

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญเนื่องจากการใช้ในการประเมินและตรวจสอบคุณภาพข้าวด้านการหุงต้มและแปรรูปข้าวแต่ละสายพันธุ์ ตลอดจนการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากข้าวด้วย (Chikuba, Watanabe, Sugimoto, Manabe, Sakai & Taniguchi, 1985, pp. 51-60; Ohtsubo, Toyoshima & Okadome, 1998, pp. 203-206) คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวประกอบด้วยโปรตีน แอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน และความหนืดของแป้ง เป็นต้น (Bhattacharya, Sowbhagya & Indudhara Swamy, 1982, pp. 564-569) ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวมีหลายปัจจัย เช่น สภาพแวดล้อม การเพาะปลูก พันธุ์ข้าว ฤดูกาล การแปรรูป และระดับการขัดสี เป็นต้น (Juliano, 1985, p. 443-524; Wadsworth, 1994, p. 139-176)

1.1 โปรตีน

โปรตีนในข้าวเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากรองจากคาร์โบไฮเดรตและมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว แบ่งได้ 4 ชนิด คือ อัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) โปรลามิน (Prolamin) และกลูเตลิน (Glutelin) ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำ น้ำเกลือ แอลกอฮอล์ และต่างตามลำดับ (ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร, 2547, หน้า 13 อ้างใน Juliano, 1985, p. 443-524) โปรตีนในข้าวจะพบมากในส่วนของเนื้อเยื่อแอลลูโรน และคัพภะ Wadsworth (1994) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องและข้าวขัดขาว พบว่าข้าวกล้องจะมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 8.3 - 9.6% ในขณะที่ข้าวขัดขาวมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 7.3 - 8.3% เนื่องจากโปรตีนที่มีอยู่มากในเนื้อเยื่อแอลลูโรนและคัพภะจะถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสีข้าว

โมเลกุลของโปรตีนที่รวมตัวกันเป็นรูปร่างโปรตีน (Protein bodies) ซึ่งมีกลูเตลินเป็นองค์ประกอบหลักนั้นจะมี 3 รูปแบบ คือ แบบผลึก (Crystalline) แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก รูปร่างกลมขนาดใหญ่ ซึ่งโปรตีนที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเมล็ดจะเป็นโปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็ก ส่วนโปรตีนรูปร่างกลมขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าและจะมีมากในส่วนใจกลางเมล็ดเท่านั้น โดยในองค์ประกอบของโปรตีนจะเป็นโปรลามินร่วมกับกลูเตลิน สำหรับโปรตีนร่างแห (Protein matrix) จะพบน้อยมากหรือไม่พบเลยในเนื้อเมล็ดข้าวซึ่งต่างจากธัญพืชอื่น ถ้าพบก็จะมีลักษณะ

เชื่อมโยงเป็นเส้นใยโปรตีน (Protein fibrils) ระหว่างโปรตีนที่มีรูปร่าง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 165)

1.2 แอมิโลส

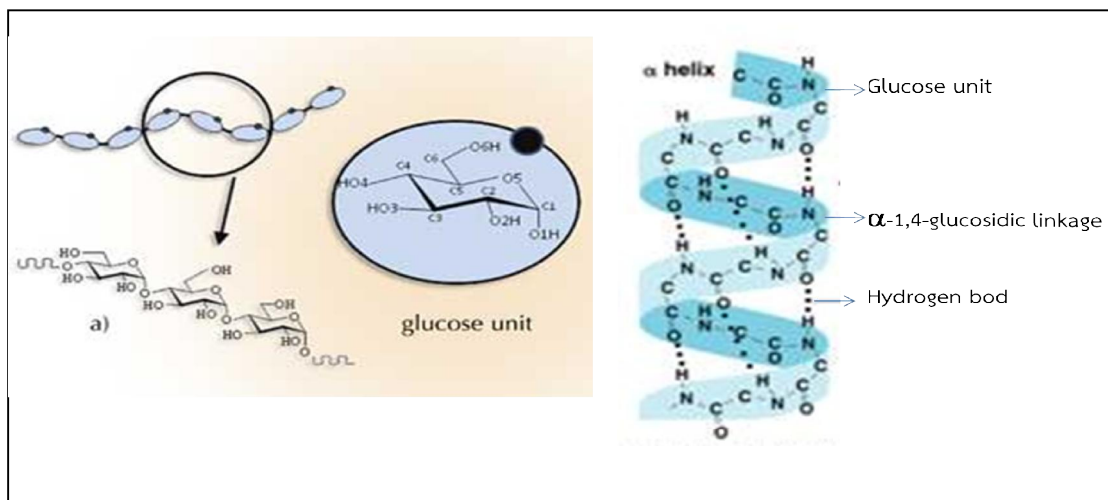
แอมิโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear chain) พบมากในสตาร์ช (Starch) ของเมล็ดข้าว มีเฉพาะในเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เท่านั้น ในข้าวขัดขาว (Non-waxy milled rice) พบปริมาณแอมิโลส 8 - 37% ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ซึ่งปริมาณแอมิโลสจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว (Juliano, Albano & Cagampang, 1964, pp. 234-241; Juliano, Cagampang, Cruz & Santiago, 1964, pp. 275-286) โมเลกุลของแอมิโลสประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4-กลูโคซิดิก (α -1,4-glucosidic linkage) และมีโซ่กิ่ง (Branched chain) เชื่อมต่อด้วยพันธะแอลฟา 1,6-กลูโคซิดิก (α -1,6-glucosidic linkage) ประมาณ 3 - 4 กิ่ง โดยมีระดับชั้นของพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 1,000 - 1,100 ความยาวของสายเฉลี่ย 250 - 320 จำนวนสายเฉลี่ย 3.4 - 4.0 และมีโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้าน 31 - 49% (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 158 อ้างใน Champagne, 1996, pp. 833-838) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลส

กลุ่มข้าว	เบตา-แอมิโลสิส ลิ้มิต (%)	ระดับชั้นพอลิเมอร์ ไรเซชันเฉลี่ย	ความยาวสาย เฉลี่ย	จำนวนสาย เฉลี่ย	โมเลกุลโซ่ (%)
อินดิกา	73	1,000	250	4.0	49
จาปอนิกา	81	1,100	320	3.4	31

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547, หน้า 158) อ้างใน Champagne (1996, pp. 833-838)

โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลสมีทั้งแบบสายตรงและสายพันเป็นเกลียว (Helix) ดังภาพที่ 2.1 เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนจะให้สารละลายสีน้ำเงิน เมื่อทำให้สุกในน้ำเดือดและทำให้เย็นจะเกิดการคืนตัวเป็นของแข็งหรือรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) ส่งผลให้ข้าวสุกแข็งรวน (Scienceinschool, 2002, ออนไลน์; งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 12)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลส
ที่มา: Scienceinschool (2002, ออนไลน์)

สตาร์ชในเมล็ดข้าวนอกจากจะมีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบแล้วยังมีแอมิโลเพกทิน (Amylopectin) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกด้วย แอมิโลเพกทินประกอบด้วยกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนงมาก ประมาณ **96%** ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา **1,4-กลูโคซิดิก** และอีก **4%** ต่อด้วยพันธะแอลฟา **1,6-กลูโคซิดิก** มีระดับชั้นการพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย **4,700 - 18,500** ความยาวของสายเฉลี่ย **18 - 21** มีจำนวนสายเฉลี่ย **220 - 1,000** โดยความยาวของสายภายนอกเฉลี่ย **12 - 14** และความยาวของสายภายในเฉลี่ย **5 - 6** (อรอนงค์ นัยวิกุล, หน้า 159 อ้างใน Champagne, 1996, pp. 833-838) แสดงดังตารางที่ 2.2

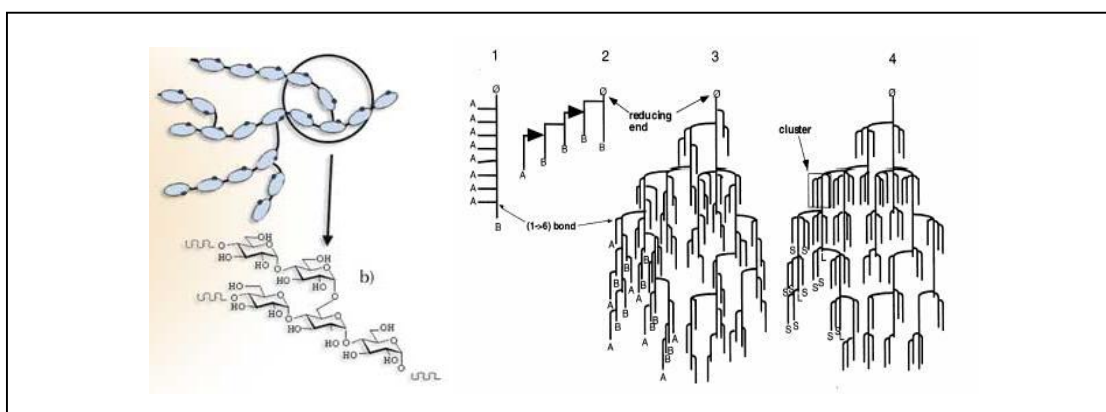
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน

กลุ่มข้าว	เบตา-แอมิโลสิส ลิ้มิต (%)	ระดับชั้นพอลิเมอร์ ไรเซชันเฉลี่ย	ความยาวสาย เฉลี่ย	จำนวนสาย เฉลี่ย	โมเลกุลโซ่ (%)
อินดิกา	4,700	21	220	14	6
จาปอนิกา	12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว	18,500	18	1,000	12	5

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547, หน้า 158) อ้างใน Champagne (1996, pp. 833-838)

โครงร่างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านในลักษณะโซ่กิ่งเกลียวคู่ แสดงดังภาพที่ 2.2 จากสายที่ต่อกันด้วยน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น ซึ่งมีคาร์บอนตัวที่หนึ่งเป็นหมู่รีดิวซิง

ดังนั้นโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสายแกนหนึ่งสายเท่านั้น (C-chain) สำหรับสายที่มาต่อกับสายแกนนี้จะเป็นสายกิ่งเชื่อม (B-chain) ต่อกับสายอื่น ๆ และสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียว (A-chain) รวมอยู่ในโมเลกุลแอมิโลเพกทิน จำนวน $10^4 - 10^5$ สาย โดยมีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งกับสายเชิงเส้นประมาณ 1.0 ทั้งสายโซ่กิ่ง และสายเชิงเส้นประมาณ 22 - 25 สายรวมกันเป็นกลุ่ม (Cluster, cl) แต่ละกลุ่มซึ่งอยู่ในบริเวณผลึก (Crystalline region) ของเม็ดสตาร์ช สำหรับข้าวเหนียวซึ่งมีแอมิโลเพกทินเกือบ 100% ดังนั้นกลุ่มสายโซ่กิ่งจะรวมเป็นกลุ่มเดี่ยว 80 - 90% และกลุ่มที่เกาะเกี่ยวกันระหว่างกลุ่มอีกประมาณ 10 - 20% (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 159)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Scienceinschool (2002, ออนไลน์)

นอกจากนี้ การจำแนกข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ ยังใช้ปริมาณแอมิโลสเป็นเกณฑ์ ในการจำแนกอีกด้วย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกข้าวตามปริมาณแอมิโลส

ชนิดข้าว	ปริมาณแอมิโลส (% น้ำหนักแห้ง)	
	Juliano (1993)	งามชื่น (2539)
ข้าวเหนียว	0.0 - 5.0	0.0 - 3.0
ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำมาก	5.1 - 12.0	4.0 - 11.0
ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ	12.1 - 20.0	12.0 - 19.0
ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง	20.1 - 25.0	20.0 - 25.0
ข้าวเจ้าแอมิโลสสูง	> 25.0	26.0 - 34.0

ที่มา: Juliano (1993, p. 23); งามชื่น คงเสรี (2539, หน้า 241-259)

