บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณภาพข้าว

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

2.1.1 คุณภาพข้าวทางกายภาพ

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

2.1.1.1 น้ำหนักเมล็ด (Grain weight)

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

2.1.1.2 น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight)

น้ำหนักจำเพาะเป็นน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเฮคโตลิตร น้ำหนักจำเพาะขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ด พันธุ์ข้าว ความชื้นของเมล็ด สิ่งเจือปนและอัตราการอัดตัวของเมล็ด ดังนั้น การหาน้ำหนักจำเพาะของเมล็ด จึงจำเป็นต้องตั้งระยะความสูงในการเทเมล็ดลงเครื่องตวงและความชื้นเมล็ดไว้เป็นมาตรฐาน ข้าวกล้องจะมีน้ำหนักจำเพาะสูงกว่าข้าวเปลือกประมาณหนึ่งเท่าตัว

2.1.1.3 สีข้าวเปลือก (Hull color)

สีข้าวเปลือกเป็นลักษณะประจำพันธุ์ขึ้นอยู่กับลักษณะการแสดงออกของยีน สีข้าวเปลือกของข้าวไทยส่วนใหญ่มี 2 สี คือ สีฟาง และสีน้ำตาล

2.1.1.4 สีข้าวกล้อง (Pericarp color)

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

2.1.1.5 ขนาดรูปร่างเมล็ด (Grain dimension)

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

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

2.1.1.6 ลักษณะท้องไข่ (Chalkiness)

ลักษณะท้องไข่ในเมล็ดข้าวเกิดจากการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ ของเม็ดแป้ง (Starch granule) กับโปรตีนรูปร่าง (Protein body) ในส่วนที่เป็นแป้งของเมล็ด ลักษณะนี้ถูกควบคุมโดยพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม ลักษณะท้องไข่ในเมล็ดข้าวแบ่งได้ 3 ชนิด คือ ท้องไข่ที่เกิดขึ้นตรงกลางของส่วนที่เป็นแป้งในเมล็ด (White center) ท้องไข่ที่เกิดด้านข้างหรือด้านท้องของเมล็ดด้านเดียวกับเยื่อเจริญ (White belly) และท้องไข่ที่เกิดขึ้นทางด้านหลังของเมล็ดด้านตรงข้ามกับเยื่อเจริญ (White belly) ลักษณะท้องไข่เป็นดัชนีที่ใช้ประเมินราคาข้าวและเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการ เนื่องจากทำให้คุณภาพการสีต่ำ มีข้าวหักมาก มาตรฐานข้าวไทยจะจำกัดปริมาณและชนิดของข้าวท้องไข่ที่ยอมให้มีเอาไว้ด้วย

2.1.1.7 ความขาวของข้าวสาร (Milled rice whiteness)

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

2.1.1.8 ความใสขุ่นของข้าวสาร (Grain transparency)

ความใสขุ่นของข้าวสาร หมายถึง ความทึบแสงหรือความใสของเนื้อข้าวสารทั้งเมล็ด สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ในข้าวเจ้า ปัจจุบันยังไม่พบสาเหตุของความใสขุ่นของข้าวสาร แต่คาดว่าน่าจะเกิดจากพันธุ์ข้าวและสภาพพื้นที่ปลูก

2.1.2 คุณภาพการสี

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

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

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของข้าวที่มีประสิทธิภาพการสีดี

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

ที่มา: ผดุงศักดิ์ วานิชชัง (2552)

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

2.1.3 คุณภาพทางด้านโภชนาการ

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

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว

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

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

หมายเหตุ : [1] คำนวณจากปริมาณรำที่ขัดสีออกจากข้าวกล้อง 10%

2.1.4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปข้าว และการตรวจสอบคุณภาพข้าวสำหรับการซื้อขายข้าว ซึ่งประกอบด้วยปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.4.1 โปรตีน

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

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

2.1.4.2 ปริมาณแอมิโลส (Apparent amylose content)

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

นอกจากนี้งามชื่น คงเสรี (2545) ยังพบว่าอัตราส่วนปริมาณแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน (Amylopectin) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณภาพแตกต่างกัน กล่าวคือปริมาณแอมิโลเพกตินทำให้ข้าวสุกเหนียว ในขณะที่แอมิโลสทำให้ความเหนียวของข้าวสุกลดลง ส่วนข้าวเจ้า

ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักร่วนและแข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและต่ำ ตามลำดับ การจัดแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส

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

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2545, หน้า 32)

2.1.4.3 อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature)

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

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิแป้งสุก

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

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547, หน้า 181)

2.1.4.4 ระยะเวลาในการหุงต้ม

ระยะเวลาในการหุงต้มข้าวอาจใช้เวลา 14-24 นาที หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในการหุงข้าว คือ เมล็ดข้าวต้องไม่มีลักษณะของแป้งดิบภายในเมล็ด ระยะเวลานี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแป้งสุก แม้ว่าระยะเวลาหุงต้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแป้งสุก แต่ความหนาของเมล็ดข้าวทำให้ต้องเพิ่มระยะเวลาการหุงต้มข้าว เช่น ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกเท่ากันแต่ข้าวที่มีเมล็ดหนาจะต้องใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวเมล็ดบาง ในทำนองเดียวกันปริมาณโปรตีนซึ่งมีมากตามบริเวณผิวนอกของเมล็ดอาจเป็นอุปสรรคในการซึมผ่านของน้ำ และทำให้เวลาในการหุงต้มข้าวเพิ่มสูงขึ้น (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 21)

2.1.4.5 ความคงตัวของแป้งสุก (Gel consistency)

ความคงตัวของแป้งสุกเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพสำคัญในการประเมินคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เนื่องจากผู้ทดสอบชิมไม่สามารถจำแนกความแตกต่างทางลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวสุกของข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกันได้ แต่ค่าความคงตัวของเจลสามารถจำแนกความแตกต่างลักษณะเนื้อ

