บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าว (Rice) จัดเป็นพืชอาหารหลักของประชากรทั่วโลก เป็นพืชอาหารและพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศไทย สร้างรายได้ให้กับประเทศกว่าปีละ 90,000 ล้านบาท พันธุ์ข้าวที่มนุษย์เพาะปลูกในปัจจุบันพัฒนามาจากข้าวป่าในตระกูล *Oryza gramineae* สันนิษฐานว่าพืชสกุล *Oryza* มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนชื้นของทวีป Gondwanaland ก่อนผืนดินจะเคลื่อนตัวและเคลื่อนออกจากกันเป็นทวีปต่าง ๆ จากนั้นกระจายจากเขตร้อนชื้นของแอฟริกา เอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงเหนือ ออสเตรเลีย อเมริกากลางและใต้ ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ตั้งแต่ความสูงระดับน้ำทะเลถึง 2,500 เมตรหรือมากกว่า ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ทั้งในที่ราบลุ่มจนถึงที่สูง มนุษย์ได้คัดเลือกข้าวป่าชนิดต่าง ๆ ตามความต้องการของตน เพื่อให้สอดคล้องกับระบบนิเวศน์ มีการผสมพันธุ์ข้ามระหว่างข้าวที่ปลูกกับวัชพืชที่เกี่ยวข้อง เกิดเป็นข้าวพื้นเมืองมากมายหลายสายพันธุ์ ซึ่งสามารถให้ผลผลิตสูง ปลูกได้ตลอดปี นอกจากนั้นยังก่อให้เกิดพันธุ์ข้าวปลูกที่เรียกว่า ข้าวลูกผสมซึ่งมีมากกว่า 120,000 พันธุ์ทั่วโลก

2.1 ชนิดของข้าว

ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ข้าวแอฟริกาและข้าวเอเชีย ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้าวแอฟริกาและข้าวเอเชีย โดยข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) แพร่กระจายอยู่เฉพาะบริเวณเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น สันนิษฐานว่าข้าวแอฟริกาอาจเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อประมาณ 1,500 ปีก่อนคริสตศักราช ส่วนข้าวเอเชีย (*Oryza sativa*) เป็นข้าวลูกผสม จากข้าวป่าชนิดต่าง ๆ มีถิ่นกำเนิดบริเวณประเทศอินเดีย บังคลาเทศ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อินเดียตอนเหนือของบังคลาเทศ บริเวณดินแดนสามเหลี่ยมระหว่างพม่า ไทย ลาว เวียดนาม และจีนตอนใต้

ข้าวเอเชียแบ่งออกได้เป็น 3 พันธุ์ ได้แก่

1) Japonica หรือ Senica เป็นข้าวที่ปลูกในประเทศจีนตอนเหนือและตะวันออก ญี่ปุ่น เกาหลี และประเทศอื่น ๆ ที่อยู่ในเขตอบอุ่น เมล็ดมีลักษณะอ้วน ป้อม รวงแน่น ใบสีเขียวเข้ม จัดเป็นข้าวเมล็ดสั้น

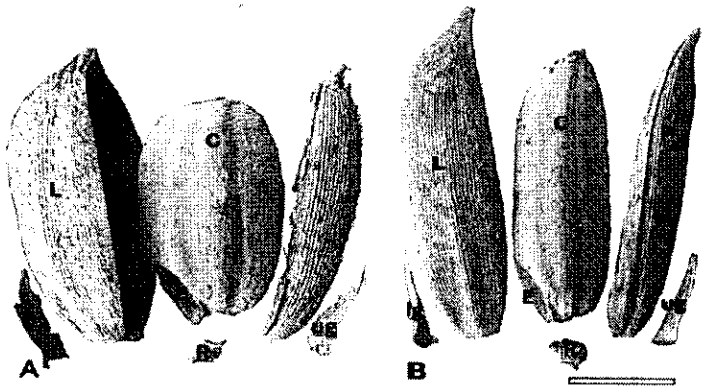
2) Indica เป็นข้าวที่ปลูกในประเทศต่าง ๆ ในเขตร้อน เช่น ศรีลังกา จีนตอนใต้และตอนกลาง อินเดีย อินโดนีเซีย บังคลาเทศ ไทย และฟิลิปปินส์ เมล็ดมีลักษณะเรียวยาว ใบมีสีเขียวอ่อน จัดเป็นข้าวเมล็ดยาว

3) Javanica เป็นข้าวที่พบมากในหมู่เกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย มีปลูกบ้างเล็กน้อยในประเทศฟิลิปปินส์ อินเดียและศรีลังกา ข้าวชนิดนี้จะมีลำต้นแข็งแรง รวงยาว เมล็ดมีหาง ใบมีสีเขียวอ่อน ข้าวพันธุ์นี้ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดขนาดความยาวของข้าวในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ เมล็ดยาว (ยาวกว่า 6.6 มิลลิเมตร) เมล็ดกลาง (ระหว่าง 5.5 - 6.6 มิลลิเมตร) และเมล็ดสั้น (สั้นกว่า 5.5 มิลลิเมตร)

การแบ่งชนิดของข้าวสามารถแบ่งได้หลายแบบขึ้นกับ แนวทางการแบ่ง เช่น แบ่งตามประเภทเนื้อแข็งในเมล็ด พื้นที่เพาะปลูก การเก็บเกี่ยว เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) การแบ่งชนิดของข้าวตามประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ดข้าวสาร สามารถแบ่งได้เป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งมีต้นและลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่าง แตกต่างกันที่ประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ด เมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วยแป้งแอมิโลส (Amylose) ประมาณร้อยละ 15 - 30 หรือบางพันธุ์อยู่ในช่วงมากกว่าร้อยละ 10 ส่วนเมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วยแอมิโลเพคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่และมีแอมิโลสเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5 - 7 หรือบางพันธุ์น้อยกว่าร้อยละ 1

2.2 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวเก็บเกี่ยวในรูปของข้าวเปลือก หรือในทางพฤษศาสตร์เรียกว่า Spikelet เมล็ดข้าวจากสายพันธุ์ต่าง ๆ จะมีรูปร่างของเมล็ดข้าวแตกต่างกันออกไป แต่โครงสร้างหลักจะเหมือนกัน โครงสร้างหลักของข้าวแสดงดังภาพ 1



ภาพ 1 โครงสร้างหลักของเมล็ดข้าว (A เป็นข้าวเมล็ดสั้น และ B เป็นข้าวเมล็ดยาว โดย C = Caryopsis, E = Embryo, L = Lemma, lg = Lower Glume, P = Palea, R = Rachilla, ug = Upper Glume)

ที่มา : Champagne et al. (2004)

ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนของเมล็ดข้าว คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (Hull หรือ Husk) และ (2) ส่วนเนื้อผลหรือผลแท้ (True Fruit หรือ Caryopsis Grain) หรือข้าวกล้อง (Caryopsis หรือ Brown rice) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) ขน หาง ขั้วเมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (Pedicel)

1.1) เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเมล็ดเนื้อผลด้านท้อง (Dorsal side) มีขนาดใหญ่อาจมีหาง หรือไม่มีก็ได้ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะมีรอยเส้น (Nerves) ตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้านในลักษณะขบอยู่ด้านบนอย่างแน่น

1.2) เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลัง (Ventral Side) ที่มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1 / 3 ของเปลือกทั้งหมด จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาว ทำให้เปลือกทั้ง 2 ติดกันสนิทบนผิว เปลือกเล็กจะเป็นรอยเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 3 เส้น รอยเส้นบนเปลือกใหญ่และเปลือกเล็ก อาจทำให้ข้าวกล้องเป็นรอยเส้นตามไปด้วย ในข้าวบางพันธุ์ ถึงแม้จะผ่านกระบวนการขัดขาว (Polishing) แล้วยังอาจมีรอยเส้นค้างอยู่บนข้าวสาร เรียกว่า สาแหรกข้าว

1.3) ขน จะขึ้นบนเปลือกใหญ่ และเปลือกเล็กเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบางพันธุ์ที่ไม่มีขนแต่เป็นส่วนน้อย ขนนี้คือ ส่วนของเซลล์ผิวนอก (Epidermal Cell) ที่เจริญกลายเป็นขน เพื่อทำหน้าที่ลดการระเหยน้ำ ป้องกันอันตรายต่อเมล็ดจากสภาวะภายนอกเมล็ด และเพื่อกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติโดยช่วยให้เมล็ดติดไปกับคน สัตว์ หรือสิ่งของต่าง ๆ ที่มีโอกาสสัมผัสเมล็ด จนทำให้เมล็ดหลุดติดไป

1.4) หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่ยาวออกมาเกินตำแหน่งยอดตอก (Apiculus) ในบางพันธุ์อาจสั้น หรือยาว หรือไม่มี ทำหน้าที่ในการกระจายพันธุ์ คล้ายขน

1.5) ขั้วเมล็ด เป็นก้านสั้น อยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ และยังติดอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือก

1.6) กลีบรองเมล็ด เป็นกลีบเล็ก 2 กลีบ อยู่ตรงข้ามกัน ใต้สุดของเมล็ด

2) ข้าวกล้องหรือเนื้อผล ประกอบด้วย

2.1) เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มเมล็ดอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีและรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน และเฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ ในชั้นเยื่อหุ้มผลนี้แบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้นย่อย คือ

1) เอพิคาร์พ หรือ เอกโซคาร์พ (Epicarp หรือ Exocarp) เป็นผิวหรือผนังหรือเปลือกที่อยู่นอกสุด มีลักษณะเรียบ เหนียว และเป็นมัน ประกอบด้วยเซลล์ชั้นเดียว

2) เมโซคาร์พ หรือ ไฮพอเดิร์ม (Mesocarp หรือ Hypoderm) เป็นผนังของผลชั้นกลาง

3) เอนโดคาร์พ (Endocarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นใน

2.2) เยื่อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาวเรียงตามขวางและมีผนังบางกั้น (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมันและสารสีเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผลทำให้ข้าวกล้องมีสี

2.3) นิวเซลลัส (Newcellus) เป็นเซลล์ที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่ละพันธะระหว่าง นิวเซลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกออกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8 - 2.5 ไมครอน

2.4) เยื่อชั้นแอลิวโรน (Aleurone Layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจาดเยื่อหุ้มเมล็ต ประกอบด้วยเซลล์ 1 - 7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ตจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างไปตามสายพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ตป้อมสั้นจะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ตยาว เป็นต้น เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ต จึงบ่งลักษณะของเซลล์แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะ คือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโทพลาซึม (Cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein Bodies) กลุ่มไขมัน (Lipid Bodies) และสารอื่น ๆ เช่น นิวเคลียส ไมโครบอดี ไมโทคอนเดรีย เอนโดพลาสมิก เรทิคิวลัม เวสิเคิล และพลาสทิด เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาสซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ประกอบอยู่

1) คัพภะหรือเชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน ต้นอ่อน เยื่อหุ้มรากอ่อน เยื่อหุ้มต้นอ่อน ท่อน้ำ ท่ออาหาร และ ใบเลี้ยงซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโดของต้นอ่อน จึงอุดมไปด้วยโปรตีน และไขมันในส่วนต่าง ๆ

2) เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (Endosperm) มีมากที่สุดในเมล็ดข้าว (ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นซับแอลิวโรน (Subaleurone Layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ต (Starchy Endosperm) ในชั้นซับแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ใน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาต 1 - 2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5 - 0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2 - 3.5 ไมครอน แต่ใน ส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนในลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ชอยู่ภายในเซลล์พาเรนไคมา ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรีหรือ

