บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าว มีความสำคัญต่อมนุษย์ และสัตว์มาก ประชากรกว่าครึ่งโลกบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะชาวเอเชีย ดังนั้นข้าวจึงปลูกมากในเอเชีย และใช้บริโภคในเอเชียประมาณร้อยละ 90 ในส่วนของประเทศไทยเอง ข้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุด และเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิตคนไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

2.1.1 ชนิดของข้าว

ข้าว หมายถึง เมล็ดของพืชจำพวกหญ้าในวงศ์ Gramineae เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุสั้น มีใบชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว มีรากเป็นระบบรากฝอย สามารถเจริญเติบโตได้ในลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศที่แตกต่างกันทั้งในเขตร้อน และเขตอบอุ่น ตั้งแต่พื้นที่น้ำท่วมสูงไปจนถึงพื้นที่สูงตามไหล่เขา ทำให้เกิดความหลากหลายของข้าวชนิดต่าง ๆ ที่แพร่กระจายไปทั่วโลกอย่างไรก็ตามข้าวที่ปลูกเพื่อการบริโภคในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้าวแอฟริกาและข้าวเอเชีย นอกเหนือจากข้าวปลูกทั้งสองชนิดนี้แล้วที่เหลือจัดเป็นข้าวป่า (wild rice) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ข้าวแอฟริกา (*oryzaglaberrima Steud*) แพร่กระจายอยู่เฉพาะบริเวณเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น สันนิษฐานว่าข้าวแอฟริกาอาจเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อประมาณ 1,500 ปีก่อนคริสตศักราช

ข้าวเอเชีย (*oryza sativa*) เป็นข้าวลูกผสมจากข้าวป่าชนิดต่าง ๆ มีถิ่นกำเนิดบริเวณประเทศอินเดีย บังคลาเทศ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อินเดีย-ตอนเหนือของบังคลาเทศ บริเวณดินแดนสามเหลี่ยมระหว่างพม่า ไทย ลาว เวียดนาม และจีน-ตอนใต้ ข้าวเอเชียแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

1) Japonica หรือ Senica เป็นข้าวที่ปลูกในประเทศจีนตอนเหนือ และตะวันออก ญี่ปุ่น เกาหลี และประเทศอื่น ๆ ที่อยู่ในเขตอบอุ่น เมล็ดมีลักษณะอ้วน ป้อมรวงแน่น ใบสีเขียวเข้ม จัดเป็นข้าวเมล็ดสั้น

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

3) Javanica เป็นข้าวที่พบมากในหมู่เกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย มีปลูกบ้างเล็กน้อยในประเทศฟิลิปปินส์ อินเดีย และศรีลังกา ข้าวชนิดนี้จะมีลำต้นแข็งแรง รวงยาว เมล็ดมีหางใบมีสีเขียวอ่อน ข้าวกลุ่มนี้ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดขนาดความยาวของข้าวในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ เมล็ดยาว (ยาวกว่า 6.6 มิลลิเมตร) เมล็ดกลาง (ระหว่าง 5.5 ถึง 6.6 มิลลิเมตร) และเมล็ดสั้น (สั้นกว่า 5.5 มิลลิเมตร) ในบางครั้งข้าวที่มีเมล็ดยาวกว่า 7.5 มิลลิเมตร ถูกเรียกว่า เมล็ดยาวพิเศษ

อรอนงค์ นัยวิกุล (2550) อธิบายว่าการแบ่งชนิดของข้าวสามารถแบ่งได้หลายแบบ ขึ้นกับแนวทางการแบ่ง เช่น แบ่งตามประเภทเนื้อแข็งในเมล็ด พื้นที่เพาะปลูก การเก็บเกี่ยว ฯลฯ

ชนิดของข้าว แบ่งตามประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ดข้าวสาร สามารถแบ่งได้เป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งมีต้น และลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่าง แตกต่างกันที่ประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ด เมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วย แป้งอะไมโลส (amylose) ประมาณร้อยละ 15 ถึง 30 หรือบางพันธุ์อยู่ในช่วงมากกว่าร้อยละ 10 ส่วนเมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วย อะไมโล-เพกติน (amylopectin) เป็นส่วนใหญ่ และมีอะไมโลสเพียงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 5 ถึง 7 หรือบางพันธุ์น้อยกว่าร้อยละ 1

ชนิดของข้าว หากแบ่งตามสภาพพื้นที่เพาะปลูกจะแบ่งได้เป็นข้าวไร่ (upland rice) เป็นข้าวที่ปลูกได้ทั้งบนที่ราบ และที่ลาดชันไม่ต้องทำคันนาเก็บกักน้ำ นิยมปลูกกันมากในบริเวณที่ราบสูงตามไหล่เขาทางภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ คิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 10 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ ข้าวนาสวนหรือนาดำ (lowland rice) เป็นข้าวที่ปลูกในที่ลุ่มทั่ว ๆ ไปในสภาพที่มีน้ำหล่อเลี้ยงต้นข้าวตั้งแต่ปลูกจนกระทั่งก่อนเก็บเกี่ยว โดยที่สามารถรักษาระดับน้ำได้ และระดับน้ำต้องไม่สูงเกิน 1 เมตร ข้าวนาสวนนิยมปลูกกันมากแทบทุกภาคของประเทศคิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูก ประมาณร้อยละ 80 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ ข้าวขึ้นน้ำหรือข้าวนาเมือง (floating rice) เป็นข้าวที่ปลูกในแหล่งที่ไม่สามารถรักษาระดับน้ำได้ บางครั้งระดับน้ำในบริเวณที่ปลูกอาจสูงกว่า 1 เมตร ต้องใช้ข้าวพันธุ์พิเศษที่เรียกว่า ข้าวลอยหรือข้าว-ฟ่างลอย ส่วนมากปลูกแถบจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี ลพบุรี พิจิตร อ่างทอง ชัยนาท และสิงห์บุรี คิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 10 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ

ชนิดของข้าวยังสามารถแบ่งตามอายุการเก็บเกี่ยว โดยแบ่งเป็นข้าวเบา ข้าวกลาง และข้าวหนัก ข้าวเบามีอายุการเก็บเกี่ยว 90 ถึง 100 วัน ข้าวกลางมีอายุการเก็บเกี่ยว 100 ถึง 120 วัน และข้าวหนักมีอายุการเก็บเกี่ยว 120 วันขึ้นไป อายุการเก็บเกี่ยวนับตั้งแต่วันเพาะกล้าหรือหว่านข้าวในนาจนเก็บเกี่ยว

ชนิดของข้าว แบ่งตามลักษณะความไวต่อช่วงแสง โดยข้าวที่ไวต่อช่วงแสงจะมีอายุการเก็บเกี่ยวที่ไม่แน่นอน คือ ไม่เป็นไปตามอายุของต้นข้าว เพราะจะออกดอกในช่วงเดือนที่

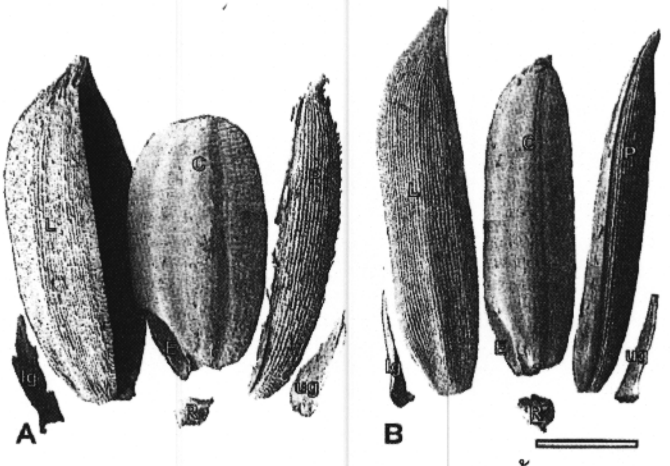
มีความยาวของกลางวันสั้นกว่ากลางคืน ในประเทศไทยช่วงดังกล่าวเริ่มเดือนตุลาคม ดังนั้น ข้าวกลุ่มนี้ต้องปลูกในฤดูนาปี (ฤดูฝน) เท่านั้น ส่วนข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสงสามารถปลูกได้ทุกฤดูกาล ข้าวขาวมะลิ 105 เป็นข้าวที่ไวต่อช่วงแสง ในขณะที่ข้าวปทุมธานี เป็นข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง

การแบ่งชนิดข้าวตามรูปร่างของเมล็ดข้าวสาร แบ่งได้เป็นข้าวเมล็ดสั้น (short grain) ความยาวของเมล็ดไม่เกิน 5.50 มิลลิเมตร ข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (medium grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 5.51 ถึง 6.60 มิลลิเมตร ข้าวเมล็ดยาว (long grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 6.61 ถึง 7.50 มิลลิเมตร และข้าวเมล็ดยาวมาก (extra-long grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 7.51 มิลลิเมตรขึ้นไป

นอกจากนั้นแล้ว ยังสามารถแบ่งตามฤดูปลูก ได้แก่ ข้าวนาปีหรือข้าวนาน้ำฝน คือ ข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และเก็บเกี่ยวเสร็จสิ้นล่าสุดไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์ ข้าวนาปรัง คือ ข้าวที่ปลูกนอกฤดูการทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม ในบางท้องที่จะเก็บเกี่ยวอย่างช้าที่สุดไม่เกินเดือนเมษายน นิยมปลูกในท้องที่ที่มีการชลประทานดี เช่น ในภาคกลาง

2.1.2 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว เก็บเกี่ยวในรูปของข้าวเปลือก หรือในทางพฤกษศาสตร์เรียก spikelet เมล็ดข้าวจากพันธุ์ต่าง ๆ จะมีรูปร่างของเมล็ดข้าวแตกต่างกันออกไป แต่โครงสร้างหลักจะเหมือนกัน ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างหลักของเมล็ดข้าว



ภาพที่ 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, Wood, Juliano & Bechtel (2004)

ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนของเมล็ดข้าว คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และ (2) ส่วนเนื้อผลหรือผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือ ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice)

1) แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขน หาง ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel)

1.1) เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเมล็ดเนื้อผลด้านท้อง (dorsal side) จะมีขนาดใหญ่ อาจมีหางหรือไม่มีก็ได้ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะมีรอยเส้น (nerves) ตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้านในลักษณะขบอยู่ด้านบนอย่างแน่น

1.2) เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลัง (ventral side) มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาว ทำให้เปลือกทั้ง 2 ติดกันสนิท บนผิวเปลือกเล็กจะเป็นรอยเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 3 เส้น รอยเส้นบนเปลือกใหญ่ และเปลือกเล็ก อาจทำให้ข้าวกล้องเป็นรอยเส้นตามไปด้วยในข้าวบางพันธุ์ ถึงแม้จะผ่านกระบวนการขัดขาว (polishing) แล้วยังอาจมีรอยเส้นค้างอยู่บนข้าวสาร เรียกว่า สาแหรกข้าว

1.3) ขน จะขึ้นบนเปลือกใหญ่ และเปลือกเล็กเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบางพันธุ์ที่ไม่มีขนแต่เป็นส่วนน้อย ขนนี้คือ ส่วนของเซลล์ผิวนอก (epidermal cell) ที่เจริญกลายเป็นขน เพื่อทำหน้าที่ลดการระเหยน้ำ ป้องกันอันตรายของเมล็ดจากสภาวะภายนอก และเพื่อกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติโดยช่วยให้เมล็ดติดไปกับคน สัตว์ หรือสิ่งของต่าง ๆ ที่มีโอกาสสัมผัสเมล็ดจนทำให้เมล็ดหลุดติดไป

1.4) หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่ยาวออกมาเกินตำแหน่งยอดดอก (apiculus) ในบางพันธุ์อาจสั้นหรือยาวหรือไม่มี 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 ไมครอนห่อหุ้มเมล็ดอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีและรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส 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 อยู่ถัดจากเยื่อผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาวเรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมัน และสารสีเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

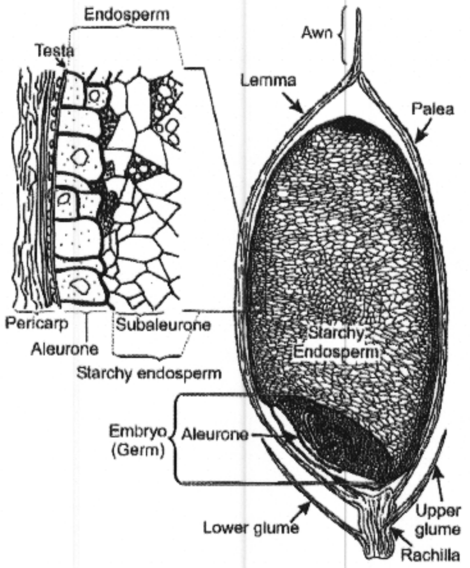
2.3) นิวเซลลัส (necellus) เป็นเซลล์ที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด พันธะระหว่างนิวเซลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกออกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8 ถึง 2.5 ไมครอน

2.4) เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1 ถึง 7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้ม-ด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างไปตามพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ดป้อมสั้นจะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด 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 และเซลลูโลสประกอบอยู่

2.5) คัพภะ หรือ เชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน ต้นอ่อน เยื่อหุ้มรากอ่อน เยื่อหุ้มต้นอ่อน ท่อน้ำท่ออาหาร และใบเลี้ยงซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะ เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อนจึงอุดมไปด้วยโปรตีน และไขมันในส่วนต่าง ๆ

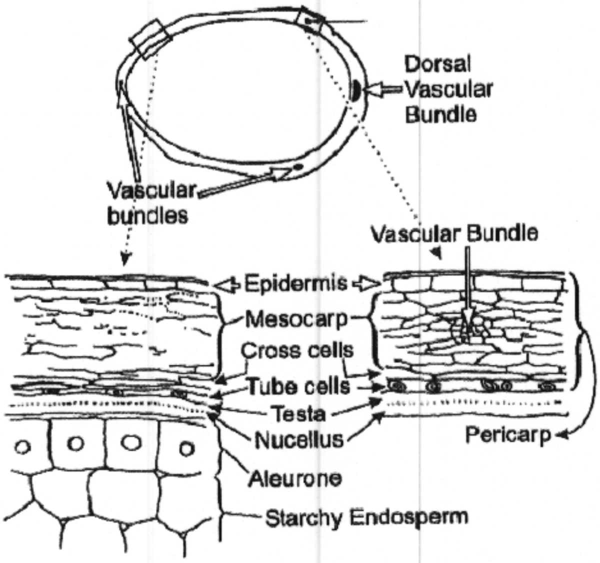
2.6) เนื้อเมล็ด หรือ เนื้อข้าว (endosperm) มีมากที่สุดในเมล็ดข้าว (ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นซับแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้น อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm) ในชั้นซับแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ใน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1 ถึง 2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5 ถึง 0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกัน (ขนาด 2 ถึง 3.5 ไมครอน) แต่ในส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนในลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช อยู่ภายในเซลล์พาเรนไคมา ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรี หรือสี่เหลี่ยม เข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้ายนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ภาพที่ 2 แสดงภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว และส่วนประกอบของเมล็ด และภาพที่ 3 แสดงให้เห็นโครงสร้างของผนังด้านนอกของเมล็ด



ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว และส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา : Champagne, Wood, Juliano & Bechtel (2004)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของผนังด้านนอกของเมล็ดข้าว

ที่มา : Champagne, Wood, Juliano & Bechtel (2004)

เมื่อเปรียบเทียบส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวจากข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และคัพภะ จะมีสัดส่วนโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนโครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ด	สัดส่วนโดยเฉลี่ย (ร้อยละ)
ข้าวเปลือก	100
แกลบ	(20)
ข้าวกล้อง	(80)
ข้าวกล้อง	100
เยื่อหุ้มผล	(1.5)
เยื่อหุ้มเมล็ด	(5)
คัพภะ	(3)
เนื้อเมล็ด	(90.5)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Juliano (1993)

องค์ประกอบต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ไม่เฉพาะแต่ในส่วนเนื้อข้าวหรือเนื้อเมล็ด ซึ่งใช้ประโยชน์ในรูปของข้าวสาร ข้าวท่อน (ข้าวหัก) ข้าวกล้อง และสามารถนำไปแปรรูปเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารหลากหลายนั่นคือนำไปผลิตเป็นแป้งข้าว ส่วนของแกลบสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล รำข้าว และคัพภะสามารถนำมาสกัดเป็นน้ำมัน เป็นต้น

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขึ้นกับพันธุ์ข้าว สภาวะการปลูก การเก็บเกี่ยว การแปรรูป กระบวนการสีข้าวเป็นข้าวสารหรือข้าวขัดขาวจะทำให้คัพภะหลุดไป และขัดเอาชั้นรำข้าวออก (ประกอบด้วย perricarp, tegmen, nucellus และ aleurone) การขัดมันจะทำให้ชั้น subaleurone ถูกกำจัดออกจนเหลือแต่ endosperm ตารางที่ 2 ถึง 4 แสดงองค์ประกอบโดยประมาณ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวในส่วนต่าง ๆ (หน่วยเป็นร้อยละ)

องค์ประกอบ	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	แกลบ	รำ	คัพภะ
โปรตีน (N x 5.95)	5.8-7.7	4.3-18.2	4.5-10.5	2.0 - 2.8	11.3-14.9	14.1-20.6
Crude fat	1.2-2.3	1.6-2.8	0.3-0.5	0.3-0.8	15.0-19.7	16.6-20.5
Crude fiber	7.2-10.4	0.6-1.0	0.2-0.5	34.5-45.9	7.0-11.4	2.4-3.5
Crude ash	2.9-5.2	1.0-1.5	0.3-0.8	13.2-21.0	6.6-9.9	4.8-8.7
Available carbohydrates	64-73	73-87	77-89	22-34	34-62	34-41
Starch	53.4	66.4	77.6	1.5	13.8	2.1
Neutral detergent fiber	16.4-19.2	2.9-3.9	0.7-2.3	65.5-74.0	23.7-28.6	13.1
Pentosans	3.7-5.3	1.2-2.1	0.5-1.4	17.7, 18.4	7.0, 8.3	4.9, 6.4
Hemiculluloses	-	-	0.1	2.9, 11.8	9.5-16.9	9.7
Celluloses	-	-	-	31.4-36.3	5.9-9.0	2.7
1,3:1,4 βglucans	-	0.11	0.11	-	-	-
Polyuronic acid	0.6	-	-	-	1.2	0.4
Free sugars	0.5-1.2	0.7-1.3	0.22-0.45	0.6	5.5-6.9	8.0-12
Lignin	3.4	-	0.1	9.5-18.4	2.8-3.9	0.7-4.1
พลังงาน (kJ/g)	15.8	15.2-16.1	14.6-15.6	11.1-13.9	16.7-19.9	-

ที่มา: ดัดแปลงจาก Champagne, Wood, Juliano & Bechtel (2004)

ตารางที่ 3 วิตามินในข้าวส่วนต่าง ๆ (หน่วยเป็น μg/g ที่ความชื้นร้อยละ 14)

วิตามิน	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	แกลบ	รำ	คัพภะ
Retinol (A)	0-0.08	0-0.11	0-trace	0	0-3.6	0-1.0
Thiamin (B1)	2.6-3.3	2.9-6.1	0.2-1.1	0.9-2.1	12-24	17-59
Riboflavin (B2)	0.6-1.1	0.4-1.4	0.3-0.6	0.5-0.7	1.8-4.3	1.7-4.3
Niacin (nicotinic acid)	29- 56	35-53	13-24	16-42	267-499	28-83
Pyridoxine (B6)	4-7	5-9	0.4-1.2	-	9-28	13-15
Panthothenic acid	7-12	9-15	3-7	-	20-61	11-28
Biotin	0.04-0.08	0.04-0.10	0.01-0.06	-	0.2-0.5	0.3-0.5
Inositol	800	1000	90-110	-	4000, 8000	3200,5500
Choline	760-980	950	390-880	-	920-1460	1700,2600
p-Aminobenzoic acid	0.3	0.3	0.12-0.14	-	0.65	0.9
Folic acid	0.2-0.4	0.1-0.5	0.03-0.14	-	0.4-1.4	0.8-4.1
Cyanocobalamin (B12)	0-0.003	0-0.004	0-0.0014	-	0-0.004	0-0.01
α-Tocopherol (E)	9-20	9-25	trace-3	-	26-130	76

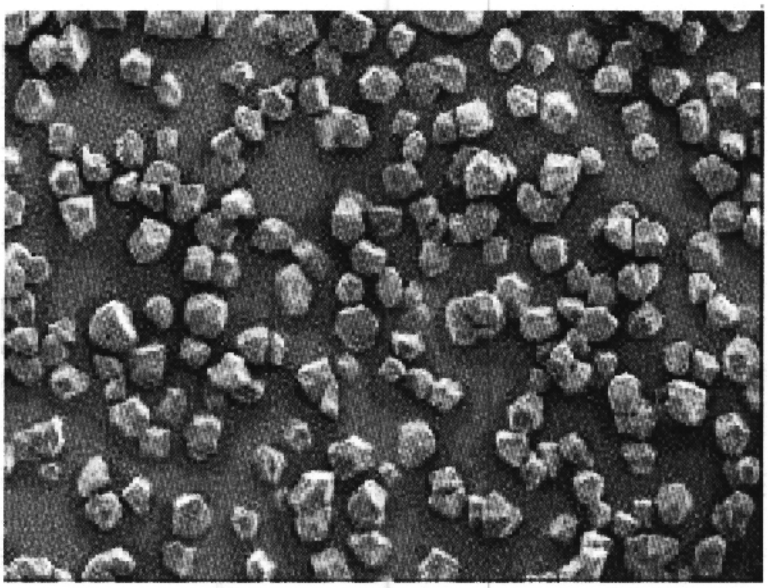
ที่มา: ดัดแปลงจาก Champagne, Wood, Juliano & Bechtel (2004)