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

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

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทตามความคงตัวของแป้งสุก

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

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

2.1.4.6 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างมีความสำคัญต่อคุณภาพด้านการหุงต้มและแปรรูปข้าว เนื่องจากสามารถใช้ประเมินอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวทางอ้อม (Delwiche *et al.*, 1996, pp. 257-263) Little *et al.* (1958) พัฒนาวิธีการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันโดยการทดสอบการแตกตัวของเมล็ดข้าว จำนวน 6 เมล็ด ที่แช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง และประเมินค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่างโดยคนที่ผ่านการฝึกฝน (Trained inspector) เป็นระดับคะแนน 1 ถึง 7 ระดับคะแนน 1 หมายถึง ลักษณะของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลง 2 หมายถึง เมล็ดข้าวพองตัว 3 หมายถึง เมล็ดพองตัวมีแป้งกระจาย จนกระทั่งถึงระดับคะแนน 7 หมายถึง เมล็ดข้าวสลายตัวทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส

Juliano *et al.* (1964c) พบว่าค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำเมล็ดข้าวจะสลายตัวทั้งเมล็ด ในขณะที่ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงเมล็ดข้าวจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือพองตัวเป็นบางส่วน โดยแบ่งข้าวตามระดับการสลายของเมล็ดข้าวในด่างได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง

ลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง	อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (°C)	ประเภทข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน
6 - 7	ต่ำกว่า 65	ต่ำ
4 - 5	70 – 74	ปานกลาง
1 - 3	75 - 79	สูง

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

Nishi *et al.* (2001) พบว่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน (Fine structure amylopectin) โดย Umemoto *et al.* (2002) พบว่าความยาวของสายแอมิโลเพกทินมีผลต่อการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง สตาร์ชข้าวที่มีองค์ประกอบของแอมิโลเพกทินสายสั้นสูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 7 – 10) จะแตกตัวได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินสายยาวอยู่ในปริมาณที่สูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 12 – 21) นอกจากนี้ Prathepha *et al.* (2005) ยังพบว่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวเหนียว (Glutinous rice) จะแตกต่างจากข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยข้าวเหนียวทั้ง 50 ตัวอย่างจะสลายตัวในสารละลายด่างทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส ในขณะข้าวที่ปริมาณแอมิโลสปานกลางและสูงจะมีระดับการสลายของเมล็ดข้าวในด่างต่ำ งามชื่น คงเสรี (2545) รายงานว่าข้าวเหนียวจะมีค่าระดับการสลายเมล็ดข้าวในด่างเฉลี่ย 6 – 7 ในขณะที่ระดับการสลายเมล็ดข้าวในด่างของข้าวเจ้าจะอยู่ในช่วง 1 – 3

Nakamura *et al.* (2002) พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง ซึ่งสอดคล้องกับ Harushima *et al.* (1998) พบว่าในสตาร์ชข้าวจะมี Amylopectin – synthesizing enzyme ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์ยีนแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตลอดจนโครงสร้างของแอมิโลเพกทินในเมล็ดข้าวแตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งความยาวของสายแอมิโลเพกทินนั้นมีผลต่อการแตกตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างอย่างมีนัยสำคัญ

2.1.4.7 คุณสมบัติด้านความหนืด (Pasting properties of rice)

อุณหภูมิในการเกิดเจลและความหนืดของแป้งสุกสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน เมื่อให้ความร้อนเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว ความหนืดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความหนืดจะสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เรียกความหนืดที่จุดสูงสุดนี้ว่า “ความหนืดสูงสุด” (Peak viscosity) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรวมตัวของน้ำแป้ง หลังจากเกิดความหนืดสูงสุดแล้วความหนืดจะลดลงเนื่องจากการแตกตัวของเม็ดแป้ง แอมิโลสจะถูกปล่อยออกมากับสารละลายและอาจมีบางส่วนที่เป็นแอมิโลเพกตินด้วย ความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ขั้นสลายตัวหรือเรียกว่า “ค่าการแตกตัวของแป้งสุก” (Breakdown) เมื่อเข้าสู่ระยะการทำให้น้ำแป้งเย็นตัว ความหนืดจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากโครงสร้างของแป้งที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ (Retrogradation) ช่วงอุณหภูมิที่แป้งคืนตัวเรียกว่า “ค่าความคงตัวของแป้งสุก” (Setback) ค่านี้สามารถใช้ประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้ (Leach, Mc Cowen & Schoch, 1959)

2.1.5 อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation ration of cooked rice)

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

2.1.6 กลิ่นหอม (Aroma)

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

2.2 วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวส่วนใหญ่ตรวจสอบด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

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

2.2.1.1 วิธีคเจลดาห์ล

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

ขั้นตอนที่ 1 ย่อยตัวอย่าง (Digestion) ด้วยกรดซัลฟูริคเข้มข้น ไนโตรเจนในตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)2SO_4$) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงโดยมีสารเร่งปฏิกิริยา เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ซีลีเนียม (Se) เมอคิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$) เมอคิวรีออกไซด์ (HgO) หรือเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$)

ขั้นตอนที่ 2 การกลั่นแอมโมเนีย (Distillation) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) มาทำปฏิกิริยากับเกลือแอมโมเนียมซัลเฟตที่ได้จากการย่อยตัวอย่างแล้ว จะได้ก๊าซแอมโมเนีย ซึ่งจับก๊าซนี้ได้ด้วยสารละลายบอริค

ขั้นตอนที่ 3 การไตเตรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน (Titration) เป็นการนำสารละลายกรดบอริคซึ่งจับก๊าซแอมโมเนียไว้มาไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริค

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

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

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

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

เมื่อ A คือ มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริค 0.1 นอร์มอล ที่ใช้ไตเตรตกับตัวอย่าง

B คือ มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริค 0.1 นอร์มอล ที่ใช้ไตเตรตกับแบลงค์