สี่เหลี่ยม เข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.3 สมบัติทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบหลักที่สำคัญซึ่งพบในเมล็ดข้าว คือ พอลิแซกคาไรด์ โปรตีน และไขมัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของเมล็ด และการนำเมล็ดไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ช ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแอมิโลสและแอมิโลเพคตินในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว ทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้มและคุณภาพในการรับประทานต่างกันไป สำหรับโปรตีนในข้าว ยังนับว่าเป็นแหล่งอาหารหลักซึ่งประชาชนในทวีปเอเชียได้รับจากอาหาร เนื่องจากมีการบริโภคข้าวเป็นจำนวนมากกว่าแหล่งโปรตีนจากอาหารอื่น ส่วนไขมันในข้าวจะอยู่เป็นกลุ่มไขมัน (Lipid Bodies) หรือหยดกลม (Spherosome) โดยรวมอยู่กับสตาร์ช และโปรตีน ในชั้น แอลิวโรนและคัพภะ จะมีผลในการเสื่อมเสียขณะเก็บรักษาเมล็ดรวมทั้งเมล็ดที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

2.3.1 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

2.3.1.1 สตาร์ช

แหล่งเกิดของสตาร์ชจะอยู่ในเม็ดสตาร์ชซึ่งมีลักษณะเป็นรูปห้าเหลี่ยมขนาด 3 - 9 ไมครอน รวมกันเป็นกลุ่มภายในแอมิโลพลาสทด์ (Amyloplast) มีลักษณะกลมหรือรี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 - 39 ไมครอน โดยภายในแต่ละแอมิโลพลาสท์มีเม็ดสตาร์ชเกาะรวมกันอยู่ประมาณ 20 - 60 เม็ด และระหว่างเม็ดสตาร์ชจะมีกลุ่มโปรตีนแทรกอยู่เห็นเป็นร่องเม็ดสตาร์ช สตาร์ชจากข้าวประกอบด้วยแอมิโลสร้อยละ 7 - 33 ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร หรือร้อยละ 8 - 37 ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ส่วนที่มีมาก คือ แอมิโลเพคติน ซึ่งอาจมีในข้าวเหนียวเกือบร้อยละ 100 แต่การเกาะกันอยู่ของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพคตินเป็นสตาร์ชยังต้องมีการศึกษาและวิจัยต่อไป แต่สันนิษฐานว่า ส่วนที่ให้โครงสร้างและเป็นผลึกนั้นเกิดจากแอมิโลเพคติน การสกัดเม็ดสตาร์ชออกจากเมล็ดข้าวนั้นไม่ยาก โดยใช้วิธีการบดแบบเปียกด้วยน้ำหรือด่างอ่อน เพื่อสกัดแยกโปรตีนออกไป และสารละลายช่วยไม่ให้เกิดสตาร์ชเสียหายในการบด แยกส่วนสตาร์ชจากสารละลาย ทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียดจะได้สตาร์ชจากข้าว

2.3.1.2 พอลิแซกคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช

พบมากในเปลือกหุ้มผลและเปลือกหุ้มเมล็ดมากกว่าในเนื้อและคัพภะ พอลิแซกคาไรด์ชนิดนี้อยู่ในรูปเส้นใยอาหาร ซึ่งประกอบไปด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส สารเพคติน ลิกนิน และโปรตีน ปริมาณเส้นใย (Crude Fiber) ในข้าวกล้อง ข้าวสาร และข้าวนึ่ง คือร้อยละ 0.9 0.3 และ 0.2 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์แต่ละส่วนของข้าว (โปรตีนสูง) ที่ขัด

สีในห้องปฏิบัติการและข้าวในท้องตลาด พบว่า มีปริมาณเส้นใยตั้งแต่ร้อยละ 1.5 - 3 เส้นใยหยาบและเส้นใยอาหารมีมากในรำและคัพภะ แต่หากวิเคราะห์ปริมาณพอลิแซกคาไรด์จากผนังเซลล์ที่เตรียมได้จะมีมากในข้าวสาร เนื่องจากปริมาณของเนื้อเมล็ด มีมากกว่าส่วนรำและคัพภะในเมล็ด นอกจากนี้ ยังเหลือส่วนที่ละลายได้ในน้ำร้อนและด่างมากกว่ารำข้าวและคัพภะอีกด้วย

2.3.2 โปรตีน (Protein)

องค์ประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญและพบในข้าวได้แก่โปรตีน ไขมัน โดยเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบของโปรตีนน้อยกว่าธัญชาติชนิดอื่นขึ้นกับสายพันธุ์ของข้าว จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเจลดาลห์ (Kjeldahl) โปรตีนในข้าวมีอยู่ประมาณร้อยละ 6 - 14 ของน้ำหนักข้าวสาร โปรตีนในข้าวอยู่กันเป็นกลุ่มมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular Protein) มีมากในบริเวณเอนโดสเปิร์มภายนอก ซึ่งแทรกระหว่าง Starch Granule มีขนาด 1 - 4 ไมครอน ปริมาณกรดอะมิโนแต่ละชนิดในโปรตีนจากข้าวเปลือกไม่ต่างจากข้าวขาวและข้าวกล้องมากนัก เนื่องจากในส่วนเปลือกมีปริมาณโปรตีนไม่มาก (ร้อยละ 2 - 3) อย่างไรก็ตามในเปลือกมีปริมาณกรดอะมิโนไลซีนอยู่มากกว่าส่วนอื่น และในข้าวกล้องจะมีไลซีนมากกว่าข้าวสารเล็กน้อย ซึ่งไลซีนจัดเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่มีไม่เพียงพอในโปรตีนจากข้าวและธัญพืชอื่น ๆ และปริมาณไลซีนจะมีในรำและคัพภะมากกว่าในส่วนของเมล็ด แต่ถ้าคิดจากปริมาณของโปรตีนรวมทั้งหมด จะได้รับจากเนื้อเมล็ดมากกว่า เนื่องจากสัดส่วนของเนื้อเมล็ดมีมากกว่าส่วนอื่น และแหล่งที่มีโปรตีนอีกส่วนหนึ่ง คือ ชั้นแอลิวโรนและชั้นถัดจากชั้นแอลิวโรน โดยสะสมเป็นกลุ่มโปรตีน ซึ่งมีองค์ประกอบต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่เกิดของกลุ่มโปรตีนนั้น Champagne et al. (1996) ทำการสกัดโปรตีนจากข้าว (มีโปรตีนประมาณร้อยละ 6.8 - 8.5) พบว่าประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายในน้ำหรือแอลบิวมิน (Albumin) ร้อยละ 3.8 - 8.8 ของโปรตีนทั้งหมด ในขณะที่พบโปรตีนที่ละลายในเกลือหรือโกลบิวลิน (Globuline) ประมาณร้อยละ 9.6 - 10 และโปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์หรือโพรลามิน (Prolamin) หรือออริซานิน (Oryzanin) ประมาณร้อยละ 66 - 78 ซึ่งกลุ่มหลังจะถือเป็นโปรตีนหลักที่สะสมในข้าว

นอกจากนี้ ยังพบโปรตีนที่ละลายได้ในกรดและด่างเจือจาง เรียกว่า กลูเตลิน (Glutelins) โปรตีนจากข้าวร้อยละ 80 เป็นชนิดที่ละลายได้ในด่าง ข้าวจะมีโปรตีนกลูเตลินสูงกว่าธัญพืช อื่น ๆ และมีโพรลามีนค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณร้อยละ 5 แต่ไลซีนมีปริมาณค่อนข้างสูง การที่ข้าวมีปริมาณโปรตีนกลูเตลินและโพรลามีนในระดับที่แตกต่างกันมาก และโปรตีนส่วนใหญ่เป็นแบบเม็ด จึงทำให้ข้าวไม่เกิดกลูเตนเมื่อผสมกับน้ำ ส่วนเนื้อเยื่อที่อยู่ใกล้เปลือกของเมล็ดข้าวในชั้นรำคัพภะและรำละเอียดจะมีอัลบูมิน (โปรตีนที่ละลายในน้ำ) และโกลบูลิน (โปรตีนที่ละลายในเกลือ) มากกว่าโปรตีนชนิดอื่น สำหรับในเนื้อเมล็ดจะมีกลูเตลิน (โปรตีนละลายในด่าง) มากที่สุด แต่โพรลามีน (โปรตีนละลายได้ในแอลกอฮอล์) จะมีน้อยในทุก

ส่วนของเมล็ดโปรตีนในเมล็ดข้าวและผลผลิตของข้าวจะมีความสัมพันธ์ในทางลบ ทั้งนี้เพราะสภาพแวดล้อมมีผลกระทบต่อปริมาณโปรตีนในเมล็ดมาก เช่น

1) ท้องฟ้าแจ่มใสดันข้าวได้รับแสงเพื่อการสังเคราะห์แสงมาก ทำให้ผลผลิตสูง แต่โปรตีนในเมล็ดข้าวต่ำลง

2) การใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ซึ่งนอกจากจะเพิ่มผลผลิตแล้วยังทำให้โปรตีนในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นอีกด้วย

3) ระยะห่างในการเพาะปลูก ถ้าหากห่างเกินไปรากข้าวจะหาอาหารได้มากจะทำให้มีโปรตีนสูง

2.3.3 ไขมัน (Fat)

ไขมันที่อยู่ในเมล็ดข้าวจะอยู่ในลักษณะเป็นก้อนกลม (Lipid Droplets) แทรกอยู่ในชั้นแอลิวโรน ขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมครอน อยู่ในชั้นถัดจากแอลิวโรนมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนและอยู่ในส่วนคัพภะมีขนาดเล็กกว่า 0.7 ไมครอน สำหรับในส่วนเนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกับกลุ่มโปรตีนและในเม็ดสตาร์ชก็จะมีไขมันชนิดที่มีโครงสร้างร่วมกับสารอื่น (Bound Lipids) ไขมันในเมล็ดส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณเยื่อแอลิวโรน และคัพภะ ซึ่งขจัดออกไปเมื่อผ่านกระบวนการสีข้าว ไขมันของข้าวเปลือกร้อยละ 80 อยู่ในส่วนที่เป็นรำ และไขมันจากทุกส่วนของเมล็ดจะมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน ไขมันที่ได้จากข้าวเป็นไขมันชนิดที่มีคุณภาพดี โดยมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (Linoleic Acid Oleic Acid และ Palmitic Acid) มีสารแกมมา - ออไรซานอล (Gamma Oryzanol) ช่วยในการควบคุมระดับโคเลสเตอรอลในเส้นเลือด และมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) ที่สำคัญได้แก่ แกมมา - ออไรซานอล โทโคฟีรอล (Tocopherol) และโทโคไตรอีนอล (Tocotrienol) สำหรับองค์ประกอบกรดไขมันมีกรดไขมันพัลมิติก โอลิอิก และลิโนเลอิกใกล้เคียงกัน โดยในแกลบมีโอลิอิกมากที่สุด ข้าวสารมีพัลมิติกและลิโนเลอิกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มไขมันที่เป็นกลาง ซึ่งจะพบมากที่สุดในปริมาณไขมันที่ไม่ได้มาจากสตาร์ช โดยส่วนใหญ่ อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ ส่วนน้อยในรูปของไขมันอิสระ แต่ไขมันจากสตาร์ชในข้าวกล้องและข้าวสารมีไขมันที่เป็นกลางเพียงร้อยละ 28 และร้อยละ 26 ตามลำดับ และเป็นไตรกลีเซอไรด์เพียงร้อยละ 4 และร้อยละ 2 ตามลำดับ เท่านั้น แต่มีกรดไขมันอิสระมากประมาณร้อยละ 2 - 21 ไกลโคลิพิดมีในไขมันที่ไม่ใช่สตาร์ชจากแกลบมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีฟอสฟอลิพิดมากที่สุด โดยเป็นส่วนของไลโซฟอสฟาดิลโคลีนและไลโซฟอสฟาทิดิลเอทานอนามีน ในขณะที่ไขมันที่ไม่ใช่มาจากสตาร์ชจะมีฟอสฟอลิพิดน้อยกว่ามาก ไขมันที่อยู่กับสตาร์ชจากข้าวกล้องของข้าวเจ้าจะมีประมาณร้อยละ 0.6 - 0.7 และมีในข้าวเหนียวประมาณร้อยละ 0.2 ในทำนองเดียวกันปริมาณไขมันที่อยู่ในสตาร์ชจากข้าวสารเจ้าจะมีประมาณร้อยละ 0.5 และข้าวเหนียวประมาณร้อยละ 0.1 อย่างไรก็ตาม ปริมาณไขมันโดยรวมในข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะไม่ต่างกันมากนัก และลักษณะไขมันที่แทรกอยู่ในสตาร์ชอาจจะอยู่รวมกับส่วนแอมิโลสดังเช่นของกลีเซอรอลโมโนสเทียรินกับแอมิโลส (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.3.4 แร่ธาตุ (Mineral)