ตารางที่ 4 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
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
Silicon	10.8	0.6-1.4	0.1-0.4	64-95	3-5	0.4-0.9
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
Tin	-	-	<1.1	0	21	-
Zinc	1.7-3.1	6-28	6-23	9-40	43-258	57-258

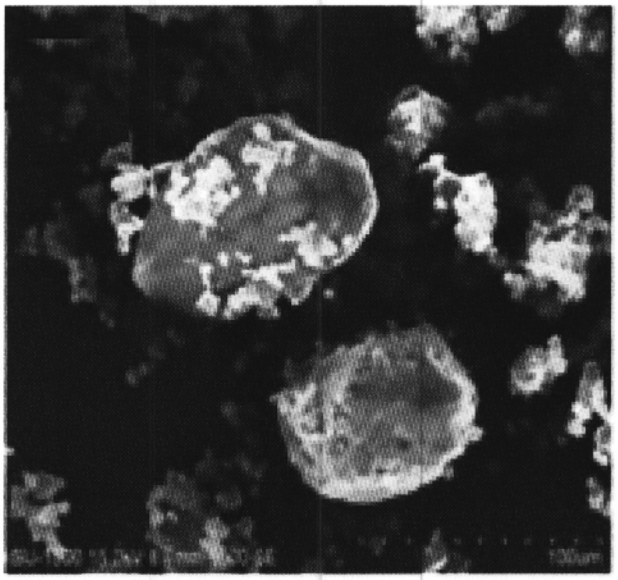
ที่มา: ดัดแปลงจาก Champagne, Wood, Juliano & Bechtel (2004)

องค์ประกอบที่พบมากที่สุดในเมล็ดข้าว คือ คาร์โบไฮเดรตโพลิแซกคาไรด์ ประเภทสตาร์ช (starch) โดยโมเลกุลของสตาร์ชรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granules) มีขนาดประมาณ 3-5 ไมครอน ซึ่งถือว่าเล็กที่สุดในกลุ่มธัญชาติ รูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม เม็ดสตาร์ชของข้าวรวมตัวกันอยู่ในอะไมโลพลาสหรือคลอโรพลาสของเซลล์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นลักษณะของเม็ดสตาร์ช (ภาพที่ 4) โดยในธรรมชาติเม็ดสตาร์ชจะถูกล้อมรอบด้วยโปรตีน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นลักษณะเม็ดสตาร์ช-ของข้าว (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

ที่มา : Zhu, Liu, Wilson, Gu & Shi (2011)

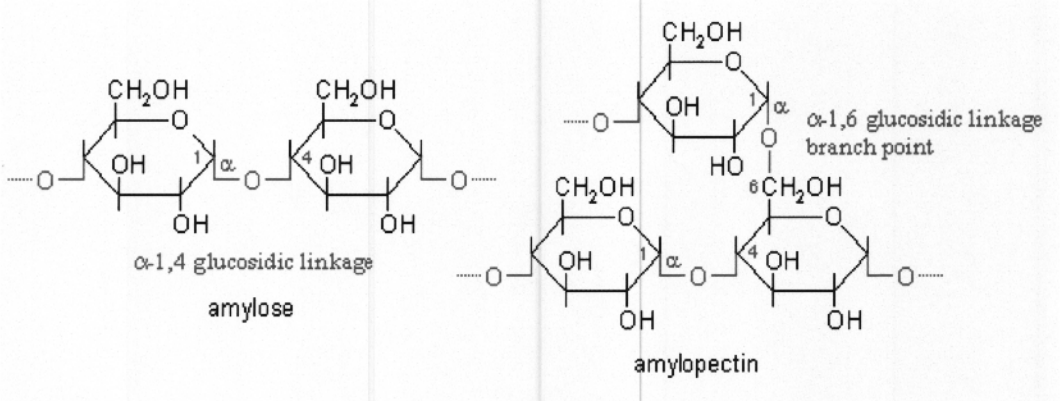


ภาพที่ 5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นลักษณะสตาร์ชข้าวตามธรรมชาติที่มีโปรตีนห่อหุ้ม (กำลังขยาย 4,000 เท่า)

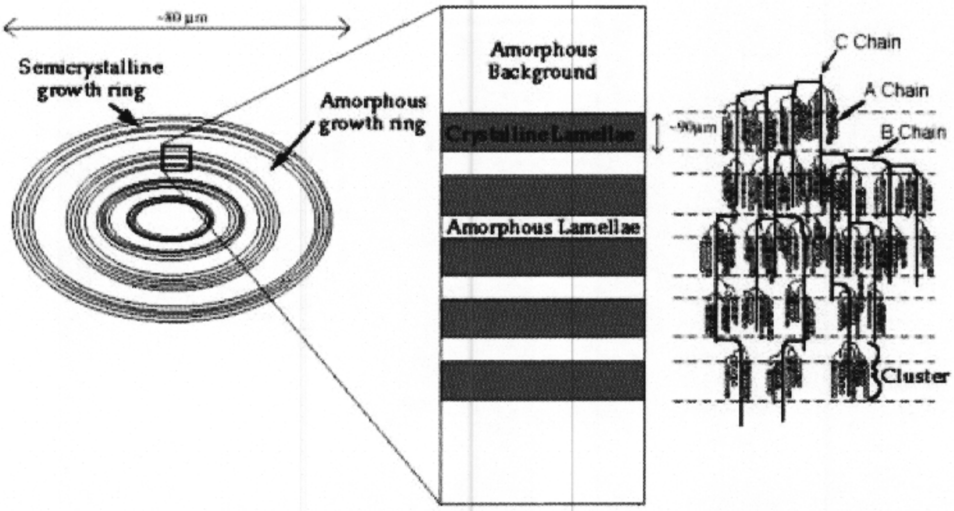
ที่มา : Ngamnikom & Songsermpong (2011)

โมเลกุลของสตาร์ช ประกอบด้วยโพลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะ ได้แก่ อะไมโลเพกตินและอะไมโลส โดยอะไมโลเพกติน เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสมีโครงสร้างโมเลกุลเหมือนกิ่งไม้ ประมาณร้อยละ 96 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 และที่เหลือต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 6

ในขณะที่อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสแบบเชิงเส้น ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 (ภาพที่ 6) โดยในธรรมชาติ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน จะจัดเรียงตัวกันแน่นในโมเลกุลของสตาร์ช เป็นรูปวงแหวน ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกึ่งสัณฐาน (semi-crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกติน
ที่มา : Tester, Karkalas & Qi (2004)



ภาพที่ 7 โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชที่มีอะไมโลส และอะไมโลเพกตินจัดเรียงตัวกันแน่น
ที่มา : Tester, Karkalas & Qi (2004)

องค์ประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญ และพบในข้าว ได้แก่ โปรตีน ไขมัน โดยเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบของโปรตีนน้อยกว่าธัญชาติชนิดอื่น ทั้งนี้ขึ้นกับพันธุ์ของข้าว Champagne (1996) สกัดโปรตีนจากข้าว (มีโปรตีนประมาณร้อยละ 6.8 ถึง 8.5) พบว่า ประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายในน้ำหรือแอลบิวมิน (albumin) ร้อยละ 3.8 ถึง 8.8 ของโปรตีนทั้งหมด ในขณะที่พบ

โปรตีนที่ละลายในเกลือหรือโกลบิวลิน (globulin) ประมาณร้อยละ 9.6 ถึง 10 และโปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์หรือโพรลามิน (prolamin) หรือออริซาอิน (oryzain) ประมาณร้อยละ 66 ถึง 78 ซึ่งกลุ่มหลังจะถือเป็นโปรตีนหลักที่สะสมในข้าว

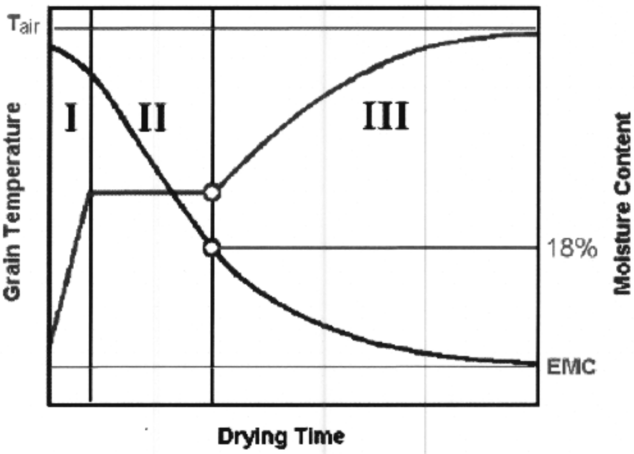
ไขมัน ที่อยู่ในเมล็ดข้าวมักจะอยู่ในสภาพเป็นหยดไขมันเล็ก ๆ ขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมครอนอยู่บริเวณเยื่อหุ้มผิวเมล็ด (รำหยาบ และรำละเอียด) และจมูกข้าว (คัพภะ) เมล็ดข้าวมีไขมัน ร้อยละ 1.6 ถึง 2.8 ส่วนใหญ่อยู่ในรำข้าว ไขมันที่ได้จากข้าวเป็นไขมันชนิดที่มีคุณภาพดี โดยมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (linoleic acid, oleic acid และ palmitic acid) มีสารแกมมา-ออไรซานอล (gamma oryzanol) ช่วยในการควบคุมระดับโคเลสเตอรอลในเส้นเลือด และมีสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ที่สำคัญ ได้แก่ แกมมา-ออไรซานอล โทโคฟีรอล (tocopherol) และโทโคไตรอีนอล (tocotrienol)

2.2 การลดความชื้นและการเก็บรักษาข้าวเปลือก

การลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว และนวดข้าวมีความสำคัญ เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกยังคงมีความชื้นสูง เมล็ดซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ทำให้เกิดความร้อน ในสภาพร้อนชื้นดังกล่าวทำให้เกิดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นผลให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพได้ง่าย นอกจากนั้นการลดความชื้นต้องดำเนินการให้เหมาะสม เพราะจะส่งผลต่อการแตกหักเมื่อนำข้าวไปผ่านการขัดสี

2.2.1 หลักการลดความชื้นในเมล็ดข้าว

ความชื้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) และความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) โดยความชื้นมาตรฐานแห้งสามารถคำนวณในรูปของสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง หารด้วยน้ำหนักของมวลแห้ง ในขณะที่ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง หารด้วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ อัตราการลดความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น และอุณหภูมิของเมล็ดข้าว รวมถึงอุณหภูมิภายนอกความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) และความเร็วของลมที่สัมผัสกับเมล็ดข้าว ภาพที่ 8 เป็นกราฟพื้นฐานการทำแห้ง แสดงปริมาณความชื้น และอุณหภูมิของข้าวระหว่างการลดความชื้น



ภาพที่ 8 กราฟการทำแห้งแสดงปริมาณความชื้น และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไประหว่างการทำแห้ง
ที่มา : IRRI (2008)

จากภาพที่ 8 จะเห็นว่าการทำแห้งมี 3 ช่วง ช่วงแรก (I) เป็นช่วงที่ความร้อนถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าว ในช่วงนี้อัตราการทำแห้งเกือบจะเป็นศูนย์ ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ช่วงที่ 2 (II) ความร้อนถูกใช้ไปในการทำให้น้ำบริเวณผิวของข้าวระเหย ความร้อนของเมล็ดข้าวจะคงที่ ปริมาณความชื้นที่ถูกระเหยออกไปก็จะคงที่ ดังนั้นอัตราการทำแห้งในช่วงนี้จะคงที่เช่นเดียวกัน และในช่วงที่ 3 (III) เป็นช่วงที่อัตราการทำแห้งจะลดลง ความร้อนจะถูกใช้ไปในการทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าในข้าวเปลือกจะมีอัตราการทำแห้งเริ่มลดลงเมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงถึงประมาณร้อยละ 18 (IRRI, 2008)

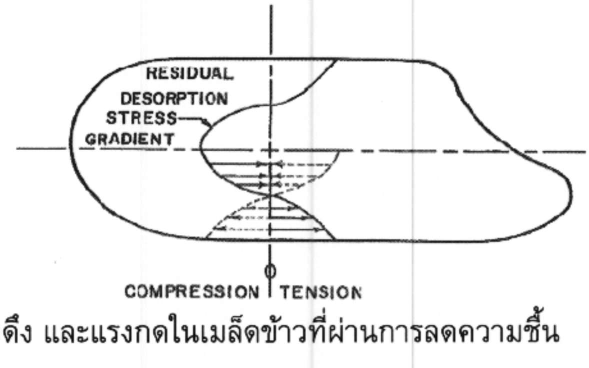
การลดความชื้นเมล็ดข้าว เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไอในเมล็ดข้าวมีมากกว่าบรรยากาศโดยรอบ ความชื้นเคลื่อนย้ายออกจากเมล็ดข้าวบริเวณผิวของเมล็ด ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นในเมล็ดข้าว โดยบริเวณแกนกลางของเมล็ดข้าวจะมีความชื้นมากกว่าบริเวณผิวของเมล็ด ในช่วงแรกของการลดความชื้น อัตราการลดความชื้นบริเวณผิวของเมล็ดจะเกิดขึ้นได้เร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการลดความชื้นจะถูกจำกัดด้วยอัตราการเคลื่อนย้ายความชื้นจากบริเวณด้านในของเมล็ดมายังบริเวณผิวของเมล็ด การเพิ่มอัตราการเคลื่อนย้ายความชื้นจากด้านในของเมล็ดมายังบริเวณผิวของเมล็ดสามารถทำได้โดยการเพิ่มความแตกต่างของแรงดันไอของเมล็ดข้าวกับบรรยากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้อากาศร้อนหรือลมร้อนช่วย (Kunze & Calderwood, 2004)

2.2.2 การแตกร้าวในเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว มีสมบัติในการดูดความชื้น ดังนั้นจึงตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น และอุณหภูมิ ความชื้นมีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในเมล็ดมากกว่าอุณหภูมิ มีรายงานการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดข้าวมีผลต่อความเครียดของเมล็ดข้าว มากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถึง 100 เท่า (Kunze & Calderwood, 2004) ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นในเมล็ดจะส่งผลต่อการแตกร้าวของเมล็ดข้าวได้ ดังนั้นการลดความชื้นของเมล็ดข้าวจึงมีความสำคัญ หากไม่ควบคุมให้ดีจะส่งผลต่อการแตกร้าวของเมล็ดข้าวได้

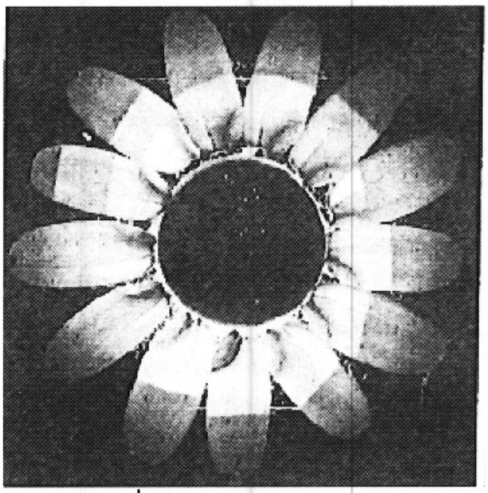
มีการศึกษาเรื่องการแตกร้าวของเมล็ดข้าวมายาวนาน และจากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการแตกร้าวของข้าว ได้ข้อสรุปว่า การแตกร้าวของข้าวไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างการลดความชื้น แต่เกิดขึ้นภายหลังจากการลดความชื้น และอาศัยช่วงระยะเวลาในการเกิดโดยส่วนใหญ่การแตกร้าวจะเกิดขึ้นภายใน 1 ถึง 2 ชั่วโมง ภายหลังการลดความชื้นโดยมีอัตราการเกิดเริ่มช้าลงภายหลังผ่านไป 72 ชั่วโมง และข้าวที่เก็บรักษาไว้หรือข้าวเก่าจะเกิดการแตกร้าวได้มากกว่าข้าวที่เก็บเกี่ยวใหม่ เมื่อนำมาลดความชื้น (Kunze, 1979; Sharma & Kunze, 1982) โดยรูปแบบการแตกร้าวจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ตามแนวเส้นรอบวงประมาณ 1 ถึง 4 จุด เมื่อนำข้าวที่ผ่านการลดความชื้นมาไว้ในสภาวะบรรยากาศปกติ ข้าวซึ่งจะมีความชื้นต่ำกว่าบรรยากาศจะดูดซับเอาไอน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เข้าไปสู่บริเวณผิวด้านนอกของเมล็ด ทำให้เม็ดแป้งในบริเวณผิวด้านนอกเกิดการพองตัว เกิดเป็นแรงกดรอบผิวด้านนอกของเมล็ด เมื่อเมล็ดข้าวซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถขยายตัวในลักษณะอิสระเพื่อรักษาสมดุลของแรง จะทำให้บริเวณด้านในของเมล็ดเกิดเป็นแรงดึง เพื่อต้านกับแรงกดที่เกิดที่บริเวณผิวของข้าว (ภาพที่ 9) เมื่อไรก็ตามที่แรงกดจากด้านนอกมีค่าสูงจนสามารถเอาชนะแรงดึงจากด้านในแล้ว จะเกิดเป็นรอยร้าวรอบ ๆ เมล็ดข้าว ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวระหว่างการเก็บรักษา หรือระหว่างการนำไปสี

การตรวจสอบการแตกร้าวของเมล็ดข้าวสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการนำเมล็ดข้าวมาส่องผ่านแสง จากด้านล่างดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 9 การเกิดแรงดึง และแรงกดในเมล็ดข้าวที่ผ่านการลดความชื้น

ที่มา : Kunze & Choudhury (1972)



ภาพที่ 10 การแตกร้าวของเมล็ดข้าวซึ่งสังเกตุได้จากการส่องแสงผ่านเมล็ดข้าวจากด้านล่าง
ที่มา : ดัดแปลงจาก Kunze (1979)

2.2.3 ความแตกต่างของความชื้นในเมล็ดข้าว

ความแตกต่างของความชื้นในเมล็ดข้าว ส่งผลต่อการแตกร้าวของเมล็ด มีการศึกษาวิจัยพบว่า ความแตกต่างของความชื้นเกิดขึ้นในเมล็ดด้านสั้นสูงกว่าด้านยาว ความแตกต่างของความชื้นสูงสุดเกิดขึ้นภายใน 15 ถึง 60 นาที เมื่อเริ่มลดความชื้น ข้าวที่มีความชื้นตั้งต้นสูง และการใช้อุณหภูมิสูงในการลดความชื้นจะส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความแตกต่างของความชื้นในเมล็ดสูง อย่างไรก็ดีความแตกต่างของความชื้นที่มีน้อยในเมล็ดข้าวที่มีความชื้นต่ำทำให้เกิดการแตกร้าวได้สูงกว่าในเมล็ดข้าวที่มีความชื้นสูง มีความเป็นไปได้ว่า ข้าวที่มีความชื้นสูงมีความยืดหยุ่นมากกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำเมื่อเกิดความแตกต่างของความชื้นในเมล็ด มีการทดลองลดความชื้นข้าวที่ 45 องศาเซลเซียส จากข้าวที่มีความชื้นตั้งต้นร้อยละ 22.7 ให้ลดลงไปจนเหลือร้อยละ 12.95 ใช้เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าข้าวร้อยละ 36 เกิดการแตกร้าวภายหลังการลดความชื้น ในขณะที่การลดความชื้นโดยใช้สภาวะเดิม แต่เพิ่มเวลาเป็น 18 ชั่วโมง จนได้ความชื้นสุดท้ายเป็นร้อยละ 7.07 พบว่า มีการแตกร้าวเกิดขึ้นสูงถึงร้อยละ 74 มีการตั้งสมมุติฐานว่าการใช้อุณหภูมิสูงในการลดความชื้น และข้าวมีความชื้นตั้งต้นสูง ข้าวจะเกิดการแตกร้าวภายหลังการลดความชื้นได้น้อยกว่า ซึ่งอาจเกิดจากบริเวณผิวข้าวเกิดการสุกของแป้งทำให้เกิดการห่อหุ้มป้องกันการแตกร้าวได้ อย่างไรก็ตามมีข้อควรระวัง คือ หากมีการลดความชื้นต่อไปข้าวจะเกิดการแตกร้าวจากภายใน ซึ่งจะสร้างปัญหาอย่างมากในการสี

มีการทดลอง พบว่าการลดความชื้นที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นสูงแต่สามารถลดความชื้นได้น้อยกว่าการลดความชื้นที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนั้นข้าวที่ผ่านการลดความชื้นที่ 55 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีการแตกร้าวมากกว่าข้าวที่ผ่านการลดความชื้นที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถึง 24 เท่า ซึ่งผลตรงข้ามกับการทดลองเมื่อลดความชื้นที่ 45 องศาเซลเซียส ดังอธิบายไปก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกร้าว ต้องคำนึงทั้งปริมาณความชื้นตั้งต้น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน ไม่สามารถแยกพิจารณาเฉพาะปัจจัยย่อยอันใดอันหนึ่งได้

