

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยไอน้ำร้อนผุดยิ่งและอากาศร้อนนี้ได้รวบรวม งานวิจัยการอบแห้งเมล็ดพืชและการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคต่างๆ ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าว รวมทั้งวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติของข้าวกล้องเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้ง ประโยชน์ที่ได้รับจากสารอาหารที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวกล้อง เมื่อผ่านกระบวนการแช่และกระบวนการงอก ดังนี้

ข้าวกล้องงอก

กระบวนการที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหรือองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวนั้นมีวิธีการที่สำคัญคือกระบวนการแช่ข้าว (soaking) และกระบวนการงอก (germination) กระบวนการทั้งสองนี้จะทำให้เกิดการงอกของเมล็ดข้าวขึ้น เมล็ดข้าวที่เกิดการงอกนั้นจะมีเอ็นไซม์ทำหน้าที่ย่อยแป้ง สารโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง และโปรตีน ซึ่งทำให้ได้โอลิโกแซคคาไรด์และกรดอะมิโน การสลายตัวของโพลีเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงในระหว่างกระบวนการงอกทำให้เกิดสารชีวภาพและมีผลในการปรับปรุงคุณภาพด้านประสาทสัมผัสในการบริโภค เช่น มีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม และกลิ่นเพิ่มขึ้นในข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง ข้าวโอ๊ต และข้าวไรซ์ (จารุรัตน์, 2550)

ในระหว่างกระบวนการงอกของข้าว องค์ประกอบในข้าวกล้องจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก โดยสารหลักที่เพิ่มขึ้นในข้าวกล้องงอก คือสาร GABA (gamma-aminobutyric acid) เส้นใยอาหาร อินโนซิทอล กรดเฟอรูลิก กรดไฟติก โทโคโทเรียนอลส์ แกมมาออริซานอล แมกนีเซียม โพแทสเซียม และสังกะสี โดยคุณค่าทางโภชนาการที่มีในข้าวกล้องงอก เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขัดขาวพบว่าข้าวกล้องงอกมีปริมาณสาร GABA มากกว่าถึง 10 เท่า มีเส้นใยอาหาร วิตามินอี ในอะซิน และไลซีน มากกว่าประมาณ 4 เท่า และวิตามินบี 1 วิตามินบี 6 มากกว่าประมาณ 3 เท่า (Kayahara and Tsukahara, 2000)

จากการศึกษาของ Komatsuzaki *et al.* (2007) โดยนำข้าวกล้องพันธุ์ Haiminori แช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนอิสระของข้าวกล้องที่ผ่านการแช่เปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการแช่ พบว่ากรดอะมิโน กรดแอสพาทิก เซอรีน แอสพาราจีน

และกรดกลูตามิกลดลง ส่วนกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ GABA ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณกรดอะมิโนอิสระ ในข้าวพันธุ์ Haiminori ที่ผ่านการแช่น้ำ

กรดอะมิโน	ข้าวกล้อง (mg/100 g น้ำหนักเปียก)	ข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ (mg/100 g น้ำหนักเปียก)
แอสพาร์ติกแอซิด (aspartic acid)	6.6 ± 1.04	1.2 ± 0.22
ทรีโอนีน (threonine)	1.0 ± 0.48	3.1 ± 0.76
เซอรีน (serine)	3.5 ± 0.29	2.0 ± 0.75
แอสพาราจีน (asparagine)	7.1 ± 1.69	3.7 ± 0.55
กลูตาเมต (glutamate)	12.4 ± 3.06	4.5 ± 0.41
โพรลีน (proline)	1.9 ± 1.66	5.1 ± 0.67
ไกลซีน (glycine)	1.5 ± 0.89	4.3 ± 0.82
อะลานีน (alanine)	12.2 ± 4.48	13.0 ± 2.00
วาลีน (valine)	0.8 ± 0.33	4.5 ± 0.76
ซิสเทอีน (cysteine)	1.4 ± 0.51	1.9 ± 1.41
เมทไทโอนีน (methionine)	0.4 ± 0.40	2.2 ± 0.52
ไอโซลิวซีน (iso-leucine)	0.7 ± 0.15	3.7 ± 0.67
ลิวซีน (leucine)	0.9 ± 0.17	6.4 ± 0.97
ไทโรซีน (tyrosine)	1.4 ± 0.39	4.1 ± 0.37
ฟีนีลอะลานีน (phenylalanine)	1.0 ± 0.59	3.8 ± 0.37
แกมมาอะมิโนบิวเทอริกแอซิด (GABA)	7.3 ± 2.05	10.1 ± 1.36
ไลซีน (lysine)	3.9 ± 1.45	4.4 ± 0.84
ฮิสทีดีน (histidine)	1.0 ± 0.30	2.4 ± 0.79
อาร์จินีน (arginine)	4.9 ± 1.14	9.0 ± 3.06