แร่ธาตุที่พบส่วนใหญ่อยู่ตามบริเวณผิวนอกของเมล็ด และจะแตกต่างกันไปตามความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ปลูก ปริมาณแร่ธาตุในส่วนต่าง ๆ ของข้าว แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 แร่ธาตุในข้าวส่วนต่าง ๆ ที่ความชื้นร้อยละ 14

แร่ธาตุ	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	แกลบ	รำ	คัพภะ
แร่ธาตุหลัก (mg/g)						
Calcium	0.1 - 0.8	0.1 - 0.5	0.1 - 0.3	0.6 - 1.3	0.3 - 1.2	0.2 - 1.0
Silicon	10.8	0.6 - 1.4	0.1 - 0.4	64 - 95	3 - 5	0.4 - 0.9
Magnesium	0.6 - 1.5	0.2 - 1.5	0.2 - 0.5	0.3	5 - 13	4 - 13
Phosphorus	1.7 - 3.9	1.7 - 4.3	0.8 - 1.5	0.3 - 0.7	11 - 25	10 - 21
Phytin phosphorus	1.8 - 2.1	1.3 - 2.7	0.3 - 0.7	0	9 - 22	7 - 16
Potassium	1.5 - 3.7	0.6 - 2.8	0.7 - 1.3	1.5 - 7.5	10 - 20	11 - 15
Sulfur	0.4 - 1.6	0.3 - 1.9	0.8	0.4	1.7	-
แร่ธาตุรอง (µg/g)						
Aluminum	26 - 540	0.3 - 26	0.1 - 2.2	52	200	-
Cadmium	-	0.02 - 0.16	0.025	-	-	-
Chlorine	500 - 800	210 - 560	200 - 300	860	66	1200
Cobalt	-	0.03 - 0.04	0.017	-	-	-
Copper	2 - 11	1 - 6	2 - 3	30 - 39	9 - 34	9 - 34
Iodine	-	0.03	0.02	-	-	-
Iron	14 - 60	2 - 52	2 - 28	39 - 95	86 - 430	60 - 180
Manganese	17 - 94	2 - 36	6 - 17	100 - 290	95 - 230	91 - 120
Molybdenum	-	0.3 - 1.0	1.4	-	-	-
Nickel	-	0.2 - 0.5	0.14	-	-	-
Selenium	-	0.3	0.3	-	-	-
Sodium	53 - 810	17 - 340	5 - 86	67 - 826	71 - 335	139 - 636

ตาราง 1 (ต่อ)

แร่ธาตุ	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	แกลบ	รำ	คัพภะ
Tin	-	-	< 1.1	0	21	-
Zinc	1.7 - 3.1	6 - 28	6 - 23	9 - 40	43 - 258	57 - 258

ที่มา: ดัดแปลงจาก Champagne et al. (2004)

2.3.5 ความชื้น (Moisture Content)

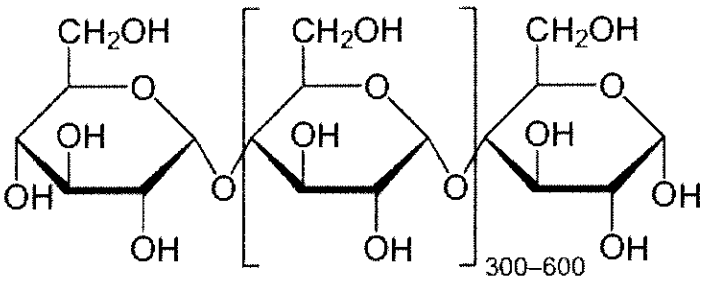
เมล็ดข้าวควรมีความชื้นประมาณร้อยละ 14 ถ้าความชื้นน้อยกว่านี้จะส่งผลให้สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น ความชื้นในแป้งยังมีผลต่อคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาอีกด้วย การที่แป้งมีความชื้นสูงส่งผลให้ Starch Granule ดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แป้งจะมีลักษณะเป็นก้อน ไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อนำไปกระจายตัวในน้ำ ทำให้เมื่อนำแป้งไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อาหาร จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพไม่ดี เนื้อสัมผัส (Texture) ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการนำแป้งไปใช้ประกอบอาหารนิยมทำให้ความชื้นในแป้งลดน้อยลงก่อน โดยนำไปตากแดดหรืออบด้วยความร้อนต่ำประมาณ 45 - 60 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาร่อนให้แป้งแตกตัว (ชาญ มงคล, 2536)

2.4 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose Unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic Linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งทางด้านดอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ เรียกว่า Reducing End Group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพคติน) โดยวางตัวในแนวรัศมี ซึ่งแป้งจากแหล่งต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) โดยองค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

2.4.1 แอมิโลส (Amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - 1, 4 - Glucosidic Linkage แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณแอมิโลสสูงประมาณร้อยละ 28 แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง มีปริมาณแอมิโลสต่ำประมาณร้อยละ 20 ส่วน Waxy Starch ไม่มีแอมิโลสเลย แป้งจาก Amylomaize มีปริมาณแอมิโลสสูงมากถึงร้อยละ 80 โครงสร้างของแอมิโลส แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amylose2.svg

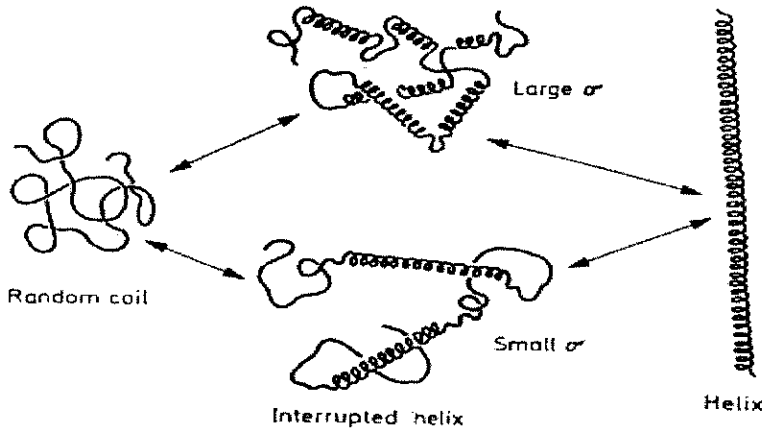
น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน ซึ่งแอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี โดยที่แป้งแต่ละชนิดมี Degree of Polymerization (DP) ของแอมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของแอมิโลสในช่วง 1,000 - 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของแอมิโลสในช่วง 200 - 1,200 โดยแป้งที่มี DP ของแอมิโลสสูงขึ้น จะมีแนวโน้มในการคืนตัว (Retrogradation) ลดลง และในธรรมชาติแอมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก

แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นเช่น Butanol Fatty Acid Surfactant Phenol และ Hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยแอมิโลสจะพันตัวเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้ แอมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบ

ตำแหน่งของแอมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับพันธุ์ของแป้ง แอมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของแอมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) ในแป้งสาลีพบแอมิโลสอยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งมันฝรั่งพบแอมิโลสอยู่ร่วมกับแอมิโลเพคติน ในส่วนผลึกการศึกษาการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบแอมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในใจกลางของเม็ดแป้ง แอมิโลสที่มีโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับแอมิโลเพคตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง และพบแอมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง จากการศึกษาครอสลิงของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งพบว่า แอมิโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของแอมิโลเพคตินมากกว่าที่จะรวมกันเป็นกลุ่ม

โครงสร้างของแอมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted Helix) หรือม้วนอิสระ (Random Coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง แอมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัว

แอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 - 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับแอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง โครงสร้างของแอมิโลสที่อยู่ร่วมกับแอมิโลเพคตินและ Monoacyl Lipid ในส่วนของเม็ดแป้งแอมิโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับแอมิโลเพคตินเป็นเกลียวคู่ (Double Helix)

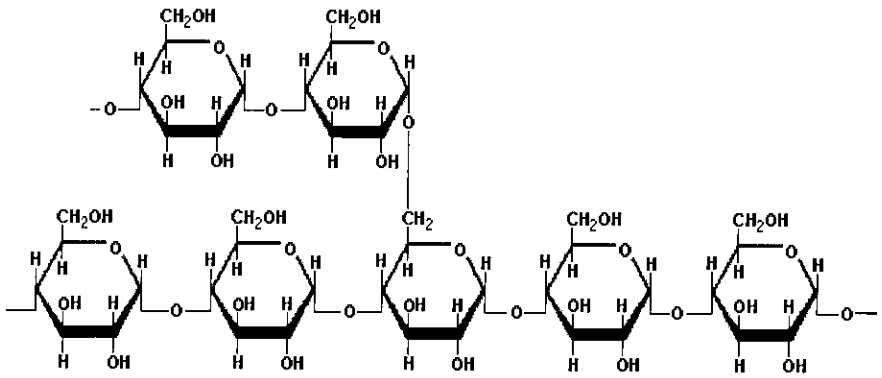


ภาพ 3 ลักษณะเกลียวของแอมิโลส

ที่มา : Whistler and Daniel (1984)

2.4.2. แอมิโลเพคติน (Amylopectin)

แอมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - 1, 4 - Glucosidic Linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 - 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - 1, 6 - Glucosidic Linkage โครงสร้างแอมิโลเพคติน แสดงดังภาพ 4



ภาพ 4 โครงสร้างของแอมิโลเพคติน

ที่มา : http://www.scientificpsychic.com

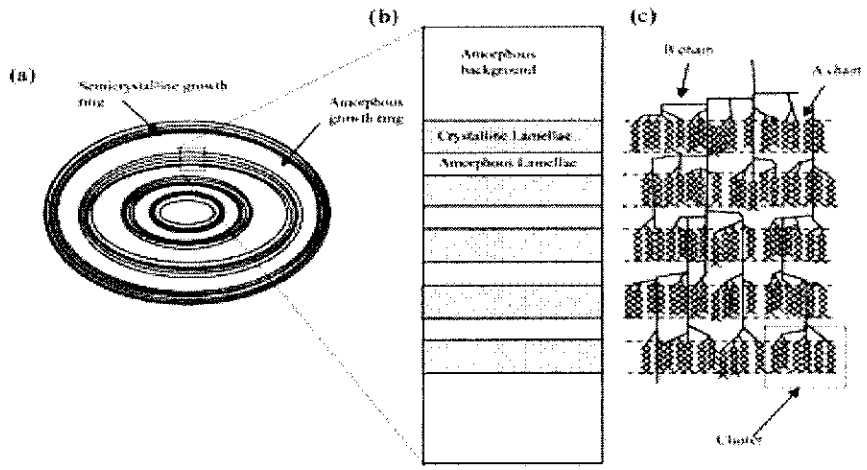
หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α - 1, 6 - Glucosidic Linkage มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในแอมิโลเพคตินทั้งหมด DP ของแอมิโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย แอมิโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของแอมิโลส คือประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากแอมิโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพคติน ประกอบด้วยสาย (chain) 3 ชนิด คือ

1) สาย A (A - Chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งต่อเชื่อมจากสายชนิดนี้ (Unbranched Structure)

2) สาย B (B - Chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น 2 สายหรือมากกว่า ซึ่งโครงสร้างแอมิโลเพคตินประกอบด้วย สาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8 - 0.9 : 1