โดยสรุปแล้วความแตกต่างของความชื้นที่สูง สามารถทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวได้รวดเร็วภายหลังจากการลดความชื้นหรือข้าวอาจจะไม่เกิดการแตกร้าวเลย แต่ในขณะเดียวกันหากความแตกต่างของความชื้นต่ำ อันเกิดจากการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลานาน เมล็ดข้าวจะเกิดการแตกร้าวได้ช้าลงแต่จะมีการแตกร้าวเกิดขึ้นอย่างแน่นอน และต่อเนื่อง

ข้าวที่ผ่านการลดความชื้นอย่างเร็ว และหากนำมาสัมผัสกับบรรยากาศ ผิวของข้าวที่แห้งจะดูดความชื้น และขยายตัวทำให้เกิดแรงเครียดบริเวณผิว ซึ่งจะช่วยเร่งการเคลื่อนย้ายความชื้นจากบริเวณด้านในมายังบริเวณผิวของข้าวทำให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นข้าวที่ผ่านการลดความชื้นอย่างเร็วหากเก็บในสภาพปิดไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศก็จะไม่มีอิทธิพลของการดูดน้ำจากบรรยากาศมาช่วยเร่งให้เกิดการแตกร้าวได้ (Kunze, 1979)

มีการศึกษาการแตกร้าวเปรียบเทียบระหว่างข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารภายหลังผ่านการลดความชื้น พบว่า ข้าวสารมีการแตกร้าวได้เร็วกว่าข้าวกล้อง และเร็วกว่าข้าวเปลือก โดยข้าวกล้องใช้เวลาในการเกิดการแตกร้าวเป็น 2 เท่าของข้าวสาร และข้าวเปลือกใช้เวลามากกว่า 3 เท่าของข้าวกล้อง (Lan & Kunze, 1996) ดังนั้นการลดความชื้นในข้าวเปลือกจึงเป็นแนวปฏิบัติที่เหมาะสมมากกว่าการลดความชื้นในข้าวกล้องหรือข้าวสารเมื่อมองในมิติด้านคุณภาพของเมล็ดข้าว

2.2.4 วิธีการลดความชื้นข้าว

จากหลักการดังกล่าวข้างต้น ในทางปฏิบัติเพื่อให้ลดการแตกร้าวในเมล็ดข้าวให้ได้มากที่สุด การลดความชื้นจะดำเนินการ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการระเหยของความชื้นที่ผิวเมล็ดสู่บรรยากาศรอบ ๆ เมล็ด และขั้นตอนที่สองเป็นการเคลื่อนย้ายความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดออกมาบริเวณผิวแทนที่ความชื้นที่ระเหยออกไปทั้ง 2 ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ช่วงเวลาที่ความชื้นภายในเมล็ดเคลื่อนออกมาที่ผิวเมล็ด เรียกว่า tempering period ระยะเวลาช่วงนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ดังนั้นการลดความชื้นที่เหมาะสมควรใช้อุณหภูมิสูง (140 ถึง 150 องศาเซลเซียส) อย่างรวดเร็วกระทั่งความชื้นเมล็ดลดลงเหลือร้อยละ 20-22 ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นจึงใช้อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) ลดความชื้นลงอย่างช้า ๆ จนเหลือความชื้นร้อยละ 14 ถึง 15 จะทำให้ได้ข้าวที่ได้มีคุณภาพการสีดี มีการแตกร้าวน้อย อย่างไรก็ดีมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการสีค่อนข้างมาก จึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น

ที่อาจจะเกี่ยวข้องเพิ่มเติมด้วย ซึ่งต้องขึ้นกับสภาพของแต่ละแห่ง Kunze (1979) รายงานการทดลองลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นตั้งต้นร้อยละ 29.8 ให้ลดลงเหลือร้อยละ 9.1 โดยการใช้ลมร้อนที่ 59 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (รอบเดียวไม่มีการพักช่วง) พบว่า ข้าวที่ผ่านการลดความชื้นเมื่อนำมาสีจะได้ปริมาณข้าวต้น (head yield rice) ร้อยละ 70 แต่ภายหลังจากนั้นข้าวต้นที่ได้จะเริ่มแตกร้าว และจะแตกร้าวไปเรื่อย ๆ ในทางปฏิบัติพบข้าวเกิดการแตกร้าวได้ระหว่างการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้นต่ำเกินไป เมล็ดไม่สมบูรณ์ มีการแตกร้าวก่อนที่จะนำมาลดความชื้น เมล็ดข้าวแห้งเกินไป

IRRI (2008) เสนอแนวปฏิบัติในการลดความชื้นข้าว โดยอาศัยกราฟพื้นฐานการทำแห้ง (ภาพที่ 8) ซึ่งพบว่าในช่วงที่เมล็ดข้าวมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 18 สามารถใช้ความร้อนสูงในการทำให้ความชื้นที่ผิวของข้าวลดลงได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าว แต่หากเมล็ดข้าวมีความชื้นลดลงจนถึงร้อยละ 18 แล้วไม่ควรใช้อุณหภูมิสูง เพราะจะทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการแตกหักเมื่อนำไปสี ในช่วงนี้ควรใช้อุณหภูมิต่ำ เพื่อช่วยลดความชื้นภายในเมล็ดข้าว และควรจำกัดในเรื่องของความแตกต่างของความชื้นให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยทำการกลับกองข้าวอย่างสม่ำเสมอในกรณีตากแดดหรือมีการผสม หมุนวนข้าวอยู่เสมอหากใช้เครื่องอบแห้ง นอกจากนั้นยังควรให้มีการพักระยะการทำแห้งเป็นช่วง ๆ (tempering) เพื่อช่วยให้ความชื้นได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว ช่วยลดความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดข้าว ซึ่งจะส่งผลดีต่อคุณภาพของข้าว และทำให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ปัจจุบันยังมีความต้องการข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของเมล็ดข้าว โดยเริ่มตั้งแต่ข้าวยังอยู่ในนาก่อนเก็บเกี่ยว ซึ่งในช่วงนี้ความชื้นในเมล็ดข้าวก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่แล้วโดยในช่วงกลางวัน ความชื้นจะลดลงอันเนื่องมาจากความร้อน และในช่วงกลางคืนข้าวจะดูดความชื้นเข้าสู่ภายใน ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาไม่สามารถป้องกันได้ ความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ดังกล่าวที่ส่งผลต่อการแตกร้าวยังไม่มีข้อมูลจากงานวิจัยยืนยันมากนัก นอกจากนั้นยังมีความต้องการข้อมูลของการแตกร้าวของข้าวภายหลังการเก็บเกี่ยวก่อนที่จะลดความชื้น ทันทีภายหลังจากลดความชื้น ระหว่างการเก็บรักษาในระยะแรก และในระยะยาว

ในทางปฏิบัติการลดความชื้นข้าวเปลือก หากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามแนวทางข้างต้นอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ แนวปฏิบัติขั้นพื้นฐานคือต้องทำการลดความชื้นทันที ไม่ควรทิ้งผลผลิตข้าวเปลือกไว้ในนาข้าวทั้งนี้เพื่อป้องกันความแตกต่างของความชื้นที่จะส่งผลต่อการแตกหักในเมล็ดข้าวในประเทศไทย วิธีการลดความชื้นข้าวอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การลดความชื้นด้วยการใช้แสงแดด และการลดความชื้นด้วยวิธีเชิงกลหรือการใช้เครื่องอบลดความชื้น

2.2.4.1 การลดความชื้นด้วยการใช้แสงแดด

การลดความชื้นโดยใช้การตากแดด ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด และมีการใช้มานานมีต้นทุนต่ำ แต่มีข้อจำกัดหลายประการโดยเฉพาะเรื่องประสิทธิภาพของการลดความชื้น การลดความชื้นแบบนี้มักจะดำเนินการโดยการตากข้าวเปลือกไว้ในลานตากที่สัมผัสกับแสงแดดโดยตรง โดยมีการกลับข้าวเป็นระยะ จนกว่าจะมีความชื้นลดลงจนถึงระดับที่ต้องการ

การลดความชื้นโดยใช้การตากแดดจะสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิ และอัตราการลดความชื้นได้ยาก ดังนั้นการคาดหวังเรื่องคุณภาพการสีจึงเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ดีหากมีการควบคุมสภาวะการตากแดดให้เหมาะสมจะสามารถทำให้ข้าวที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นได้

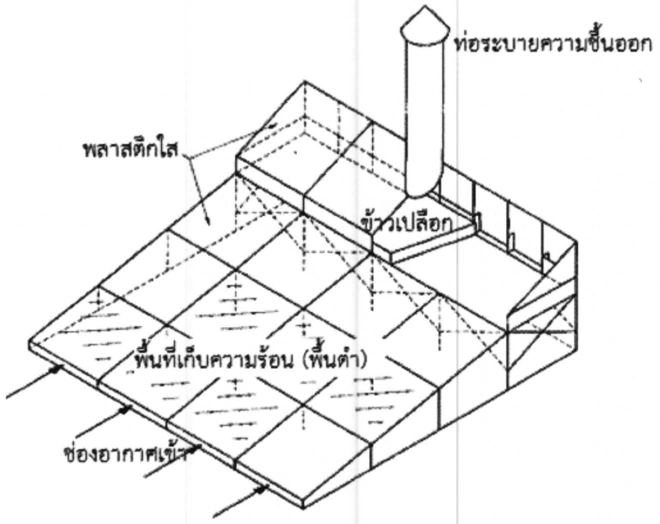
IRRI (2008) ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทำแห้งด้วยการตากแดดดังนี้

1) ความหนาของข้าวควรอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 เซนติเมตร หากบางเกินไป จะทำให้เกิดความร้อนสูง และหากหนาเกินไปจะเกิดความแตกต่างของความชื้น ซึ่งจะส่งผลคุณภาพการสีทำให้เกิดการแตกหักได้

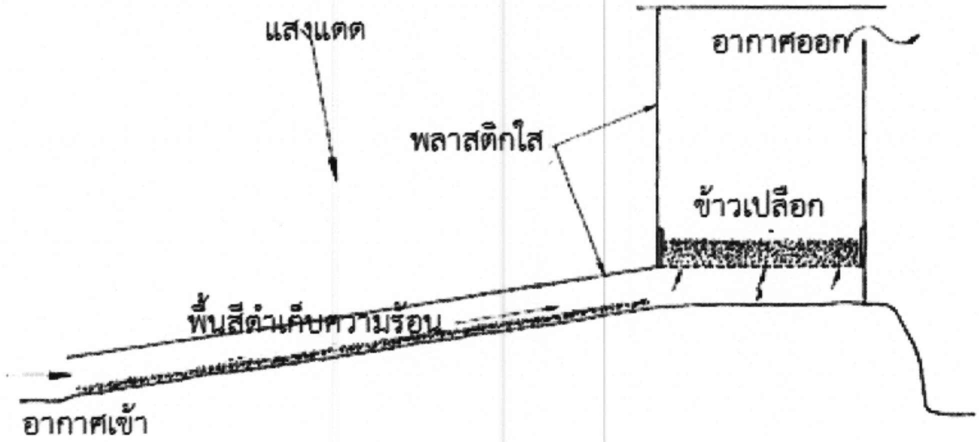
2) ควรมีการผสม หรือ กลับกองข้าวเป็นระยะ ๆ อย่างน้อยทุกชั่วโมง หรือหากจะให้ดีควรมีการกลับกองข้าวทุก 30 นาที เพื่อลดความแตกต่างของความชื้นในกองข้าวโดยเฉพาะข้าวชั้นบน และชั้นล่าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการแตกหักระหว่างการนำไปสี

3) หลีกเลี่ยงความร้อนจากแสงแดดที่สูงเกินไป มีการทดลองพบว่า ข้าวจะแตกหักน้อยลงเมื่อตากแดดเฉพาะในช่วงเช้าแต่ใช้เวลาหลายวัน แทนที่จะตากแดดตลอดทั้งวัน และการแตกหักจะลดลงอีกหากใช้การตากแดดเฉพาะในช่วงเช้า จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งต่อในที่ร่ม โดยในทางปฏิบัติในช่วงกลางวันที่อุณหภูมิผิวข้าวอาจสูงถึง 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส ควรมีการคลุมผ้าใบเพื่อลดความร้อนลง

นอกเหนือจากการตากในลานตากแล้ว ยังสามารถใช้เครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยในการอบเมล็ดข้าว ซึ่งมีการออกแบบได้หลากหลาย ได้แก่ เครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยการอาศัยการนำความร้อน โดยเครื่องอบดังกล่าวจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนเก็บความร้อน ถังลดความชื้น และปล่องระบาย การออกแบบเครื่องอบที่มีความจุ 1 ตัน จะมีขนาดของส่วนเก็บความร้อนกว้าง 4.5 เมตร ยาว 7 เมตร ใช้ถ่านแกลบหรือพลาสติกสีดำปูพื้นเพื่อดูดซับความร้อนจากแสงแดด ปิดด้านบนด้วยพลาสติกใส ถังลดความชื้นมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 7 เมตร มีตะแกรงด้านล่างเป็นไม้ไผ่สานหรือตะแกรงเหล็ก (ภาพที่ 11) ซึ่งหลักการนี้สามารถใช้ออกแบบเครื่องอบขนาดเล็กแบบง่ายได้ ดังภาพที่ 12 โดยเครื่องอบทั้งสองแบบนี้ใช้การไหลเวียนของอากาศร้อนตามธรรมชาติ ไม่มีเครื่องมือเชิงกลช่วยจึงเป็นการประหยัดพลังงาน แม้ว่าประสิทธิภาพจะด้อยกว่าการใช้วิธีเชิงกลก็ตาม



ภาพที่ 11 ตัวอย่างเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์
ที่มา : Exell (1980)



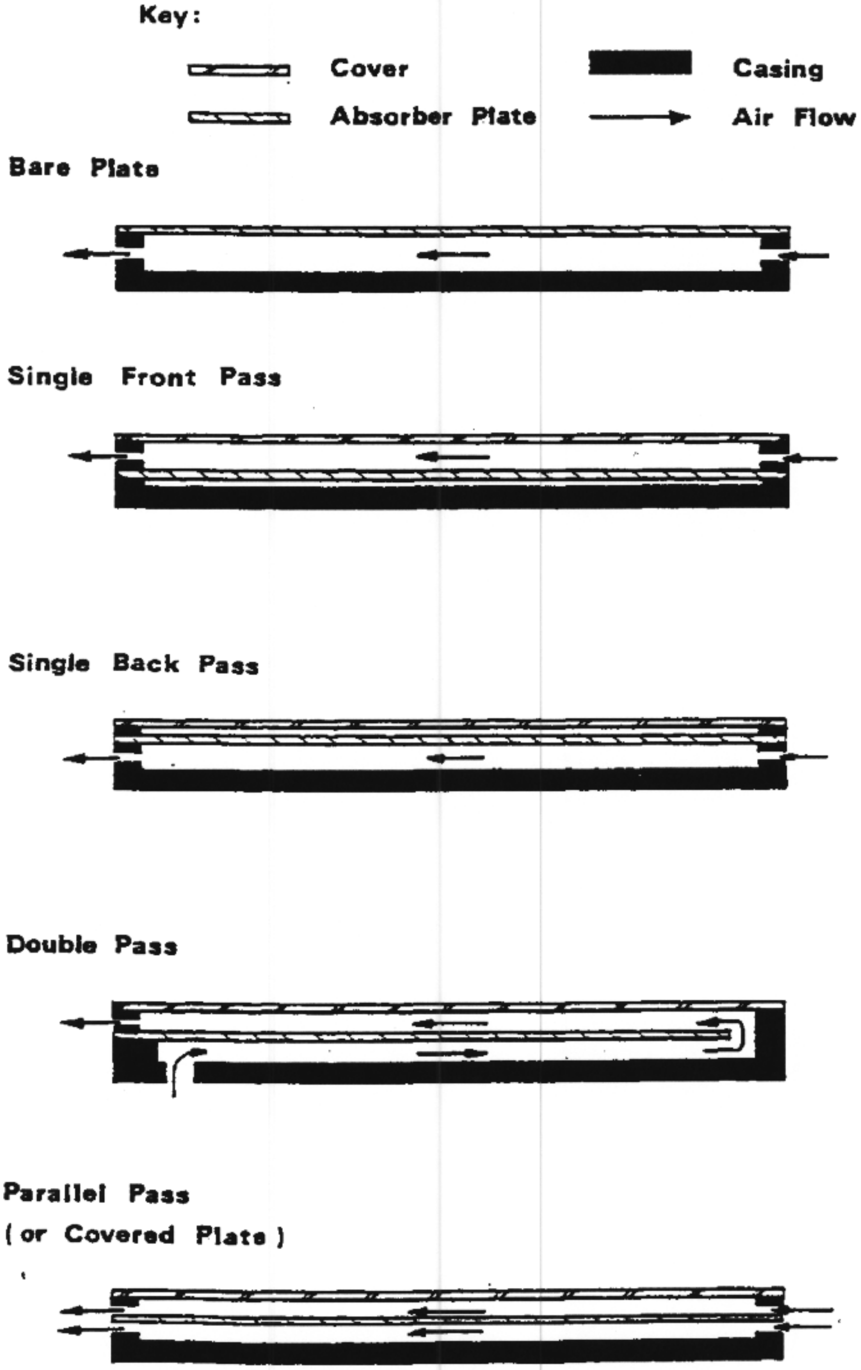
ภาพที่ 12 ตัวอย่างเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบง่าย
ที่มา : Exell & Kornsakoo (1978)

2.2.4.2 การลดความชื้นด้วยวิธีเชิงกล

การลดความชื้นด้วยวิธีทางกลหรือการใช้เครื่องอบลดความชื้น มีบทบาทมาก เนื่องจากเมล็ดพืชจำเป็นจะต้องลดความชื้นอย่างรวดเร็ว ในอดีตการใช้เครื่องอบส่วนใหญ่จะไม่มีความจำเป็นสำหรับข้าว เนื่องจากข้าวเปลือกไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องความชื้นสำหรับข้าวนาปี เพราะช่วงเวลานั้นไม่มีฝน เกษตรกรจะเกี่ยวข้าวแล้วจะตากข้าวในนาสักระยะหนึ่ง จึงเก็บข้าวรวมกองแล้วนำมานวดทำให้ข้าวแห้งขณะที่ตากในนา สำหรับข้าวนาปรัง ซึ่งเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูฝนแต่ปริมาณไม่มากนัก สามารถลดความชื้นในลานตาก หรือนำไปทำข้าวนึ่งได้

ปัจจุบันปัญหาในการปลูกข้าวก็คือ การขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยว ทำให้เกษตรกรหันมาใช้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวทำให้ข้าวเปลือกมีปริมาณมาก และความชื้นสูงเข้าสู่ตลาดในเวลาพร้อมกันเป็นจำนวนมากเกินความสามารถที่ลานตากข้าวโรงสีต่าง ๆ จะรับได้มีผลทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสูง ถ้าหากข้าวเปลือกมีความชื้นสูงจะต้องรีบลดความชื้นอย่างรวดเร็วให้ทันเวลา ไม่เช่นนั้น คุณภาพของข้าวจะเสื่อมอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นจะต้องนำเครื่องอบมาใช้ โดยเครื่องลดความชื้นเมล็ดพืชที่ใช้อยู่ภายในประเทศ สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น

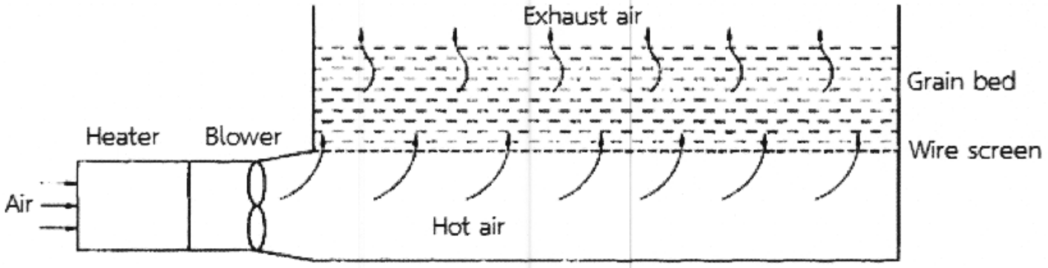
1) เครื่องลดความชื้นด้วยแสงแดด แบบใช้วิธีเชิงกลช่วยในการหมุนเวียนอากาศร้อน เป็นวิธีการใช้แสงแดดในการลดความชื้นเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ แต่ใช้วิธีเชิงกลช่วยในการหมุนเวียนอากาศร้อน ซึ่งสามารถออกแบบอุปกรณ์เก็บความร้อนจากแสงแดดได้หลากหลายรูปแบบ ดังภาพที่ 13 โดยความร้อนที่ได้จากแสงแดดจะถูกดูดไปใช้ในการลดความชื้นด้วยพัดลม การออกแบบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กอาจใช้ชุดเก็บความร้อนแบบ bare plate ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเก็บความร้อนประมาณร้อยละ 40 ถึง 50 ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.10 กิโลกรัม/วินาทีต่อตารางเมตร และเมื่อใช้ควบคู่กับฉนวนที่มีประสิทธิภาพในการเก็บความร้อน 0.5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ชุดเก็บความร้อนดังกล่าวสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ประมาณ 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส โดยมีพลังงานที่ได้อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.25 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร อย่างไรก็ดีหากมีการใช้ covered plate collectors จะทำให้มีประสิทธิภาพในการเก็บความร้อนสูงขึ้นเป็นร้อยละ 60 ถึง 70 ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส แต่จะใช้อัตราการไหลของอากาศน้อยกว่า