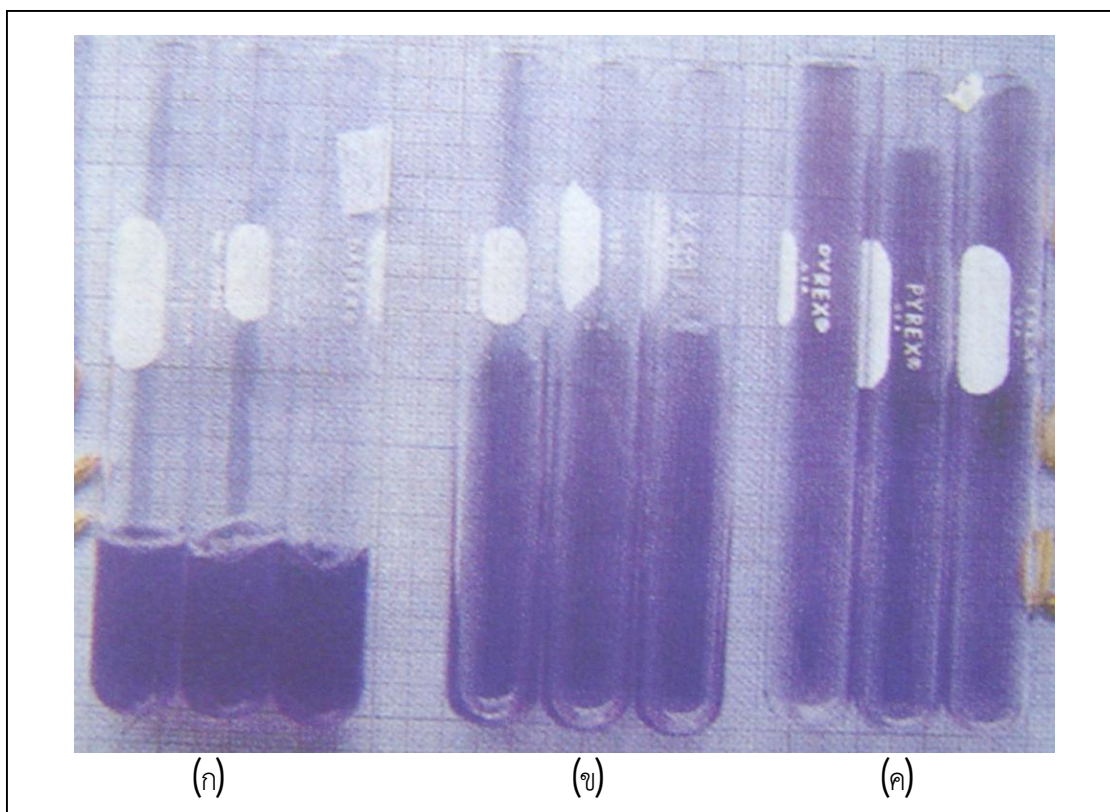
1.3 ความคงตัวของเจล

ความคงตัวของเจลเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพสำคัญในการประเมินคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เนื่องจากผู้ทดสอบชิมไม่สามารถจำแนกความแตกต่างลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่มีปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกัน แต่ค่าความคงตัวของเจลสามารถจำแนกความแตกต่างลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากเจลแป้ง (**Gelatinized starch**) ของข้าวแต่ละพันธุ์มีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้เจลแป้งมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน (**Blakeney, 1979, pp. 343-353**) **Cagampang, Perez & Juliano (1973)** พัฒนาวิธีการทดสอบความค่าคงตัวของเจลในปี ค.ศ. 1972 เพื่อหาความแตกต่างของข้าวที่มีแอมิโลสสูงใกล้เคียงกัน แต่มีผลของความหนืดที่วัดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ (**Brabender viscoamylograph**) แตกต่างกัน โดยอาศัยหลักการทำให้แป้งเกิดเจลในเซชันโดยต้มในสารละลายต่างแล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และวัดระยะทางที่เจลไหลในหลอดทดลองเมื่อวางบนพื้นราบเป็นมิลลิเมตร เปรียบเทียบค่ากับลักษณะเจลมาตรฐาน 3 แบบ คือ เจลนุ่ม (61 - 100 มิลลิเมตร) เจลนุ่มปานกลาง (41 - 60 มิลลิเมตร) และเจลแข็ง (26 - 40 มิลลิเมตร) ส่งผลให้สามารถแบ่งประเภทของข้าวได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.4 และภาพที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทข้าวเจ้าตามความคงตัวของเจล

ประเภทแป้งสุก	ระยะทางที่แป้งสุกไหล (มิลลิเมตร)
เจลแข็ง	26 - 40
เจลนุ่มปานกลาง	41 - 60
เจลนุ่ม	61 - 100

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



ภาพที่ 2.3 ลักษณะความคงตัวของเจลจากแป้งข้าว (ก) เจลแข็ง (ข) เจลนุ่มปานกลาง และ (ค) เจลแข็ง

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

อรอนงค์ นัยวิกุล (2547) อ้างใน Varavinit, Shobsngob, Chinachoti & Naivikul (2002) ตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลที่เตรียมจากแป้งข้าวความเข้มข้น 6% ของแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (28%) ปานกลาง (18%) และต่ำ (5%) ที่อุณหภูมิ -18°C นาน 22 ชั่วโมง จากนั้นนำเจลทั้ง 3 ลักษณะมาคืนรูปจากเยือกแข็งในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 60 และ 90°C โดยวัดความคงตัวของเจลจากปริมาณน้ำที่แยกตัวออกมาจากเจล (Syneresis value) พบว่าเจลจากแป้งข้าวที่มีแอมิโลสสูงจะเกิดการแยกน้ำจากเจลสูงสุด โดยเฉพาะในครั้งแรกของการแช่เยือกแข็ง รองลงมาคือเจลจากแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง และเจลจากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำจะเกิดการแยกน้ำออกจากเจลด้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าที่อุณหภูมิ 90°C ทำให้ลักษณะการแยกน้ำจากเจลเกิดได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 30°C ตามลำดับ สรุปได้ว่าเจลจากแป้งข้าวที่มีแอมิโลสต่ำมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ดีกว่าเจลจากแป้งข้าวที่มีแอมิโลสปานกลาง และสูง ตามลำดับ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าความคงตัวของเจลแป้งข้าว ได้แก่ พันธุ์ข้าว ระยะเวลาการเก็บรักษา ขนาดอนุภาคของแป้ง ระดับการขัดสี และปริมาณโปรตีน เป็นต้น **Cagampang, Perez & Juliano (1973)** พบว่าการเก็บข้าวสารนาน 6 เดือน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความคงตัวของเจลน้อย แต่ **Kongseree, Khowchaimaha & Natesomranh (1985)** พบว่าการเก็บรักษาข้าวพันธุ์ขาวตาแห้งเพียง 1 เดือน จะทำให้เจลแป้งมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ค่าความคงตัวของเจลลดลง ขนาดอนุภาคของแป้งมีอิทธิพลต่อการเกิดเจลลาคติในเซชันของแป้งในสารละลายต่าง และส่งผลต่อค่าความคงตัวของเจลเช่นกัน **Perez (1979)** พบว่าแป้งข้าวขนาดอนุภาค 100 เมช จะให้ค่าความคงตัวของเจลถูกต้องมากกว่าแป้งข้าวขนาดอนุภาค 50 - 60 เมช เนื่องจากแป้งข้าวอนุภาคขนาดใหญ่จะมีการกระจายตัวและเกิดเจลลาคติในเซชันในสารละลายต่างไม่สมบูรณ์ ทำให้แป้งจับตัวกันเป็นก้อนและความเข้มข้นของเจลแป้งลดลง ส่งผลให้ค่าความคงตัวของเจลสูงกว่าแป้งที่มีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งสามารถเกิดการเจลลาคติในเซชันได้อย่างสมบูรณ์

Perez & Juliano (1979) ศึกษาผลของระดับการขัดสีที่มีต่อค่าความคงตัวของเจล เนื่องจากข้าวที่มีระดับการขัดสีต่ำจะมีไขมันในเนื้อเยื่อแอลูโรนสูง ในขณะที่ข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงจะมีปริมาณไขมันต่ำเนื่องจากถูกกำจัดไปในระหว่างการสีข้าว โดยพบว่าไขมันมีผลต่อค่าความคงตัวของเจลเนื่องจากสามารถรวมตัวกับแอมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส - กรดไขมัน (**Amylose - fatty acid complex**) และส่งผลให้ค่าความคงตัวของเจลแป้งมีค่าลดลง เจลแป้งมีความนุ่มเพิ่มขึ้น สำหรับโปรตีนมีผลต่อค่าความคงตัวของเจลน้อย ซึ่งสอดคล้องกับ **Cagampang, Perez & Juliano (1973)** พบว่าโปรตีนไม่มีผลต่อค่าความคงตัวของเจลของข้าวพันธุ์เดียวกันที่มีปริมาณโปรตีนแตกต่างกันไม่เกิน 5%

1.4 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างมีความสำคัญต่อคุณภาพด้านการหุงต้มและแปรรูปข้าว เนื่องจากสามารถใช้ประเมินอุณหภูมิการเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์ชข้าวทางอ้อม (**Delwiche, McKenzie & Webb, 1996, pp. 257-263**) **Little, Hilder & Dawson (1958)** พัฒนาวิธีการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดเจลลาคติในเซชันด้วยการทดสอบการแตกตัวของเมล็ดข้าว 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 เมล็ดพองตัวมีแป้งกระจาย จนกระทั่งถึงระดับคะแนน 7 หมายถึง เมล็ดข้าวสลายตัวทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส

Juliano, Bautista, Lugay & Reyes (1964) พบว่าค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าว อย่างมีนัยสำคัญ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำเมล็ดข้าวจะสลายตัวทั้งเมล็ด ในขณะที่ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันสูงเมล็ดข้าวจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือพองตัวเป็นบางส่วน โดยแบ่งข้าวตามระดับการสลายของเมล็ดข้าวในต่างได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง	อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน (°C)	ประเภทข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน
6 - 7	ต่ำกว่า 65	ต่ำ
4 - 5	70 - 74	ปานกลาง
1 - 3	75 - 79	สูง

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

Nishi, Nakamura, Tanaka & Satoh (2001) รายงานว่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน (Fine structure amylopectin) โดย Umemoto, Yano, Satoh & Shomura (2002) รายงานว่าความยาวของสายแอมิโลเพกทินมีผลต่อการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง สตาร์ชข้าวที่มีองค์ประกอบของแอมิโลเพกทินสายสั้นสูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 7 - 10) จะแตกตัวได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินสายยาวอยู่ในปริมาณที่สูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 12 - 21) นอกจากนี้ Prathepha, Daipolmak, Samappito & Baimai (2005) ยังพบว่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวเหนียว (Glutinous rice) แตกต่างจากข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอย่างข้าวเหนียว 50 ตัวอย่างสลายตัวในสารละลายต่างทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส ในขณะที่ข้าวที่ปริมาณแอมิโลสปานกลางและสูงจะมีระดับการสลายของเมล็ดข้าวในต่างต่ำ งามขึ้น คงเสรี (2545) รายงานว่าข้าวเหนียวจะมีค่าระดับการสลายเมล็ดข้าวในต่างเฉลี่ย 6 - 7 ในขณะที่ระดับการสลายเมล็ดข้าวในต่างของข้าวเจ้าจะอยู่ในช่วง 1 - 3

Nakamura, Sakurai, Inaba, Kimura, Iwasawa & Nagamine (2002) พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง ซึ่งสอดคล้องกับ Harushima, Yano, Shomura, Sato, Shimano, Kuboki, Yamamoto, Lin, Antonio, Parco, Kajiya, Huang, Yamamoto, Nagamura, Kurata, Khush & Sasaki (1998) พบว่าในสตาร์ชข้าวจะมี Amylopectin - synthesizing enzyme ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์ขึ้นแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติ

ทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตลอดจนโครงสร้างของแอมิโลเพกทินในเมล็ดข้าวแตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งความยาวของสายแอมิโลเพกทินนั้นมีผลต่อการแตกตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอย่างมีนัยสำคัญ

1.5 อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน

การรับประทานข้าวส่วนใหญ่จะเป็นการรับประทานในลักษณะข้าวหุงสุกทั้งเมล็ด และในเมล็ดข้าวมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักถึง **85%** ดังนั้นการหุงข้าวให้สุกจะมีผลทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตในเซชันและส่งผลกระทบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก แต่ถ้าสตาร์ชยังไม่เกิดเจลลิตในเซชันจะทำให้เนื้อสัมผัสข้าวสุกแข็งไม่เหมาะต่อการบริโภค และเวลาที่ใช้ทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตในเซชันยังบอกถึงเวลาในการทำให้ข้าวสุกอีกด้วย (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 181)

อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของข้าว เนื่องจากมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับลักษณะการหุงต้มข้าวและเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ในระหว่างการหุงต้มข้าวสตาร์ชจะดูดซับน้ำและพองตัวเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอุณหภูมิวิกฤต (**Critical temperature range**) เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ (**Irreversible process**) ความหนืดเพิ่มขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลลิตในเซชัน (**Gelatinization**) เม็ดแป้งจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียไบรีฟรินเจนซ์ (**Birefringence**) แป้งที่ละลายได้เริ่มละลายออกมา การเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น โดยข้าวเจ้าจะมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ **68 - 78°C** (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 51-52)

1.6 ความหนืดของแป้ง

ความหนืดของแป้งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (**Sensory evaluation**) และการแปรรูปอาหารที่มีข้าวเป็นองค์ประกอบ อาทิเช่น ค่าความคงตัวของแป้งสุก (**Setback viscosity**) ถูกนำมาใช้ในการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เป็นต้น (Meadows & Barton II, 2002, pp. 563-566) ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืด คือ ชนิดของแป้ง ขนาดของเม็ดแป้ง ปริมาณแอมิโลส เป็นต้น กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550) กล่าวว่าแป้งแต่ละชนิดจะให้ลักษณะ (**Profile**) ความหนืดแตกต่างกันเมื่อวัดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (**Rapid Visco Analyzer, RVA**) และแบ่งรูปแบบความหนืดของแป้งสุกที่วัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ตามกำลังการพองตัวของแป้ง แบ่งเป็น **4** แบบ คือ

แบบ **a** : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูง เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวฟ่าง แป้งจากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งเม็ดแป้งจะมีกำลังการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดแป้งกระจายตัวออกเมื่อได้รับแรงเค้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงสูงขึ้น แล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

แบบ **b** : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง ได้แก่ แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ เม็ดแป้งไม่พองตัวมากถึงขั้นกระจายตัวออก จึงได้ลักษณะกราฟความหนืดที่สูงขึ้นน้อยกว่า และเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า

แบบ **C** : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย ได้แก่ แป้งจากถั่วและแป้งครอสลิงหรือพันธะข้าม (**Cross-linked** หรือ **Cross-bonded**) วิธีครอสลิงทำให้การพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง ทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด มีค่าความหนืดสูงซึ่งอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างต้มสุก

แบบ **d** : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก เช่น แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ได้แก่ แป้งข้าวโพดซึ่งมีแอมิโลสสูงถึง **50 - 80%**

ขนาดของเม็ดแป้ง และปริมาณแอมิโลสก็มีส่วนสำคัญต่อความหนืดของแป้ง กล่าวคือ ขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่ย่อมมีกำลังการพองตัวสูงและให้ความหนืดสูงสุด (**Peak viscosity**) ในขณะที่ปริมาณแอมิโลสมีผลต่อการเกิดริโพรกราเดชัน ถ้าแป้งชนิดใดมีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าความหนืดสุดท้าย (**Final viscosity**) สูงด้วยเช่นกัน สำหรับปัจจัยทางภายนอกคือ ถ้ามีการใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกลมาก จะทำให้เม็ดแป้งแตกและค่าความหนืดลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 48)

2. ความสำคัญของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพต่อคุณภาพข้าว

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการหุงต้ม การรับประทาน และการแปรรูปของข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, หน้า 180) ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่มีผลต่อคุณภาพข้าว

2.1 ปริมาณโปรตีน

ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวเป็นองค์ประกอบสำคัญรองจากสตาร์ช โปรตีนจะมีผลต่อคุณภาพการหุงต้มและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก งามขึ้น คงเสี (2545) รายงานว่าโปรตีนที่อยู่ส่วนนอกของเมล็ดจะมีผลทำให้ระยะเวลาการหุงต้มเมล็ดข้าวสุกนานขึ้น เนื่องจากโปรตีนจะ

เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมของน้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าว อรอนงค์ นัยวิกุล (2547) พบว่าการที่ในเมล็ดสตาร์ชมีโปรตีนที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ชและโปรตีนที่เชื่อมโยงกับเม็ดสตาร์ช อาจมีผลต่อการเกิดเจลาตินไนซ์ของเม็ดสตาร์ชโดยทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชไม่เสียรูปร่างได้ง่าย และทำให้โมเลกุลของแอมิโลสไม่ซึมผ่านออกไป ซึ่งมีผลต่อลักษณะความอ่อน หรือแข็งของเจลเมื่ออุณหภูมิของลดลง และส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ได้แก่ ความนุ่ม เหนียว หรือแข็งร่วน

Chrastil (1990) พบว่าความเหนียวของข้าวสุกมีความสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว โดยความเหนียวของข้าวสุกมีผลมาจากการจับกันระหว่างออริซานิน (**Oryzanin**) กับโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน นอกจากนี้ยังพบว่าในโครงสร้างของโปรตีนส่วนที่มีพันธะซัลไฟด์คู่ คือ ซีสทีน (**Cysteine**) ที่เกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ชจะขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้สตาร์ชมีความเหนียวต่ำ และความเหนียวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ **Ramesh, Bhattacharya & Mitchell (2000)** พบว่าโปรตีนออริซานินซึ่งมีมากกว่าโปรตีนชนิดอื่นจะทำปฏิกิริยาเคมีร่วมกับเม็ดสตาร์ชในระหว่างการหุงต้ม ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของสตาร์ชลดลง ส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกร่วนขึ้น

2.2 ปริมาณแอมิโลส

ปริมาณแอมิโลสเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญของเมล็ดข้าว เนื่องจากมีความสัมพันธ์อย่างสูงในทางบวกกับความแข็งของข้าวสุก ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มข้าว การเกิดรีโทรกราเดชัน และการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (**Elongation ratio**) แต่มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับความเหนียวของข้าวสุก (**Juliano, 1985, p. 443-524**) เมล็ดข้าวถึงแม้ว่าจะมีขนาดและรูปร่างเมล็ดใกล้เคียงกันแต่เมื่อหุงเป็นข้าวสุกแล้วจะได้ข้าวที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณแอมิโลสในเมล็ดข้าว ข้าวแอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อยในการหุงต้มถ้าใช้น้ำมากเกินไปจะทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวสุกนุ่ม และในทางตรงกันข้ามข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงต้องการน้ำในการหุงต้มข้าวมาก ข้าวสุกจะมีลักษณะร่วนแข็ง ไม่เหนียวติดกัน จึงส่งผลให้ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงขยายปริมาตรได้สูงกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (**Ramesh, Bhattacharya & Mitchell, 2000, pp. 449-460; งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 12**)

Singh, Kaur, Sodhi & Sekhon (2005) พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ได้แก่ ความแข็ง ความเกาะติดกัน (**Cohesiveness**) และการเคี้ยว (**Chewiness**) มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส **Juliano, Villareal, Perez, Villareal, Takeda & Hizukuri (1987)** รายงานว่าข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงและสตาร์ชประกอบด้วยแอมิโลเพกตินสายยาวเป็นจำนวนมากมีค่า

ความแข็งของข้าวสุกสูงกว่าข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำและมีแอมิโลเพกทินสายสั้น ซึ่ง Ong & Blanshard (1995) พบว่าข้าวพันธุ์ที่มีแอมิโลเพกทินสายสั้นสูงจะทำให้การเกิดรีโทรกราเดชัน ลดลง ค่าความแข็งของข้าวสุกจึงต่ำกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสายยาวสูง งามชื่น คงเสวี (2545) แบ่งคุณภาพข้าวไทยตามลักษณะการหุงต้ม และการรับประทานได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ข้าวสุกนุ่มและเหนียว ข้าวสุกร่วน และข้าวสุกแข็ง แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพข้าวสุก

พันธุ์ข้าว	ปริมาณแอมิโลส (%)	อุณหภูมิแป้งสุก	ความคงตัวของแป้งสุก	ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก
ขาวดอกมะลิ 105	13 - 18	ต่ำ	อ่อน	นุ่มและเหนียว
กข 15	14 - 17	ต่ำ	อ่อน	นุ่มและเหนียว
ปทุมธานี 1	14 - 18	ต่ำ	อ่อน	นุ่มและเหนียว
ขาวตาแห้ง 17	24 - 28	ต่ำ - ปานกลาง	อ่อน	อ่อน
กข 23	22 - 26	ปานกลาง	อ่อน	อ่อน
ชัยนาท 1	27 - 30	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง	ร่วนแข็ง
สุพรรณบุรี 90	27 - 30	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง	ร่วนแข็ง

ที่มา: งามชื่น คงเสวี (2545, หน้า 14)

นอกจากนี้อาร์รตัน อิมคิลปี (2544) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวสุก โดยข้าวพันธุ์ขาวตาแห้งซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุดเมื่อวัดด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) รองลงมาคือข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และต่ำ ตามลำดับ

2.3 ความคงตัวของเจล

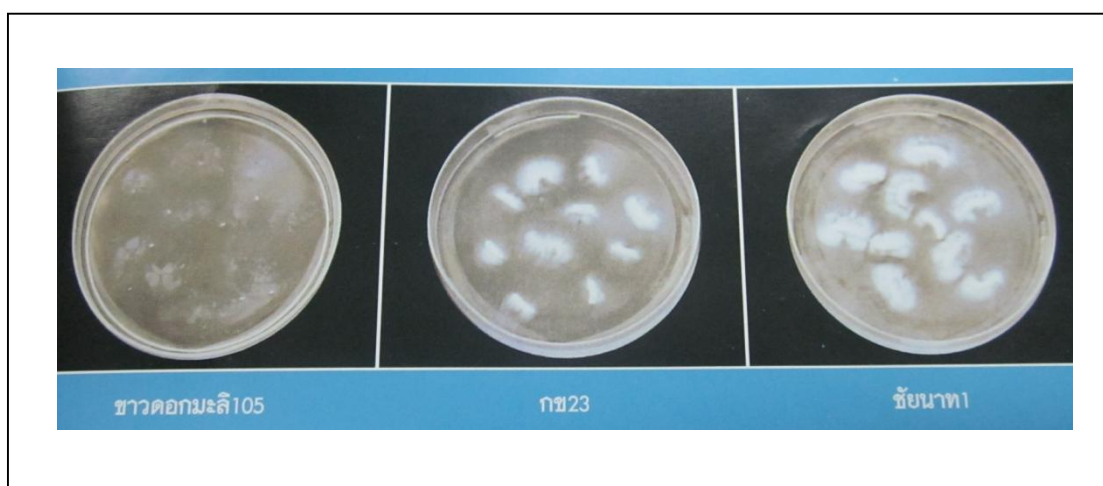
ถึงแม้ว่าปริมาณแอมิโลสจะเป็นคุณสมบัติหลักทางเคมีกายภาพที่สำคัญยิ่งต่อคุณภาพการหุงต้ม การรับประทาน และการแปรรูปข้าว อีกทั้งยังสามารถจำแนกข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยอาศัยปริมาณแอมิโลสเป็นเกณฑ์ซึ่งจะให้คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.3 และ 2.6) แต่ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 24 - 28% ไม่สามารถจำแนกคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้โดยใช้ปริมาณแอมิโลสในเมล็ดข้าวเพียงอย่างเดียว เนื่องจากข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีคุณภาพการรับประทาน

แตกต่างกัน ดังนั้น ค่าความคงตัวของเจลจึงเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่มีความสำคัญในการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594)

Sowbhagya, Ramesh & Bhattacharya (1987) พบว่าค่าความคงตัวของเจลมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้านความแข็งกับค่าความคงตัวของแป้งสุก (Setback viscosity) เมื่อวัดด้วยบราเบนเดอริสโคแอมิโลกราฟ แต่มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความเหนียวของข้าวสุก Khush, Paule & Dela Cruz (1979) พบว่าข้าวพันธุ์ที่มีค่าความคงตัวของเจลปานกลาง ปริมาณแอมิโลสปานกลาง และอุณหภูมิการเกิดเจลดีในเซชันปานกลาง เป็นคุณลักษณะของข้าวที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุด นอกจากนี้ Halick & Kelly (1959) พบว่าค่าความคงตัวของเจลจะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีคุณสมบัติการรับประทานที่จำเพาะเจาะจงอีกด้วย