3) สาย C (C - Chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในแอมิโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสายหนึ่งสายเท่ากัน ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก มี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วย สาย A และสาย B ขนาดเล็กจนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มี DP ประมาณ 45 หน่วย ประกอบด้วยสาย B สายยาว ซึ่งสายเหล่านี้รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน สำหรับแอมิโลเพคตินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียวและมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80 - 90 ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลือจะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22 - 25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของแอมิโลเพคตินเกิดเป็นเกลียวคู่ ทำให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อแรงกระทำและเอนไซม์ การเกิดเกลียวคู่ของแอมิโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกิ่งแอมิโลเพคติน ภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกิ่งที่อยู่ใกล้เคียงกัน



ภาพ 5 ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพคติน

ที่มา : http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/pfg-alumni-nitin-nowjee.html

2.5 คุณภาพข้าวสุก

เมื่อกล่าวถึงคุณภาพข้าว พิจารณาในแง่ของคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพการหุงต้มหรือข้าวสวย ดังนั้นคุณภาพข้าวสุกจึงมีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อของผู้บริโภค ทั้งนี้เนื่องจากความชอบของแต่ละคนแตกต่างกัน โดยคุณภาพข้าวสุกนี้สามารถคาดคะเนได้จากสมบัติทางเคมีของเมล็ด การที่ข้าวแต่ละพันธุ์มีคุณภาพข้าวสุกแตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบ ดังนี้

2.5.1 ปริมาณแอมิโลส (Amylose Content)

แม้ว่าแป้งข้าวจะมีแอมิโลเพคติน ปริมาณมากกว่าแอมิโลส แต่โดยทั่วไปมักนิยมแบ่งประเภทข้าวโดยยึดแอมิโลสเป็นหลัก ทั้งนี้ถ้าพิจารณาถึงร้อยละของแอมิโลส ส่วนที่เหลือของแป้งมักมีความหมายว่าเป็นส่วนของแอมิโลเพคติน อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น แป้งข้าวเหนียวมีแต่แอมิโลเพคตินหรือมีแอมิโลสปนอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนแป้งข้าวเจ้าจะมีแอมิโลสปนอยู่ประมาณร้อยละ 10 - 34 ปริมาณแอมิโลสเป็นสาเหตุทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้น และทำให้ข้าวนุ่มน้อยลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการคืนตัวของแอมิโลสที่สุกแล้ว (Retrogradation) ได้มีการจัดแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส แสดงดังตาราง 2 ข้าวที่มีแอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้มากในระหว่างการหุงต้ม ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงมีผลต่อคุณภาพข้าวสุก เช่น ข้าวแอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อย หากเติมน้ำมากเกินไปจะได้ข้าวสุกที่แฉะเละ แต่สำหรับข้าวแอมิโลสสูงหากใส่น้ำปริมาณเท่ากับการหุงต้มข้าวแอมิโลสต่ำจะได้ข้าวสวยที่แข็งกระด้างมาก

เนื่องจากการหุงต้มข้าวแอมิโลสสูงต้องการน้ำมาก และเมื่อสุกแล้วจะได้ข้าวสวยที่ร่วนฟูไม่เหนียวติดกัน จึงทำให้ข้าวสุกขยายปริมาตรมากหรือข้าวขึ้นหม้อดีกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ ในขณะที่ข้าวแอมิโลสต่ำ ข้าวสวยมีลักษณะเหนียว เกาะติดกัน เป็นก้อนจึงไม่ขึ้นหม้อ ดังตาราง 2 และ 3

ตาราง 2 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลสในข้าวขาว

ประเภทข้าว	ปริมาณแอมิโลส	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0 - 2	เหนียวมาก
ข้าวเจ้า		
- ข้าวแอมิโลสต่ำ	10 - 19	เหนียวนุ่ม
- ข้าวแอมิโลสปานกลาง	20 - 25	ค่อนข้างร่วน ไม่แข็ง
- ข้าวแอมิโลสสูง	26 - 34	ร่วน แข็ง

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

ตาราง 3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวพันธุ์ที่นิยมบริโภคแบ่งตามปริมาณแอมิโลส

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (ร้อยละ)	แอมิโลส (ร้อยละ)	โปรตีน (ร้อยละ)	ความคงตัวแป้งสุก (มม.)	การสลายเมล็ดในด่าง	อัตราการยืดเมล็ด (เท่า)	เวลาดัมสุก (นาที)
แอมิโลสต่ำ							
ขาวดอกมะลิ105	10.5	16.1	7.7	79	7.0	1.6	15
ปทุมธานี1	11.0	20.3	8.6	40	6.4	1.5	17
กข15	12.6	15.6	8.2	80	7.0	1.7	15
แอมิโลสปานกลาง							
กข23	11.1	24.0	8.3	59	4.9	1.5	20
สุพรรณบุรี2	11.1	21.4	10.5	59	4.9	1.5	21
สุพรรณบุรี60	10.6	24.3	8.6	46	5.1	1.5	20
แอมิโลสสูง							
สุพรรณบุรี1	10.9	29.5	8.2	96	5.0	1.5	21
ชัยนาท1	10.9	26.6	8.8	63	5.0	1.7	20
เหลืองประทิว123	10.0	26.0	11.1	58	6.0	1.7	21

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลส สามารถตรวจวิเคราะห์จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแป้งที่ละลายในสารละลายโดยปรับสภาพความเป็นกรด - ด่างพอเหมาะ แอมิโลสเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะได้สารละลายสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถหาปริมาณแอมิโลสในแป้งได้โดยการวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่นแสง 610 - 620 นาโนเมตร (Nanometer : nm) และเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน แป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสระดับต่าง ๆ สีของสารละลายจะแตกต่างกัน การย้อมสีเมล็ดข้าวสารกับสารละลายไอโอดีนโดยตรง เป็นวิธีการที่จะแยกข้าวเจ้าและข้าวเหนียวได้ โดยแป้งข้าวเหนียวจะย้อมได้สีน้ำตาลแดง ส่วนแป้งข้าวเจ้าเป็นสีน้ำเงินเข้ม (งามชื่น คงเสรี, 2547)

2.5.1.1 สมบัติบางประการของแอมิโลส

1) สมบัติการละลาย (Solubility) แอมิโลสสามารถละลายได้ดีในสารละลายเจือจางของด่าง นอกจากนี้ แอมิโลสยังละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น สารละลายคลอรัลไฮเดรด (Aqueous Chloral Hydrate) กรดไดคลอโรอะซิติก (Dichloroacetic Acid) กรดฟอร์มิก (Formic Acid) และยูเรีย (Urea) เป็นต้น

2) การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน (Reaction with Iodine) โดยปกติโครงสร้างเส้นตรงของแอมิโลสมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นที่ขดเป็นเกลียว สายโมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ด้านในของโมเลกุลจะเป็นไฮโดรโฟบิกหรือไลโพฟิลิก ซึ่งสามารถจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้กับไอโอดีน โดยเฉพาะไอโอดีนที่อยู่ในรูปของ I_3 สามารถรวมตัวได้กับทั้งโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพคติน หากเป็นแอมิโลสจะรวมกับสายยาวของ I_3 ได้เป็นสีน้ำเงิน สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลส - ไอโอดีน มีไอโอดีนอยู่ร้อยละ 19 ส่วนสายแขนงของแอมิโลเพคตินซึ่งค่อนข้างสั้น จะรวมตัวกับสายยาวของ I_3 ทำให้ได้สีม่วงแดง

3) การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) หลังจากที่เม็ดแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสที่มีขนาดเล็กจะกระจายตัวออกมาจากเม็ดแป้งทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้สารละลายแป้งเย็นตัวลงจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โมเลกุลของแอมิโลสที่ออกจากเม็ดแป้งที่อยู่ใกล้จะเกาะกันเอง ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุลของแอมิโลส เป็นผลทำให้โครงสร้างที่จัดเรียงใหม่สามารถอุ้มน้ำ และไม่ละลายน้ำ เรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรกราเดชัน หรือการคืนตัวของแป้ง อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันขึ้นกับขนาดของโมเลกุล ความเข้มข้นของแอมิโลส อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 80 ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันลดลง แอมิโลสโมเลกุลใหญ่มีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันต่ำกว่าแอมิโลสโมเลกุลเล็ก และอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงขึ้นในช่วงความเป็นกรด - ด่าง 5 ถึง 7 และไม่พบการเกิดรีโทรกราเดชันที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่ำกว่า 2 และสูงกว่า 10

2.5.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลส

ปริมาณแอมิโลสของข้าว เป็นคุณภาพทางเคมีที่มีความจำเป็นในการใช้เป็นข้อมูลเพื่อบ่งบอกถึงลักษณะของแป้งข้าวเพื่อใช้ในการแปรรูป หรือคุณภาพการหุงต้ม ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงคุณภาพข้าว ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส สามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีมีหลักการและขั้นตอนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างวิธีวิเคราะห์สามารถแบ่งได้ดังนี้

1) การทำให้เกิดสี (Colorimetric Method) Juliano (1971) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส โดยอาศัยหลักการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลแอมิโลสกับสารละลายไอโอดีน เริ่มจากนำแป้งข้าวมาเติมเอทานอลและสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปให้ความร้อนนาน 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายไอโอดีน เกิดเป็นสารประกอบสีน้ำเงินขึ้น ทำการวัดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด และใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย

2) การตกตะกอนแอมิโลเพคตินด้วย Concanavalin A (Con A) สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้ความแตกต่างของสัดส่วนของจำนวน Non - Reducing End Groups ในแอมิโลสและแอมิโลเพคติน โดย Con A จะจับกับปลายของกลูโคสด้านที่ไม่มีหมู่รีดิวซิ่งและตกตะกอน ทำให้สามารถแยกแอมิโลเพคตินออกจากแอมิโลสได้ หรือที่เรียกว่า Con A Method (Gibson et al., 1997) ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและใช้สารเคมีหลายชนิด

3) การใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC) สามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณแอมิโลสได้จากค่าพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน จะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายน้ำแป้งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมาก เพื่อให้แอมิโลสในแป้งจับตัวกับไขมัน ซึ่งปริมาณแอมิโลส สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีความสะดวก และรวดเร็ว แต่ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูงเท่านั้น (Mestres et al., 1996)

4) การใช้ Size Exclusion Chromatography (SEC) สามารถวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส จากความแตกต่างของเส้นผ่าศูนย์กลางกับน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่าง สำหรับโมเลกุลที่มีขนาดแตกต่างกันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัดถุที่มีรูพรุนจะมีความสามารถในการแพร่กระจายต่างกัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ออกมาช้าที่สุด ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดปานกลางจะแพร่ได้เฉพาะบางส่วนเท่านั้น แต่ถ้าเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงทำให้ถูกชะออกมาเป็นอันดับแรก สามารถคำนวณปริมาณแอมิโลส จากพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่างที่ทำการทดสอบกับพื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานเด็กซ์แดรน (Dextran) ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัดในการแยกส่วนขององค์ประกอบที่มีช่วงขนาดโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.5.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

การเก็บรักษาข้าวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าว โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติเกี่ยวข้องกับ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ แป้ง ไขมัน และโปรตีน ซึ่งข้าวที่อยู่ในระหว่างการเก็บรักษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยเม็ดแป้งจะเกิดการจับกันแข็งแรงขึ้น และกรดไขมันอิสระที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสของไขมันจะจับกับแอมิโลส มีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนไป นอกจากนี้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนออกซิเดชันของไขมัน มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสารระเหยพวกสารประกอบ

คาร์บอนิล และสามารถเร่งการเกิดกระบวนการออกซิเดชันของโปรตีนได้ ซึ่งมีผลต่อกลิ่นของข้าวที่อยู่ในระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้กระบวนการออกซิเดชันของโปรตีน ยังมีผลทำให้โครงสร้างภายในเกิดการเปลี่ยนแปลง มีผลทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง ซึ่งทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน นอกจากนี้ยังเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือดีเกรเดชัน (Degradation) อาจจะเกิดขึ้นได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ ส่วนปริมาณแอมิโลสจะแตกต่างกันไปขึ้นกับพันธุ์ของข้าวและการเพาะปลูกเป็นสำคัญ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาน้อยมาก (Charastil, 1990 ; Zhou et al., 2002) และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 พบว่าปริมาณแอมิโลสของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่เก็บรักษาอุณหภูมิ 25 และ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 เดือน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ส่วนระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าปริมาณ แอมิโลสของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่เก็บรักษาทั้ง 2 อุณหภูมิ ไม่มีความแตกต่างจากการเก็บรักษาในเดือนแรก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) (เพลงพิณ ศิวาพรรักษ์, 2541)

2.5.2 ความคงตัวของแป้งสุก (Gel Consistency)

แม้ปริมาณแอมิโลสจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพการหุงต้ม แต่ในข้าวที่มีแอมิโลสเท่ากันหรือใกล้เคียงกันอาจมีความแข็งของข้าวสุกแตกต่างกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของแป้งสุกมีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ทำให้แป้งสุกมีความแข็งและอ่อนตัวต่างกัน การทดสอบความคงตัวของแป้งสุกทำให้โดยการวัดระยะการไหลของแป้ง โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แป้งสุกแข็ง มีระยะการไหลของแป้งไม่เกิน 40 มิลลิเมตร แป้งสุกปานกลาง มีระยะการไหลของแป้ง 41 - 60 มิลลิเมตร และแป้งสุกอ่อนมีระยะการไหลของแป้งตั้งแต่ 61 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน ข้าวที่มีค่าความคงตัวของแป้งสุกอ่อนจะมีความแข็งกระด้างน้อยกว่าข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกแข็ง (งามชื่น คงเสรี, 2547) การแบ่งประเภทข้าวเจ้าตามความคงตัวของแป้งสุก แสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 การแบ่งประเภทข้าวเจ้าตามความคงตัวของแป้งสุก

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

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

2.5.3 อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization Temperature)

อุณหภูมิที่แป้งสุกนั้นแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการหุงต้ม โดยปกติข้าวจะใช้เวลาในการหุงต้ม 14 - 24 นาที หรือมากกว่านั้น โดยปกติการตรวจสอบอุณหภูมิแป้งสุกทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ทำได้ง่าย คือ การดูจากการสลายเมล็ดในสารละลายด่าง (Alkaline test) โดยแช่เมล็ดข้าวสารในสารละลายด่าง KOH ความเข้มข้น ร้อยละ 1.7 นาน 23 ชั่วโมง ประมาณระดับอุณหภูมิแป้งสุกได้จากการสลายตัวของเมล็ด นอกจากนี้ ยังสามารถหาอุณหภูมิแป้งสุกได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีการจัดระเบียบของแสงให้เป็น Polarized Light และมีฐานที่สามารถให้ความร้อนได้ โดยนำน้ำแป้งไปส่องกล้องและสังเกตการเรืองแสงของ Birefringence เมื่อให้ความร้อนไปเรื่อย ๆ การเรืองแสงของ Birefringence จะลดลงแสดงให้เห็นว่าแป้งเริ่มสุกสังเกตต่อไปจนกว่าร้อยละ 90 ของเม็ดแป้งสูญเสียสมบัติ Birefringence จึงอ่านอุณหภูมิซึ่งก็คือ Final Birefringence End Point Temperature นอกจากนี้ ยังสามารถหาค่าอุณหภูมิแป้งสุกได้จากการวัดสมบัติทางความหนืดโดยใช้เครื่อง Brabender Visco / Amylograph นอกจากอุณหภูมิแป้งสุกจะส่งผลต่ออัตราการหุงต้มแล้ว ในข้าวที่มีอุณหภูมิของแป้งสุกเท่ากัน หากมีความหนามากกว่าจะใช้เวลาในการหุงนานกว่า และปริมาณโปรตีนที่ผิวของข้าวบางพันธุ์ที่มีมากจะทำให้น้ำซึมผ่านได้ช้า ทำให้ใช้เวลาในการหุงต้มนานขึ้นอีก (งามชื่น คงเสรี, 2547) การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิแป้งสุก แสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิแป้งสุกและการประเมินด้วยค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหุงต้มข้าวสุก

อุณหภูมิแป้งสุก (องศาเซลเซียส)	ระดับ	ค่าการสลายเมล็ดในด่าง	ระยะเวลาหุงต้ม (นาที)
ต่ำกว่า 69	ต่ำ	6 - 7	12 - 16
70 - 74	ปานกลาง	4 - 5	17 - 24
มากกว่า 75	สูง	1 - 3	> 24

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

จากตัวอย่างพันธุ์ข้าวที่รัฐบาลส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นพันธุ์ที่รวบรวมจากเกษตรกรและนำมาคัดเลือกจนได้พันธุ์ดี หรือพันธุ์ที่ทางราชการพัฒนาขึ้นในภายหลัง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามคุณภาพข้าวสุก คือ กลุ่มข้าวนุ่มเหนียว (แอมิโลสต่ำ) กลุ่มข้าวขาวดาแห้ง (แอมิโลสปานกลาง) และกลุ่มข้าวเสาไห้ (แอมิโลสสูง) ดังแสดงในดาราง 6

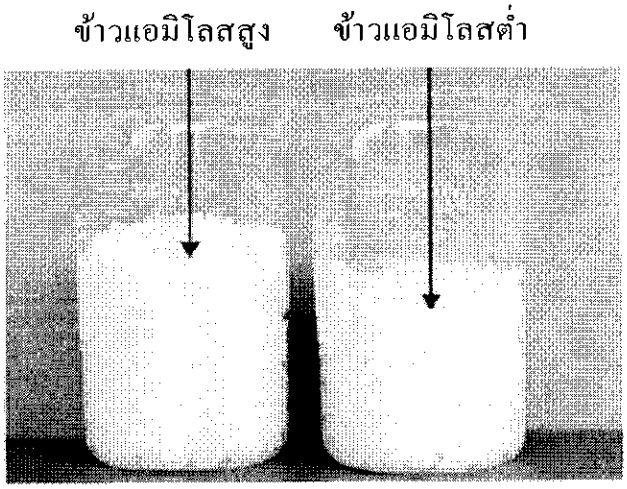
ตาราง 6 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพข้าวสุก

พันธุ์ข้าว	ความยาวเมล็ด (มม.)	แอมิโลส (ร้อยละ)	อุณหภูมิแป้งสุก	ความคงตัวของแป้งสุก
ข้าวสุกนุ่ม และเหนียว				
ขาวดอกมะลิ105*	7.2 - 7.6	13 - 18	ต่ำ	อ่อน
กข15*	7.5	14 - 17	ต่ำ	อ่อน
กข21	7.3	17 - 19	ต่ำ	อ่อน
ปทุมธานี1*	7.3 - 7.8	14 - 18	ต่ำ	อ่อน
ข้าวสุกอ่อน				
ขาวปากหม้อ	7.7	24 - 26	ปานกลาง	อ่อน
ขาวตาแห้ง17	7.5	24 - 28	ต่ำ - ปานกลาง	อ่อน
กข7	7.2	24- 28	ปานกลาง	อ่อน
กข23	7.3	22 - 26	ปานกลาง	อ่อน
สุพรรณบุรี60	7.5	20 - 26	ต่ำ	ปานกลาง
ข้าวสุกร่วนแข็ง (เสาไห้หรือข้าวเคี่ยว)				
เหลืองใหญ่148	7.3	30 - 31	ต่ำ	อ่อน - ปานกลาง
น้ำสะกุย19	7.6	30 - 31	ต่ำ	อ่อน - ปานกลาง
เหลืองประทิว123	7.4	28 - 32	ต่ำ - ปานกลาง	อ่อน - แข็ง
เล็บมือนาง111	7.6	29 - 32	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง - อ่อน
ปิ่นแก้ว56	7.5	29 - 31	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง
กข11	7.6	29 - 32	ต่ำ	แข็ง
กข13	6.9	30 - 33	ต่ำ - ปานกลาง	อ่อน
ปทุมธานี60*	7.5	27 - 32	ต่ำ	แข็ง
ชัยนาท1	7.4	27 - 30	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง
สุพรรณบุรี90	7.4	27 - 30	ต่ำ - ปานกลาง	แข็ง
สุพรรณบุรี1	7.3	29	ปานกลาง	อ่อน
* มีกลิ่นหอม				

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

2.5.4 การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation Ratio During Cooking)

ในระหว่างหุงต้ม เมล็ดข้าวมีการขยายตัวทุกด้าน โดยเฉพาะด้านยาว คุณลักษณะนี้เป็นคุณภาพพิเศษของข้าวบางพันธุ์ ซึ่งจะช่วยเสริมให้เมล็ดข้าวสุกขยายขนาดเพิ่มขึ้น และหากเมล็ดข้าวสุกเป็นข้าวที่ไม่เหนียวติดกัน การขยายขนาดเมล็ดข้าวสุกจะช่วยให้ข้าวขึ้นหม้อดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังช่วยให้ข้าวนุ่มมากขึ้น เพราะการขยายตัวทำให้เนื้อข้าวโปร่งขึ้น ไม่อัดกันแน่น การขยายปริมาตรเมื่อผ่านการหุงต้มของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน แสดงดังภาพ 6



ภาพ 6 การขยายปริมาตรเมื่อผ่านการหุงต้มของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน
ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2547)

2.5.5 กลิ่นหอม

ข้าวหอมของไทยมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว คือกลิ่นหอมของข้าว ซึ่งประกอบด้วยสารระเหยจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตาม สารระเหยที่ให้กลิ่นรสในข้าวที่สำคัญ คือ สาร 2 - แอซิติล - 1 - ไพโรลีน (2 - Acetyl - 1 - Pyroline) องค์ประกอบของกลิ่นรสในข้าวสุกเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วระหว่างการเก็บรักษา ข้าวบางพันธุ์ต้องบริโภคภายใน 1 เดือน เนื่องจากจะเกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งรับรู้ได้ภายในช่วงการเก็บรักษา 2 - 4 สัปดาห์ สารประกอบคาร์บอนิลโดยเฉพาะเฮกซานาล (Hexanal) มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเฮกซานาลสามารถเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องหรือจากการเปลี่ยนแปลงของกรดลิโนลิอิก นอกจากนี้ สารประกอบคาร์บอนิลยังเกิดได้จากการออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว และสารประกอบคาร์บอนิลนี้สามารถทำปฏิกิริยา

กับหมู่ซัลไฮดริลในโมเลกุลโปรตีนทำให้ปริมาณสารระเหยซัลเฟอร์ลดลง ทำให้ข้าวมีกลิ่นหอมลดลง (งามชื่น คงเสรี, 2547)

2.5.6 ปริมาณโปรตีน (Protein Content)

โปรตีนโดยเฉพาะที่อยู่ส่วนนอกของเมล็ด มีส่วนทำให้ระยะเวลาหุงต้มเมล็ดข้าวให้สุกนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนจะเป็นตัวขัดขวางการซึมของน้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าว นอกจากนี้ ข้าวโปรตีนสูงยังทำให้เมล็ดแกร่งขึ้นทำให้ขัดสีออกได้ยาก จึงอาจมีระดับการสีต่ำกว่า (มีรำเหลืออยู่มาก) และทำให้ข้าวสุกนั้นเหนียวน้อยลงและมีสีคล้ำ อย่างไรก็ตาม ข้าวมีความนุ่มลดลงเมื่อเมล็ดข้าวสารมีโปรตีนถึงร้อยละ 10 (งามชื่น คงเสรี, 2547)