ภาพที่ 13 ชุดเก็บความร้อนจากแสงแดด
ที่มา : Proctor (1994)

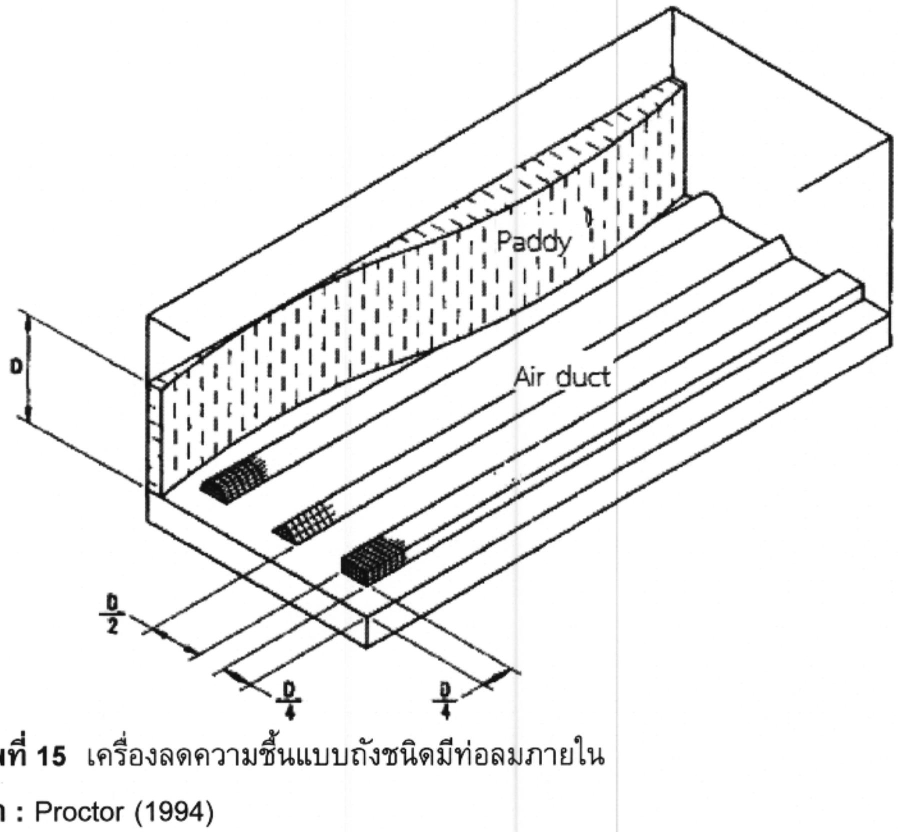
2) เครื่องลดความชื้นแบบถัง (batch-in-bin dryer) ประกอบด้วยถังที่มีเมล็ดพืชบรรจุอยู่บนตะแกรง ด้านล่างของตะแกรงจะเป็นห้องลมร้อน ที่ต่อเข้ากับพัดลม และชุดเตาลมร้อน ลมร้อนจะพัดผ่านชั้นเมล็ดพืชที่อยู่นิ่งกับที่จากด้านล่างสู่ด้านบน (ภาพที่ 14) มีผลทำให้ความชื้นของเมล็ดพืชด้านล่างลดลงเร็วกว่าด้านบน เครื่องลดความชื้นแบบนี้มักจะใช้อุณหภูมิ-

ไม่สูง (50 ถึง 70 องศาเซลเซียส) หรือแบบมีท่อลมภายใน (ภาพที่ 15) ข้อเสียที่สำคัญของเครื่องลดความชื้นแบบนี้ คือ ความแตกต่างของความชื้นด้านล่าง และด้านบนโดยด้านล่างซึ่งสัมผัสกับลมร้อนจะแห้งกว่าด้านบน



ภาพที่ 14 เครื่องลดความชื้นแบบถังหรือกระบะ

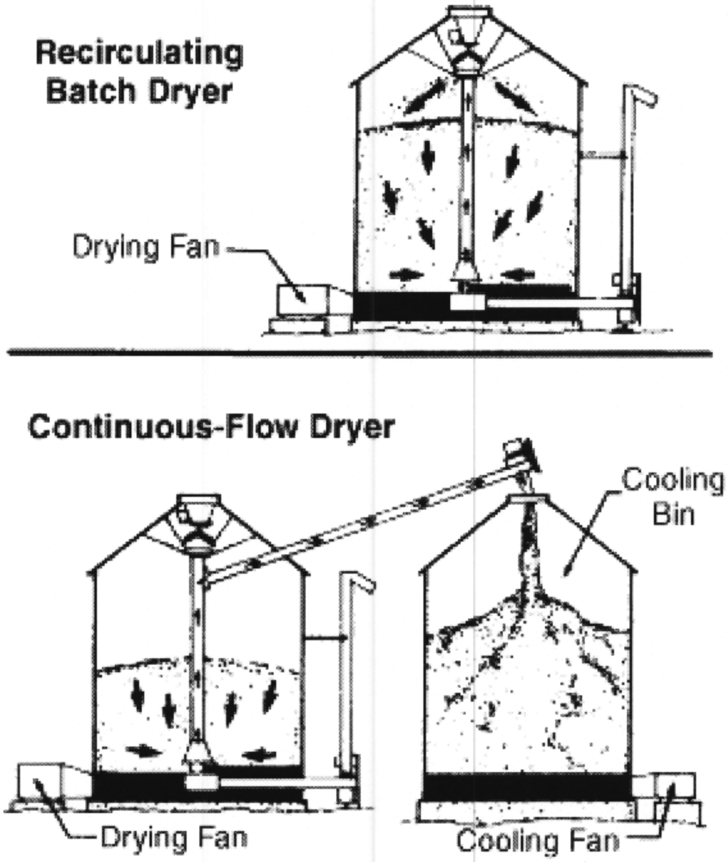
ที่มา : Proctor (1994)



ภาพที่ 15 เครื่องลดความชื้นแบบถังชนิดมีท่อลมภายใน

ที่มา : Proctor (1994)

เครื่องลดความชื้นแบบถัง สามารถติดตั้งอุปกรณ์หมุนเวียนเมล็ดข้าว ในการลำเลียงเมล็ดข้าวที่แห้งแล้วขึ้นไปด้านบนถึง และหมุนเวียนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการลดความชื้น ดังภาพที่ 16

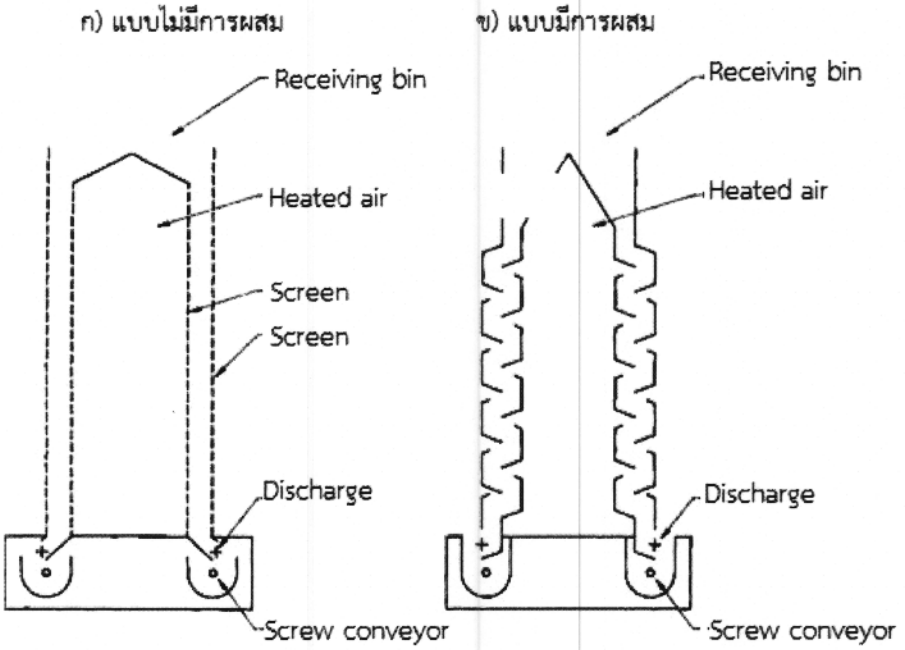


ภาพที่ 16 เครื่องลดความชื้นแบบถังที่ติดตั้งอุปกรณ์ลำเลียงทั้งในรูปแบบของแบทช์ และต่อเนื่อง

ที่มา : Proctor (1994)

3) เครื่องลดความชื้นแบบถังหมุนเวียน (continuous-flow dryer) เครื่องลดความชื้นแบบนี้มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่ไม่มีการผสม และแบบมีการผสม โดยในแบบที่ไม่มีการผสม ลักษณะของถังบรรจุเมล็ดพืชจะทำด้วยตะแกรงเป็นรูปทรงกระบอกแนวตั้ง ส่วนกลางของถังจะมีท่อลมทำด้วยตะแกรงรูปทรงกระบอกซ้อนอยู่ภายใน ลมร้อนจะถูกเป่าให้ผ่านเมล็ดตามแนวรัศมี ผ่านรูตะแกรงออกสู่ภายนอก เมล็ดพืชที่อยู่ด้านล่างจะถูกลำเลียงขึ้นไปด้านบนใหม่หลายเที่ยวจนกว่าจะแห้ง (ภาพที่ 17 ก) ส่วนแบบที่มีการผสมจะมีตะแกรงตามแนวขวางอยู่ตลอดตัวถัง (ภาพที่ 17 ข) เพื่อช่วยในการกระจายอากาศ เครื่องอบแบบนี้ได้มีการสร้างจำหน่ายมานาน แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาเรื่องฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจาย

รบกวนผู้ปฏิบัติงาน และผู้ที่อยู่ใกล้เคียง รวมทั้งการสึกหรอของระบบลำเลียง ซึ่งใช้เกลียวลำเลียงในแนวตั้ง



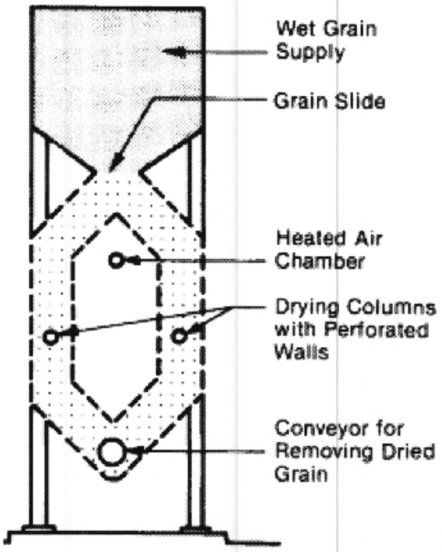
ภาพที่ 17 เครื่องลดความชื้นแบบถังหมุนเวียน ก) แบบไม่มีการผสม และ ข) แบบมีการผสม
ที่มา : Proctor (1994)

4) เครื่องลดความชื้นแบบคอลัมน์ (column dryer) เครื่องลดความชื้นแบบนี้มองภายนอกจะเห็นถังบรรจุเมล็ดพืชเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้งส่วนใหญ่สูงมากกว่า 3 เมตร การบรรจุเมล็ดพืชจะต่อเข้ากับท่อลมร้อนทางด้านข้างซึ่งมีเตาลมร้อน และพัดลมเป็นส่วนประกอบ ส่วนล่างของถังบรรจุเมล็ดจะมีชุดควบคุมการไหลของเมล็ดพืชเครื่องลดความชื้นแบบนี้แบ่งออกได้ 2 แบบ

4.1) ชนิดเมล็ดพืชไม่ไหลคลุกเคล้า ภายในถังบรรจุเมล็ดพืชของเครื่องลดความชื้นแบบนี้จะประกอบด้วย ช่องบรรจุเมล็ดพืชที่ด้านข้างทั้ง 2 ด้าน เป็นตะแกรง เพื่อให้ลมผ่านได้ อย่างน้อยจะต้องมีช่องบรรจุเมล็ดพืช 2 ช่อง ตรงส่วนกลางจะเป็นห้องลมร้อนซึ่งจะพัดผ่านเมล็ดพืชออกแนวข้างทั้ง 2 ช่อง (ภาพตัดขวางของเครื่องอบแบบนี้แสดงไว้ในภาพที่ 18) เครื่องลดความชื้นแบบนี้มีข้อเสีย คือ เมล็ดพืชที่อยู่ชิดห้องลมร้อนจะแห้งเร็วกว่าทางด้านลมออก จึงต้องใช้ปริมาณลมสูง คือ 112 ถึง 262 ลูกบาศก์เมตร/นาที/ตันเมล็ดพืช เพื่อให้ความแตกต่างความชื้นของเมล็ดพืชส่วนที่ติดห้องลมร้อนกับด้านลมออกมีค่าน้อย อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ต่ำ คือ ประมาณ 54 องศาเซลเซียส

4.2) ชนิดเมล็ดพืชมีการคลุกเคล้า เครื่องลดความชื้นแบบนี้ต่างจากแบบในข้อ (4.1) คือ แทนที่ระหว่างห้องลมร้อนกับช่องบรรจุเมล็ดพืชจะเป็นตะแกรง แต่จะเป็นแผ่นทึบที่ทำเป็นแนวกลับทิศการไหลของเมล็ดพืชสลับไปมา ซึ่งในระหว่างแผ่นนี้จะมีช่องว่างให้ลมไหลผ่านได้เมล็ดพืชที่ไหลจากด้านบนสู่ด้านล่างจะมีโอกาสสัมผัสลมร้อนเท่า ๆ กัน เนื่องจากเมล็ดพืชไหลกลับไปกลับมา

เครื่องลดความชื้นแบบคอลัมน์ทั้ง 2 แบบนี้ สามารถใช้งานได้ 2 ลักษณะ คือ แบบแรกใช้อบแบบเป็นครั้งหรือแบทช์ โดยในขั้นแรกจะบรรจุเมล็ดพืชจนเต็มถัง จากนั้นจึงเปิดพัดลม และเตาลมร้อน ในขณะเดียวกันก็หมุนเวียนเมล็ดพืชส่วนที่อยู่ด้านล่างขึ้นไปสู่ด้านบนของถังบรรจุเมล็ดพืชหลาย ๆ ครั้งจนกว่าเมล็ดพืชจะแห้งได้ความชื้นตามที่ต้องการจึงถ่ายเมล็ดพืชออกจากถังเก็บการใช้งานในลักษณะที่สอง คือ แบบไหลต่อเนื่องเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงจะผ่านเข้าสู่ถังอบจากด้านบนลงล่างเพียงเที่ยวเดียวความชื้นจะลดลงในระดับหนึ่ง จากนั้นนำไปเก็บในถังพักไว้ระยะหนึ่งเพื่อปรับสภาพความชื้นภายในเมล็ดพืชเองอย่างน้อย 4 ชั่วโมง โดยทั่วไป 4 ถึง 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำกลับมาผ่านเครื่องอบใหม่ทำในลักษณะนี้จนกว่าเมล็ดพืชจะแห้ง

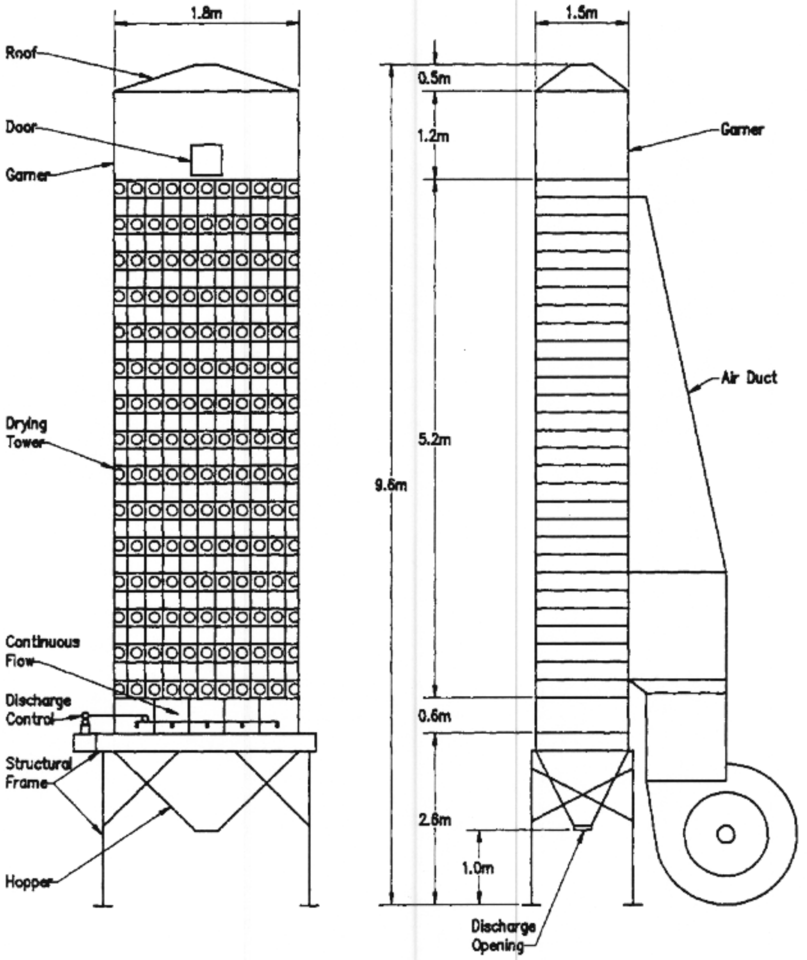


ภาพที่ 18 ภาพตัดขวางของเครื่องอบแบบคอลัมน์

ที่มา : Proctor (1994)

5) เครื่องลดความชื้นแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า ซึ่งทั่วไป เรียกว่า แบบแอลเอสยู (LSU) เครื่องลดความชื้นแบบนี้ดูภายนอกมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแบบคอลัมน์ คือ ถังบรรจุเมล็ดพืชจะเป็นแบบถังทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้ง เมล็ดพืชจะไหลจากด้านบนลงล่างโดยมีอุปกรณ์ควบคุมการไหลของเมล็ด ภายในถังอบประกอบด้วยท่อลมเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะมีท่อลม

หลายท่อ ท่อลมแต่ละชั้นจะเป็นท่อลมร้อนเข้า และท่อลมออกสลับกันท่อลมร้อนเข้านี้จะพัดผ่านเมล็ดพืชในถังอบ และไหลออกทางท่อลมออกที่อยู่ชั้นด้านบน และด้านล่างท่อลมแต่ละท่อจะมีลักษณะเป็นรางคว่ำ ด้านบนแหลม ด้านล่างเปิดว่างในแนวขนานกับพื้นยาวตลอดถัง ที่ปลายรางด้านหนึ่งจะเจาะช่องต่อเข้ากับห้องรวบรวมลม ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะปิดท่อลมแต่ละชั้นจะมีช่องที่เจาะเข้ากับห้องรวบรวมลมสลับกัน โดยชั้นหนึ่งจะต่อเข้าทางด้านห้องลมร้อนเข้า และอีกชั้นหนึ่งจะต่อเข้ากับห้องลมออก เครื่องลดความชื้นแบบนี้จะทำให้เมล็ดพืชไหลกลับไปกลับมา และมีโอกาสสัมผัสกับลมร้อนเข้า และลมชื้นที่เป่าออกสลับกัน เท่ากันตลอดทั้งถังบรรจุเมล็ดพืช ใช้ปริมาณลมในอัตรา 44 ถึง 97 ลูกบาศก์เมตร/นาที/ตันเมล็ดพืช บางครั้งอาจสูงถึง 112 ถึง 180 ลูกบาศก์เมตร/นาที/ตันเมล็ดพืช และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้จะได้สูงกว่าแบบคอลัมน์ คือ 66 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 19) สำหรับการใช้งานก็เช่นเดียวกันกับแบบคอลัมน์ คือ ใช้อบแบบเป็นครั้งหรืองวด และอบแบบไหลต่อเนื่อง



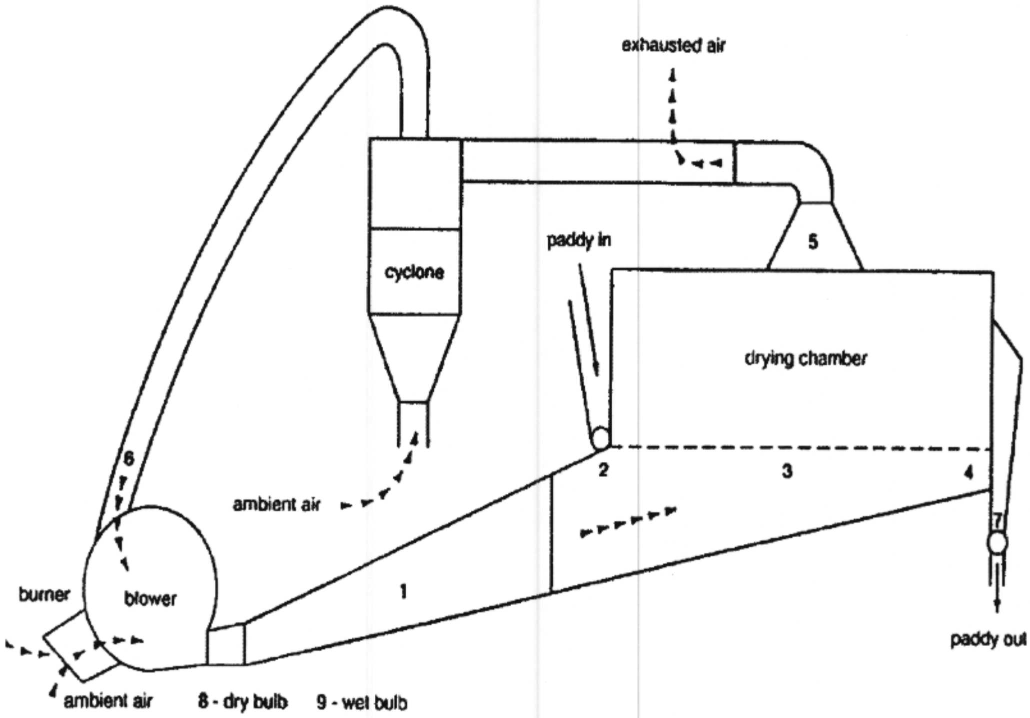
ภาพที่ 19 เครื่องลดความชื้นแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้าแบบแอลเอสยู