2.4 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างมีความสำคัญต่อคุณภาพด้านการหุงต้มและแปรรูปข้าว เนื่องจากสามารถใช้ประเมินอุณหภูมิการเกิดเจลดีในเซชันของสตาร์ชข้าวทางอ้อม (Delwiche, McKenzie & Webb, 1996, pp. 257-263; Little, Hilder & Dawson, 1958, pp. 111-126) นอกจากนี้งามขึ้น คงเสรี (2545) ยังได้ประยุกต์ใช้ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่างมาทดสอบหาปริมาณข้าวเจ้าอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทยปนได้อีกด้วย แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การตรวจสอบข้าวชนิดอื่นปนโดยวิธีการสลายเมล็ดข้าวในต่าง
ที่มา : งามขึ้น คงเสรี (2545, หน้า 105)

2.5 อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชัน

อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพสำคัญในการใช้เป็นดัชนีปรับปรุงคุณภาพข้าว เพราะอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกและมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงต้ม เนื่องจากในเมล็ดข้าวมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ในการหุงข้าวให้สุกจะมีผลทำให้สตาร์ชเกิดเจลลาติโนเซชันและส่งผลกระทบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Cuevas, Daygon, Corpuz, Nora, Reinke, Waters & Fitzgerald, 2010, pp. 1-3; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 181) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทข้าวตามอุณหภูมิแบ่งสุกที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างและระยะเวลาหุงต้มข้าวสุกได้ 3 ประเภท คือ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันต่ำกว่า 65°C , $70 - 74^{\circ}\text{C}$ และมากกว่า 75°C (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 13) แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันและการประเมินด้วยค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างที่สัมพันธ์กับระยะเวลาหุงต้มข้าวสุก

อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชัน ($^{\circ}\text{C}$)	ระดับ	ค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่าง	ระยะเวลาหุงต้ม (นาท)
ต่ำกว่า 65	ต่ำ	6 - 7	12 - 17
70 - 74	ปานกลาง	4 - 5	17 - 24
มากกว่า 75	สูง	1 - 3	> 24

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2545, หน้า 13)

2.6 ความหนืดของแป้ง

ความหนืดของแป้งจะถูกนำมาใช้ในการประเมินคุณลักษณะการหุงต้มและการแปรรูปข้าวและผลิตภัณฑ์จากธัญพืช (Meadows & Barton II, 2002, pp. 563-566) ลักษณะภาพแอมิโลกราฟความหนืดของข้าวประกอบด้วย 3 คุณลักษณะที่สำคัญได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดที่คงทนต่อการการกรวน (Holding strength/hot paste viscosity) และความหนืดสุดท้าย (Final/cool paste viscosity) ความหนืดสูงสุด คือ ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวสุกที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งเป็นช่วงที่เมล็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติการพองตัวและการละลายสูงที่สุด ความหนืดที่คงทนต่อการการกรวน คือ ค่าความหนืดต่ำสุดของแป้งข้าวที่อุณหภูมิ 95°C หลังจากการเกิดความหนืดสูงสุด และความหนืดสุดท้าย คือ ความหนืดของแป้งข้าวที่อุณหภูมิ 50°C มักจะเกิดในช่วงที่ลดอุณหภูมิให้เย็น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสูงสุด ความหนืดที่คงทนต่อการการกรวน และความ

หนืดสุดท้ายสามารถนำมาใช้ตรวจสอบคุณลักษณะการหุงต้มของข้าวได้ (Gravois & Webb, 1997, pp. 25-29)

การแตกตัวของแป้งสุก (Breakdown viscosity) หมายถึง ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับความหนืดที่คงทนต่อการกรวน ข้าวพันธุ์ที่มีการแตกตัวของแป้งสุกสูงจะมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตข้าวบรรจุกระป๋อง (Bollich, Webb, Marchetti & Scott, 1980) สำหรับค่าความคงตัวของแป้งสุกจะเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด ค่าความคงตัวของแป้งสุกจะแสดงถึงการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าว ซึ่งสามารถจำแนกความแตกต่างของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันได้ (Gravois & Webb, 1997, pp. 25-29) การเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชในข้าวสุกมักจะเกิดในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้ข้าวสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยการเกิดรีโทรกราเดชันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา ข้าวสุกจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน ดังนั้นความหนืดของแป้งจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพข้าว โดยเฉพาะคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (อารีรัตน์ อิมศิริ, 2544, หน้า 1)

3. วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวส่วนใหญ่ตรวจสอบด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

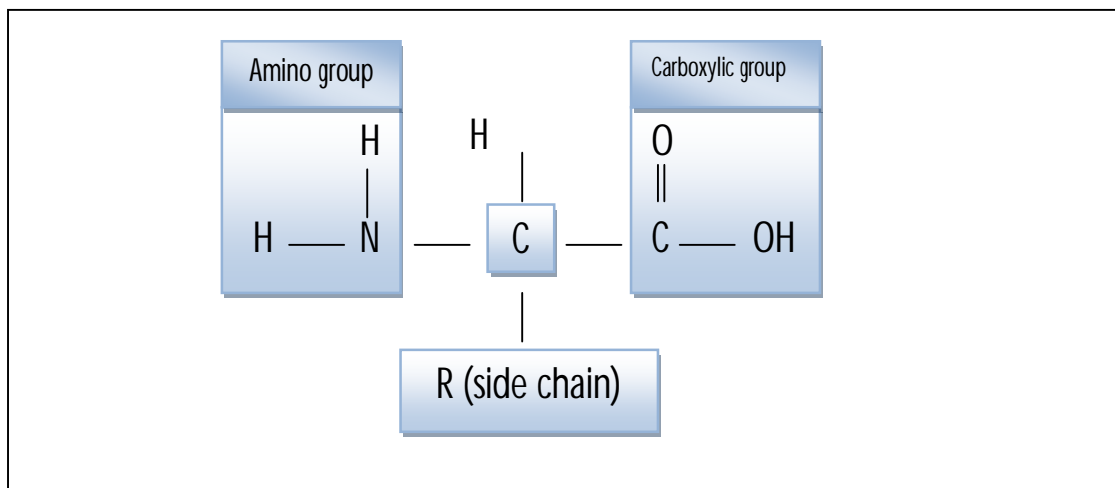
การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น วิธีคเจลดดาห์ล (Kjeldahl method) และวิธีดูมาส (Dumas combustion method) โดยทั้งสองวิธีนี้ได้รับการรับรองโดย The Association of Analytical Communities (AOAC) และ American Association of Cereal Chemists (AACC) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ได้กับอาหารหลายชนิด

3.1.1 วิธีคเจลดดาห์ล

วิธีคเจลดดาห์ลเป็นการวิเคราะห์โปรตีนในอาหารโดยการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยการย่อยสลายโปรตีน ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน (Amino acid) ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบในกลุ่มอะมิโน (Amino group) แสดงดังภาพที่ 2.5

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 และขั้นตอนที่ 4 การคำนวณ นำปริมาณสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรตไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนแล้วคูณกับคเจลดาล์แฟคเตอร์ (Kjeldahl factor) ซึ่งค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนในโปรตีนอยู่ที่ 16% ได้เป็นค่าโปรตีนหายาบ (การวิเคราะห์โปรตีน, 2008, หน้า 42-45)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของกรดอะมิโน

ที่มา : การวิเคราะห์โปรตีน (2008, หน้า 42-45)

สำหรับปริมาณโปรตีนในข้าวที่คำนวณมาจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะคูณด้วยคเจลดาล์แฟคเตอร์ 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 ที่ใช้
ไตเตรตกับตัวอย่าง

B คือ มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก **0.1** นอร์มอล ที่ใช้
ไตเตรตกับแบลงค์ (Blank)

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

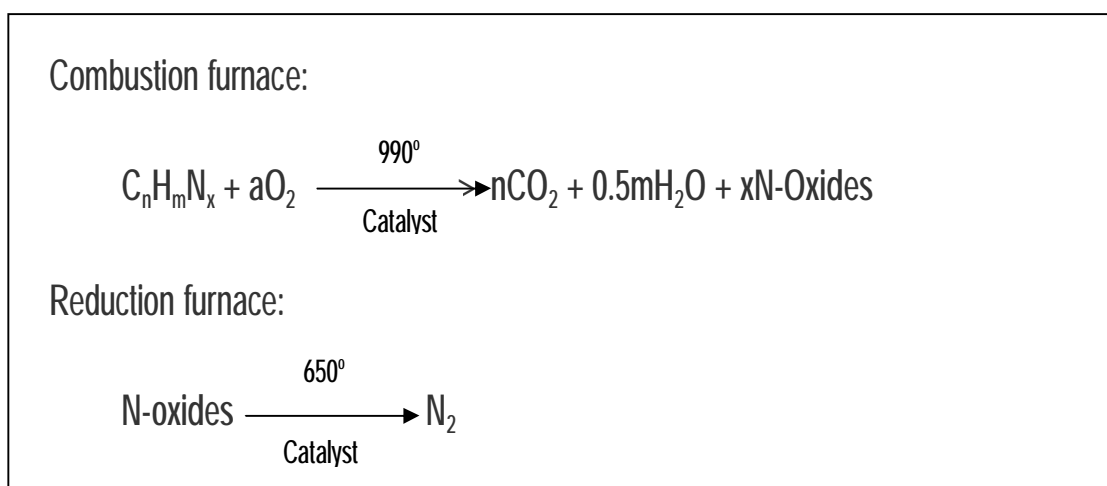
D คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าวิธีคเจลดาคัลจะเป็นวิธีที่ให้ค่าการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนานตามชนิดและองค์ประกอบของตัวอย่าง ผู้วิเคราะห์ต้องมีทักษะและความชำนาญค่อนข้างสูง ต้องใช้สารเคมีที่เป็นกรดและต่างเข้มข้นหลายชนิด รวมถึงมีการใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง พรอท ทำให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียจากห้องปฏิบัติการและปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์, 2553, หน้า 13-16)

3.1.2 วิธีดูมาส

การหาปริมาณโปรตีนโดยวิธีดูมาสเป็นวิธีวิเคราะห์โปรตีนที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและยังให้ค่าผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับวิธีคเจลดาคัล นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น ใช้ระยะเวลาและสารเคมีในการวิเคราะห์น้อยกว่า หลักการทำงานของเทคนิคนี้จะอาศัยหลักการนำสารตัวอย่างปริมาณน้อยมาเผาหรือสันดาปในระบบปิดที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า **850°C** ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า **99.99%** โดยใช้โลหะ เช่น ทองแดง หรือ แพลตินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไอสารที่ได้จากการเผาไหม้ (Combustion gases) ส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลของไนโตรเจน ไนโตรเจนออกไซด์ น้ำคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบอื่น เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ ฮาโลเจน จะถูกนำเข้าไปในระบบโดยแก๊สตัวพา (Carrier gas) เช่น แก๊สฮีเลียม แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แก๊สตัวพา

ต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีหรือมีผลต่อสารวิเคราะห์ เมื่อไนโตรเจนออกไซด์ผ่านเข้าไปใน **Reduction tube** จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนโดยโลหะทองแดง หรือ ทังสเตน ส่วนสารอื่น ๆ ก็จะถูกกำจัดด้วยตัวดูดซับที่มีความจำเพาะแตกต่างกันไปตามชนิดของสาร น้ำที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดด้วยสารดูดซับความชื้น (**Drying agent**) เช่น ไดฟอสฟอรัสเพนท็อกไซด์ (**Diphosphorus pentoxide**) และแมกนีเซียมเปอร์คลอเรต (**Magnesium perchlorate**) คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนสารประกอบซัลเฟอร์และธาตุฮาโลเจนจะถูกกำจัดด้วยตัวดูดซับ เช่น เลดโครเมต (**Lead chromate**) หรือซิลเวอร์วูล (**Silver wool**) (มโนวิช เรื่องดิซซัส และยูทธรูมิ สัมพันธ์อักษร, 2553, หน้า 13-16) ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส (**Dumas combustion**)
ที่มา: มโนวิช เรื่องดิซซัส และยูทธรูมิ สัมพันธ์อักษร (2553, หน้า 13-16)