2.5.7 ความเก่า - ใหม่ของข้าว

ภายหลังการเก็บเกี่ยว เมล็ดข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นโดยเฉพาะในเวลา 3 - 4 เดือนหลังเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบหลัก ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และสตาร์ช ผลจากการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลต่อคุณภาพการหุงต้ม ทำให้ข้าวเมื่อหุงแล้วมีความร่วนแข็งมากขึ้น หรือมีความเหนียว เกาะติดกันน้อยลง และมีผลให้ข้าวสุกขยายปริมาตรโดยรวมได้มากขึ้นหรือข้าวหุงขึ้นหม้อดีขึ้น ทั้งนี้เมล็ดข้าวจะดูดน้ำได้มากขึ้นโดยไม่แตกตัว น้ำข้าวจะใส อย่างไรก็ตามเมล็ดข้าวอาจจะต้องใช้เวลาต้มให้สุกนานขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้สีของข้าวจะคล้ำมากขึ้น (งามชื่น คงเสรี, 2547)

2.6 มาตรฐานข้าวหอมมะลิไทย

ข้าวหอมมะลิไทยนับได้ว่าเป็นที่รู้จักและเป็นที่นิยมบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากข้าวหอมมะลิไทยเป็นข้าวหอมหนึ่งเดียวของโลกที่มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติและมีคุณภาพข้าวสวยนุ่มเหนียวซึ่งแตกต่างจากข้าวทั่วไปที่มีคุณภาพข้าวสวยค่อนข้างร่วนแข็ง โดยมีกลิ่นคล้ายใบเตย สารที่ให้กลิ่นหอมในข้าวหอมมะลิ คือ 2 - แอซิติล - 1 - ไพโรลีน (2 - Acetyl - 1 - Pyroline) (งามชื่น คงเสรี, 2547) พันธุ์ข้าวที่นำมาผลิตข้าวหอม ได้แก่ พันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข15 ซึ่งเป็นข้าวชนิดแอมิโลสต่ำ ข้าวสุกจึงนุ่มและค่อนข้างเหนียว

จากความนิยมในข้าวหอมของไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตลาดโลก จึงเกิดปัญหาการนำข้าวชนิดอื่นที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับข้าวหอมทั้ง 2 พันธุ์นี้มาผสม ในปัจจุบันมีการนำข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มาผสมในข้าวหอมเนื่องจากมีรูปร่างใกล้เคียง และมีราคาถูกกว่า แต่มีคุณภาพทางเคมีที่เกี่ยวกับการหุงต้มต่างกัน การนำข้าว กข23 และชัยนาท1 มาผสมกับข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข15 นอกจากจะทำให้ข้าวสุกมีกลิ่นหอมลดลง ยังทำให้ความนุ่มของข้าวสุกลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข15 การหุงต้มควรเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้น โดยการผสมข้าวขาวดอกมะลิ105 กับ

ข้าวชัยนาท1 ปริมาณร้อยละ 30 จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำหุงต้มจึงจะได้ข้าวสวยที่มีความนุ่มใกล้เคียงกับพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 โดยมีกลิ่นหอมอ่อนลง

จากการศึกษาข้าวเจ้าพันธุ์ดีของรัฐบาลจำนวน 14 พันธุ์ ที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 14.9 - 28.7 และเก็บรักษาไว้ 4 - 8 เดือน พบว่า อัตราส่วนน้ำหุงต้มต่อข้าวที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส (R^2 = 0.665) แสดงว่าอัตราส่วนน้ำหุงต้มเพื่อให้ได้ข้าวสวยที่ดีมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส ในขณะเดียวกันมีปัจจัยอื่น ๆ เกี่ยวข้องด้วย เมื่อศึกษาการผสมข้าว กข23 (แอมิโลสปานกลาง) และชัยนาท1 (แอมิโลสสูง) กับข้าวขาวดอกมะลิ105 พบว่า สัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้นนอกจากจะทำให้ปริมาณแอมิโลสของข้าวขาวสูงขึ้นแล้ว ยังมีผลทำให้ข้าวสวยมีความนุ่มและความเหนียวลดลง (งามชื่น คงเสรี, 2547)

การผสมข้าวที่ขาดหลักเกณฑ์เหมาะสมจึงทำให้เกิดการร้องเรียนจากผู้บริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ ดังนั้นปัญหาการร้องเรียนเกิดจากความคาดหวังของผู้บริโภคที่ต้องการข้าวสวยที่มีความนุ่มและกลิ่นหอม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งออกข้าวหอมของไทยมักไม่มีคำแนะนำวิธีการหุงต้ม ผู้บริโภคจึงหุงต้มข้าวตามความเคยชินของตนเอง เมื่อข้าวที่ได้รับเป็นข้าวที่มีข้าวอื่นผสม ปริมาณน้ำในการหุงต้มที่เคยปฏิบัติย่อมไม่เพียงพอ ทำให้ข้าวสวยที่ต้มได้แข็งกว่าที่ควรเป็น คำร้องเรียนต่าง ๆ มักมาจากกลุ่มผู้บริโภคที่ชอบข้าวนุ่ม ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวทางกระทรวงพาณิชย์จึงได้กำหนดมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิขึ้น

ข้าวของประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานเพื่อการซื้อขายโดยกระทรวงพาณิชย์ ซึ่งมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าว เป็นระยะ ๆ โดยมีการปรับปรุงเมื่อปี พ.ศ. 2540 ตามมาตรฐานดังกล่าว มีการพิจารณาชนิดคุณภาพข้าวโดยยึดถือลักษณะทางคุณภาพที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาเป็นหลัก ได้แก่

1. พื้นข้าว คือ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก ขนาดต่าง ๆ ที่ผสมรวมอยู่ ข้าวเต็มเมล็ดเหล่านี้แบ่งตามความยาวของเมล็ดได้เป็น 4 ขนาด คือ เมล็ดยาวชั้น 1 มีขนาดยาวกว่า 7.0 มิลลิเมตร เมล็ดยาวชั้น 2 มีขนาด 6.6 - 7.0 มิลลิเมตร เมล็ดยาวชั้น 3 มีขนาด 6.2 - 6.6 มิลลิเมตร และเมล็ดสั้น มีขนาดสั้นกว่า 6.2 มิลลิเมตร โดยข้าวคุณภาพดีมีสัดส่วนของเมล็ดยาวชั้น 1 มาก เช่น ข้าวขาวร้อยละ 100 ชั้น 1 ต้องมีเมล็ดยาวชั้น 1 ตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไป การตรวจสอบพื้นข้าวตามมาตรฐานกำหนดให้สุ่มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก 100 เมล็ดและวัดความยาวด้วยไมโครมิเตอร์หรือเวอร์เนียร์ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร เพื่อแบ่งชั้นตามขนาดความยาวเมล็ด

2. ส่วนผสม คือ อัตราส่วนผสมของข้าวเต็มเมล็ต (ที่มีความยาวตั้งแต่ 9/10 ของเมล็ตที่ไม่มีส่วนใดหัก) ต้นข้าว และส่วนหักขนาดต่าง ๆ ทั้งนี้ต้นข้าวและข้าวหักยังมีขนาดแตกต่างกันตามเกรดของข้าว มาตรฐานกำหนดให้ตรวจสอบโดย นำส่วนของข้าว 100 กรัม มาคัดแยก

ข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักตามขนาดต่าง ๆ ตรวจสอบความยาวของข้าวหักและต้นข้าวตามที่กำหนดในข้าวแต่ละเกรด

3. สิ่งที่อาจมีปนได้ ซึ่งประกอบด้วย เมล็ดแดงหรือเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน การกำหนดในข้าวแต่ละเกรด เมล็ดเหลือง ท้องไข่ เมล็ดเสีย ข้าวเหนียว ข้าวเมล็ดดำ ข้าวเมล็ดดำบางส่วน ข้าวเมล็ตจุดดำเมล็ดลีบ ข้าวเปลือก มาตรฐานกำหนดให้ทำการตรวจสอบด้วยสายตาหรือตรวจพินิจจากข้าว 100 กรัม

4. ระดับการสี โดยมาตรฐานกำหนดไว้ 4 ระดับ คือ สีดีพิเศษ สีดี สีดีปานกลาง และสีธรรมดา มาตรฐานกำหนดให้ตรวจสอบโดยใช้วิธีตรวจพินิจด้วยสายตาจากผู้ชำนาญ

5. ความชื้น โดยกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 14 โดยตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความชื้น

นอกจากนั้นกระทรวงพาณิชย์ยังได้ได้ออกมาตรฐานสำหรับข้าวหอมมะลิของไทย ตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง กำหนดให้ข้าวหอมมะลิไทยเป็นสินค้ามาตรฐานและมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย พ.ศ. 2544 (เพิ่มเติมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2545 และฉบับที่ 3 พ.ศ. 2546) ซึ่งมาตรฐานนี้ กำหนดข้าวหอมมะลิไทย (THAI HOM MALI RICE) หมายถึง เฉพาะข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และพันธุ์ กข15 เท่านั้น โดยแบ่งชนิดและชั้นออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้าวขาว และข้าวกล้อง (ข้าวขาว แบ่งออกเป็น 8 ชนิด และข้าวกล้องแบ่งออกเป็น 6 ชนิด) โดยมีข้อกำหนดมาตรฐานที่สำคัญดังนี้

1) มีข้าวหอมมะลิไทยไม่น้อยกว่าร้อยละ 92.0

2) มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 14.0

3) เป็นข้าวเมล็ตยาวมีความขาว ท้องไข่น้อยโดยธรรมชาติ

4) ไม่มีแมลงที่ยังมีชีวิตอยู่

5) ขนาดเมล็ต ความยาวเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก ต้องไม่ต่ำกว่า 7.0 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความยาวเฉลี่ยต่อความกว้างเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก ต้องไม่ต่ำกว่า 3.2 : 1

6) มีคุณสมบัติทางเคมี คือ มีปริมาณแอมิโลสไม่ต่ำกว่าร้อยละ 13.0 และไม่เกินร้อยละ 18.0 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 14.0 และมีค่าการสลายเมล็ตข้าวในด่าง ระดับ 6 - 7

นอกจากนี้ข้าวหอมมะลิไทยแต่ละประเภทและชนิด ต้องมีส่วนผสมของเมล็ดข้าวและระดับการสีข้าวเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.7 แนวทางการตรวจสอบหาปริมาณข้าวเจ้าอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทยปน

ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการจัดให้มีการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าและการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย พ.ศ. 2546 แนะนำวิธีการตรวจสอบการปนเปื้อนของข้าวหอมมะลิโดยใช้วิธีการหาค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.7 โดยกำหนดเมล็ดข้าวที่มีระดับการสลายในด่าง ดั้งแต่ระดับ 1 (ลักษณะของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลงเลย) ถึงระดับ 5 (ผิวของเมล็ดข้าวปริทางขวางหรือทางยาวและมีแป้งกระจายออกมารอบเมล็ดเป็นบริเวณกว้าง) เป็นเมล็ดข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทย โดยเมล็ดข้าวหอมมะลิไทยจะต้องสลายตัวดลอดทั้งเมล็ด มีลักษณะเป็นเมือกขุ่นขาวหรือเป็นเมือกใส นอกจากนี้ ยังแนะนำให้ใช้วิธีตรวจสอบเมล็ดข้าวสุกที่ต้มในน้ำเดือด ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบเบื้องต้นอย่างง่าย ๆ เป็นแนวทางในการบ่งชี้ ทำได้โดยสุ่มข้าวขาวเต็มเมล็ดมา 100 เมล็ดใส่ในตะกร้า นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 17 นาที เมล็ดข้าวที่ยังไม่สุกสมบูรณ์ ให้ถือว่าเป็นข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทย นอกจากนี้ ยังมีรายงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบหาปริมาณข้าวชนิดอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทยปน ดังนี้