ที่มา : Proctor (1994)

2.2.4.3 การลดความชื้นด้วยวิธีการสมัยใหม่

ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องอบลดความชื้นที่ใช้เทคนิคสมัยใหม่ มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นกว่าเครื่องลดความชื้นแบบเดิม หรือใช้พลังงานได้ดีมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ดีเครื่องลดความชื้นแบบนี้บางรูปแบบยังคงมีราคาแพง

1) เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด เครื่องลดความชื้นแบบนี้ได้มีการพัฒนา และสร้างออกจำหน่ายภายในประเทศเมื่อไม่นานมานี้ และการใช้งานในลักษณะไหลต่อเนื่อง และใช้ปริมาณลมสูงถึง 1,900 ถึง 2,500 ลูกบาศก์เมตร/นาที/ตันเมล็ดพืช ส่วนของห้องอบจะเป็นห้องปิดมีตะแกรงอยู่ด้านล่าง ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน จะมีอุปกรณ์สำหรับป้อนเมล็ดพืชเข้า และออกจากห้องอบ ลมร้อนจะเป่าผ่านชั้นเมล็ดพืชที่อยู่บนตะแกรง และความหนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็ว 1.9 เมตร/วินาที ซึ่งทำให้เมล็ดพืชลอยตัวได้ อุณหภูมิลมร้อนที่จะใช้สูง คือ มากกว่า 100 องศาเซลเซียส และช่วงระยะเวลาที่เมล็ดพืชสัมผัสลมร้อนจะสั้นประมาณ 3 ถึง 5 นาที เหมาะสำหรับใช้ลดความชื้นเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 20 เนื่องจากเครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้ปริมาณลม และความร้อนสูงเป่าผ่านเมล็ดพืชในระยะเวลาอันสั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ลมร้อนจึงมีการนำเอาความร้อนที่ผ่านเมล็ดพืชแล้วกลับมาทำให้ร้อนใหม่ประมาณร้อยละ 80 ส่วนร้อยละ 20 เป่าทิ้งไป เมล็ดพืชเมื่อผ่านเครื่องลดความชื้นแบบนี้เพียงเที่ยวเดียวความชื้นจะลดลงร้อยละ 5 ถึง 10 ทำให้มีอัตราการทำงานสูง เหมาะกับตลาดกลางหรือโรงสีขนาดใหญ่ที่มีปริมาณข้าวเปลือกความชื้นสูงเข้ามาในปริมาณมาก เมล็ดพืชที่ผ่านเครื่องลดความชื้นแบบนี้แล้ว สามารถนำไปอบแห้งในยุ้งเก็บที่มีการเป่าอากาศผ่านกองเมล็ดพืชได้ หรืออาจใช้ร่วมกับเครื่องลดความชื้นแบบอื่น ๆ ก็ได้ ภาพที่ 20 แสดงตัวอย่างเครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบดที่ออกแบบสำหรับเมล็ดข้าว



ภาพที่ 20 เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบดสำหรับข้าว
ที่มา : Soponronnarit (1999)

2) เครื่องลดความชื้นโดยอาศัยหลักการนำความร้อน (conduction drying) โดยมีการออกแบบพื้นเหล็กที่มีการให้ความร้อนให้มีอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 59 องศาเซลเซียส โดยการหมุนเวียนด้วยน้ำร้อนจากเตาเผาซึ่งอาจใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง พบว่า สามารถลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกที่ความหนา 6 เซนติเมตร จากความชื้นร้อยละ 22 ถึง 26 เป็นร้อยละ 18 ได้ภายใน 1 ถึง 2 ชั่วโมง โดยวิธีการแบบนี้ พบว่า มีการแตกหักของเมล็ดข้าวน้อยกว่าการตากแดดในลานตาก และสามารถใช้เป็นขั้นตอนการลดความชื้นอย่างเร็วในขั้นตอนแรก สำหรับการอบแบบ 2 ขั้นตอน ได้เป็นอย่างดี

3) เครื่องลดความชื้นแบบโรตารี (rotary dryer) เป็นเครื่องลดความชื้นที่ใช้ท่อเหล็กขนาดใหญ่ เชื่อมกับมอเตอร์เพื่อขับให้มีการหมุน โดยภายในจะเชื่อมติดแผ่นเหล็กสำหรับคลุกเคล้าเมล็ดข้าว การให้ความร้อนใช้ลมร้อน ซึ่งอาจเป็นแบบทางตรง (direct heating) ที่ลมร้อนสัมผัสกับเมล็ดข้าวหรือทางอ้อม (indirect heating) ที่ลมร้อนไม่สัมผัสโดยตรงกับเมล็ดข้าว

4) เครื่องลดความชื้นแบบไมโครเวฟหรืออินฟราเรด (microwave or infrared dryer) หลักการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟหรือรังสีอินฟราเรด เริ่มจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ในระดับไมโครเวฟหรืออินฟราเรด ทำให้น้ำในเมล็ดข้าว

เกิดการเสียดสี และเกิดความร้อนเคลื่อนย้ายออกมาที่บริเวณผิวข้าว และระเหยไปกับอากาศโดยรอบได้ โดยเครื่องลดความชื้นแบบนี้จะใช้ลมเพื่อพาไอน้ำที่ระเหยออกมาจากเมล็ดข้าวออกไป ไม่ใช่เป็นตัวนำความร้อนส่งผ่านให้กับเมล็ดข้าว จึงทำให้เกิดฝุ่นฟุ้งกระจายได้น้อยกว่าการลดความชื้นแบบดั้งเดิม และมีความสม่ำเสมอในการเกิดความร้อน แต่อย่างไรก็ดีจะมีต้นทุนในส่วนของเครื่องจักรสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ ดังนั้นการใช้เครื่องลดความชื้นด้วยไมโครเวฟมักจะใช้กับผลิตผลทางการเกษตรที่มีมูลค่าสูง จึงยังคงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้กับเมล็ดข้าวในปัจจุบัน

2.2.4.4 การออกแบบระบบลดความชื้นในโรงสีเชิงพาณิชย์

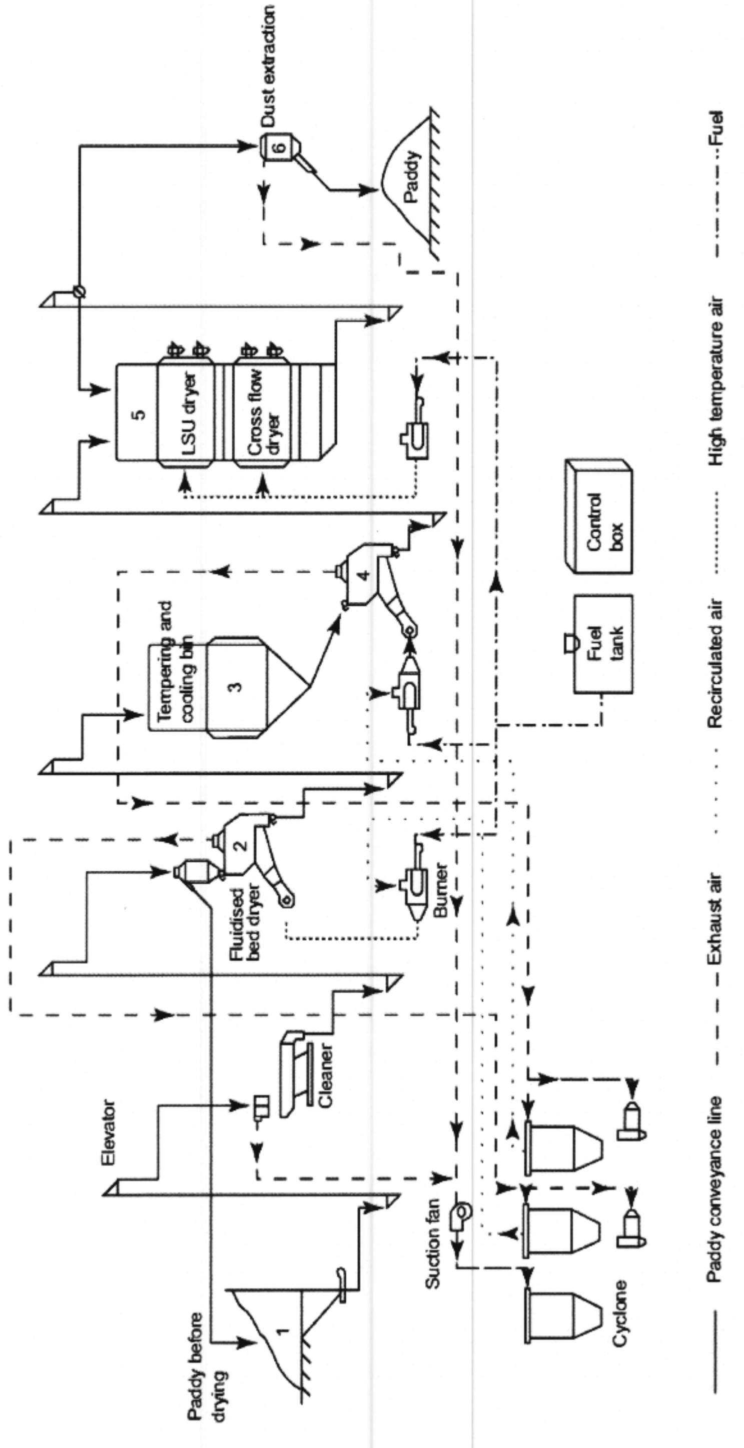
การติดตั้งระบบอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยการออกแบบอาจแตกต่างกันออกไปขึ้นกับแต่ละแห่ง อย่างไรก็ดีโรงสีเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมักทำการโดยใช้เครื่องอบแห้งเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นแบบ LSU แบบถังหมุนเวียน แบบคอลัมน์ หรือแบบฟลูอิดไดซ์-เบด ในขั้นตอนของการอบแห้ง

Meeso, Soponronnarit & Wetchacama (2000) ทำการทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งในโรงสีหลายแห่ง และได้รายงานระบบการอบแห้งข้าวเปลือกของโรงสีแห่งหนึ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งได้ออกแบบระบบไว้ดังแสดงในภาพที่ 21 โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของโรงสีดังกล่าว พบว่า มีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าโรงสีอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ โดยระบบได้ออกแบบให้มีกำลังการผลิต 6.03 ตัน/ชั่วโมง ทำการอบแห้งขั้นตอนแรกโดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด (หมายเลข 2 ในภาพ) โดยรับข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดจากเครื่องทำความสะอาด มีความชื้นร้อยละ 23.9 (ฐานแห้ง) ค่าเฉลี่ยร้อยละข้าวต้น คือร้อยละ 46.0 และความขาว 40.9 อัตราการป้อน 9.54 ตัน/ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ 142 องศาเซลเซียส ความสูงของข้าวในห้องอบ 15 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาในห้องอบ 1.4 นาที ซึ่งจะสามารถลดความชื้นลงมาเหลือร้อยละ 20.5 (ฐานแห้ง) อุณหภูมิของข้าวเฉลี่ย 67 องศาเซลเซียส มีร้อยละข้าวต้น 45.9 และความขาว 41.8 จากนั้นนำเข้าไปบ่มในถังขนาด 18 ตัน (หมายเลข 3 ในภาพ) ซึ่งจะทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 18.4 (ฐานแห้ง) อุณหภูมิเฉลี่ยของข้าว 43 องศาเซลเซียส ร้อยละข้าวต้น 44 และความขาว 40.7

ในส่วนของการอบแห้งขั้นตอนที่สอง จะใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด (หมายเลข 4 ในภาพ) โดยมีอัตราการป้อน 9.06 ตันต่อชั่วโมง ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบ 141 องศาเซลเซียส ความสูงของข้าว 12 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาในห้องอบ 1.2 นาที ซึ่งจะทำให้ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 15.6 (น้ำหนักแห้ง) อุณหภูมิข้าวเฉลี่ย 75 องศาเซลเซียส ได้ข้าวต้น (ข้าวเต็มเมล็ดหรือหักน้อยกว่าที่กำหนดไว้) ร้อยละ 43.7 ความขาว 41.2 จากนั้นข้าวจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบ LSU ขนาด 17 ตัน ซึ่งถูกใช้เป็นเสมือนถังบ่ม (หมายเลข 5 ในภาพ) แทนที่จะใช้ในการอบแห้ง ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ความชื้นลดลงเหลือ 14.2 อุณหภูมิข้าวเฉลี่ย 42 องศาเซลเซียส ได้ข้าวต้นร้อยละ 44.5 ความขาว 40.2 จากนั้น

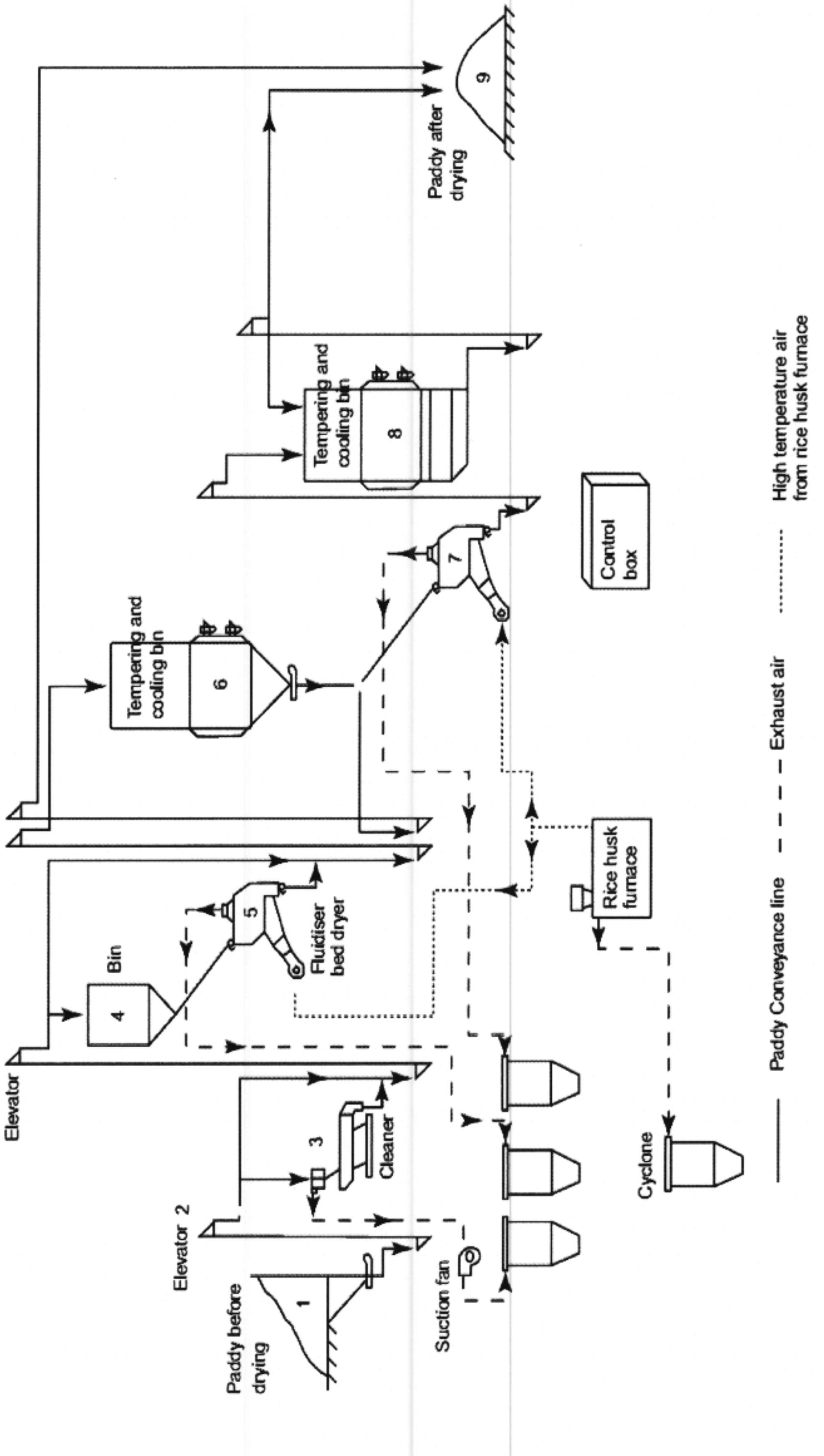
ข้าวจะถูกส่งผ่านไปยังถังแยกฝุ่นผง (หมายเลข 6 ในภาพ) ซึ่งจะทำให้ข้าวมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 41 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ดีจากการประเมินประสิทธิภาพในหลาย ๆ แห่ง Meeso, Soponronnarit & Wetchacama (2000) ได้แนะนำให้มีการออกแบบระบบการอบแห้งข้าวที่เหมาะสม โดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด ทั้งสองขั้นตอน ดังภาพที่ 22 โดยขั้นตอนแรกภายหลังจากข้าวได้รับการทำความสะอาด (หมายเลข 3 ในภาพ) ข้าวจะถูกส่งมาเก็บในถังขนาด 5 ตัน (หมายเลข 4) จากนั้นเข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด ขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง (หมายเลข 5) ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดความชื้นข้าวจากร้อยละ 25 ลงเหลือร้อยละ 20 (ฐานแห้ง) จากนั้นลำเลียงข้าวเข้าสู่ขั้นตอนการบ่มในถังขนาด 10 ตัน (หมายเลข 6) ในส่วนของขั้นตอนที่ 2 ใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด ขนาด 10 ตันต่อชั่วโมง (หมายเลข 7) ซึ่งจะสามารถลดความชื้นเมล็ดข้าวลงไปจนเหลือร้อยละ 16 (ฐานแห้ง) จากนั้นจึงลำเลียงเข้าถังบ่มขนาด 10 ตัน (หมายเลข 8) และเก็บไว้ในโกดังต่อไป



ภาพที่ 21 ระบบการอบแห้งข้าวเปลือกของโรงสีเชิงพาณิชย์

ที่มา : Meeso, Soponronnarit & Wetchacama (2000)



ภาพที่ 22 ระบบการอบแห้งข้าวเปลือกของโรงสีเชิงพาณิชย์ โดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด ทั้งสองขั้นตอน

ที่มา : Meeso, Soponronnarit & Wetchacama (2000)

2.3 การสีข้าวและการประเมินคุณภาพการสี

การสีข้าวเปลือก เป็นกระบวนการแปรรูปขั้นต้นที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะประเทศไทย เนื่องจากข้าวสารถือเป็นสินค้าแปรรูปจากข้าวที่สำคัญที่สุดของประเทศ กระบวนการสีข้าวเปลือกจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ได้แก่

1) การทำความสะอาดข้าวเปลือก เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ติดมากับข้าวเปลือก เศษกรวด หิน ดิน ทราย เศษวัชพืช ข้าวเมล็ดลีบ ใบข้าว ฯลฯ

2) การสีข้าวกล้อง หรือ การกะเทาะเปลือก เพื่อแยกเปลือกหุ้มแข็งออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้ คือ ข้าวกล้อง และแกลบ โดยข้าวกล้องจะเป็นส่วนของเนื้อผลที่ยังคงมีเยื่อหุ้มชั้นนอกติดอยู่ และแกลบจะเป็นส่วนของเปลือกเมล็ด หาง กลีบเลี้ยง และขั้วเมล็ด โดยส่วนของแกลบคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 ถึง 24 ขององค์ประกอบทั้งหมดของเมล็ดข้าว

3) การขัดขาว เพื่อขัดเยื่อหุ้มเมล็ด และทำให้คัพภะหลุดออกจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้ คือ ข้าวขัดขาว และรำ ซึ่งเป็นส่วนผสมของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด เยื่อแอลิวโรน คัพภะและผิวนอกของข้าวสาร ซึ่งจะมีประมาณร้อยละ 8 ถึง 10 ของข้าวเปลือก โดยมีข้าวขัดขาวที่ได้ประมาณร้อยละ 68 ถึง 70

4) การคัดแยก เพื่อแยกข้าวหักออกจากข้าวต้น และข้าวเต็มเมล็ด โดยคุณภาพการสีจะส่งผลต่อปริมาณที่ได้

นอกจาก 4 ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงสีหลายแห่ง อาจจะมีกระบวนการผสมข้าวต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้าวที่มีสมบัติตามต้องการ ก่อนที่จะนำไปบรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เพื่อจำหน่ายต่อไป (Bond, 2004)