เมื่อก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการกำจัดสารรบกวนแล้ว จะถูกพาเข้าไปที่เครื่องตรวจวัด **Thermal Conductivity Detector (TCD)** เพื่อแยกสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ สัญญาณที่ตรวจวัดได้ก็就会被ประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงผลเป็นค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซึ่งค่าไนโตรเจนทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณหาค่าปริมาณโปรตีน โดยการนำมาคูณกับแฟกเตอร์ที่เหมาะสมเช่นเดียวกับวิธีคเจลดาล์ล ซึ่งค่าแฟกเตอร์ที่จะนำมาใช้นั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนที่แตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ (มโนวิช เรื่องดิซซัส และยูทธรูมิ สัมพันธ์อักษร, 2553, หน้า 13-16) ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 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 สัมพันธรักษ์ (2553, หน้า 13-16)

Williams, Sobering & Antoniszyn (1998) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบระหว่างวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล พบว่าวิธีดูมาสจะให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่าวิธีคเจลดาห์ลถึง 1.5 - 2.0% เนื่องจากวิธีดูมาสจะให้สารประกอบที่ได้จากการเผาไหม้โปรตีน เปปไทด์ และกรดอะมิโนให้อยู่ในรูปของไนโตรเจน ในขณะที่วิธีคเจลดาห์ลจะให้สารประกอบไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารแอมโมเนียก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปไตเตรตเพื่อให้ได้ไนโตรเจนซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ การเปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบผลการหาค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล

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); มโนวิช เรื่องดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธรักษ์ (2553, หน้า 13-16)

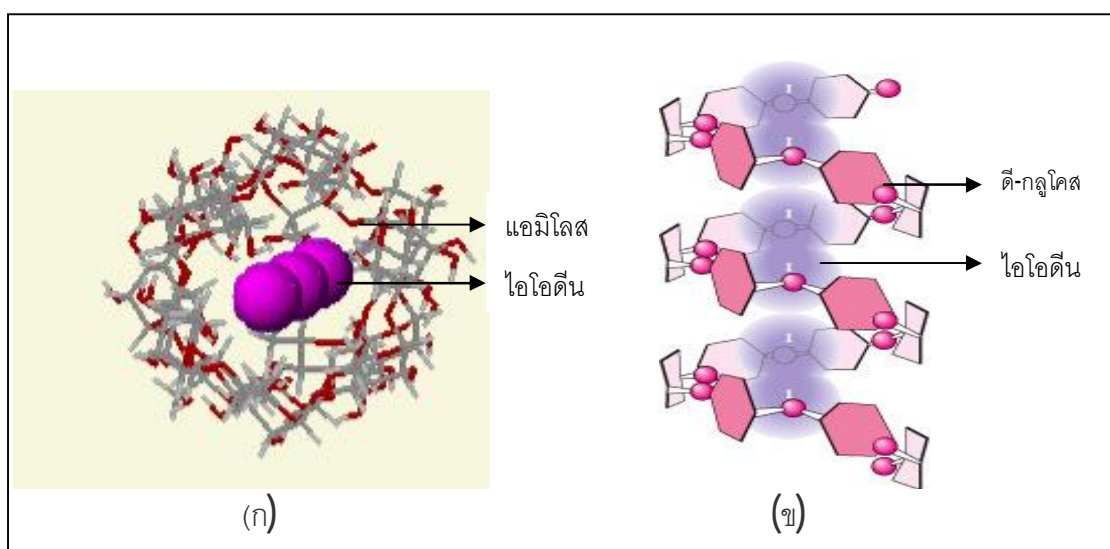
อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 วิธีนี้จะวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนได้อย่างแม่นยำก็ต่อเมื่ออาหารที่นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่โปรตีนเจือปน (การวิเคราะห์โปรตีน, 2008, หน้า 42-45)

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

สตาร์ชข้าวประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสที่สำคัญ 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งปริมาณของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกันตามชนิดของแป้ง วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสที่สำคัญ ได้แก่

3.2.1 การทำให้เกิดสี (Colorimetric method)

วิธีนี้อาศัยหลักการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลส-ไอโอดีน (Amylose-iodine complex) ทำให้ได้สารประกอบสีน้ำเงิน จากนั้นวัดค่าสีน้ำเงินด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร สารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีนเกิดจากโครงสร้างเส้นตรงของแอมิโลส ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นที่ขดเป็นเกลียวจับกับสารละลายไอโอดีนเกิดเป็นโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนและไม่เป็นของแข็งในสารละลาย (Juliano, 1971, pp. 334-340, 360; Keush, 2011; Virginia university, 2011) แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีน (ก) และการจับกับสารละลายไอโอดีนของโมเลกุลดี-กลูโคส

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

การเรียงตัวของแอมิโลสในลักษณะที่เป็นเส้นขดเกลียวทำให้เกิดขั้วคู่ (Dipole) ไปตามแกนของขดเกลียวส่งผลให้เกิดขั้วคู่ของโมเลกุลดี-กลูโคส (D-glucose) แต่ละโมเลกุลในสายโซ่ ดังนั้น เมื่อโมเลกุลของสารละลายไอโอดีนเข้าไปในขดเกลียวจึงถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดสภาพมีขั้วด้วยคู่ที่แข็งแรงของโมเลกุลแอมิโลส ทั้งขั้วคู่ของแอมิโลสและสารละลายไอโอดีนจะทำปฏิกิริยากันภายใต้แรงของสภาพขั้วคู่ ขนาดของการเหนี่ยวนำขั้วคู่จะเพิ่มตามจำนวนโมเลกุลของสารละลายไอโอดีนและการจัดเรียงในแนวขนาน รวมทั้งความเข้มข้นของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ของโมเลกุลแอมิโลสซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความยาวโมเลกุล นอกจากนี้ยังพบว่าอะตอมของไอโอดีนจะถูกจำกัดอยู่ในส่วนกลางของขดเกลียว โดยดี-กลูโคส 6 โมเลกุล จับไอโอดีนไว้ได้ 1 โมเลกุล (Keush, 2011; Virginia university, 2011)

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

3.2.2 การใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC)

การหาปริมาณแอมิโลสวิธีนี้จะคำนวณค่าปริมาณแอมิโลสจากพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายน้ำแป้งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมากเกินไปเพื่อให้แอมิโลสในแป้งทั้งหมดจับกับไขมัน พลังงานที่ใช้ในการละลายจะได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีคที่เกิดขึ้น วิธีนี้จะสะดวกและรวดเร็ว ให้ผลการทดลองที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (ก้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

3.2.3 การใช้ High Performance Size Chromatography (HPSEC)

วิธีนี้สามารถหาปริมาณแอมิโลสได้โดยอาศัยความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของตัวอย่าง โดยโมเลกุลที่มีขนาดแตกต่างกันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัสดุที่รูพรุน (Packing material) จะมีความสามารถในการแพร่ผ่านแตกต่างกัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้าที่สุด ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดกึ่งกลางไม่ใหญ่มากนักจะแพร่ผ่านได้เฉพาะบางส่วนของรู

พรุณและจะถูกกันจากรูที่เล็กมาก ๆ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุณได้ จึงถูกชะออกมาจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

3.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี Concanavalin-A (Con A)

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี Concanavalin-A ทำได้โดยอาศัยหลักการตกตะกอนของแอมิโลเพกทินด้วยสาร Concanavalin-A ตามวิธีของ Gibson, Solah & McCleary (1997) ซึ่งสาร Concanavalin นี้เป็นสารโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยสายโซ่กิ่งของ α -D-glucopyranosyl หรือ D-mannopyranosyl เป็นจำนวนมาก และที่ปลายสายประกอบด้วยน้ำตาลนอนรีดิซ (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 นำมาทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000g นาน 5 นาที เพื่อให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทินตกตะกอน นำส่วนสารละลายใสใส่หลอดทดลองและเติม Sodium acetate buffer จำนวน 3 มิลลิลิตร ปิดฝา วางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) นาน 5 นาที จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวในหลอดทดลองมาวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40°C นาน 5 นาที เติมสารผสมระหว่าง 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

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

3.3 การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจล

การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจลจะอาศัยคุณสมบัติของแป้งสุกที่มีอัตราการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรกราเดชันไม่เท่ากัน ทำให้เจลของแป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน การทดสอบความคงตัวของแป้งสุกสามารถทดสอบได้โดยนำแป้งใส่ในหลอดทดลองที่มีเอธานอลความเข้มข้น 95% เพื่อป้องกันแป้งจับตัวเป็นก้อนในระหว่างการเกิดเจลาตีในเซชัน เติมน้ำละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2 นอร์มัล และสารละลายไทมอลบลู (Thymol blue) เพื่อให้ง่ายต่อการวัดระยะเวลาไหลของเจลแป้ง จากนั้นนำเจลแป้งสุกไปทำให้เย็นในน้ำแข็ง นาน 20 นาที เพื่อให้เจลแป้งเกิดการคืนตัว และวัดระยะทางที่เจลแป้งสุกไหลหน่วยเป็นมิลลิเมตร (Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594)

3.4 การวิเคราะห์หาค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง วิเคราะห์ได้โดยอาศัยความแตกต่างของการสลายเมล็ดข้าวที่มีลักษณะของเอนโดสเปิร์มแตกต่างกันระหว่างข้าวเหนียว (Glutinous rice) และข้าวเจ้า (Non-glutinous) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง (Prathepha, Daipolmak, Samappito & Baimai, 2005, pp. 69-75) 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)

3.5 การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตีในเซชัน

การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตีในเซชัน สำหรับการตรวจสอบเพื่อบริโภคหรือเพื่อการแปรรูปข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีวิธีและเครื่องมือวัดทั้งโดยอ้อมและโดยตรง ดังนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 181 - 184)

3.5.1 การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตีในเซชันทางตรง

การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตีในเซชันทางตรง ทำได้โดยส่องดูการเปลี่ยนแปลงของเม็ตสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบฐานร้อน (Kofler hot stage microscope) และกล้องจุลทรรศน์แบบกราดลำแสง ทำการทดลองโดยการผสมแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าวกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ หยดส่วนผสมลงบนสไลด์ ปิดด้วยแผ่นกระจก นำแผ่นสไลด์ที่มีน้ำแป้งวางบนฐานที่ทำพิเศษ ซึ่งให้ความร้อนแก่ฐานนี้ได้อย่างสม่ำเสมอและควบคุมได้ สังเกตลักษณะเม็ตสตาร์ชใน

แบ่งขณะที่อุณหภูมิร้อนขึ้นจากอุณหภูมิห้อง บันทึกอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช เม็ดแรกทีฟองตัวเต็มที่เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น อาจสังเกตผ่านเลนส์จัดแสงโพลาไรซ์ (Polarized light len) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของไบริฟรินเจนซ์ในเม็ดสตาร์ช โดยเม็ดสตาร์ชเกิดเจลาตินในเซชัน สมบูรณ์จะมองไม่เห็นไบริฟรินเจนซ์ แสดงว่าเม็ดสตาร์ชฟองตัวเต็มที่ โดยการบันทึกอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันโดยการส่องดูการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนนี้จะบันทึกเป็น 3 ระยะ คือ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาตินในเซชัน (เม็ดสตาร์ชเริ่มฟองตัวเม็ดแรก) อุณหภูมิระหว่างกลาง (เม็ดสตาร์ชฟองตัวเต็มที่ประมาณ 50%) และอุณหภูมิตสุดท้าย (มองเห็นการฟองตัวของเม็ดสตาร์ช ประมาณ 98%)

3.5.2 การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันทางอ้อม

การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันทางอ้อม โดยการวัดค่าการสลายของ เมล็ดข้าวในต่างตามวิธีของ Little, Hilder & Dawson, 1958, pp. 111-126) ค่าที่วัดได้แสดงถึง ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันสูงต้องใช้เวลาในการหุงต้มข้าวมากกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำ

3.5.3 การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติน โดยสามารถจัดตั้งลำดับอัตรา การให้ความร้อนด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนที่วัดได้จึง มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการนำข้าวหรือแป้งข้าวไปผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร Kohlwey (1994) รายงานว่าเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์จะแสดงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน 3 ค่า คือ อุณหภูมิเริ่มการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช (Onset temperature; To) อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาตินในเซชันสูงสุด (Peak temperature; Tp) และอุณหภูมิตสุดท้ายของสตาร์ชเจลาตินในเซชัน (Conclusion temperature; Tc) และค่าพลังงานทั้งหมด (ΔH) ที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช มีหน่วยเป็นจูล/กรัม (J/g)