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริค

D คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

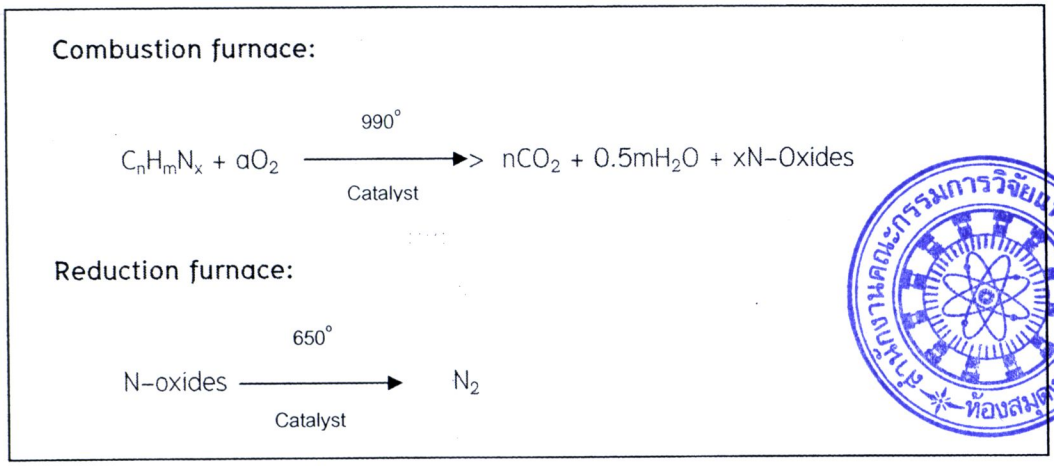
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าวิธีคเจลดาห์ลจะเป็นวิธีที่ให้ค่าการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนานตามชนิดและองค์ประกอบของตัวอย่าง ผู้วิเคราะห์ต้องมีทักษะและความชำนาญค่อนข้างสูง ต้องใช้สารเคมีที่เป็นกรดและด่างเข้มข้นหลายชนิด รวมถึงมีการใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง ปรอท ทำให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียจากห้องปฏิบัติการและปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธารักษ์, 2553, หน้า 13-16)

2.1.1.2 วิธีดูมาส

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 21 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน 191087
เลขเรียกหนังสือ

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



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส (Dumas combustion)
ที่มา: มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธารักษ์ (2553, หน้า 13-16)

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

ตารางที่ 2.7 ค่าแฟกเตอร์ในอาหารแต่ละผลิตภัณฑ์

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

ที่มา: มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธารักษ์ (2553, หน้า 13-16)

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

ในสารแอมโมเนียก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปไตเตรตเพื่อให้ได้ไนโตรเจนซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ การเปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล

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

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

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

2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

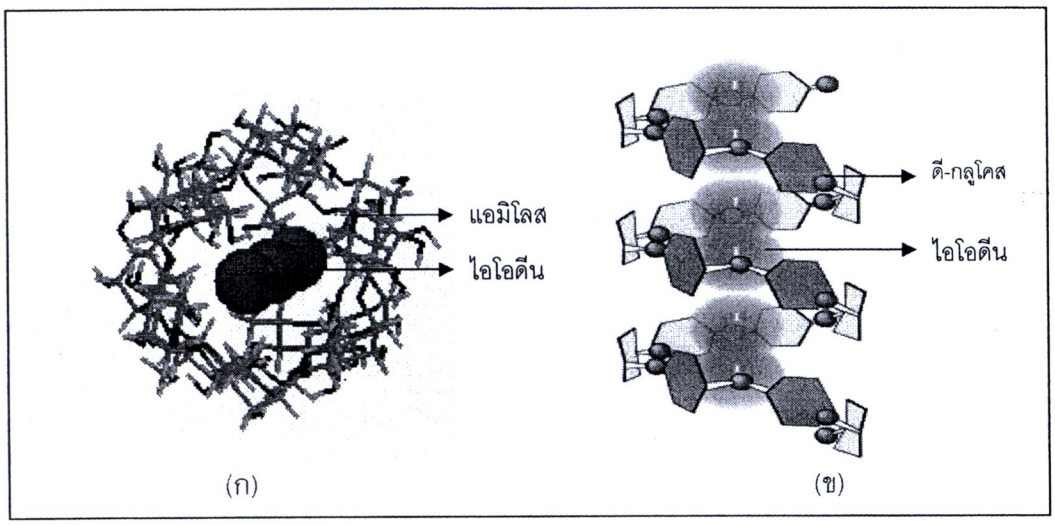
สตาร์ชข้าวประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสที่สำคัญ 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งปริมาณของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกันตามชนิดของแป้ง วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสที่สำคัญ ได้แก่

2.2.2.1 การทำให้เกิดสี (Colorimetric method)

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

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

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



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีน (ก) และการจับกับสารละลายไอโอดีนของโมเลกุลดี-กลูโคส
ที่มา: Keush (2011); Virginia university (2011)

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

2.2.2.2 การใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเทียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

การหาปริมาณแอมิโลสวิธีนี้จะคำนวณค่าปริมาณแอมิโลสจากพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมากเกินพอเพื่อให้แอมิโลสในแป้งทั้งหมดจับกับไขมัน พลังงานที่ใช้ในการละลายจะได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีคที่เกิดขึ้น วิธีนี้สะดวกและรวดเร็ว ให้ผลการทดลองที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.2.3 การใช้ High Performance Size Chromatography (HPSEC)

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

กัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้าที่สุด ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดกึ่งกลางไม่ใหญ่มากนักจะแพร่ผ่านได้เฉพาะบางส่วนของรูพรุนและจะถูกกันจากรูที่เล็กมาก ๆ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงถูกชะออกมาจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี Concanavalin-A (Con A)

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

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

$$\text{ปริมาณแอมิโลส (\%)} = \frac{\text{Absorbance Con A Supernatant}}{\text{Absorbance Total starch aliquot}} \times \frac{6.15}{9.2} \times \frac{100}{1}$$

$$= \frac{\text{Absorbance Con A Supernatant}}{\text{Absorbance Total starch aliquot}} \times 66.8$$