2.3.1 เทคโนโลยีการสีข้าวเปลือกในประเทศไทย

การสีข้าว ถือเป็นส่วนหนึ่งของวัฒนธรรมไทยที่เกี่ยวกับข้าว และมีวิวัฒนาการมายาวนาน เครื่องสีข้าวโบราณแบบคันโยกสามารถใช้เพื่อสีเปลือกข้าวให้ร่อนออกจากเมล็ดได้เป็นข้าวกล้อง แล้วนำไปใส่ครกตำทำให้ได้เป็นข้าวขาวหรือข้าวสาร วิธีใส่ครกตำ เรียกว่า ซ้อมข้าว จากนั้นจะนำข้าวกล้องที่ได้มาซ้อมข้าวให้ขาวโดยการตำในครกไม้ ก็จะได้เป็นข้าวสารสำหรับบริโภคต่อไป

กระแสความต้องการบริโภคอาหารที่ผลิตโดยวิธีแบบอินทรีย์ทำให้กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรบางแห่ง หันมาใช้เครื่องสีข้าวแบบโบราณดังกล่าวในการผลิตข้าวกล้อง แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของการสีข้าวสำหรับอุตสาหกรรมทั้งในระดับครอบครัว วิสาหกิจชุมชน อุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะใช้เครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังสำหรับการสีข้าว

โรงสีข้าวจัดเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมากที่สุดในประเทศไทย ศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2550) รายงานปริมาณโรงสีข้าวที่ขึ้นทะเบียนไว้กับกรมโรงงานอุตสาหกรรมทั่วประเทศ

มีอยู่ 39,834 แห่ง เทคโนโลยีการสีข้าวเปลือกในประเทศไทย หากแบ่งออกเป็นตามขนาดของโรงสีได้ 3 ประเภท ดังนี้

1) โรงสีใหญ่ หรือ โรงสีไฟ เป็นโรงสีข้าวขนาดใหญ่ที่มักจะใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหมุนเครื่องจักรไอน้ำซึ่งใช้เป็นตัวต้นกำลัง ส่วนใหญ่มักจะตั้งอยู่ในตัวจังหวัด ตัวอำเภอหรือชุมชนขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตตั้งแต่ 20 ตันขึ้นไปต่อวัน โรงสีข้าวขนาดนี้มีอยู่ประมาณร้อยละ 18 ของโรงสีข้าวทั่วทั้งประเทศ

2) โรงสีกลาง หรือ โรงสีเศรษฐกิจ เป็นโรงสีขนาดย่อมลงมา ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องต้นกำลัง มีกำลังการผลิตระหว่าง 5 ถึง 30 ตันต่อวัน มักจะตั้งอยู่ในระดับตำบลหรือหมู่บ้านโรงสีข้าวประเภทนี้มีอยู่ประมาณร้อยละ 20 ของจำนวนโรงสีข้าวทั่วประเทศ

3) โรงสีเล็ก หรือ โรงสีครอบครัว ส่วนใหญ่อยู่ในหมู่บ้านชนบท มีอยู่ประมาณร้อยละ 62 ของจำนวนโรงสีข้าวทั่วประเทศส่วนใหญ่ยังคงใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องต้นกำลังและมีแนวโน้มเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

การใช้เครื่องจักรในการสีข้าว จำเป็นต้องออกแบบให้มีความเหมาะสม ปริมาณข้าวสารที่ได้จากกระบวนการสี รวมทั้งคุณภาพของข้าวสาร จะขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ โรงสีข้าวที่ใช้เครื่องจักรที่มีความทันสมัย จะได้ปริมาณข้าวสารมากกว่าโรงสีข้าวที่ใช้เครื่องจักรแบบดั้งเดิม ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ในขณะเดียวกัน จะได้ปริมาณข้าวสารเต็มเมล็ดมากกว่า และมีความเสียหายน้อยกว่า ลักษณะการทำงานของโรงสีที่ดี จะประกอบด้วย

1) สีข้าวเปลือกได้ปริมาณข้าวสารสูง

2) ข้าวสารที่ได้มีคุณภาพสูง

3) มีความสูญเสียข้าวเปลือกน้อย

4) ค่าใช้จ่ายในการสีข้าวต่ำ

ในกลุ่มประเทศทางแถบเอเชีย ได้ตระหนักถึงความจำเป็นในการใช้เครื่องจักรที่มีคุณภาพสูงในกระบวนการสีข้าว แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวแปรอีกมากมายที่มีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพของข้าว เช่น ความชื้นของข้าวเปลือก คุณภาพของข้าวเปลือก เป็นต้น

2.3.2 คุณภาพการสีข้าวเบื้องต้น

มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในส่วนของคุณภาพการสีข้าวที่สำคัญ คือ ข้าวเปลือกที่จะนำมาสีต้องมีคุณภาพดี เครื่องจักรที่ใช้ต้องมีประสิทธิภาพ และมีการควบคุมการทำงานอย่างเหมาะสม โดยในส่วนของข้าวเปลือกจะต้องมีความแก่พอดี มีขนาดเป็นไปตามพันธุ์ ไม่มีการแตกร้าว เมล็ดไม่ลีบ สะอาดไม่มีการปนเปื้อนของเศษวัชพืชต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งหากคุณภาพของข้าวเปลือกดีก็จะทำให้ข้าวที่สีได้มีคุณภาพดีตามไปด้วย คุณลักษณะที่ใช้ในการประเมินคุณภาพการสีเบื้องต้นสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณลักษณะที่ใช้ในการประเมินคุณภาพการสี

คุณลักษณะ	คำอธิบาย
	ข้าวที่สีไม่สมบูรณ์ หมายถึง ข้าวที่ขัดสีไม่หมด หรือมีส่วนของรำข้าวติดอยู่ แม้ว่าข้าวประเภทนี้จะทำให้ผลผลิตของการสีสูง แต่เป็นลักษณะที่ไม่ต้องการ เนื่องจากชั้นรำที่ติดอยู่จะทำให้มีปัญหาระหว่างการเก็บรักษาข้าวสาร เกิดการเหม็นหืน มีอายุการเก็บรักษาต่ำผู้บริโภคไม่ยอมรับ
	ข้าวหัก เป็นข้าวที่แตกหักระหว่างการสี ซึ่งเกิดจากรอยแตกร้าวภายในข้าวก่อนนำมาทำการสี ในทางปฏิบัติรอยแตกร้าวในเมล็ดข้าวเกิดขึ้นโดยธรรมชาติตั้งแต่ในแปลงนาอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนั้นการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น ระบบการลดความชื้นที่ไม่เหมาะสม ข้าวมีการเปียกชื้นภายหลังลดความชื้นไปแล้ว ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อรอยแตกร้าวในเมล็ด โดยปกติแล้วข้าวที่มีรอยแตกร้าวอาจจะไม่หักระหว่างการสีก็ได้ นอกจากนั้นข้าวเมล็ดยาวมีโอกาสแตกหักได้ง่ายกว่าข้าวเมล็ดสั้น
	ข้าวมีสีเหลือง โดยปกติแล้วสีของข้าวจะขึ้นกับสายพันธุ์ แต่อย่างไรก็ตามข้าวที่มีความชื้นสูงแล้วไม่ได้รับการลดความชื้นภายในเวลาที่กำหนด หรือเก็บไว้โดยไม่ลดความชื้นจะทำให้เกิดสีเหลืองขึ้น
	ข้าวท้องไข่หรือข้าวมีสีขุ่นกว่าปกติ ซึ่งจะไม่ส่งผลต่อรสชาติภายหลังการหุง แต่เป็นลักษณะที่ไม่ต้องการของข้าวสาร ข้าวท้องไข่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเจริญเติบโตของเมล็ดข้าว
	ข้าวเมล็ดสีหรือข้าวที่มีสีคล้ำบางส่วนหรือทั้งหมด อันเป็นผลจากแมลง เชื้อรา ความร้อน ความชื้น ฯลฯ
	สิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในข้าวเปลือก แสดงให้เห็นถึงการทำความสะอาดข้าวไม่ดีพอ จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดให้ดีก่อนนำข้าวเปลือกไปสี

ที่มา : IRRI (2008)

การตรวจสอบคุณภาพการสี และข้าวสารที่ได้ สามารถตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ซึ่งโรงสีสามารถเลือกตรวจสอบตามความจำเป็น และขึ้นกับความพร้อมของแต่ละแห่ง รวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง สรุปการหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) ระดับการสี (milling degree) หมายถึง ปริมาณชั้นรำที่ถูกขัดสีออกไปจากข้าวกล้อง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 1 โดยในส่วนของมาตรฐานข้าวไทยตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ พ.ศ. 2540 แบ่งระดับการสีออกเป็น 4 ระดับ คือ

1. สีดีพิเศษ คือ การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามเป็นพิเศษ
2. สีดี คือ การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามดี
3. สีดีปานกลาง คือ การสีขัดเอารำออกเป็นส่วนมากจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพอสมควร
4. สีธรรมดา คือ การสีขัดเอารำออกแต่เพียงบางส่วน

$$\text{ระดับการสี (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง}} \times 100 \qquad (1)$$

2) อัตราการสี หรือ ข้าวสารที่ได้ (milling recovery) เป็นการตรวจสอบปริมาณข้าวที่ได้จากการสี โดยการนำข้าวเปลือกมาสีขัดขาวจนเป็นข้าวสาร จากนั้นคำนวณดังสมการที่ 2

$$\text{ข้าวสารที่ได้ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสารที่ได้}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือกที่ใช้}} \times 100 \qquad (2)$$

3) ส่วนเสียในข้าว (dockage) เป็นการตรวจสอบการปนเปื้อนของส่วนเสียต่าง ๆ ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าว จากนั้นทำการคัดเลือกเอาส่วนเสียต่าง ๆ สิ่งปนเปื้อนออก หาสัดส่วนดังสมการที่ 3

$$\text{ส่วนเสีย (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนเสียที่คัดแยกได้}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวสารทั้งหมด}} \times 100 \qquad (3)$$

4) ข้าวต้น (head rice) และข้าวหัก (broken rice) เป็นการตรวจสอบข้าวหักจากการสี ทำได้โดยการคัดเลือกข้าวหักออกจากข้าวเต็มเมล็ด (whole grain) หาสัดส่วนดังสมการที่ 4-5

$$\text{ข้าวต้น (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \qquad (4)$$

$$\text{ข้าวหัก (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวหัก}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \qquad (5)$$

5) ข้าวท้องไข่ (chalkiness) หรือข้าวมีสีขาวขุ่น สามารถตรวจสอบโดยตรวจสอบข้าวทีละเมล็ดเปรียบเทียบกับสเกลดังนี้

1. สเกล 1 มีข้าวท้องไข่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั้งหมด
2. สเกล 5 มีข้าวท้องไข่อยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 ของพื้นที่ทั้งหมด
3. สเกล 9 มีข้าวท้องไข่มากกว่าร้อยละ 20 ของพื้นที่ทั้งหมด จากนั้นนำข้าวที่มีระดับสเกล 9 มาหาร้อยละของข้าวท้องไข่ดังสมการที่ 6

$$\text{ข้าวท้องไข่ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวท้องไข่}}{\text{น้ำหนักข้าวสารทั้งหมด}} \times 100 \qquad (6)$$

6) ข้าวเหลือง (yellow grain) หมายถึง ข้าวที่มีสีเหลือง สามารถหาได้โดยคัดแยกข้าวที่มีสีเหลืองออกจากตัวอย่างจากนั้นคำนวณดังสมการที่ 7

$$\text{ข้าวเหลือง (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเหลือง}}{\text{น้ำหนักข้าวสารทั้งหมด}} \times 100 \qquad (7)$$

7) สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/W) เป็นการตรวจสอบรูปร่างของข้าวเปลือก ทำได้โดยการวัดความกว้าง และความยาวของข้าวเปลือกจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย และหาสัดส่วนดังสมการ 8 โดยมีมาตรฐานสากลกำหนดไว้ดังตาราง 6

$$\text{L/W ratio} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยความยาวข้าวเปลือก (มม.)}}{\text{ค่าเฉลี่ยความกว้างข้าวเปลือก (มม.)}} \times 100 \qquad (8)$$

ตารางที่ 6 รูปร่างของข้าวเปลือกตามมาตรฐานสากล

สเกล	รูปร่าง	สัดส่วน (L/M ratio)
1	Slender (ผอมบาง)	มากกว่า 3.0
3	Medium (ปานกลาง)	2.1-3.0
5	Bold (หนา)	1.1-2.0
9	Round (กลม)	น้อยกว่า 1.0

ที่มา : IRRI (2008)

8) น้ำหนักข้าวใน 1,000 เมล็ด หาได้โดยทำการชั่งน้ำหนักข้าวจำนวน 1,000 เมล็ด

9) นอกจากนั้นยังอาจทำการตรวจสอบคุณภาพข้าวสารที่ได้ เช่น การตรวจสอบหาปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิการเกิดเจล และความคงตัวของเจล (จะได้อธิบายต่อไป)

ปัจจัยที่สำคัญในการสีข้าว คือ ร้อยละของข้าวสาร และข้าวต้นที่ได้ ซึ่งข้อมูลทั่วไปของเครื่องสีชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 อย่างไรก็ดีมีปัจจัยอื่น ๆ อีกมากที่ต้องคำนึง เช่น สายพันธุ์ ความชื้น ฯลฯ

ตารางที่ 7 อัตราการสีและข้าวต้นที่ได้จากการสีโดยทั่วไป

เครื่องสีชนิดต่าง ๆ	ข้าวสาร (ร้อยละ)	ข้าวต้น (ร้อยละ)
ในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมเป็นพิเศษ	68-72	50-58
Single stage (Engleberg steel mill)	50-55	15-30
Compact rice mill (two stage single pass)	>60	40-50
Multi stage (โรงสีสมัยใหม่)	65-70	45-55

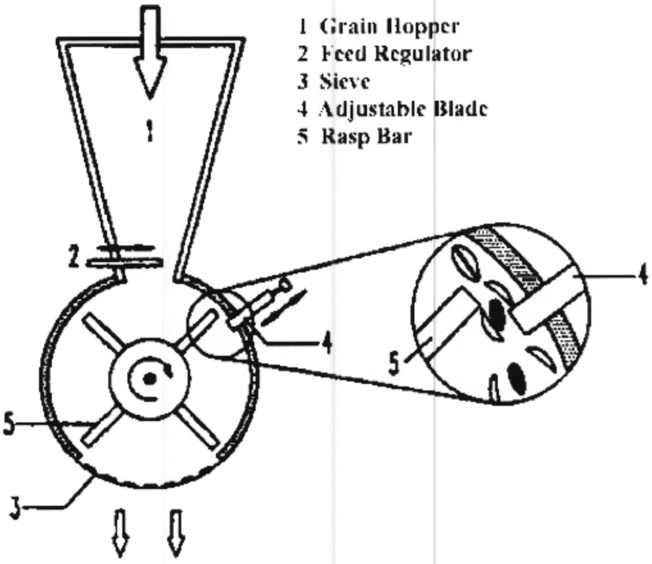
ที่มา : IRRI (2008)

2.3.3 วิวัฒนาการของเครื่องจักรสีข้าว

ปัจจุบันเครื่องจักรสำหรับใช้ในการสีข้าวได้รับการพัฒนาให้มีความก้าวหน้าเพิ่มขึ้นมาก สามารถสีข้าวให้ได้คุณภาพดี มีกำลังการผลิตสูง และควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

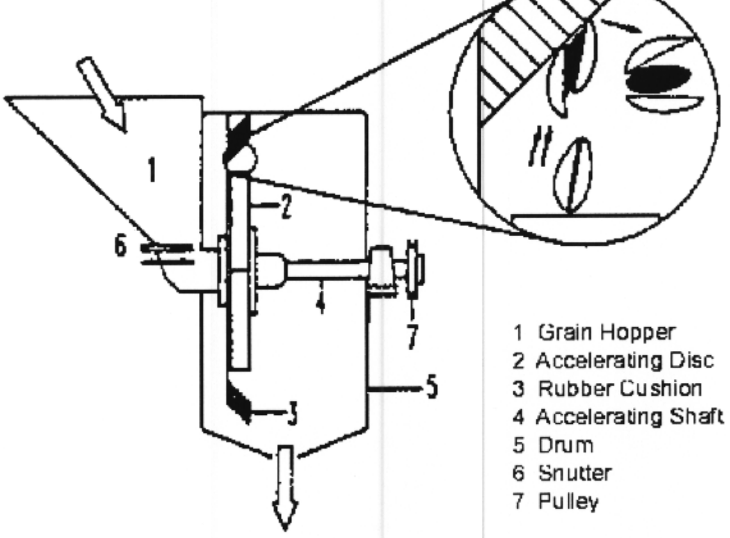
ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 ระบบการสีที่ถือเป็นเครื่องจักรเริ่มต้น ที่มีการใช้สำหรับสีข้าวเปลือกไปเป็นข้าวสาร คือ เครื่องสีแบบเอนเจลเบิร์จ (Engleberg rice huller) ซึ่งใช้กันแพร่หลายในโรงสีขนาดเล็กในประเทศกำลังพัฒนา ส่วนประกอบหลักเป็นลูกกลิ้งทรงกระบอกในแนวนอนมีฝาครอบ หมุนด้วยความเร็วสูงทำให้เปลือกข้าวหลุดจากการขัดสีกับฝาครอบครึ่งล่างเป็นตะแกรงที่ปรับความถี่ห่างได้ (ภาพที่ 23) ข้อเสียของเครื่องสีข้าวแบบนี้ คือ ใช้พลังงานสูง ให้ผลผลิตต่ำ นอกจากนั้นข้าวสารที่ได้ยังมีการแตกหักสูง

นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาเครื่องสีแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal rice huller) ซึ่งอาศัยการขัดสีข้าวเปลือกโดยจานที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 3,000 ถึง 4,000 รอบต่อนาที (ภาพที่ 24) เครื่องสีแบบนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบเอนเจลเบิร์จ



ภาพที่ 23 เครื่องสีข้าวแบบเอนเจลเบิร์จ

ที่มา: FAO (1994)



ภาพที่ 24 เครื่องสีข้าวแบบหมุนเหวี่ยง

ที่มา : FAO (1994)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ปัจจุบันเทคโนโลยีการสีข้าวได้พัฒนาไปมาก มีการออกแบบเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเดิม และมีเครื่องจักรเฉพาะในแต่ละขั้นตอนตั้งแต่การทำความสะอาดข้าวเปลือก ไปจนถึงการสีให้ได้ข้าวขัดขาว และการบรรจุข้าว

2.3.4 การทำความสะอาดข้าวเปลือก

โดยปกติข้าวเปลือกจากเกษตรกรที่โรงสีได้รับ จะมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น เศษดิน เศษหิน เศษฟางข้าว แกลบ วัชพืช เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องทำความสะอาด ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกะเทาะเปลือก ซึ่งจะทำให้คุณภาพของข้าวสารที่กะเทาะได้ดีขึ้น สิ่งเจือปนที่มีน้ำหนักเบากว่าข้าวเปลือกสามารถคัดแยกโดยใช้พัดลมทำความสะอาด ในขณะที่วัสดุเจือปนที่มีน้ำหนักมากกว่าข้าวเปลือกจะคัดแยกโดยการใช้ตะแกรงโยก สิ่งปลอมปนที่มีขนาดเท่ากับเมล็ดข้าวเปลือก แต่มีน้ำหนักมากกว่าจะใช้วิธีการแยกด้วยความโน้มถ่วง (specific gravity separator) ในขณะที่เศษเหล็กที่เจือปนในข้าวเปลือก จะใช้สมบัติความเป็นแม่เหล็กในการคัดแยก (magnetic separator) เมล็ดวัชพืช หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ ซึ่งไม่สามารถคัดแยกได้ในขั้นตอนนี้ จะถูกคัดแยกในขั้นตอนต่อไป

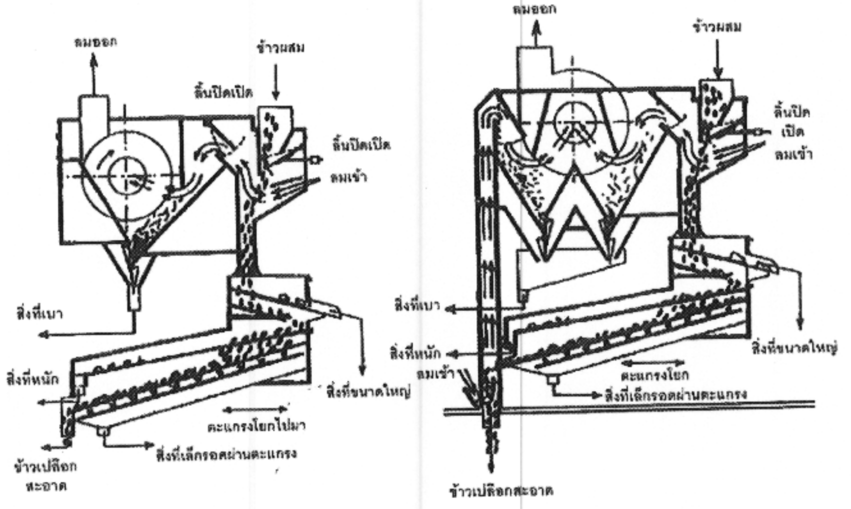
มีการออกแบบเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดไว้หลากหลาย เช่น เครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่า และตะแกรงโยกคู่ (double-sieve cleaner) ตะแกรงทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning sieve) เครื่องทำความสะอาดแบบพัดลมดูดจังหวะเดียว (single action aspirator) เครื่องทำความสะอาดแบบพัดลมดูดสองจังหวะ (double-action aspirator) เครื่องทำความสะอาดแบบทรงกระบอกคู่ (double-drum precleaner) เครื่องทำความสะอาดแบบทรงกระบอกเดียว (single-drum precleaner) เครื่องทำความสะอาดแบบแม่เหล็ก (magnetic separator)