3.6 การวิเคราะห์ความเหนียวของแป้ง

การตรวจวัดความเหนียวทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความเหนียวแตกต่างกันดังนี้ (กล้าณรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปี ะจอมขวัญ, 2550, หน้า 48-51)

3.6.1 การใช้เครื่องวัดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer)

สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้อ่านด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาด และชนิดของเครื่อง ค่าที่วัดได้จากเครื่องนี้จะมีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (Centipoise)

3.6.2 การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer)

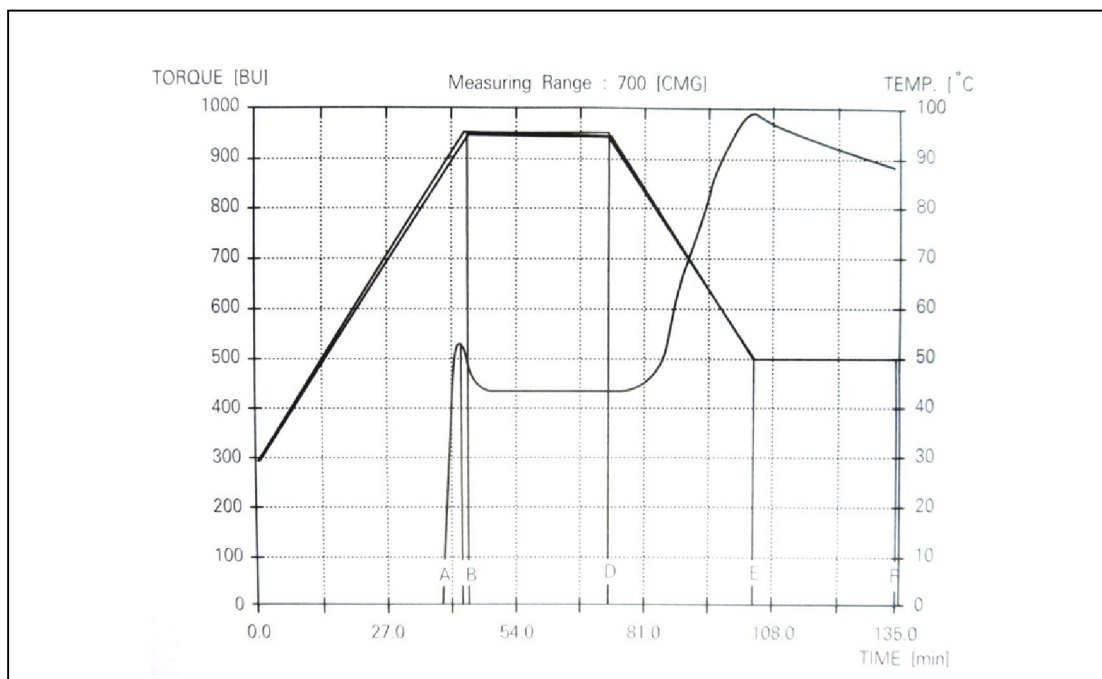
สามารถใช้วัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น มีหน่วยของความหนืดเป็น mPa.s

3.6.3 การใช้เครื่องบราเบนเดอร์เอมิโลกราฟ

เครื่องบราเบนเดอร์เอมิโลกราฟเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นตอนการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยความหนืดเป็น **Brabender unit (BU)** สามารถเปลี่ยนเป็นเซนติพอยส์ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 เซนติพอยส์ ความหนืดค่าต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 2.8 โดยที่จุด A แสดงความหนืดเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ 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 น้ำบริเวณรอบเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดรีโทรกราเดชัน ส่งผลให้ความหนืด

เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 49)



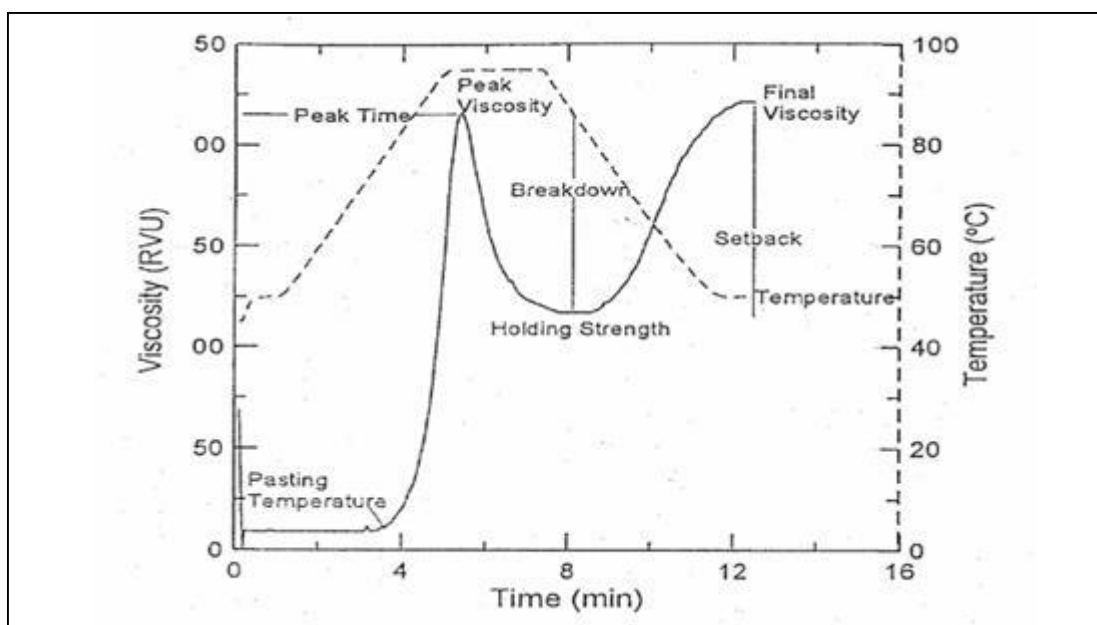
ภาพที่ 2.8 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 49)

3.6.4 การใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีหลักการวัดค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างกับน้ำได้รับความร้อนจนเกิดความหนืดในขณะที่ร้อนขึ้นด้วยอัตราระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (ประมาณ 95°C) หลังจากนั้นก็จะคงอุณหภูมิที่สูงสุดนี้ไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อวัดความคงทนของความหนืดต่อแรงเฉือนของเครื่อง จากนั้นจึงตรวจสอบค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมเย็นลงในอัตราระหว่างเวลาและอุณหภูมิลดลง (ประมาณ 50°C) ความเปลี่ยนแปลงของความหนืดทั้ง 3 ระยะ เป็นผลของลักษณะทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของตัวอย่างที่ปรากฏเป็นความหนืด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 2) ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วแสดงดังภาพที่ 2.9

จากเส้นโค้งของความหนืด (**Pasting curve**) สามารถอธิบายค่าต่าง ๆ ที่อ่านได้จากเส้นโค้งของความหนืด เมื่อนำเม็ดสตาร์ชที่ผสมในน้ำมาให้ความร้อนจะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชัน ในขณะที่เม็ดสตาร์ชพองตัวจะเกิดจะมีความหนืดเกิดขึ้นและความหนืดเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของสตาร์ช เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีการกวนโดยพายตลอดเวลา ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลายและเกิดการกระจายตัวของแอมิโลส ทำให้เกิดผลรวมของกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน เรียกว่า ความหนืด (**Pasting**) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (**Pasting temperature**) วัดเมื่อความหนืดเริ่มที่ 2 RVU ความหนืดสูงสุด คือ จุดสมมูลระหว่างการพองตัวที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นกับการทำลายเม็ดสตาร์ชของเครื่องกวนที่ทำให้ความหนืดลดลง วัดค่าเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (**Peak temperature**) และเวลาที่ความหนืดสูงสุด (**Peak time**) เกิดขึ้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 3)

เมื่อคงอุณหภูมิไว้ระยะเวลาหนึ่งจะมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของแป้งสุก (**Breakdown viscosity**) โดยทั่วไปจะทำให้ความหนืดลดลงเนื่องจากอุณหภูมิจึงอัตราการกวน แรงที่ใช้ในการกวน และคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช เรียกว่า ความคงทนต่อการกวน (**Shear-thinning, Holding strength, Hot paste viscosity, Trough**) ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดการจับเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอีกครั้ง ซึ่งจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนผสมว่าชื้นมากหรือน้อย ถ้าชื้นมากจะเกิดการรวมตัวเป็นเจลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเป็นความหนืดสุดท้าย (**Final viscosity**) ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้มากที่สุดในการอธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ความหนืดจะเกิดขึ้นหลังการหุงต้มและทำให้เย็น สำหรับค่าความคงตัวของแป้งสุกหรือเซตแบค (**Setback viscosity**) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่คงทนต่อการกวน ค่าความคงตัวของแป้งสุกมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรกราเดชัน จึงส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น การแยกของเหลวจากผลิตภัณฑ์ (**Syneresis หรือ Weeping**) การแช่เยือกแข็ง-คือนรูป (**Freeze-thaw cycle**) เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 3-4)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 50)

4. เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

สเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared reflectance spectroscopy; NIRS) เป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (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 อันตรกิริยาดังกล่าวคือการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นของพันธะเคมีในระดับโอเวอร์โทน (Overtone vibration) และคอมบิเนชัน (Combination vibration) ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของโมเลกุลที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ จะปรากฏในสเปกตรัม NIR เพื่อนำไปประมวลผลในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่อไป (ศุมาพร เกษมสำราญ, 2552, หน้า 2-5)

การสั่นแบบโอเวอร์โทนเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไป ทำให้เกิดการแทนที่ชั้นเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากระดับพื้น (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 และสามตามลำดับ ดังนั้นจะไม่สามารถสังเกตเห็นแถบโอเวอร์โทนอันดับที่สามขึ้นไป เนื่องจากมีความเข้มต่ำมาก (ศุมาพร เกษมสำราญ, 2552, หน้า 2-14) ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	ย่านอันตรกิริยา	โมเลกุล
1440	6944	C-H methylene ($-\text{CH}_2$)	C-H combination, $-\text{C}-\text{H}_2$	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 ($-\text{O}-\text{H}$)	O-H (2ν), O-H	Starch/Polymeric alcohol/water
1471	6798	N-H amide with N-R group	N-H (2ν), $-\text{CONHR}$	Amide/protein
1490	6711	N-H amide with N-R group	N-H (2ν), $-\text{CONHR}$	Amide/protein
1492	6702	N-H amide $-\text{NH}$ or $-\text{NH}_2$	N-H (2ν), ArNH_2	Amide/protein
1510	6623	N-H amide $-\text{NH}$ or $-\text{NH}_2$	N-H (2ν), $-\text{CONH}_2$	Amide/protein
1520	6579	N-H amide $-\text{NH}$ or $-\text{NH}_2$	N-H (2ν), $-\text{CONH}_2$	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 2.10 (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 2.10 (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 2.10 (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)

4.1 การเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร

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

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

เมื่อสสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนในอินฟราเรดย่านใกล้ สเปกตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) แถบตั้งและความยาวคลื่น (Wavelength) (แกนนอน) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสาร ดังนี้

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

กรณีวัดแสงสะท้อน $A = \epsilon bc = \log (1/R) = \log (I_0/I_r)$ 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 การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาความเข้มข้นของตัวอย่างหรือสารที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ได้ 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

4.2 การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถส่องผ่านตัวอย่างแบบสะท้อนกลับ (Reflectance) แบบส่องผ่าน (Transmittance) หรือแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse transreflectance) ส่งผลให้ข้อมูลสเปกตรัมของ NIR มีความซับซ้อนและแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง ความยาวคลื่น ความชื้นในตัวอย่าง อุณหภูมิของตัวอย่าง และขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (Particle size) เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้สเปกตรัมซ้อนทับกัน (Overlapping) หรือทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงเลื่อนขึ้นลง (Baseline shift) และส่งผลโดยตรงต่อการทำสมการแคลิเบรชัน (Calibration equation) (Nicolai, Beullens, Bobelyn, Peirs, Saeys, Theron & Lammertyn, 2007, pp. 99-108; Workmand & Weyer, 2008, p. 10) ดังนั้น การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการทำสมการแคลิเบรชันจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแม่นยำของสมการแคลิเบรชัน การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์มีหลายวิธี อาทิเช่น วิธีการ

แปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (Derivative transformation) วิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction; MSC) และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate; SNV) (Rinnan, Nørgaard, Berg, Thygesen, Bro, & Engelsen, 2009, p. 29-48)

4.2.1 การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์

การหาค่าอนุพันธ์ของสเปกตรัมเป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัมและการเลื่อนขึ้นของสเปกตรัมทั้งแบบเบสไลน์ออฟเซต (Baseline offset) และเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (Linear baseline shift) การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) ของสเปกตรัม จะทำให้เกิดการแยกของจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันออกมา การแปลงค่าเป็นอนุพันธ์อันดับสองจะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงทั้งที่เป็นผลเชิงบวก (Additive effect) ที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นในลักษณะที่เป็นการบวกเพิ่มด้วยค่าบนเส้นตรงที่เป็นมุมเอียงซึ่งค่าบวกจะเพิ่มน้อยกว่าที่ความยาวคลื่นสั้นและค่าบวกเพิ่มจะสูงที่ความยาวคลื่นสูง และผลเชิงคูณ (Multiplicative effect) ที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นในลักษณะที่มีค่าคงที่มาคูณค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น โดยจะลดผลกระทบหลักจากผลเชิงบวก การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23; Rinnan, Nørgaard, Berg, Thygesen, Bro, & Engelsen, 2009, p. 29-48)

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

4.2.2 การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ

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

ขั้นตอนที่สอง คือ หมนุสเปคตรัมของแต่ละตัวอย่างมาให้ตรงกับสเปคตรัมเฉลี่ย ขั้นตอนการหมนุสดังกล่าวทำได้โดยการหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปคตรัมเพื่อลดผลจากการเลือนตัวของสเปคตรัม และต้องหาค่าคงที่อีกค่าหนึ่งมาหารค่าการดูดกลืนแสงของทุก ๆ จุด (ความยาวคลื่น) ของตัวอย่างเพื่อปรับความชันของสเปคตรัมที่เปลี่ยนไป (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23)

4.2.3 วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ถูกวัดด้วยวิธีการสะท้อนแบบแพร่โดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปคตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ กระบวนการปรับแก้แบบปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานจะแตกต่างจากวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สเปคตรัมอ้างอิงเหมือนในวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณที่ต้องใช้สเปคตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง ในวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานสเปคตรัมแต่ละเส้นจะถูกปรับแก้โดยปรับค่าการดูดกลืนให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) คล้ายกับการคำนวณค่ามาตรฐานหรือค่า Z ในทางสถิติ โดยปรับแก้ให้ค่าเฉลี่ยของสเปคตรัมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยการนำค่าเฉลี่ยของสเปคตรัม (ค่าการดูดกลืนแสง) ของตัวอย่างนั้นมาลบออกจากค่าสเปคตรัมที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วง และปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่ง โดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของสเปคตรัมตลอดช่วงมาหารค่าสเปคตรัมหรือค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23)

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอินฟราเรดย่านใกล้

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนแสง หรือที่เรียกว่า “สเปคตรัม” ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการทราบได้ทันที ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจากสเปคตรัมที่ได้ รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปคตรัมที่ได้กับค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (Quantitative and qualitative analyses) โดยใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 2 ขั้นตอน คือ การสร้างสมการที่ใช้

ทำนายค่าคุณภาพองค์ประกอบที่ต้องการทราบ (Calibration) และการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (Validation) (ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33) วิธีการทางคณิตศาสตร์สำคัญที่ใช้ในการสร้างสมการแคลิเบรชัน ได้แก่ 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 ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น

4.3.1 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน ในที่นี้จะเรียกว่า “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, p. 5-1 to 5-17) การสร้างสมการ PLSR นั้น จะทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) โดยในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) จะต้องมีการสร้างตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า “ค่าคะแนนปัจจัย” (Factor loading) หรือ “แฟกเตอร์” โดยนำข้อมูลของตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ด้วย โดยค่าคะแนนปัจจัยหรือแฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นมานี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเสมอ 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 ค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรด ยานไกล์ว่ามีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย และค่า **Bias** เป็นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน (Romía & Bernardez, 2009, pp. 51-79; ธงชัย สุวรรณสิขณห์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33)

4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ธงชัย สุวรรณสิขณห์ 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**) โดยแต่ละตัวแปร

เดิมจะมีค่าน้ำหนัก (**Loading**) ในแต่ละ **PC** ซึ่งค่าน้ำหนัก คือ ค่าโคไซน์ (**Cosine**) ของมุมระหว่างตัวแปรกับ **PC** นั้น ๆ (มุมที่แคบจะมีค่าน้ำหนักสูง) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง **-1** ถึง **+1** ถ้าตัวแปร **2** ตัวแปรมีค่าน้ำหนักสูงอยู่บนแกน **PC** เดียวกัน นั้นแสดงว่าทั้งสองตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กันสูง โดยทิศทางของความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของค่าน้ำหนัก โดยถ้ามีเครื่องหมายบวกแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน และถ้ามีเครื่องหมายลบแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน

ในขณะที่ค่าคะแนนปัจจัย จะใช้ในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวอย่าง (**Sample pattern**) ซึ่งจะแสดงถึงความคล้ายหรือความแตกต่างของตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะมีค่าคะแนน (**Score**) ในแต่ละ **PC** ซึ่งค่าเหล่านี้จะแสดงให้เห็นตำแหน่งของตัวอย่างตามแกน **PC** โดยตัวอย่างที่มีค่าคะแนนใกล้เคียงกันในแกน **PC** เดียวกัน จะมีความคล้ายกัน นั้นแสดงว่าตัวอย่างที่คล้ายกันเหล่านี้จะมีค่าของตัวแปรเดิมบางตัวที่ใกล้เคียงกันด้วย ในทางกลับกันตัวอย่างที่มีค่าคะแนนแตกต่างกันมากจะมีค่าของตัวแปรเดิมนั้นแตกต่างกันด้วย จากการอธิบายผลด้วยค่าคะแนนปัจจัยทำให้การสร้างสมการด้วยวิธี **PCA** สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้

4.3.3 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด หรือ **PLS-DA** เป็นเทคนิคทางสถิติที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อสร้างสมการแคลิเบรชัน คือ การรู้จำแบบรูปภายใต้การควบคุมดูแล (**Supervised pattern recognition**) เทคนิคการรู้จำแบบรูปภายใต้การควบคุมดูแล เป็นเทคนิคทางสถิติหนึ่งของการรู้จำแบบรูป (**Pattern recognition**) ที่ต้องการทราบรายละเอียด เช่น กลุ่ม ชนิด หรือ เกรดของตัวอย่างก่อนทำการสร้างสมการสำหรับแบ่งกลุ่ม (**Classification model**) การสร้างสมการ **PLS-DA** สำหรับทำนายการแบ่งกลุ่มตัวอย่างจะต้องทำ **PLS model** ก่อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การสร้างสมการถดถอยแบบ **PLS1** และ **PLS2** โดยวิธีการถดถอยแบบ **PLS1** คือ การสร้างสมการสำหรับทำนายค่าตัวแปรเพียง 1 ตัวแปร โดยใช้สมการ 1 สมการ ในขณะที่วิธีการถดถอยแบบ **PLS2** คือ การสร้างสมการสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามหลายตัวโดยใช้สมการเดียวกัน (**Barker & Rayens, 2003, pp. 166-173 ; ธงชัย สุวรรณสิขณณ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33**)

ในการสร้างสมการแบ่งกลุ่ม ตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรหุ่น (Dummy variables) โดยตัวอย่างที่จัดให้อยู่ในกลุ่มจะมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้จัดให้อยู่ในกลุ่ม จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น ในการสร้างสมการสำหรับทำนายการแบ่งกลุ่ม ตัวอย่างจะต้องนำตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้าร่วมด้วยเช่นเดียวกับการสร้างสมการการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนเพื่อสร้าง PLS model ในบางกรณีการสร้างสมการสำหรับแบ่งกลุ่มนั้น ตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) อาจมีค่าไม่เท่ากับ 1 หรือ 0 แต่อาจมีค่าเท่ากับ 0.5 หรือมากกว่า 0.5 หรือน้อยกว่า 0.5 ในกรณีนี้ก็สามารถแบ่งกลุ่มได้เช่นเดียวกันโดยพิจารณาจากตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) มีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าตัวอย่างอยู่ในกลุ่ม แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) มีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าตัวอย่างไม่ได้อยู่ในกลุ่ม ซึ่งในกรณีนี้ควรประเมินประสิทธิภาพการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี Receive Operating Characteristics (ROC) มาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อให้การแบ่งกลุ่มตัวอย่างมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Ballabio & Todeschini, 2009, p. 83-103; Rossini, Verdun, Cariou, Qannari & Fogliatto, 2011, Paper Published in Press)

4.4 การประยุกต์ใช้สเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าวและผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันนี้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและประเมินคุณภาพข้าวแทนการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีอย่างแพร่หลาย รายงานวิจัยที่ใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Referene method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.)	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 2.11 (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 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณความชื้น (%)	ข้าวกล้อง, ข้าวสาร (n=125)	ตูบอบร้อนที่ 135°C นาน 3 ชม.	PLS: Brown rice: SEP = 0.12, r = 0.990 Milled rice: SEP = 0.17, r = 0.978	NIT: 825 - 1,075 NIT: 825 - 1,075	Shimizu <i>et al.</i> (1998)
	ข้าวเปลือก (n=150)	AOAC (ตูบอบร้อน)	PLS: Rough rice: SEP = 0.70, r ² = 0.96	NIT: 400 - 2,498	Kawamura <i>et al.</i> (1997)
	ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง	AOAC (ตูบอบร้อน)	PLS: 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)
	ข้าวกล้องที่ละเม็ด (n=100)	ตูบอบร้อนที่ 135°C นาน 15 ชม.	PLS: 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)	ตูบอบร้อนที่ 135°C นาน 24 ชม.	PLS: 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)
	ข้าวสาร (n=130)	ตูบอบร้อนที่ 105°C นาน 72 ชม.	MLR: SEC = 0.329, r ² = 0.975, RPD=5.5 PLS: SEP = 0.245, r ² = 0.987, RPD = 8.2	NIR: 960, 930, 980 NIR: 930 - 1,014	Lin <i>et al.</i> (2006)
ปริมาณโปรตีน (%)	แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ข้าวเมล็ดสั้น (n=97)	Combustion method (N x 5.95)	PLS: 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)	PLS: SEP = 0.13, r ² = 0.966	NIR: 1,180 - 1,800	Delwiche <i>et al.</i> (1996)

ตารางที่ 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
โปรตีน (%)	ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=120)	Kjeldahl method (N x 5.95)	PLS: 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)	PLS: 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)	PLS: 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)	PLS: 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)	PLS: 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)	PLS: 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)	PLS: 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 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณโปรตีน (%)	แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น ($n=128$) แป้งข้าว ($n=214$)	Combustion method ($N \times 5.95$)	PLS: SECV = 0.23, $r^2 = 0.982$	NIR: 400 - 2,498	Sohn <i>et al.</i> (2004a)
		Combustion method ($N \times 5.95$)	PLS: SECV = 0.22, $r^2 = 0.983$	NIR: 1,100 - 2,498	Sohn <i>et al.</i> (2004b)
	ข้าวกล้องที่ละเม็ด ($n=100$)	Combustion method ($N \times 5.95$)	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 ($N \times 5.95$)	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 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณแอมิโลส (%)	ข้าวสาร, แป้งข้าว (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 (<i>n</i> =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 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณแอมิโลส (%)	ข้าวเจ้าจากปอนิกามาเมล็ดสั้น (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 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: 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 2.11 (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 (มม.)	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 2.11 (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, $r^2 = 0.611$ Milled rice: SEP = 16.44, $r^2 = 0.533$ Rice flour: SEC = 14.31, $r^2 = 0.670$ Rice flour: SEP = 14.52, $r^2 = 0.654$	NIR: 1,108 - 1,940 NIR: 1,108 - 1,940 NIR: 1,116 - 1,776 NIR: 1,116 - 1,776	Srisawas (2009)
ปริมาณไขมัน (%)	ข้าวเมล็ดยาว	Soxtec system	PLS: SEC = 0.04, $r^2 = 0.97$ SEC = 0.03, $r^2 = 0.99$ SEC = 0.024, $r^2 = 0.99$	NIR: 400 - 700 NIR: 1,500 - 2,500 NIR: 400 - 700, 1,500 - 2,500	Chen <i>et al.</i> (1997)
	ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง, เมล็ดสั้น ($n=76$)	Soxtec system	SEC = 0.03, $r^2 = 0.99$ PLS: RMSEP = 0.04, $r^2 = 0.90$	NIR: 400 - 2,500 NIR: 400 - 2,500	Champagne <i>et al.</i> (2001)
	ข้าวจาปอนิกา, อินдика, ข้าวเหนียว ($n=248$)	Soxtec system	PLS: Brown rice grain: RMSECV = 0.17, $r^2 = 0.73$ 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, $r^2 = 0.89$	NIR: 1,100 - 2,498	Wang <i>et al.</i> (2006)
	ข้าวสาร, แป้งข้าว ($n=140$)	Fat acidity (mg of KOH/100 g dm)	PLS: Milled rice: SEP = 0.83, $r^2 = 0.87$ Rice flour: SEP = 0.73, $r^2 = 0.94$	NIR: 1,100 - 2,498	Li and Shaw (1997)