2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจล

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

2.2.4 การวิเคราะห์หาค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง

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

2.2.5 การวัดความหนืดของแป้ง

การตรวจวัดคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดแตกต่างกัน ดังนี้ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.5.1 การใช้เครื่องวัดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer)

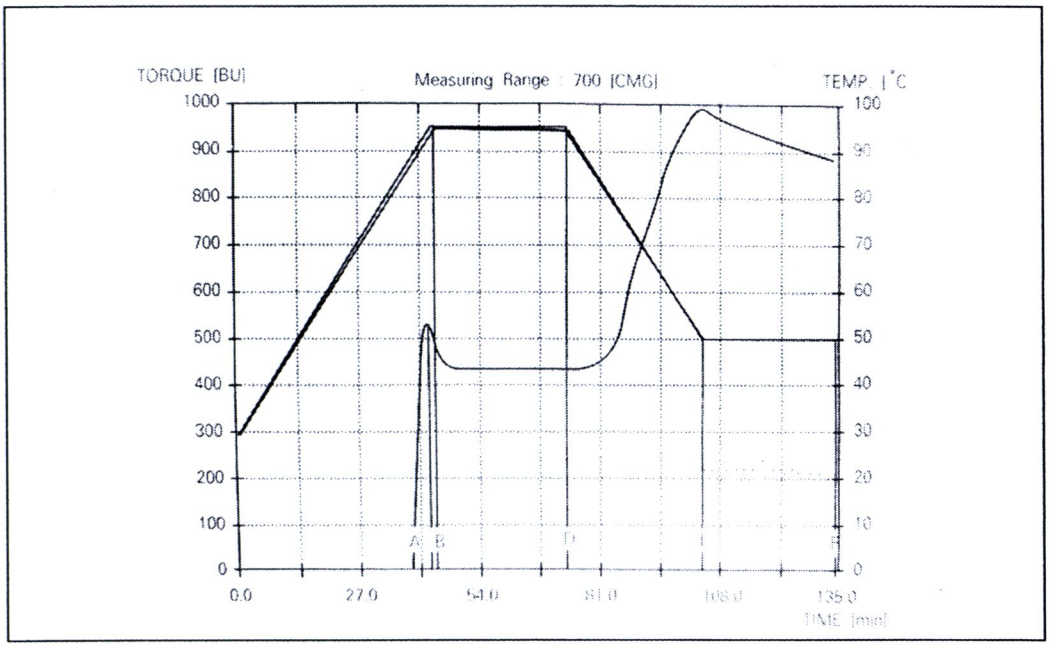
สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัว โดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้จะคูณด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว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

2.2.5.2 การใช้เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโลกราฟ

เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโลกราฟเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น Brabender unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็นเซนติพอยส์ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 เซนติพอยส์ ความหนืดค่าต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยที่จุด A แสดงความหนืดเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ จุด B แสดงความหนืดสูงสุด ซึ่งเป็นความหนืดสูงสุดในช่วงการให้ความร้อนเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ จุด C แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95°C ชี้ให้เห็นถึงความยากง่ายในการหุงต้ม จุด D แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95°C ชี้ให้เห็นถึงความคงตัวของเม็ดแป้ง จุด E แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50°C ชี้ให้เห็นถึงการเกิดรีโทรกราเดชันเนื่องจากการทำให้เย็น และจุด F แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50°C ชี้ให้เห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุกที่ผ่านการหุงต้ม และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบเม็ดแป้งเหลือน้อยลงทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากเกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออกความหนืดลดลง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดรีโทรกราเดชันส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นความหนืดที่เกิด

จากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)



ภาพที่ 2.3 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 256)

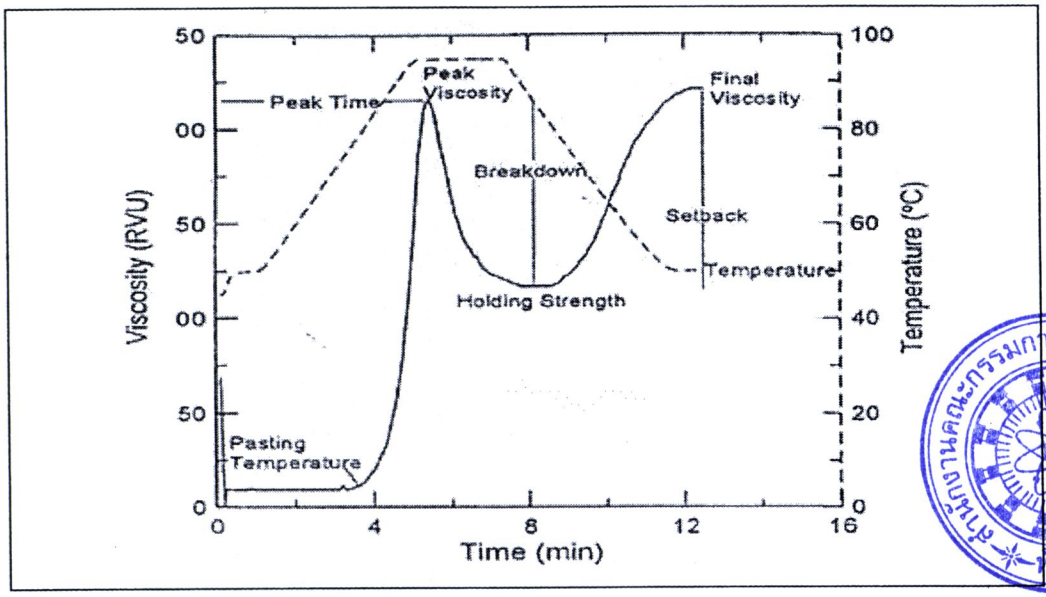
2.2.5.3 การใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว

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

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

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

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



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ภาพที่ 2.4 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 250)

2.3 เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

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

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

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

2.3.1 การเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร

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

$$I_o = I_a + I_t + I_r \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปคตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน

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

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

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	ย่านอันตรกิริยา	โมเลกุล
1940	5155	O-H (H-O-H) water	O-H stretching and HOH bending combination	Water
1960	5102	O-H Polymeric (.O-H)	O-H stretching and HOH bending combination	Polysaccharides
1980	5051	N-H amide II (.$CONH_2$)	N-H stretching and N-H in-plane bending combination	Amides/proteins
2050	4878	N-H/C-N/N-H amide II and amide III combination (.CONH) and (.$CONH_2$)	N-H in-plane bend and C-N stretching and N-H in-plane bend combination	Amides/proteins
2055	4866	N-H/C=O amide as (.CoNH) and (.$CONH_2$)	N-H stretching and C=O stretching (amide I) combination	Amides/proteins
2060	4850	N-H combination band from secondary amides in proteins	N-H [νN-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 assicated (.RC=CH and RC=O)	C-H stretching and C=O stretching combination and C-H deformation combination	Lipids
2180	4587	N-H proteins: N-H ($3\nu_B$)	N-H (3δ)	Proteins/amino acids

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

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	ย่านอันตรกิริยา	โมเลกุล
2180	4590	N-H/C-N/C=O combination band from secondary amides in proteins	N-H/C-N/C=O[2 x amide I (2νC=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 (3δ)	Lipids
2322	4307	C-H (.C-H and CH_2)	C-H stretching and CH_2 deformation combination	Polysaccharides
2330	4292	C-H (.C-H and CH_2)	C-H stretching and CH_2 deformation combination	Polysaccharides
2335	4283	C-H (.C-H and CH_2)	C-H stretching and CH_2 deformation combination	Polysaccharides

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

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	ย่านอันตรกิริยา	โมเลกุล
2380	4202	C-H/C-C (.C-H and .C-C)	C-H stretching and C-C stretching combination	Lipids
2470	4049	C-H (.CH_2)	C-H combination	Lipids, aliphatic compounds
2470	4049	C-N-C amide: (.C-N-C)	C-N-C (2ν)	Proteins
2500	4000	C-H/C-C/C-O-C (.C-H and .C-C and .C-O-C)	C-H stretching and C-C and C-O-C Stretching combination	Polysaccharides

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

เมื่อสสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนใน NIR สเปคตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) แกนตั้ง และความยาวคลื่น (Wavelength) (แกนนอน) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสาร ดังนี้

กรณีวัดแสงส่องผ่าน $A = \varepsilon bc = \log (1/T) = \log (I_o/I_t)$ สมการที่ 2

กรณีวัดแสงสะท้อน $A = \varepsilon bc = \log (1/R) = \log (I_o/I_t)$ 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_o คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง

I_t คือ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง

โดยทั่วไปการใช้ประโยชน์ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ คือ การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาความเข้มข้นของตัวอย่างหรือสารที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ สมการที่ 2 และ 3 จึงสามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็น

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

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

$$C = B_o + B_iA_i = B_o + B_i \log (1/T_i) = B_o + B_i \log (1/R_i) \qquad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ B_o คือ ค่าตัดจุดแกน y (intercept) ของสมการ

B_i คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ที่ตำแหน่ง i

2.3.2 การปรับแต่งสเปคตรัมก่อนการวิเคราะห์

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถส่องผ่านตัวอย่างแบบสะท้อนกลับ (Reflectance) แบบส่องผ่าน (Transmittance) หรือแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse transflectance) ส่งผลให้ข้อมูลสเปคตรัมของ NIR มีความซับซ้อนและแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง ความยาวคลื่น ความชื้นในตัวอย่าง อุณหภูมิของตัวอย่าง และขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (Particle size) เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้สเปคตรัมซ้อนทับกัน (Overlapping) หรือทำให้สเปคตรัมเปลี่ยนแปลงเลื่อนขึ้นลง (Baseline shift) และส่งผลโดยตรงต่อการทำสมการเครลิเบรชัน (Calibration equation) (Nicolaï *et al.*, 2007, pp. 99-108; Workmand & Weyer, 2008, p. 10) ดังนั้น การปรับแต่งสเปคตรัมก่อนการทำสมการเครลิเบรชันจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแม่นยำของสมการเครลิเบรชัน การปรับแต่งสเปคตรัมก่อนการวิเคราะห์มีหลายวิธี อาทิเช่น การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (Derivative transformation) การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction; MSC) วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate; SNV) (Rinnan *et al.*, 2009, p. 29-48)

2.3.2.1 การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์

การหาค่าอนุพันธ์ของสเปคตรัมเป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปคตรัมและการเลื่อนขึ้นของสเปคตรัมทั้งแบบเบสไลน์ออฟเซ็ต (Baseline offset) และเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (Linear baseline shift) การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) ของสเปคตรัม จะทำให้เกิดการแยกของจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันออกมา การแปลงค่าเป็นอนุพันธ์อันดับสองจะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงทั้งที่เป็นผลเชิงบวก (Additive effect) ที่ทำให้ขนาดสเปคตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นในลักษณะที่เป็นการบวกเพิ่มด้วยค่าบนเส้นตรงที่เป็นมุมเอียง ซึ่งค่าบวกจะเพิ่มน้อยกว่าที่ความยาวคลื่นสั้นและค่าบวกเพิ่มจะสูงที่ความยาวคลื่นสูง และผลเชิงคูณ (Mulitplicative effect) ที่ทำให้ขนาดสเปคตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นในลักษณะที่มีค่าคงที่มาคูณค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นโดยจะลดผลกระทบหลักจากผลเชิงบวก การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23, 2552 ; Rinnan *et al.*, 2009, p. 29-48)