ตะแกรงที่นิยมใช้สำหรับการทำความสะอาดข้าวเปลือก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตะแกรงทรงกระบอกหมุน (rotating screen) และตะแกรงโยก (oscillating screen) เนื่องจากข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของการสั่นตะแกรงโยก ดังนั้น การออกแบบตะแกรงที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องลดลง

เครื่องทำความสะอาดบางประเภท จะมีอุปกรณ์พิเศษ สำหรับคัดแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเดียวกับข้าวเปลือก แต่มีน้ำหนักต่างกัน โดยมีหลักการทำงาน คือ ลมจะไหลผ่านที่ด้านล่างของตะแกรงโยก ที่มีรูขนาดเล็ก สิ่งเจือปนที่มีน้ำหนักมากกว่า (เศษหิน) จะเคลื่อนตัวลงล่าง ในขณะที่ข้าวเปลือกที่มีน้ำหนักน้อยกว่า จะเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนตามแนวเอียงของตะแกรง ดังนั้น เศษหินจึงถูกแยกออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้

สำหรับการคัดแยกสิ่งเจือปนที่เป็นเหล็ก ตะแกรงทำความสะอาดจะยึดติดด้วยแม่เหล็กคัดแยก ซึ่งเศษเหล็กต่าง ๆ จะถูกทำความสะอาดออกเป็นระยะ ๆ

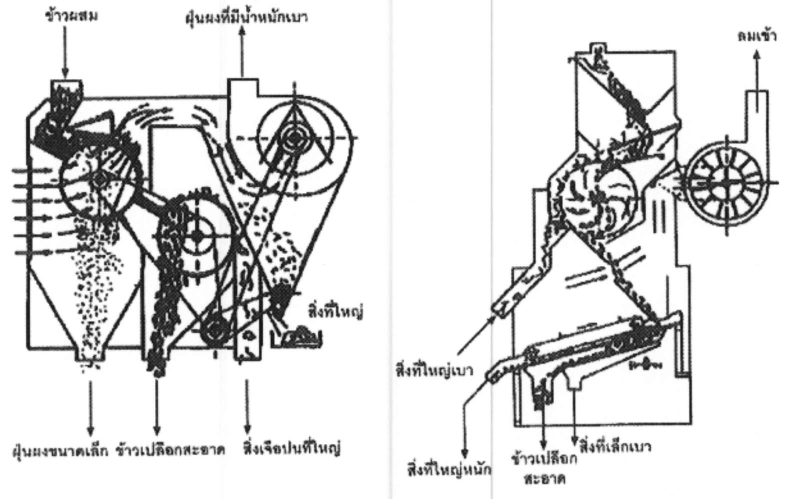
ตัวอย่างลักษณะของเครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่า และตะแกรงโยกดังแสดงใน ภาพที่ 25 สำหรับตัวอย่างของเครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่า และตะแกรงทรงกระบอกหมุน แสดงในภาพที่ 26



ก. เครื่องทำงานจังหวะเดียว ข. เครื่องทำงานสองจังหวะ

ภาพที่ 25 เครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่า และตะแกรงโยก

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)



ก. แบบเยอรมัน ข. แบบญี่ปุ่น

ภาพที่ 26 เครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่า และตะแกรงทรงกระบอกหมุน

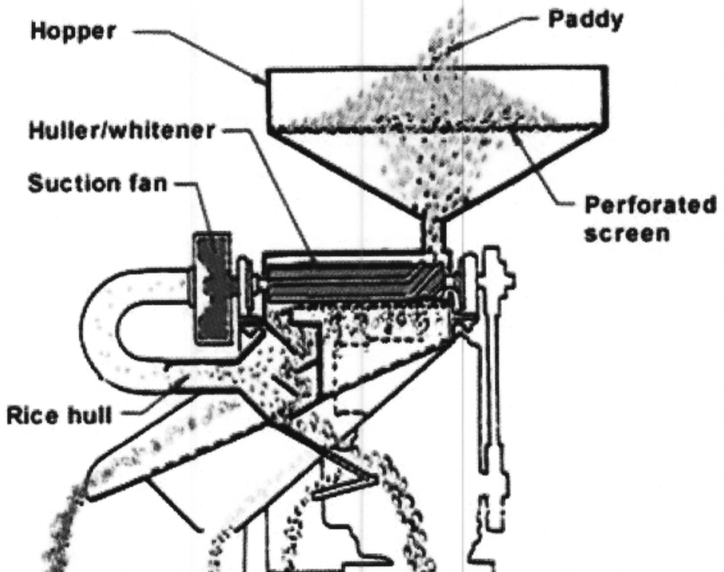
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

2.3.5 การกะเทาะข้าวเปลือก

การกะเทาะข้าวเปลือกเป็นการแยกเอาเปลือกหุ้มแข็งหรือแกลบออกจากข้าวกล้อง โดยอาศัยแรงกด แรงบีบ หรือการเสียดสี ขึ้นกับการออกแบบ

ระบบการกะเทาะข้าวเปลือกที่นิยมใช้อาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การกะเทาะโดยการใช้ลูกเหล็ก (steel husker) การใช้จานหมุน (underrunner disk husker) และการใช้ลูกกลิ้งยาง (rubber roller husker) โดยประสิทธิภาพการกะเทาะของระบบการใช้ลูกกลิ้งยางโดยทั่วไป จะสูงกว่าระบบการใช้แบบลูกเหล็ก และการใช้แบบจานหมุน

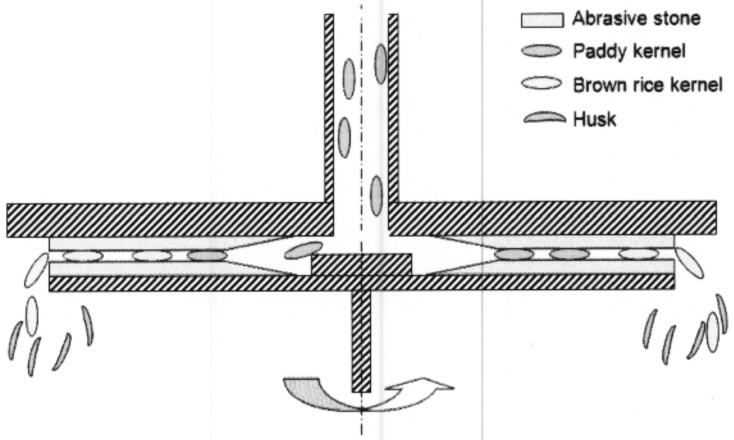
1. การกะเทาะโดยใช้ลูกเหล็ก เป็นการดัดแปลงจากระบบการสีแบบเอนเจลเบิร์จ ซึ่งระบบการกะเทาะแบบนี้ยังทำหน้าที่ขัดขาวไปในตัวด้วย ลักษณะการทำงานดังแสดงในภาพที่ 27 โดยข้าวเปลือกที่ป้อนเข้าไปจะถูกกะเทาะ และขัดขาวไปพร้อม ๆ กัน โดยลูกเหล็กและฝาครอบที่ครึ่งล่างเป็นตะแกรง



ภาพที่ 27 ลักษณะการกะเทาะข้าวเปลือกแบบการใช้ลูกเหล็ก
ที่มา : IRRI (2008)

2. การกะเทาะโดยใช้จานหมุน ลักษณะของเครื่องประกอบด้วยจาน 2 ใบประกบกัน จานบนจะอยู่กับที่ ส่วนจานล่างจะหมุนทำให้เกิดแรงเสียดสี และดึงแยกเปลือกออกจากข้าว-กล้อง ระยะห่างของจานสามารถปรับได้ โดยจานอาจทำจากวัสดุหลากหลาย เช่น

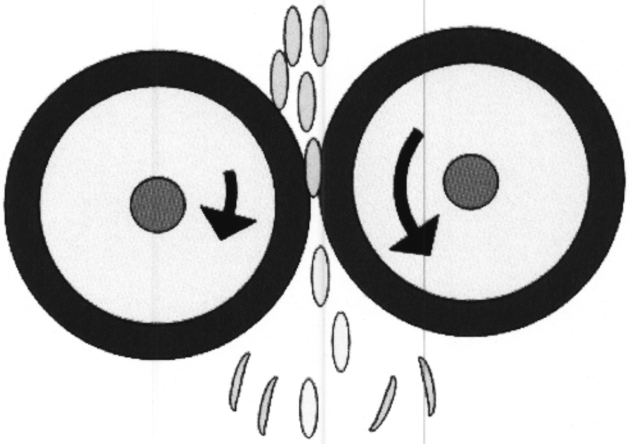
จานบนเป็นเหล็ก จานล่างบุด้วยหินกากเพชรหรือบุด้วยหินกากเพชรทั้งสองจาน (โรงสีในประเทศไทยเรียก หินข้าวดำหรือหินจาน) ลักษณะการทำงานดังภาพที่ 28



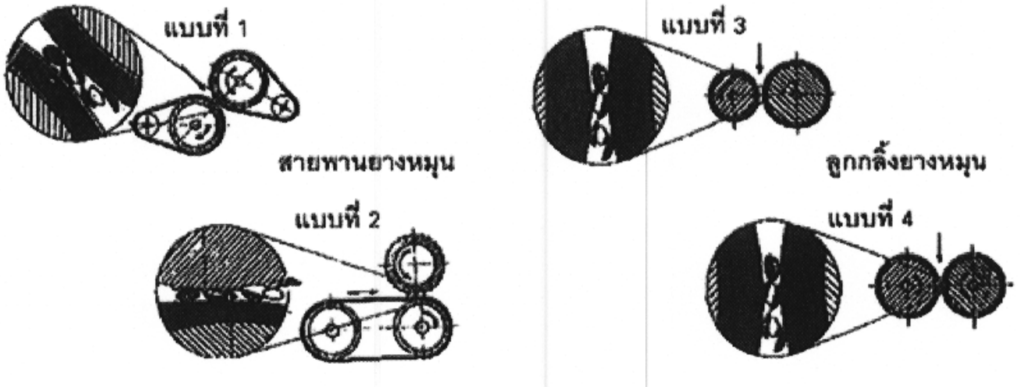
ภาพที่ 28 ลักษณะการกะเทาะข้าวเปลือกโดยใช้จานหมุน
ที่มา : IRRI (2008)

เครื่องกะเทาะแบบจานหมุนแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบลูกเหล็ก แต่เครื่องจักรมักจะมีขนาดใหญ่น้ำหนักมาก ต้องการพื้นที่เยอะ นอกจากนั้นยังก่อให้เกิดการขีดข่วนในเมล็ดข้าว ไม่เหมาะกับข้าวเปลือกที่มีขนาดเมล็ดไม่สม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 85 ถึง 90 ซึ่งน้อยกว่าแบบลูกยาง นอกจากนั้นยังอาจมีเศษหินหลุดปนไปกับข้าวที่ผ่านการกะเทาะแล้ว

3. การกะเทาะโดยการใช้ลูกกลิ้งยางหรือสายพานยาง เป็นวิธีการที่โรงสีในปัจจุบันนิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง สามารถลดการแตกหักของข้าวได้ดีกว่าแบบอื่น การดึงแยกเปลือกของข้าวออกอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งยางที่หมุนด้วยอัตราเร็วต่างกันหรือขนาดแตกต่างกัน โดยมีลักษณะของการกะเทาะดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งการออกแบบลักษณะของลูกกลิ้งยางหรือสายพานยางอาจแตกต่างกันไปตามแต่ผู้ผลิต (ภาพที่ 30) แต่อาศัยหลักการเดียวกันดังกล่าวมาข้างต้น



ภาพที่ 29 ลักษณะการกะเทาะข้าวเปลือกโดยใช้ลูกกลิ้งยาง และลักษณะของลูกกลิ้งยางที่ใช้ในโรงสีขนาดกำลังการผลิต 2 ตันต่อชั่วโมง
ที่มา : IRRI (2008)



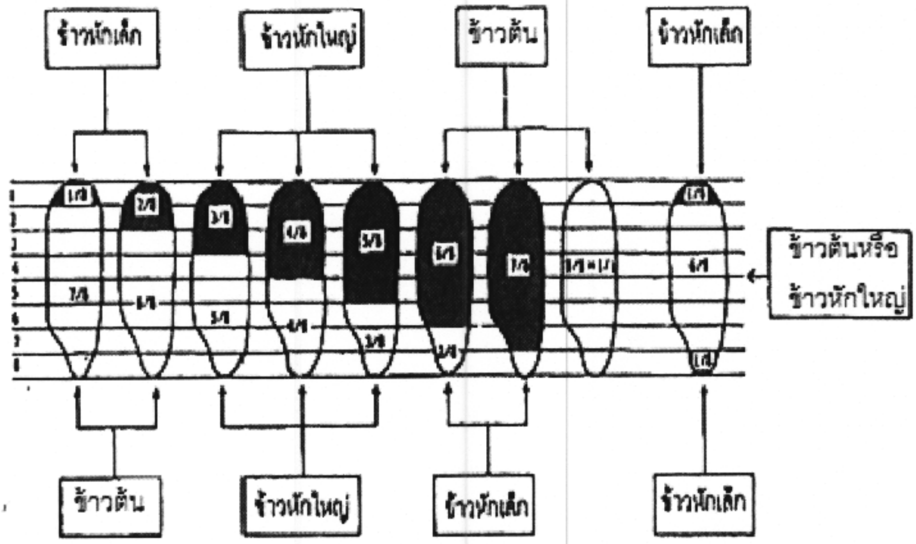
ภาพที่ 30 ลักษณะการออกแบบลูกกลิ้งยางหรือสายพานยางแบบต่าง ๆ
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

การกะเทาะโดยการใช้ลูกยางแม้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่น ๆ ให้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี ข้าวหักน้อย แต่มีข้อที่ต้องคำนึงคือ ราคาของเครื่องจักร รวมถึงการบำรุงรักษา การสึกหรอของลูกยางหรือสายพานซึ่งจะมีอายุการใช้งานสั้นกว่า การใช้การกะเทาะแบบลูกเหล็กหรือแบบจานหมุน โรงสีจึงควรเลือกใช้ตามความเหมาะสม

2.3.6 การคัดขนาด

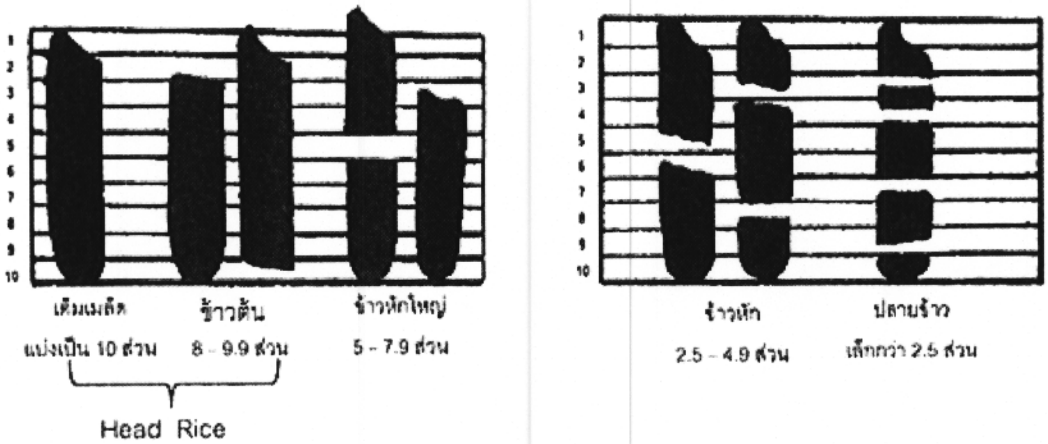
โดยปกติก่อนการสีอาจมีการคัดขนาดข้าวเปลือก โดยคัดแยกเอาเมล็ดลีบหรือเมล็ดข้าวเปลือกที่ไม่ได้ขนาดออกไปก่อน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสี แต่โดยทั่วไป

มักจะไม่มีการดำเนินการ มีเพียงขั้นตอนการทำความสะอาด ซึ่งอาจจะช่วยกำจัดข้าวเมล็ดลีบได้ การคัดขนาดข้าวจะดำเนินการกับข้าวที่ผ่านการสีแล้วหรือข้าวสาร เป็นการแยกข้าวต้นออกจากข้าวหัก โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 8 ส่วน (ภาพที่ 31) แต่ในส่วนของมาตรฐานข้าวไทยตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ (2540) จะแบ่งออกเป็น 10 ส่วน (ภาพที่ 32) ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักเล็ก และปลายข้าว



ภาพที่ 31 การแบ่งสัดส่วนข้าวต้น และข้าวหักโดยทั่วไป

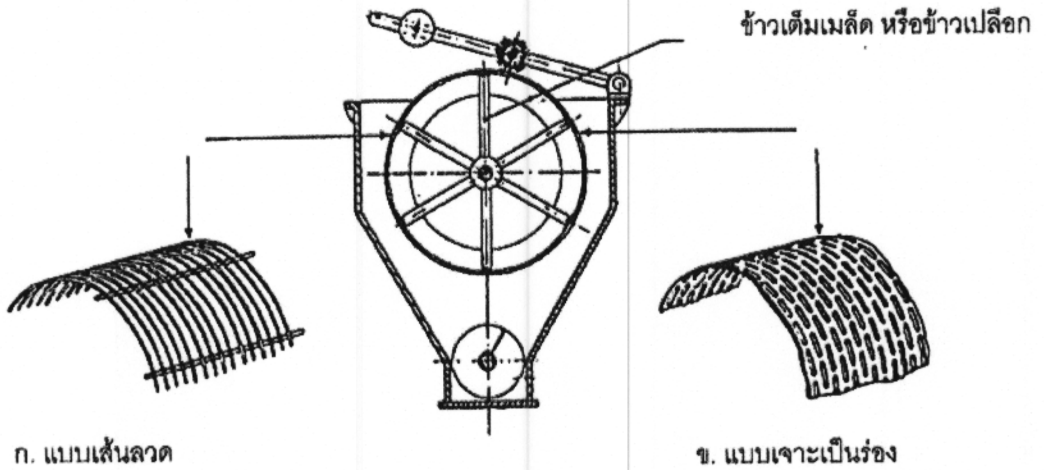
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)



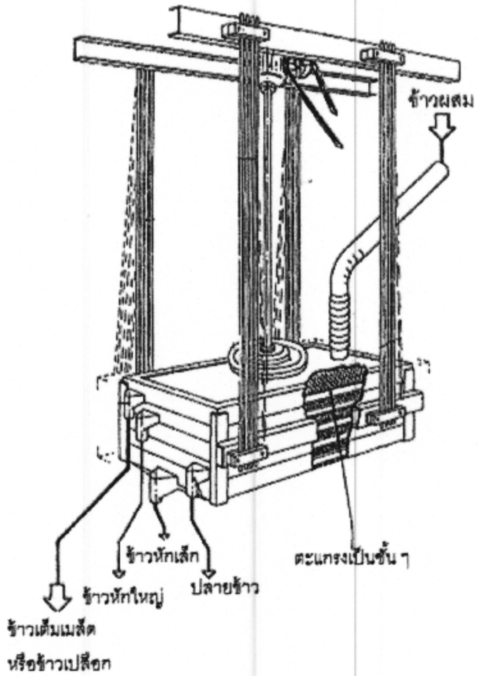
ภาพที่ 32 การแบ่งสัดส่วนข้าวต้น และข้าวหักตามมาตรฐานข้าวไทย ตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ (2540)

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

เครื่องจักรที่ใช้ในการคัดแยกข้าวโดยส่วนใหญ่อาศัยหลักการของความหนาหรือความแตกต่างของขนาดของเมล็ดข้าว และคัดแยกผ่านตะแกรงที่เจาะรูเป็นรูปต่าง ๆ ตามการออกแบบของผู้ผลิตที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจออกแบบในรูปของลูกกลิ้งหมุน (ภาพที่ 33) หรือในลักษณะของตะแกรงโยก (ภาพที่ 34)



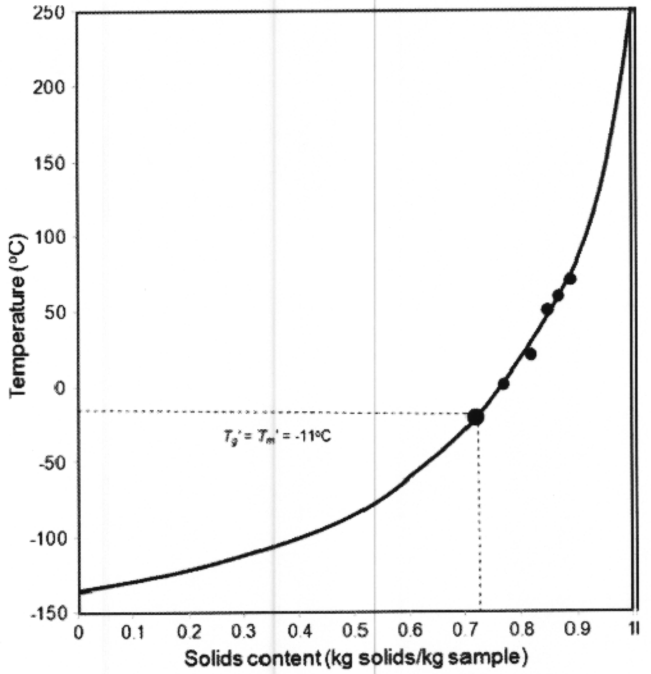
ภาพที่ 33 เครื่องคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงแบบลูกกลิ้ง
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)