ตารางที่ 2.11 (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 2.11 (ต่อ)

Parameter	Sample	Reference method	Results	Mode: Wavelength (nm)	Author (Year)
ความหนืดของข้าว (RVU)	ข้าวเจ้าจากปอนิกามาเมลิ็ดสั้น ($n=341$) แป้งข้าว ($n=86$) 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 2.11 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการอ้างอิง (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	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 ($^{\circ}\text{C}$)	PLS: To: SEP = 1.79, $r^2 = 0.86$ Tp: SEP = 1.33, $r^2 = 0.89$ Tc: SEP = 2.23, $r^2 = 0.64$ ΔHg (J/g): SEP=0.03, $r^2 = 0.58$	NIR: 400 - 2,500	Bao <i>et al.</i> (2001)

จากตารางที่ 2.11 พบว่าเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพข้าว ดังจะเห็นได้จาก **Delwiche, Bean, Muller, Webb & Williams (1995)** ศึกษาหาปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับ วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ PLSR ที่ความยาวคลื่น 1,100-2,498 นาโนเมตร จำนวนกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการเท่ากับ 105 ตัวอย่าง และกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบการทำนาย 97 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายแอมิโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.95 และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.0 ต่อมาในปี 1996 **Delwiche, McKenzie & Webb** ศึกษาคุณภาพข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่น 400-2,498 นาโนเมตร วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ PLSR ที่ความยาวคลื่น 1,100-1,800 นาโนเมตร พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ทำนายปริมาณแอมิโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.887 และค่าความคลาดเคลื่อนจากการตรวจสอบสมการที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.33% จากตัวอย่างทั้งหมด 95 ตัวอย่าง

Shimizu, Okadome, Yanagisawa, Andren, Thente, Kimura & Ohtsubo (1998) ศึกษาหาปริมาณแอมิโลสในข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรด วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ PLSR ผลการทดลองพบว่าสมการที่สร้างสามารถนำมาใช้ตรวจสอบปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน และความชื้นได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวได้ เช่น อัตราส่วนของต้นข้าว และความขาวของเมล็ดข้าว เป็นต้น **Wu & Shi (2004)** ทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสในข้าวแบบวัดทีละเมล็ด (Single rice grain) ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับ ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสมีค่าเท่ากับ 0.85 0.71 และ 0.67 ตามลำดับ นอกจากนี้ **Wu & Shi (2007)** ประเมินคุณลักษณะการหุงต้มของข้าวสุกด้วยเทคนิคนี้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการนำไปทำนายค่าปริมาณแอมิโลส ความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดในต่าง

นอกจากนี้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปข้าวได้อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก **Windham, Lyon, Champagne, Barton & Webb (1997)** ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาทำนายลักษณะของข้าวสุกที่ระดับการขัดสีต่างกัน ผลการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้มาตรวจสอบ

ลักษณะเนื้อสัมผัส แต่บางคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสข้าวสุกมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำ **Champagne, Bett-Garber, Grimm, McClung, Moldenhauer, Linscombe, McKenzie & Barton (2001)** ทำนายลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยให้ค่าคะแนนการทดสอบชิมของผู้ทดสอบชิมเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยวิธี **Descriptive analysis** เป็นตัวแปรอิสระ และข้อมูลการดูกลิ่นแสงเป็นตัวแปรตาม เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีทางสถิติ **PLSR** พบว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายค่าความแข็ง ความเหนียว และการยึดเกาะกันของข้าวสุกมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง **0.71-0.96**

5. การแบ่งกลุ่มข้าว (Classification of rice)

ประเทศไทยเป็นแหล่งเพาะปลูกข้าวที่สำคัญ และมีความหลากหลายในพันธุ์ข้าวปลูก ซึ่งสถาบันวิจัยข้าวได้รวบรวมพันธุ์ข้าวปลูกและข้าวป่าไว้มากกว่า **19,000** ตัวอย่าง พบว่าอย่างน้อย **5,500** ตัวอย่าง มีชื่อข้าวปลูกต่างกัน จากความหลากหลายของพันธุ์ข้าวดังกล่าว การแบ่งกลุ่มข้าวจึงอาจพิจารณาจากสภาพทางภูมิศาสตร์ในการเพาะปลูก สภาพพื้นที่ปลูก (ข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวท่อน้ำลึก และข้าวนาเมือง) สายพันธุ์ข้าว (ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวจาวานิกา) วิธีการเพาะปลูก (การทำนาดำ และการทำนาหว่าน) สภาพแสงแดดในขณะที่ยังเจริญเติบโต (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)

นอกจากนี้การแบ่งกลุ่มข้าวยังสามารถแบ่งได้ตามระดับการขัดสี (Degree of milling) ได้แก่ สีสพิเศษ (8% ของน้ำหนักที่หายไปหรือมากกว่า) สีส (7-7.9% ของน้ำหนักที่หายไป) สีสปานกลาง (6-6.9% ของน้ำหนักที่หายไป) และสีธรรมดา (5-5.9% ของน้ำหนักที่หายไป) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 154) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวนั้นพบว่าข้าวสามารถแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติดังกล่าวได้เช่นเดียวกัน **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) นอกจากนี้การแบ่งกลุ่มข้าวยัง

สามารถแบ่งได้อ่อนความคงตัวของเจลแบ่งได้อีกด้วย คือ เจลนุ่ม (61-100 มิลลิเมตร) เจลนุ่มปานกลาง (41-60 มิลลิเมตร) และเจลแข็ง (26-40 มิลลิเมตร) (Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594)

การแบ่งกลุ่มข้าวตามอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน แบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำ (55-69°C) ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันปานกลาง (70-74°C) และข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันสูง (75-79°C) (Kongseree, 2002, p. 25) เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก สามารถแบ่งข้าวได้ 4 กลุ่ม คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่มมาก ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม ลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งร่วนปานกลาง และลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งร่วนมาก (Champagne, Bett-Garber, Grimm, McClung, Moldenhauer, Linscombe, McKenzie & Barton II, 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 ประกอบกับข้าวหอมมะลิของประเทศไทยมีมูลค่าสูงแต่มีผลผลิตต่ำ จึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้ประกอบการนำข้าวพันธุ์อื่นที่มีลักษณะทางกายภาพหรือคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่คล้ายกับข้าวหอมมะลิมาผสมกับข้าวหอมมะลิ ทำให้คุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และแปรรูปของข้าวหอมมะลิจึงมีคุณภาพลดลง ส่งผลให้เกิดการร้องเรียนจากลูกค้า (กรมการค้าต่างประเทศ, 2554, ออนไลน์) ในปัจจุบันผู้ประกอบการค้าข้าวจึงนิยมใช้วิธีการตรวจดีเอ็นเอ (DNA analysis) แบ่งกลุ่มข้าวหอมมะลิออกจากข้าวประเภทอื่น ๆ ซึ่งการตรวจดีเอ็นเอนั้นเป็นวิธีการที่ให้ผลแม่นยำ แต่ใช้เวลานาน และมีค่าใช้จ่ายสูง (Kim, Rhyu, Kim & Lee, 2003, pp. 346-349)

ดังนั้น ในปัจจุบันนี้จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้คิดค้นวิธีการแบ่งกลุ่มข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยใช้วิธีการตรวจสอบที่ให้ผลแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการทางเคมีเมทริกซ์แบ่งกลุ่มข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.12 โดยพบว่าการวิเคราะห์หลายตัวแปรก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งกลุ่มข้าวด้วยเช่นกัน Bett-Garber, Champagne, McClung, Moldenhauer, Linscombe & McKenzie (2001) แบ่งข้าวออกเป็น 7 กลุ่ม โดยพิจารณาจากปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยวิธี Ward's

cluster analysis ในขณะที่ Patindol, Flowers, Kuo, Wang & Gealy (2006) แบ่งข้าวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พันธุ์ Wells และ Bengal ด้วยวิธี Hierarchical cluster analysis ในปีต่อมา Suwannaporn, Pitiphunphong & Champangen (2007) แบ่งข้าวออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม โดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าวและปริมาณแอมิโลส พบว่าสามารถจำแนกกลุ่มข้าวได้อย่างชัดเจน

สำหรับการแบ่งกลุ่มข้าวโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการทางเคโมเมทริกซ์นั้น Osborne, Martens, Thomson & Fearn (1993) ศึกษาความเป็นไปได้ในการจำแนกความแตกต่างของข้าวพันธุ์บาสมาติออกจากข้าวพันธุ์เมล็ดยาวด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้โดยใช้ข้าวพันธุ์บาสมาติ จำนวน 16 ตัวอย่าง และข้าวพันธุ์เมล็ดยาวจำนวน 100 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าสามารถจำแนกข้าวพันธุ์บาสมาติออกกลุ่มข้าวพันธุ์เมล็ดยาวได้ Ootake & Kokot (1998a) ศึกษาจำแนกระหว่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้าด้วยเทคนิค FT-NIR ส่วน Kwon & Cho (1998) วิเคราะห์ความแตกต่างของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ที่จำหน่ายภายในประเทศ โดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีแบบการถ่ายภาพ (Image processing technique a CCD camera) ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคนี้สามารถจำแนกข้าวที่มีรูปร่างแตกต่างกันได้แม่นยำถึง 90%

Rittiron, Saranwong & Kawano (2005) วิเคราะห์การปลอมปนข้าวญี่ปุ่นโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบส่องผ่าน โดยใช้วิธีการวัดแบบที่ละเมล็ด ผลการศึกษาพบว่าสามารถแยกข้าวผสมออกจากข้าวบริสุทธิ์ โดยใช้ปริมาณโปรตีนเป็นตัวชี้บ่งในการแยกการปลอมปนดังกล่าว Theanjumol, Ripon, Karaboon, Suwapanit, Thanapornpoonpong & Vearasilp (2005) จำแนกกลุ่มข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์อื่น ๆ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ และแบ่งกลุ่มข้าวด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA ผลการวิจัยพบว่าข้าวพันธุ์กข 15 ปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 จะมีคุณภาพที่คล้ายกัน และแตกต่างจากข้าวกลุ่มอื่นอย่างชัดเจน และจากการแบ่งกลุ่มด้วย PCA พบว่าไม่สามารถแยกความแตกต่างในด้านคุณภาพของข้าวพันธุ์กข 15 และข้าวดอกมะลิ 105 ออกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้

ตารางที่ 2.12 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	-	Suwannapom <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 Suwannapom (2009)
เทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด	ข้าวพันธุ์บาสมัติ ($n=16$) และข้าวพันธุ์อื่น ๆ ($n=100$)	Fisher linear discriminant	Classifying Basmati rice from other rice varieties	NIT: 850 - 1,050	Osborne <i>et al.</i> (1993)
	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 and Kokot (1998a)

ตารางที่ 2.12 (ต่อ)

วิธีการ	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการวิเคราะห์หลายตัวแปร/ เคโมเมทริกซ์	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.)	รายการอ้างอิง
เทคนิคสเปคโตรสโคปี 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	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	NIR: 400 - 2,500	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	Theanjumool <i>et al.</i> (2005)
	ข้าวสารญี่ปุ่น	PLS	Detection blended the Koshihikari 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)	