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

2.3.2.2 การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ

เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อลดผลที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattering light) ต่อสเปคตรัมที่ได้จากการวัดแบบการสะท้อนการแพร่ (Diffuse reflectance) และแบบส่องผ่าน โดยทั่วไปการกระเจิงแสงจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปคตรัมเปลี่ยนไป ซึ่งเปรียบเสมือนว่าสเปคตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุดของสเปคตรัม (Multiplicative effect) การปรับแก้ด้วยวิธีการกระเจิงแบบผลคูณมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนแรกต้องนำสเปคตรัมของตัวอย่างทั้งหมดมาเฉลี่ยเพื่อให้ได้สเปคตรัมเฉลี่ยก่อน จากนั้นนำค่า log (1/R) หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่แต่ละความยาวคลื่นของแต่ละตัวอย่างมาพลอตกับค่า log

(1/R) ของสเปคตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมดทุกความยาวคลื่นซึ่งจะได้เส้นตรงที่มีความชันไม่เท่ากับหนึ่ง ขั้นตอนที่สอง คือ หมุนสเปคตรัมของแต่ละตัวอย่างมาให้ตรงกับสเปคตรัมเฉลี่ย ขั้นตอนการหมุนดังกล่าวทำได้โดยการหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปคตรัมเพื่อลดผลจากการเลื่อนตัวของสเปคตรัม และต้องหาค่าคงที่อีกค่าหนึ่งมาหารค่าการดูดกลืนแสงของทุก ๆ จุด (ความยาวคลื่น) ของตัวอย่างเพื่อปรับความชันของสเปคตรัมที่เปลี่ยนไป (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23)

2.3.2.3 วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

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

2.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอินฟราเรดย่านใกล้

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

เฉพาะวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น

2.3.3.1 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนในที่นี้จะเรียกว่า "PLSR" เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (Mulitvariate analysis) ที่สามารถลดจำนวนตัวแปรได้ นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปคตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ สมการของ PLSR ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (Independent variables) หรือตัวแปร X (X variables) เป็นค่าที่อ่านได้จากสเปคตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (ค่า log 1/R, ค่า ΔOD) และตัวแปรตาม (Dependent variables) หรือ ตัวแปร Y (Y variables) หมายถึง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณแอมิโลส เป็นต้น) (Williams, 2007) การสร้างสมการ PLSR นั้น จะทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) โดยในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) จะต้องมีการสร้างตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า "ค่าคะแนนปัจจัย" (Factor loading) หรือ "แฟกเตอร์" โดยนำข้อมูลของตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ด้วย โดยค่าคะแนนปัจจัยหรือแฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นมาใหม่นี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเสมอ สมการของ PLSR สามารถเขียนได้ดังนี้ (Liu & He, 2008, pp. 562-567; ธงชัย สุวรรณสิชณน์ 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 ค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่องสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ว่ามีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย และค่า Bias เป็นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน (Romía & Bernàrdez, 2009, pp. 51-79; ธงชัย สุวรรณสิชณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33)

2.3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ธงชัย สุวรรณสิชณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช (2552) อธิบายถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA ว่าเป็นวิธีการหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวโดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า "ปัจจัย หรือ องค์ประกอบ" (Factors or Principal Components; PCs: สมมติว่ามีตัวแปรใหม่ทั้งสิ้น k ตัว ได้แก่ $F_1, F_2,....F_k$) ซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้น (Linear combination)

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

$$F_1 = w_{11}*X_1 + w_{12}*X_2 + w_{13}*X_3 + \ldots\ldots + w_{1p}*X_p$$
$$F_2 = w_{21}*X_1 + w_{22}*X_2 + w_{23}*X_3 + \ldots\ldots + w_{2p}*X_p$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$F_K = w_{K1}*X_1 + w_{K2}*X_2 + w_{K3}*X_3 + \ldots\ldots + w_{Kp}*X_p$$

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

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

2.3.4 การประยุกต์ใช้สเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าวและผลิตภัณฑ์

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

มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 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 *et al.* (1998) วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด และวิเคราะห์ผลด้วย PLSR ผลการทดลองพบว่าสมการสามารถนำมาใช้ตรวจสอบปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน และความชื้นได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวได้ Wu & Shi (2004) ทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสในข้าวแบบวัดทีละเมล็ด ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับ ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสมีค่าเท่ากับ 0.85 0.71 และ 0.67 ตามลำดับ นอกจากนี้ Wu & Shi (2006) ประเมินคุณลักษณะการหุงต้มของข้าวสุกด้วยเทคนิคนี้ พบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการนำไปทำนายค่าปริมาณแอมิโลส ความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดในด่าง

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

ตารางที่ 2.10 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Referene method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
คุณภาพการสี					
- ระดับการขัดสี	ข้าวสาร	ไขมันที่ผิว, ไขมันทั้งหมด ปริมาณรำที่ถูกกำจัด	MLR: SEE = 0.112, r^2 = 0.98	NIR: 800 – 1,800	Stermer *et al.* (1977)
- ระดับการขัดสี	ข้าวกล้อง, ข้าวสาร	ปริมาณรำที่ถูกกำจัด	MLR: SEE = 0.569, r^2 = 0.988 SEP = 0.744, r^2 = 0.985 PLS: SEE = 0.511, r^2 = 0.992 SEP = 1.07, r^2 = 0.965	NIR: 1100 – 2500	Wadsworth *et al.* (1994)
- ระดับการขัดสี	ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196)	Milling meter	PLS: SEP = 2.7, r^2 = 0.969	NIR: 450 – 1,048	Delwiche *et al.* (1996)
- ค่าความขาว	ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196)	Milling meter	PLS: SEP = 0.60, r^2 = 0.966	NIR: 450 – 1,048	Delwiche *et al.* (1996)
- ค่าความมัน	ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196)	Milling meter	PLS: SEP = 0.15, r^2 = 0.927	NIR: 450 – 1,048	Delwiche *et al.* (1996)
- ระดับการขัดสี	ข้าวสารและแป้งข้าว (n=120)	Milling meter	PLS: 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 *et al.* (1998)
- ค่าความขาว	ข้าวสารและแป้งข้าว (n=120)	Milling meter	PLS: 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 *et al.* (1998)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