ภาพที่ 34 เครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงโยก
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล(2550)

2.4 กลาสทรานซิชัน

กลาสทรานซิชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะลำดับที่สอง ของวัสดุซึ่งพบได้ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานหรือกึ่งผลึก เช่น สารโพลิเมอร์ นมผง น้ำตาล แป้ง เป็นต้น โดยเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน ส่วนที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานในวัสดุจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะ มีความหนืดประมาณ 10^{12} ปาสคาล.วินาที และมีโครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ แต่เป็นระเบียบน้อยกว่าของแข็งกลายเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งมีลักษณะเหนียวหนึบ โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ โดยโครงสร้างจะไม่เป็นระเบียบน้อยกว่าของเหลว และมีความหนืดประมาณ 10^{6} ถึง 10^{8} ปาสคาล.วินาที (Truong, Bhandari, Howes & Adhikari, 2004) โดยที่อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของวัสดุ น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุ ความชื้นของวัสดุ เป็นต้น (Roos & Karel;1991; Roos & Drusch; 2015) โดยเฉพาะความชื้นของวัสดุหรือปริมาณน้ำในวัสดุ เนื่องจากน้ำสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งมีหน้าที่ทำให้โครงสร้างของวัสดุนุ่ม และง่ายต่อการเกิดกลาสทรานซิชันมากขึ้น วัสดุที่มีน้ำมากหรือมีความชื้นสูงจึงมีอุณหภูมิในการเกิดกลาสทราน-ซิชันต่ำลง ตัวอย่างเช่นภาพที่ 35 แสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของแป้งข้าวโพดที่ความชื้นต่าง ๆ



ภาพที่ 35 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณค่าชื้น (สัดส่วนของแข็ง) ต่าง ๆ
ที่มา : Jouppila & Roos (1997)

โดยที่อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันที่แปรผันตามความชื้นหรือปริมาณน้ำในวัสดุนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการของ Gordon-Taylor (Gordon & Taylor; 1952) ดังสมการที่ (9) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการของ Couchmann-Karasz (Couchman & Karasz; 1978) ดังสมการที่ (10) รวมทั้งยังสามารถหาได้จากการวิเคราะห์วัสดุที่มีความชื้นในระดับต่างๆ ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

$$T_g = \frac{w_1T_{g1} + kT_{g2}w_2}{w_2 + kw_2} \qquad (9)$$

เมื่อ T_g คือ อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (องศาเซลเซียส)

w_1 คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุ

w_2 คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำในวัสดุ

T_{g1} คือ อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุแห้ง (ความชื้นร้อยละ 0) (องศาเซลเซียส)

T_{g2} คือ อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -135 องศาเซลเซียส

k คือ ค่าคงที่

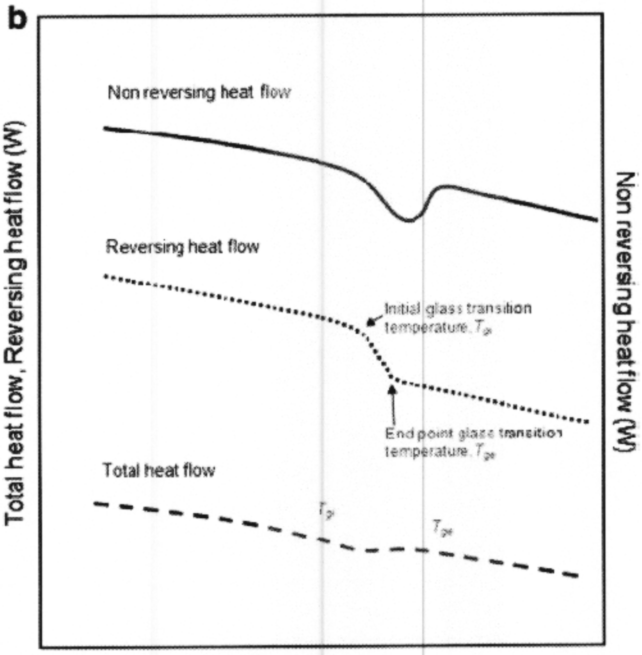
$$T_g = \frac{w_1T_{g1} + \frac{[\Delta C_{p2}]}{[\Delta C_{p1}]}\, T_{g2}w_2}{w_1 + \frac{[\Delta C_{p2}]}{[\Delta C_{p1}]}\, w_2} \qquad (10)$$

เมื่อ ΔC_{p1} คือ ความแตกต่างระหว่างความจุความร้อนของน้ำในสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง (จูล/กิโลกรัมองศาเซลเซียส)

ΔC_{p2} คือ ความแตกต่างระหว่างความจุความร้อนของวัสดุในสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง (จูล/กิโลกรัมองศาเซลเซียส)

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วย DSC เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ที่มีรายงานไว้มักจะได้มาจากการวัดด้วย DSC ถึงแม้ว่าจะมีรายงานว่า DSC อาจจะไม่มีความละเอียดเพียงพอในการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน เนื่องจาก DSC วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

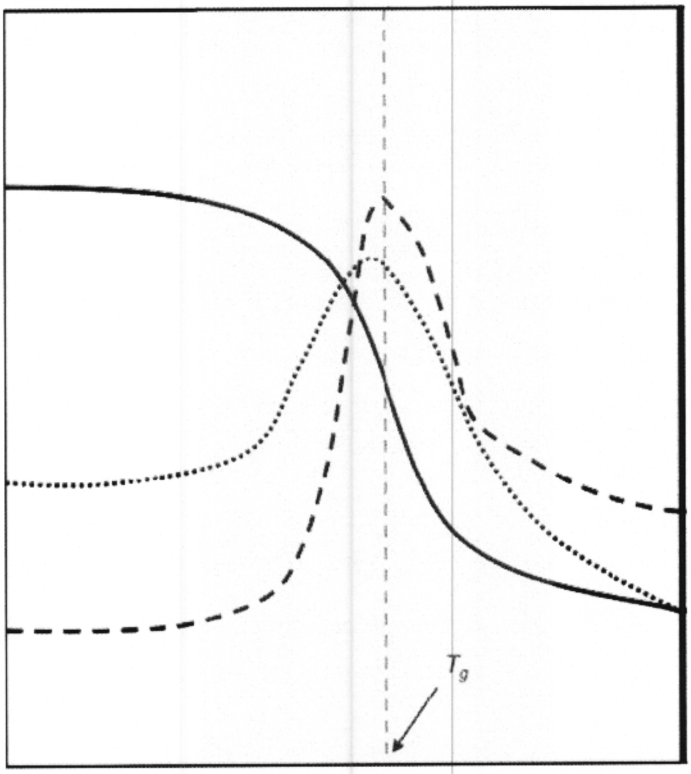
จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะของผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดมักจะมีค่าต่ำมาก ๆ และเป็นไปได้ยากที่จะตรวจจับด้วย DSC โดยเฉพาะอาหารที่มีองค์ประกอบของส่วนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สตาร์ช โปรตีน เป็นต้น โดย DSC เหมาะที่จะใช้ในการตรวจสอบหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในอาหารที่มีองค์ประกอบของส่วนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และมีส่วนประกอบของน้ำตาลอยู่ในปริมาณที่สูง โดยค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันขององค์ประกอบส่วนใหญ่ของอาหาร อาจถือเป็นค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหารชนิดนั้น ๆ ดังนั้นการใช้ DSC ในการหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาวะการวิเคราะห์ตรวจสอบเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำเที่ยงตรงมากที่สุด (Sablani, Syamaladevi & Swanson; 2010) ซึ่งปกติจำเป็นต้องมีการปรับตั้งค่าสภาวะต่าง ๆ ของเครื่อง DSC ให้มีความเหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิด และการวัดค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน มักจะวัดจากสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบผันกลับได้ (reversible heat flow) มากกว่าการใช้สัญญาณการเปลี่ยนแปลงความร้อนทั้งหมด (total heat flow) หรือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ (non-reversible heat flow) ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ตัวอย่างกราฟเทอร์โมแกรมของ DSC แสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบผันกลับได้ (reversible heat flow) ความร้อนทั้งหมด (total heat flow) ความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ (non-reversible heat flow)

ที่มา : Syamaladevi, Sablani, Tang, Powers & Swanson (2010)

ปัจจุบันมีการรายงานการใช้เทคนิค DMTA ในการตรวจสอบวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ซึ่งพบว่า มีความแม่นยำมากกว่า โดย DMTA จะวัดสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic properties) ของอาหาร โดยจะแสดงค่า storage modulus (E′), loss modulus (E″) และ mechanical loss factor (tan δ = E″/E′) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันได้ ดังภาพที่ 37



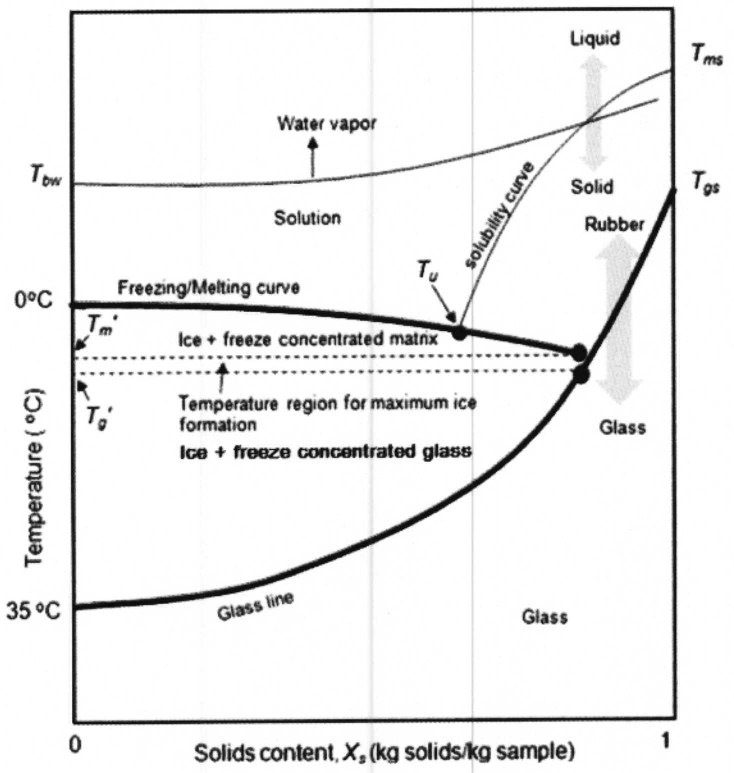
ภาพที่ 37 การวัดค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วย DMTA แสดงจุดสูงสุดของกราฟ tan δ ซึ่งเป็นจุดค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน
ที่มา : Sablani, Syamaladevi & Swanson (2010)

นอกจากนั้นแล้วยังมีการใช้ rheometer ในการตรวจสอบค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยเทียบเคียงกับค่า shear storage modulus G′ และ shear lossmodulus G″ รวมถึงใช้ thermo-mechanical analyzer (TMA) เช่น thermal mechanical compression test (TMCT) รวมถึง dielectric thermal analysis (DTA) และ nuclear magnetic resonance (NMR) อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคที่ยังได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์และมีรายงานผลการวิเคราะห์ในวารสารวิชาการต่างๆ มากมายคือเทคนิค DSC

2.5 ไดอะแกรมสถานะ

ไดอะแกรมสถานะ เป็นแผนที่บ่งบอกสถานะของอาหารเนื่องจากปริมาณน้ำหรือของแข็ง และอุณหภูมิ ข้อดีของการสร้างแผนที่เป็นการบ่งบอกสถานะของอาหาร เช่น จุดเยือกแข็ง และการเกิดกลาสทรานซิชัน ทำให้เกิดความเข้าใจถึงความซับซ้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ และอุณหภูมิในอาหารช่วยให้สามารถออกแบบสภาวะการเก็บรักษาได้อย่างเหมาะสม และยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น รวมทั้งสามารถทำนายอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ในสภาวะเปลี่ยนแปลงการเก็บรักษาการพิจารณากลาสทรานซิชันเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ทั่วไปในการกำหนดเกณฑ์ความคงตัวของอาหาร เพราะอาจมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่นการเกิดรูพรุน (pore formation) การแพร่ (diffusion) ความคงตัวจากเชื้อจุลินทรีย์การเกิดสีน้ำตาลแบบไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามหลักการเกี่ยวกับกลาสทรานซิชันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความคงตัว และเป็นตัวประกอบกับปัจจัยอื่น ๆ ที่เป็นความท้าทายต่อไปในอนาคต (Rahman, 2006)

ลักษณะของไดอะแกรมสถานะของอาหารที่มีความสมบูรณ์โดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบหลักๆ ที่สำคัญดังแสดงในภาพที่ 38



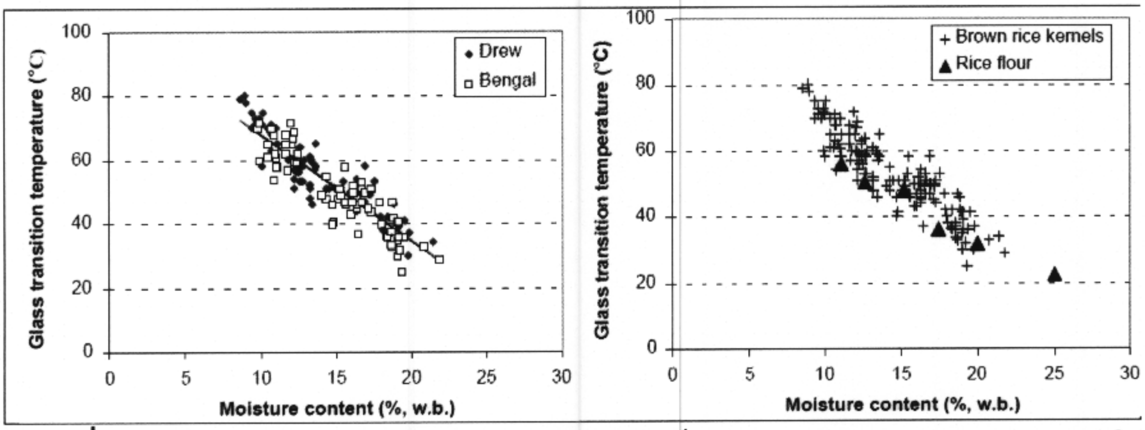
ภาพที่ 38 ลักษณะของไดอะแกรมสถานะของอาหารที่มีความสมบูรณ์

ที่มา : Sablani, Syamaladevi & Swanson (2010)

จากภาพจะเห็นว่าไดอะแกรมสถานะประกอบด้วยเส้นกราฟที่สำคัญสองเส้น คือ freezing/melting curve และ glass line โดยเส้นแรกแสดงจุดเยือกแข็งของน้ำในวัสดุ ในขณะที่เส้นที่สองแสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยแกน y ของไดอะแกรมสถานะจะเป็นค่าอุณหภูมิ ในขณะที่แกน x จะเป็นสัดส่วนของแข็งหรือปริมาณน้ำในวัสดุหรืออาหารนั้น ๆ

เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการใช้หาค่าจุดเยือกแข็ง และหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของวัสดุอาหารนั้นๆ ที่สภาวะความชื้นต่างๆ มีเทคนิคในการวิเคราะห์หลากหลายดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ แต่เครื่องมือที่ได้รับความนิยมคือ DSC แม้จะมีรายงานว่า DSC อาจไม่เหมาะสมในการใช้ตรวจสอบหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสำหรับตัวอย่างอาหารที่มีองค์ประกอบของส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สตาร์ชหรือโปรตีน

มีรายงานค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวสองพันธุ์ (Drew และ Bengal) ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และนอกจากนั้นการวัดค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวในสภาพของเมล็ดข้าวกล้องและสภาพของแป้งจะให้ผลที่ใกล้เคียงกันด้วย ดังแสดงในภาพที่ 39

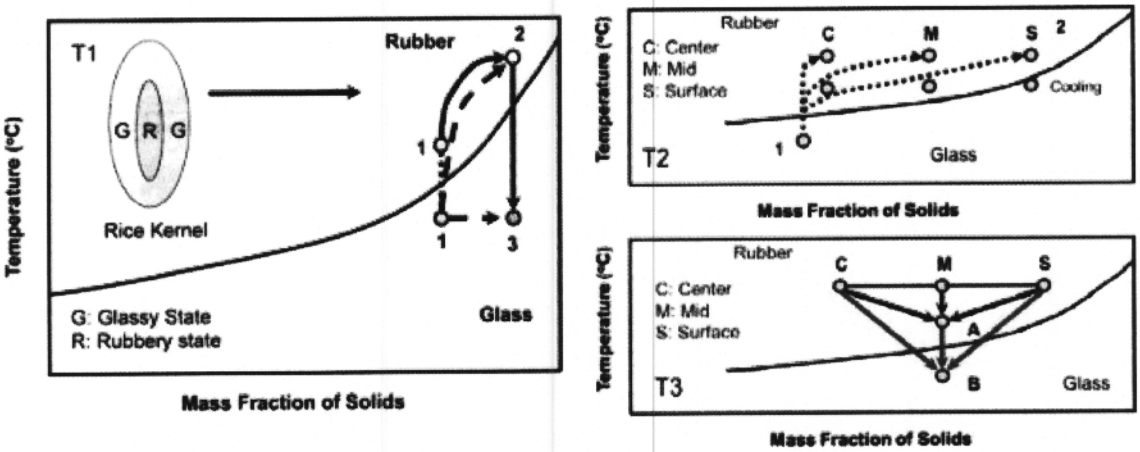


ภาพที่ 39 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวสองพันธุ์ (Drew และ Bengal) และค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวในสภาพของเมล็ดข้าวกล้องและสภาพของแป้ง

ที่มา : Siebenmorgen, Yang & Sun (2004)

นอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้ไดอะแกรมสถานะในการควบคุมคุณภาพและความคงตัวของอาหารต่าง ๆ มากมายนับตั้งแต่มีการแนะนำเทคนิคนี้ในวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร (Rahman, 2012) รวมถึงการนำมาใช้ในข้าว เช่น การพัฒนาไดอะแกรมสถานะของข้าวพันธุ์บาสมาติของอินเดีย (Sablani, Bruno, Kasapis & Symaladevi, 2009) การสร้างไดอะแกรมสถานะของข้าว และเส้นกราฟกลาสทรานซิชัน จากนั้นนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายสถานะของข้าวระหว่างการอบลดความชื้น (Perdon, Siebenmorgen & Mauromoustakos, 2000) การพัฒนาไดอะแกรมสถานะของกระบวนการลดความชื้นข้าว ซึ่ง

แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างการลดความชื้นดังภาพที่ 40 (Cnossen, Siebenmorgen, Yang & Bautista, 2001)



ภาพที่ 40 ไดอะแกรมสถานะของข้าวแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างการลดความชื้น

ที่มา : Cnossen, Siebenmorgen, Yang & Bautista (2001)

จากภาพที่ 40 จะแสดงให้เห็นสถานะคล้ายแก้ว และสถานะคล้ายยาง ของเมล็ดข้าวระหว่างการลดความชื้นและการบ่ม (tempering) โดยสถานะดังกล่าวสามารถเปลี่ยนไปมาได้ตลอดหรือในเมล็ดอาจมีสถานะที่เป็นคล้ายแก้วด้านนอก และมีสถานะคล้ายยางภายในเมล็ดขึ้นกับความชื้น และอุณหภูมิ

ความเครียดหรือรอยแตกร้าวในเมล็ดข้าวสามารถหลีกเลี่ยงได้ หากสภาวะในการลดความชื้นและบ่มอยู่ในสภาวะที่ให้เมล็ดข้าวคงอยู่ในสถานะคล้ายยางตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ข้าวไม่มีรอยร้าวระหว่างการลดความชื้น เมื่อนำไปสีการแตกหักจะมีน้อย ซึ่งจากไดอะแกรม-สถานะของข้าว (ภาพที่ 40) จะเห็นว่า ไดอะแกรมสถานะจะแสดงสภาวะต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวรวมถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่อาจเกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าว (ภาพ T2 และ T3) และสภาวะที่เหมาะสมในการที่จะทำให้เมล็ดข้าวอยู่ในสถานะคล้ายยางตลอดเวลาระหว่างการลดความชื้นและการบ่มซึ่งจะช่วยทำให้โรงสีสามารถปรับสภาวะการลดความชื้นให้เหมาะสมกับข้าวเปลือกช่วยทำให้ข้าวมีรอยร้าวเกิดขึ้นน้อยที่สุดส่งผลต่อคุณภาพการสีที่ดีขึ้นซึ่งหากควบคู่กับการควบคุมเครื่องจักรสีข้าวให้มีสภาวะที่เหมาะสมก็จะช่วยลดการสูญเสียได้อย่างมหาศาล