งามชื่น คงเสรี (2547) ทำการศึกษาพันธุ์ข้าวที่นำมาผสม คือ กข23 และ ชัยนาท1 นอกจากจะมีปริมาณแอมิโลสสูงกว่า และยังมีค่าการสลายเมล็ดในด่างต่างจากข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข15 อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังใช้การย้อมสีเมล็ดข้าวด้วยสารละลายไทมอลบลู และสารละลายไอโอดีน จากนั้นทำการคัดแยกเมล็ดข้าวเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 คือ เมล็ดข้าวติดสีชมพูอ่อนถึงไม่ติดสีเป็นข้าวแอมิโลสต่ำ หรือข้าวหอมมะลิ และส่วนที่ 2 คือ เมล็ดข้าวติดสีน้ำเงินหรือม่วงเข้มเป็นข้าวที่มีแอมิโลสสูงหรือข้าวชนิดข้าวสวยแข็ง นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบข้าวชนิดอื่นปนในข้าวหอมมะลิได้โดยวิธีการต้มเมล็ดข้าว 100 เมล็ด ในน้ำเดือด ปรับระยะเวลาต้มข้าวจนกว่าจะถึงระยะเวลาต้มที่เมล็ดข้าวสุกทั้ง 100 เมล็ด พิจารณาจากเมล็ดข้าวที่ยังไม่สุกสมบูรณ์ ให้ถือว่าเป็นข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทย ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ไม่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน แต่เป็นวิธีการตรวจสอบเบื้องต้นอย่างง่ายๆ เพื่อเป็นแนวทางในการบ่งชี้เท่านั้น

สิริรัตน์ จำปาเงิน (2547) ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer ; RVA) เพื่อทำนายการปลอมปนของข้าวหอมมะลิที่ระดับร้อยละ 0 - 30 ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยพบว่าค่าการคืนตัว สามารถทำนายการปลอมปนของชัยนาท1 และปทุมธานี1 ได้ถูกต้องร้อยละ 99.0 และ 96.0 ตามลำดับ และการวิเคราะห์ปัจจัยและการถดถอยเพื่อคาดเดาเปอร์เซ็นต์การปลอมปนข้าวหอมมะลิด้วยข้าวชัยนาท1 และข้าวปทุมธานี1 ได้ โดยมีความถูกต้องร้อยละ 96.0 และ 92.0 ตามลำดับ

ศศิวิมล มากมูล และคณะ (2553) ได้ศึกษาการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจสอบการปนของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ที่มีการปลอมปนระดับร้อยละ 8 16 และ 24 โดยน้ำหนัก มาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystem 6500

ช่วงความยาวคลื่น 1,100 - 2,500 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 บริสุทธิ์ และตัวอย่างข้าวที่ผสมด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ที่ระดับร้อยละ 8 16 และ 24 ตามลำดับ และกลุ่มที่ 2 คือ สเปกตรัมของข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ดังนั้นเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี จึงสามารถใช้ในการตรวจสอบการปนของข้าวได้

Sawidtree et al. (2011) ทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบการปลอมปนในข้าวหอมมะลิโดยใช้การตรวจสอบทางเคมีกายภาพและวิธีการย้อมเมล็ดข้าว (Dyed Grain Method) พบว่าวิธีการย้อมเมล็ดข้าวนั้นไม่สามารถแยกความแตกต่างของข้าวได้เมื่อมีการปลอมปนด้วยข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิ และเมื่อทำการตรวจสอบโดยใช้ลักษณะเนื้อสัมผัสและสมบัติการยุบตัว ด้วยเทคนิค Principal Component Analysis (PCA) โดยใช้ตัวอย่างข้าวชัยนาท1 และปทุมธานี1 ปนในข้าวหอมมะลิที่ระดับร้อยละ 5 8 10 15 20 25 และ 30 จากการวิเคราะห์ด้วย PCA พบว่า มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้าวชัยนาท1 และปทุมธานี1 เท่ากับร้อยละ 81.6 และร้อยละ 90.5 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ได้มีการใช้เทคโนโลยีลายพิมพ์ดีเอ็นเอ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพิสูจน์พันธุ์ข้าว และเพิ่มข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอของพันธุ์ข้าวลงในฐานข้อมูล เพื่อนำมาใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าวได้ โดยใช้เทคนิค Microsatellite PCR เป็นวิธีการขยายยีนในส่วนของโครโมโซมที่มีลำดับเบสซ้ำๆ กัน ตั้งแต่ 2 - 6 เบส และวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องวิเคราะห์ลำดับพันธุกรรม ABI Prism 310 หรือ 377 ทำให้ได้ลายพิมพ์ดีเอ็นเอของพันธุ์ข้าวไทยพันธุ์ใหม่ เพิ่มขึ้นอีก 18 พันธุ์ ประกอบด้วย ข้าวพันธุ์รับรอง 12 พันธุ์ ข้าวเจ๊กเชย 2 พันธุ์ ข้าวหอม 3 พันธุ์ และพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เป็นตัวเปรียบเทียบ จากข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอของพันธุ์ข้าวไทยทั้งหมดได้นำไปจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอของพันธุ์ข้าวไทยในรูปของภาพ Electropherogram และข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอที่แสดงในรูปของความยาว Allele มีหน่วยเป็น Basepair (bp) โดยสามารถนำข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการจำแนกความแตกต่างระหว่างพันธุ์ข้าว และการตรวจการปลอมปนในข้าวสารได้อย่างแม่นยำ (สุภาวดี ง้อเหรียญ และคณะ, 2550)

อย่างไรก็ตาม แต่ละวิธีมีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่นำไปใช้ ทั้งนี้แต่ละวิธีอาจมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยการเกิดสีกับไอโอดีนนั้นเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ ง่าย ไม่ซับซ้อนและรวดเร็ว นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบการปนของข้าวชนิดอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทย ซึ่งวิธีการหาปริมาณแอมิโลสด้วยการเกิดสีกับไอโอดีนนี้ เป็นวิธีที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานข้าวหอมมะลิไทย

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาการปลอมปนข้าวหอมมะลิพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยข้าวพันธุ์ปทุมธานี1 และ ชัยนาท1 ที่สัดส่วน 80 : 20 70 : 30 60 : 40 และ 50 : 50 จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพคติน โปรตีน ไขมัน เถ้า สี ขนาดเมล็ด และทำการประเมินด้านเนื้อสัมผัส ผลพบว่า ปริมาณแอมิโลสเท่านั้นที่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อมีการปลอมปนของข้าวชนิดอื่น (ศิริธร ศิริอมรพรรณ, 2548)

Mohammadkhani et al. (1998) ได้วิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสในธัญพืช *Triticum monococcum T. turgidum* และ *T. tauschii* โดยดัดแปลงวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ด้วยการใช้ตัวอย่าง 2 - 3 เมล็ด แช่ด้วยสารละลายแอมโมเนียเจือจาง ก่อนนำมาทำการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีการทำให้เกิดสีกับสารละลายไอโอดีน พบว่า วิธีการนี้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งละหลายตัวอย่าง

สุภารัตน์ ธนัตวรานนท์ (2548) ได้ประดิษฐ์เครื่องมืออย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสในข้าวสาร สำหรับใช้งานภาคสนาม โดยใช้หลักการทางสเปคโตรโฟโตเมตรี จากผลการทดสอบ ความแตกต่างของการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสโดยใช้ชุดทดสอบกับวิธีมาตรฐานที่ใช้เครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ ให้ผลการทดสอบไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) โดยชุดทดสอบนี้เหมาะสมที่จะใช้กับตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง (ร้อยละ 20 - 34)

2.8 ทฤษฎีระบบสีเบื้องต้น

ปัจจุบันมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในกระบวนการออกแบบทางการพิมพ์ นับตั้งแต่การสร้างภาพประกอบ การตกแต่งภาพถ่าย การกำหนดสีในโปรแกรม การออกแบบทางการพิมพ์ส่วนใหญ่สามารถกำหนดสีได้ ถ้าต้องการสีที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เช่นเดียวกับการกำหนดสีบนแผ่นอาร์ตเวิร์ก

2.8.1 ระบบสี RGB

ระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม จะเกิดแถบสีที่เรียกว่า สีรุ้ง (Spectrum) ซึ่งแยกสีตามที่สายตามองเห็นได้ 7 สี คือ แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม และม่วง ซึ่งเป็นพลังงานอยู่ในรูปของรังสีที่มีช่วงคลื่นที่สายตาสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงมีความถี่คลื่นสูงที่สุด คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วงเรียกว่าอุลตราไวโอเลต (Ultra Violet) และคลื่นแสงสีแดงมีความถี่คลื่นต่ำที่สุด คลื่นแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงเรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วงและต่ำกว่าสีแดงนั้นสายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับได้ RGB เป็นระบบที่ใช้ทั่วไปในจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำงานได้ดี และมองดูเป็นธรรมชาติใกล้เคียงกับสีที่ตามองเห็นปกติ ประกอบด้วย 3 สี คือสีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) แต่ละสีมีค่าความแตกต่างกัน 256 สี (ระดับ 0 - 255) สามารถผสมทั้ง 3 สีเป็นสีต่างๆ ได้ถึง 16.7 ล้านสี ซึ่งสีที่ได้จากการผสมสี

ขึ้นอยู่กับความเข้มของสี โดยถ้าสีมีความเข้มมาก เมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดเป็นสีขาว จึงเรียกระบบสีนี้ว่าแบบ additive หรือการผสมสีแบบบวก

2.8.2 ระบบสี CMYK

ระบบสี CMYK เป็นระบบสีชนิดที่เป็นวัตถุ คือ สีแดง เหลือง และน้ำเงิน แม่สีในระบบ CMYK เกิดจากการผสมกันของแม่สีของแสง หรือระบบสี RGB คือ

แสงสีน้ำเงิน	+	แสงสีเขียว	=	สีฟ้า (Cyan)
แสงสีน้ำเงิน	+	แสงสีแดง	=	สีแดง (Magenta)
แสงสีแดง	+	แสงสีเขียว	=	สีเหลือง (Yellow)

สีฟ้า (Cyan) สีแดง (Magenta) และสีเหลือง (Yellow) นี้นำมาใช้ในระบบการพิมพ์ และมีการเพิ่มเติมสีดำเข้าไป เพื่อให้มีน้ำหนักเข้มขึ้นอีก เมื่อรวมสีดำ (Black = K) เข้าไป จึงมี 4 สี โดยทั่วไปจึงเรียกระบบการพิมพ์นี้ว่า ระบบการพิมพ์ 4 สี (CMYK)

ระบบการพิมพ์ 4 สี (CMYK) เป็นการพิมพ์ภาพในระบบที่ทันสมัยที่สุด และได้ภาพใกล้เคียงกับภาพถ่ายมากที่สุด โดยทำการพิมพ์ทีละสีจากสีเหลือง สีแดง สีน้ำเงิน และสีดำ การที่เรามองเห็นภาพมีสีต่าง ๆ นอกเหนือจาก 4 สีนี้เกิดจากการผสมของเม็ดสีเหล่านี้ในปริมาณต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละของปริมาณเม็ดสี ซึ่งกำหนดเป็นร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 100 เมื่อนำมาผสมกันจะเกิดสีเป็นสีดำ แต่จะไม่ดำสนิท เนื่องจากหมึกพิมพ์มีความไม่บริสุทธิ์ จึงเป็นการผสมสีแบบลบ (Subtractive)

2.8.3 ระบบสีแบบ L*a*b*

ระบบสีแบบ L*a*b* เป็นค่าสีที่ถูกกำหนดขึ้นโดย CIE (Commission Internationale d' Eclarirage) เพื่อให้เป็นสีมาตรฐานกลางของการวัดสีทุกรูปแบบ ครอบคลุมทุกสีใน RGB และ CMYK และใช้ได้กับสีที่เกิดจากอุปกรณ์ทุกอย่างไม่ว่าจะเป็นจอคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ เครื่องสแกนและอื่นๆ ส่วนประกอบของโหมดสีนี้ได้แก่ เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่

แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า - L* แสดงถึงสีดำจนไปถึง - L* แสดงถึงสีขาว

แกน a* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว - a* ไปจนถึงแดง + a*

แกน b* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน - b* ไปจนถึงเหลือง + b*

2.9 ชุดแถบสี

การใช้เครื่องมือวัดความเข้มสีของสารละลาย เพื่อตรวจสอบปริมาณแอมิโลสนั้น โดยทั่วไปใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีราคาแพงจึงไม่เหมาะสมที่กลุ่มผู้ประกอบการรายย่อยจะนำไปใช้ การพัฒนาอุปกรณ์วัดความเข้มสีที่มีราคาไม่แพงและสะดวกในการใช้งาน คือ แผ่นเทียบสี ซึ่งเป็นชุดแถบสีที่พัฒนาขึ้นจากวิธีในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการทดสอบหาปริมาณแอมิโลสในข้าว ทำให้สามารถใช้วิเคราะห์ในภาคสนามได้อย่างง่ายและรวดเร็ว ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ลดขั้นตอนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ สามารถใช้ในการตรวจหาปริมาณแอมิโลสได้ ซึ่งให้ผลในทิศทางเดียวกับการตรวจหาปริมาณแอมิโลสโดยวิธีทางสเปคโตรโฟโตเมตรี ซึ่งเป็นอีกทางเลือกที่จำเป็นต่อผู้ผลิตที่ต้องมีการทดสอบผลิตภัณฑ์

หลักการของชุดแถบสีนี้ใช้วิธีการเทียบสีของสารละลายตัวอย่างกับแถบสีมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีงานวิจัยที่มีการพัฒนามาก่อนหน้านี้แล้วในระดับหนึ่ง ดังนี้

Beasley (1993) ได้พัฒนาชุดทดสอบหาสารพิริมิฟอสเฟสเมทิลในเมล็ดพืชในกลุ่มออกาโนฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืช โดยใช้หลักการปฏิกิริยาเกิดสีสมบูรณ์เมื่อเกิดการเปลี่ยนเป็นกรด โดยใช้เอนไซม์และเทียบระดับความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืช ในตัวอย่างจากแผ่นเทียบสี โดยให้ระดับสีเขียวอ่อนไปยังสีเขียวเข้ม ผลการทดสอบขีดจำกัดของการตรวจหาของชุดทดสอบ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณพิริมิฟอสเฟสเมทิลในเมล็ดพืชพบที่ช่วง 0.5 - 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดของการตรวจหาในตัวอย่างกากเมล็ดพืช 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Hernandez et al. (2004) ได้ทำการพัฒนาวิธีการประเมินคุณภาพสีของพริกแดง โดยการสร้างแถบสีสำหรับสีมาตรฐานของพริกแดง โดยการวัดค่าสีแดง (a*) ในระบบ CIELAB กับตัวอย่างจริง จากนั้นนำมาสร้างเป็นแถบสี ซึ่งสามารถแบ่งค่าสีแดงได้ 6 ระดับตั้งแต่ 0 ถึง 5 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าสีที่ได้จากเครื่องวัดสีและแถบสีมาตรฐานที่สร้างขึ้น พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของพริกแดงได้

Witt et al. (2005) ได้พัฒนาแถบสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับเกษตรกร โดยการนำใบข้าวมาเทียบกับแถบสีที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นแถบสีพลาสติกโดยใช้สีของใบข้าวจริง มีช่วงสีตั้งแต่สีเขียวเหลืองจนสีเขียวเข้ม ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่จะต้องใช้วิธีการนี้สามารถทำได้ทันที ลดการใช้ปุ๋ยโดยไม่จำเป็น และช่วยเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น

Avaro et al. (2009) ได้พัฒนาวิธีการตรวจสอบปริมาณแอมิโลสในข้าว ด้วยการพัฒนาเป็นแถบสีสำหรับตรวจสอบปริมาณแอมิโลส โดยอาศัยหลักการทำให้เกิดสีกับไอโอดีนแทนการใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้แถบสี 5 แถบคือ สีเหลืองแดง สีน้ำตาลมะกอก สีน้ำตาลเขียวเข้ม สีเขียวน้ำเงิน และสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งสามารถแบ่งปริมาณแอมิโลสได้ 3 ช่วงคือ

ช่วงปริมาณแอมิโลสต่ำ ปานกลาง และสูง โดยข้าวพันธุ์ Phka Mlis Koshihikari Phka Rumchang Yukihikari และ Phka Khgnei มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 15 - 22 สารละลายมีสีเขียวมะกอก ส่วนข้าวพันธุ์ Rumpe Sarika Santepheap3 Tchibanga NEKO5 - 315bH9 NEKO5 - 322H5 NERICA1 Popoul และ NEKO5 - 311cH8 มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าร้อยละ 23 สารละลายมีสีเขียวน้ำเงิน และจากการใช้แถบสีในการตรวจสอบปริมาณแอมิโลส พบว่า สามารถใช้แถบสีในการคาดคะเนปริมาณแอมิโลสของข้าวได้รวดเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายน้อยอีกด้วย

Dawn (2009) ได้พัฒนาชุดแถบสีสำหรับหาปริมาณ Pyruvic Acid อย่างง่าย ในหัวหอม (Sweet Onions) เพื่อใช้แทนเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้การเปลี่ยนแปลงสีของ DNPH Indicator หลังจากทำปฏิกิริยากับ Pyruvic Acid จากนั้นนำสารละลายมาเทียบกับชุดแถบสีมาตรฐาน จากการทดสอบ พบว่าชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องร้อยละ 98 ± 0.78 นอกจากนี้ ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ได้อีกด้วย

Michael et al. (2011) ได้พัฒนาวิธีการตรวจสอบปริมาณแอมิโลสในข้าว โดยทำการวัดค่าสีของสารละลายตัวอย่างจากการทำให้เกิดสีกับสารละลายไอโอดีน ในระบบ L* a* b* ร่วมกับการใช้ Regression Model พบว่าค่าสี L* a* b* มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลสในตัวอย่าง โดยมีค่า R^2 = 0.99 และจากการเปลี่ยนค่าสี L* a* b* เป็น RGB เพื่อสร้างเป็นแถบสีแอมิโลส พบว่าวิธีการใช้แถบสีสำหรับตรวจสอบปริมาณแอมิโลสสามารถช่วยตรวจสอบเบื้องต้นในประมาณค่าปริมาณแอมิโลสในข้าวได้ ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้สามารถใช้งานได้รวดเร็ว แม่นยำ และมีราคาถูก โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างอื่น ๆ ต่อไปได้

พิชญา โล้วิชากรดิกุล และคณะ (2545) ได้พัฒนาชุดตรวจสอบโปรตีนสำหรับตรวจวิเคราะห์ความสะอาดและประสิทธิภาพการล้างทำความสะอาดพื้นผิวสัมผัสอาหาร ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย และให้ผลรวดเร็ว จากการพัฒนาวิธีวิเคราะห์โปรตีน พบว่า วิธีปรับปรุง Biuret เป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นชุดตรวจสอบ โดยระดับสีของปฏิกิริยาแตกต่างกันชัดเจนที่สุด เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 10 นาที ซึ่งผลของระดับสีจากการสังเกตด้วยสายตาและเทียบกับค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 562 นาโนเมตร สามารถแบ่งได้ 4 ระดับ โดยเปลี่ยนจากสีเขียว (ระดับ 1 สะอาด) ไปถึงสีม่วง (ระดับ 4 สกปรก) และเมื่อนำชุดทดสอบโปรตีนไปใช้ตรวจสอบความสะอาดของพื้นผิวสัมผัสอาหารในโรงงานไก่สดแช่เยือกแข็ง พบว่าผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันกับชุดทดสอบทางการค้า โดยระดับความสะอาดมีความสัมพันธ์กับค่าดูดกลืนแสงและจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด

สุรพล จัตุพร และคณะ (2547) ทำการทดลองใช้แผ่นเทียบสีใบควบคู่ไปกับคลอโรฟิลล์มิเตอร์ เพื่อจัดการปุ๋ยไนโตรเจนให้แก่ข้าว 2 พันธุ์ คือ สุพรรณบุรี1 และปทุมธานี1 ในนาดินเหนียวชุดสระบุรี โดยเริ่มวัดสีใบตั้งแต่ข้าวมีอายุ 21 - 69 วัน รวม 13 ครั้ง พบว่า ความเข้มของสีใบข้าวที่วัดได้จากอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด มีความสัมพันธ์กันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 99 และสัมพันธ์กับอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่เพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำแผ่นเทียบสีใบข้าวที่ใช้ง่ายและมีราคาถูกใช้แทนคลอโรฟิลล์มิเตอร์ที่มีราคาแพง

สุรพล จัตุพร และคณะ (2551) ทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเทียบสีใบข้าวเพื่อจัดการปุ๋ยไนโตรเจนในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี1 ในนาเกษตรกร จ.สุพรรณบุรี ทั้งฤดูนาปรังและนาปี 2546 2 กรรมวิธีทดสอบ เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยของเกษตรกร พบว่า กรรมวิธีการใช้แผ่นเทียบสีใบข้าวในการตัดสินใจใช้ปุ๋ยไนโตรเจนให้ผลตรงตามความต้องการปุ๋ยจริงของต้นข้าวซึ่งสอดคล้องกับความอุดมสมบูรณ์ของดินทั้ง 2 กรรมวิธี จึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและมีแนวโน้มให้ผลผลิตข้าวเฉลี่ยสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยของเกษตรกรและประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนสูงกว่า ดังนั้น การใช้แผ่นเทียบสีจัดการปุ๋ยไนโตรเจนจะทำให้เกษตรกรทำนาเขตชลประทาน สามารถลดการใช้ปุ๋ยยูเรียในการผลิตข้าวได้มากทั้งปริมาณและมูลค่า

นภัสวรรณ สุนทร (2553) ได้พัฒนาชุดตรวจสอบความเป็นกรด - ด่างจากวัสดุธรรมชาติสำหรับน้ำทิ้ง โดยใช้การเทียบสีของสารละลายกับแถบสี pH มาตรฐาน พบว่า ดอกอัญชัน สามารถให้สีกับสารละลายบัฟเฟอร์ชัดเจน สามารถแบ่งช่วงสีของสารละลายบัฟเฟอร์ได้เป็น ช่วงกรดแก่ ช่วงกรดอ่อน ช่วงมาตรฐานน้ำทิ้ง และช่วงด่างได้ และเมื่อทดสอบชุดตรวจสอบความเป็นกรด - ด่างกับน้ำทิ้งในระดับภาคสนาม พบว่าชุดตรวจสอบค่าความเป็นกรด - ด่าง สามารถใช้ตรวจสอบค่าความเป็นกรด - ด่างได้เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง pH Meter และชุดตรวจสอบความเป็นกรด - ด่างของบริษัทเอกชน

ศุภกฤษ์ อินทยนต์ (2553) ได้พัฒนาแถบสีมาตรฐานสำหรับชุดทดสอบการหาปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศ โดยการเทียบสีสารละลายกับแถบสีมาตรฐาน เพื่อทราบปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศ จากการทดสอบพบว่า ค่าที่อ่านได้จากแถบสีมาตรฐานมีความถูกต้องร้อยละ 68 ± 10

ธีรพงษ์ เทพกรณ์ (2554) ได้พัฒนาชุดทดสอบโพลิฟีนอลทั้งหมดในชา ซึ่งสามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อน โดยใช้หลักการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin - Ciocalteu Assay จากนั้นนำมาเปรียบเทียบความเข้มของสีกับแถบสีมาตรฐาน พบว่า ช่วงของการทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 2.5 - 25 สามารถเก็บชุดทดสอบได้นาน อย่างน้อย 12 เดือนที่อุณหภูมิห้อง