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

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณความชื้น (%)	ข้าวกล้อง, ข้าวสาร (n=125)	ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 3 ชม.	PLS: Brown rice: SEP = 0.12, r = 0.990	NIT: 825 – 1,075	Shimizu *et al.* (1998)
			Milled rice: SEP = 0.17, r = 0.978	NIT: 825 – 1,075	
	ข้าวเปลือก (n=150)	AOAC (ตู้อบลมร้อน)	PLS: Rough rice: SEP = 0.70, r^2 = 0.96	NIT: 400 – 2,498	Kawamura *et al.* (1997)
	ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง	AOAC (ตู้อบลมร้อน)	PLS: Rough rice: SEP = 0.70, r^2 = 0.96	NIR: 400 – 2,498	Kawamura *et al.* (2003)
			Brown rice: SEP = 0.50, r^2 = 0.97		
	ข้าวกล้องทีละเมล็ด (n=100)	ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 15 ชม.	PLS: SEP = 0.29, r = 0.99	NIT: 800 – 1,000	Rittiron *et al.* (2004)
			SEP = 0.24, r = 0.99	NIT: 1,300 – 1,500	
	ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61)	ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 24 ชม.	PLS: Brown rice: SECV = 0.15, r = 0.98	NIR: 800 – 1,098	Natsuga and Kawamura (2006)
			Brown rice: SECV = 0.19, r = 0.97	NIR: 1,100 – 2,498	
			Milled rice: SECV = 0.16, r = 0.96	NIR: 800 – 1,098	
			Milled rice: SECV = 0.19, r = 0.99	NIR: 1,100 – 2,498	
	ข้าวสาร (n=130)	ตู้อบลมร้อนที่ 105°C นาน 72 ชม.	MLR: SEC = 0.329, r^2 = 0.975, RPD=5.5	NIR: 960, 930, 980	Lin *et al.* (2006)
			PLS: SEP = 0.245, r^2 = 0.987, RPD = 8.2	NIR: 930 – 1,014	
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 *et al.* (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 *et al.* (1996)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
โปรตีน (%)	ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=120)	Kjeldahl method (N x 5.95)	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 *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (2003)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณโปรตีน (%)	แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (*n*=128)	Combustion method (*N* x 5.95)	PLS: SECV = 0.23, r^2 = 0.982	NIR: 400 – 2,498	Sohn *et al.* (2004a)
	แป้งข้าว (*n*=214)	Combustion method (*N* x 5.95)	PLS: SECV = 0.22, r^2 = 0.983	NIR: 1,100 – 2,498	Sohn *et al.* (2004b)
	ข้าวกล้องทีละเมล็ด (*n*=100)	Combustion method (*N* x 5.95)	PLS: SEP = 0.38, r = 0.96 SEP = 0.31, r = 0.97	NIT: 800 – 1,000 NIT: 1,300 – 1,500	Rittiron *et al.* (2004)
	ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (*n*=61)	Kjeldahl method (*N* x 5.95)	PLS: Brown rice: SECV = 0.16, r = 0.96 Brown rice: SECV = 0.24, r = 0.92 Milled rice: SECV = 0.18, r = 0.95 Milled rice: SECV = 0.19, r = 0.94	NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498	Natsuga and Kawamura (2006)
ปริมาณแอมิโลส (%)	ข้าวกล้อง (*n*=153), ข้าวสาร (*n*=123)	Iodine colorimetry using a potato (superlose)-waxy (IR29)	PLS: Brown rice: SEP = 2.27, r^2 = 0.757 Milled rice: SEP = 0.79, r^2 = 0.960	NIT: 800 – 1,050	Villareal *et al.* (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 *et al.* (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 *et al.* (1996)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

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

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
ปริมาณแอมิโลส (%)	ข้าวเจ้าจาปอนิกาเมล็ดสั้น (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 *et al.* (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 *et al.* (2004a)
	แป้งข้าว (n=214)	Iodine-blue colorimetric method (AACC, 2000d)	PLS: SECV = 0.57, r^2 = 0.994	NIR: 1,100 – 2,498	Sohn *et al.* (2004b)
	ข้าวกล้องทีละเมล็ด (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 autoanaly-zer (Juliano, 1971)	MPLS: Milled rice: SECV = 2.13, r^2 = 0.92	NIR: 1,100 – 2,498	Wu and Shi (2007)
	ข้าวสาร (n=230)	Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971)	PLS: Milled rice: SEC = 1.723, r^2 = 0.902 Milled rice: SEP = 2.158, r^2 = 0.843 Rice flour: SEC = 0.969, r^2 = 0.934 Rice flour: SEP = 1.224, r^2 = 0.945	NIR: 1,160 – 1,950 NIR: 1,160 – 1,950 NIR: 1,400 – 2,492 NIR: 1,400 – 2,492	Srisawas (2009)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	รายการวิจัย
ค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่าง	ข้าวสารเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (*n*=196)	Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little *et al.*, 1958)	PLS: SEP = 0.43, r^2 = 0.966	NIR: 400 – 2,498	Delwiche *et al.* (1996)
	ข้าวสาร, แป้งข้าว (*n*=96)	Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little *et al.*, 1958)	PLS: SECV = 0.64	NIR: 400 – 2,498	Barton *et al.* (2000)
	แป้งข้าว (*n*=162)	Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little *et al.*, 1958)	PLS: SEP = 0.88, r^2 = 0.70	NIR: 400 – 2,500	Bao *et al.* (2001)
	ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง, ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=586)	Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little *et al.*, 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 *et al.*, 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 *et al.*, 1973)	PLS: SEP = 7.12, r^2 = 0.81	NIR: 400 – 2,500	Bao *et al.* (2001)
	ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง, ข้าวสาร,แป้งข้าว (n=586)	Gel length of rice paste (Cagampang *et al.*, 1973)	MPLS: Milled rice: SECV = 11.73, r^2 = 0.76	NIR: 1,100 – 2,498	Wu and Shi (2007)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

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

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

คุณภาพข้าว	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการมาตรฐาน (Reference method)	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.)	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 *et al.* (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 *et al.* (2001)

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

Parameter	Sample	Reference method	Results	Mode: Wavelength (nm)	Author (Year)
ความหนืดของข้าว (RVU)			Breakdown viscosity; SEP = 10.2, r^2 = 0.88		
	ข้าวเจ้าจาปอนิกาเมล็ดสั้น (*n*=341)	RVA analyzer	PLS: Maximum viscosity SEP = 17.7, r^2 = 0.75, RPD = 1.9	NIT: 850 – 1,048	Shimizu *et al.* (2001)
	แป้งข้าว (*n*=86)	RVA analyzer	PLS: 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)
	ข้าวสาร (*n*=230)	RVA analyzer	PLS: Peak viscosity SEP = 26.83, r^2 = 0.678	NIR: 1,130 – 2,470	Srisawas (2009)
			Breakdown viscosity SEP = 14.89, r^2 = 0.735	NIR: 1,120 – 2,480	
			Setback viscosity SEP = 33.50, r^2 = 0.602	NIR: 1,108 – 2,492	
			Consistency SEP = 27.83, r^2 = 0.522	NIR: 1,148 – 2,452	
ระดับการเกิดรีโทรกราเดชัน (%)	ข้าวสุก (*n*=43)	Enzymatic digestibility	MLR: 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 *et al.* (1998)
คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (0-15 scale)	Milled rice (*n*=60)	Sensory evaluation	PLSR: Manual adhesiveness, visual Adhesiveness, stickiness to lip, RAP = 0.54-0.56	NIR	Windham *et al.* (1997)

ตารางที่ 2.10 (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 *et al.* (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 *et al.* (2001)
คุณสมบัติด้านความร้อน	แป้งข้าว (*n*=162)	DSC (°C)	PLS: To: SEP = 1.79, r^2 = 0.86 Tp: SEP = 1.33, r^2 = 0.89 Tc: SEP = 2.23, r^2 = 0.64 ΔH_g (J/g): SEP=0.03, r^2 = 0.58	NIR: 400 – 2,500	Bao *et al.* (2001)

2.3.4 การแบ่งกลุ่มข้าว (Classification of rice)

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

การแบ่งกลุ่มข้าวยังสามารถแบ่งได้ตามระดับการขัดสี (Degree of milling) ได้แก่ สีดีพิเศษ (8% ของน้ำหนักรำที่หายไปหรือมากกว่า) สีดี (7-7.9% ของน้ำหนักรำที่หายไป) สีดีปานกลาง (6-6.9% ของน้ำหนักที่หายไป) และสีธรรมดา (5-5.9% ของน้ำหนักรำที่หายไป) (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 glutinour rice) และข้าวเจ้า (Non-waxy or non-glutinous rice) นอกจากนี้การแบ่งกลุ่มข้าวยังสามารถแบ่งได้อ่อนความคงตัวของเจลแป้งได้อีกด้วย คือ เจลนุ่ม (61-100 มิลลิเมตร) เจลนุ่มปานกลาง (41-60 มิลลิเมตร) และเจลแข็ง (26-40 มิลลิเมตร) (Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594)

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

จากการที่ประเทศไทยมีความหลากหลายทางสายพันธุ์ข้าว ประกอบกับข้าวหอมมะลิของไทยมีมูลค่าสูงแต่มีผลผลิตต่ำ จึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้ประกอบการนำข้าวพันธุ์อื่นที่มีลักษณะทาง

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

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

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

Rittiron, Saranwong & Kawano (2005) วิเคราะห์การปลอมปนข้าวญี่ปุ่นโดยใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบส่องผ่าน (Transmittance) โดยใช้วิธีการวัดแบบมีละเมล็ด (Sigle grain) ผลการศึกษาพบว่าสามารถแยกข้าวผสมออกจากข้าวบริสุทธิ์ โดยใช้ปริมาณโปรตีนเป็นตัวชี้บ่งในการแยกการปลอมปนดังกล่าว Theanjumpol *et al.* (2005) จำแนกกลุ่มข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์อื่น ๆ ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ และแบ่งกลุ่มข้าวด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA ผลการวิจัยพบว่าข้าวพันธุ์กข 15 ปทุมธานี 1 และขาวดอกมะลิ 105 จะมีคุณภาพที่คล้ายกันและแตกต่างจากข้าวกลุ่มอื่นอย่างชัดเจน และจากการแบ่งกลุ่มด้วย PCA พบว่าไม่สามารถแยกความแตกต่างในด้านคุณภาพของข้าวพันธุ์กข 15 และขาวดอกมะลิ 105 ออกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้

ตารางที่ 2.11 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแบ่งกลุ่มข้าว

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

ตารางที่ 2.11 (ต่อ)

วิธีการ	ลักษณะตัวอย่าง	วิธีการวิเคราะห์หลายตัวแปร/เคโมเมทริกซ์	ผลการวิจัย	รูปแบบ/ความยาวคลื่น (นม.)	รายการอ้างอิง
เทคนิคสเปคโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด	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 camara	Kwon and Cho (1998)
	ข้าวพันธุ์เมล็ดยาว,ปานกลางและเมล็ดสั้น (n=280)	Modified PLS (MPLS)	1st calibration: SECV = 0.165, r2 = 0.91 2nd calibration: SECV = 0.165, r= 0.93 Korean domestic rice correctly identified of 80% samples	NIR: 400 – 2,500	Kim *et al.* (2003)
	ข้าวที่มีกลิ่นหอมของประเทศไทย	PCA	PCA was not sufficient to classify Thai rice variety by NIR spectroscopy without chemical properties	NIR: 1,100 – 2,500	Theanjumpool *et al.* (2005)
	ข้าวสารญี่ปุ่น	PLS	Detection blended the Koshihiakari with >5% of Akitakomachi varieties by single kernel NIT spectroscopy	NIT: 1,100 – 2,500	Rittiron *et al.* (2005)
	ข้าวเปลือกจากการเพาะปลูก 4 ฤดูกาล (n=1,408)	Discriminant analysis (DA)	Eight models were used to classify paddy rice	NIR: 1,100 – 2,500	Liu *et al.* (2006)