ที่มา: Komatsuzaki *et al.* (2007)

Takayo *et al.* (1994) ศึกษาการเพิ่มปริมาณสาร GABA ในคัพพะข้าวโดยการแช่น้ำ พบว่า สาร GABA ช่วยลดความดันโลหิตได้ สารดังกล่าวพบในคัพพะข้าวซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่างการแช่น้ำ จากการศึกษาผลของการแช่น้ำของข้าว 10 สายพันธุ์ ที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณสาร GABA ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการแช่น้ำมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละชนิดข้าว ที่น่าสนใจคือข้าว พันธุ์ฮอกไก 269 (Hokkai 269) ซึ่งมีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวชนิดอื่นด้วย ระยะเวลาการแช่เดียวกัน ดังนั้นข้าวพันธุ์นี้น่าจะเป็นแหล่งผลิตสาร GABA ที่สำคัญในอนาคต สาร GABA มีผลต่อการลดความดันโลหิต ด้วยการทดสอบกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น สุนัข กระต่าย หมู และแมว สาร GABA ช่วยลดภาวะความดันโลหิตของผู้ที่มีระดับความดันโลหิตสูง ซึ่งเป็นโรค ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ (spontaneously hypertensive rats, SHR) การศึกษาผลของการแช่น้ำโดยการแพร่ของกรดอะมิโนภายในเมล็ดข้าวพันธุ์โคชิฮิการิ (Koshihikari) ซึ่งเป็นข้าว พันธุ์ที่มีความนิยมบริโภคสูงที่สุดในญี่ปุ่น ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร GABA นั้นมีผล จากการแช่น้ำเพราะฉะนั้นกระบวนการแช่จึงมีความสำคัญมาก

กรรมวิธีการผลิตข้าวกล้องงอก

การผลิตข้าวกล้องงอกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การแช่ข้าวกล้องและการงอกของข้าว กล้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Manna *et al.*, 1995)

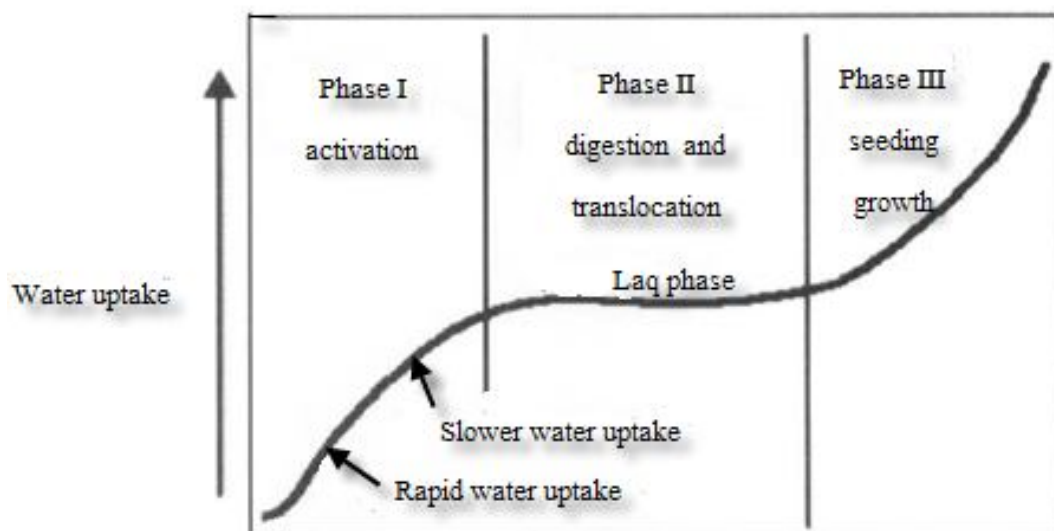
1. การแช่ข้าว (soaking process)

มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ด และเกิดการกระจายตัวเข้าไปในส่วนต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ เป็นการกระตุ้นให้เกิดการงอกของเมล็ดข้าว และการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมของ องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อเมล็ด การดูดซึมน้ำของข้าวแบ่งออกเป็น 3 ระยะ โดยระยะแรกเกิดการ เปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วยกระบวนการแพร่ (diffusion) เพียงอย่างเดียว จนกระทั่งได้ความชื้น ประมาณ 32% (w.b.) การเพิ่มขึ้นของความชื้นในระยะนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ใน การแช่ข้าว ดังนั้นระยะเวลาในการดูดซึมน้ำจนได้ความชื้นตามที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ในการแช่ ระยะที่สอง เป็นช่วงที่มีการดูดซึมน้ำลดลง (lag phase) และระยะสุดท้าย มีอัตราการ ดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ความชื้นคงที่ประมาณ 45% (w.b.) โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของ ความชื้น อัตราเร็วของการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ดและระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ น้ำแช่ ขนาดของเมล็ด ชนิดและสายพันธุ์ของข้าว ตลอดจนลักษณะของส่วนประกอบในเนื้อเมล็ด

ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อการแช่พบว่า อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ดได้อย่างรวดเร็ว แต่การกระจายตัวของความชื้นในส่วนต่างๆ ของเมล็ดไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะในส่วนเนื้อเมล็ด และคัพพะทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในการผลิตเอนไซม์ การเจริญของรากและ ลำต้นมีประสิทธิภาพต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากใช้อุณหภูมิในการแช่ต่ำเกินไป การดูดซึมน้ำของ เมล็ดจะเป็นไปได้ช้า แต่เกิดการกระจายตัวของน้ำในเมล็ดได้ดี และใช้ระยะเวลานานซึ่งจะเป็นการ เพิ่มโอกาสในการเจริญของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของเมล็ดและทำให้ประสิทธิภาพการ งอกของเมล็ดต่ำลง ในช่วงการแช่ข้าวมีความสัมพันธ์กับการงอกของเมล็ด ส่วนของเนื้อเมล็ด และคัพพะ มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งได้ความชื้น 60-65% (w.b.) ภายในเวลา 24 ชั่วโมง และจะเริ่มเกิดการงอกของรากเทียม (scutellum) ออกมาเป็นจุดเริ่มต้นของการงอก การสร้างรากเทียมนี้เกิดขึ้นในส่วนที่เจริญเป็นใบเลี้ยงอ่อน ซึ่งเป็นส่วนที่สะสมสารอาหารต่างๆ ไว้สำหรับการงอกเป็นรากและลำต้น ความชื้นที่เหมาะสมในการสร้างรากเทียมของใบเลี้ยงเริ่มต้น ที่ 55% (w.b.) และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อเมล็ด เป็นการปรับสภาพความชื้นให้เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์ในขั้นตอนการงอกต่อไป

2. การงอก (germination process)

มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารอาหารที่สะสมในเนื้อเมล็ดให้อยู่ในรูป โครงสร้างที่สลายได้ง่ายโดยการทำงานของเอนไซม์ ในขั้นตอนการงอกเมล็ดจึงมีการผลิตเอนไซม์ ย่อยแบ่งที่มีปริมาณสูงโดยทั่วไปในเมล็ดข้าวมีเอนไซม์เบต้าอะไมเลส (β -amylase) สะสมอยู่แล้ว เอนไซม์ชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นมาพร้อมกับการพัฒนาของเมล็ด จนกลายเป็นเมล็ดที่สมบูรณ์ ดังนั้นใน ขั้นตอนการงอกของเมล็ดจึงเป็นการผลิตเอนไซม์เบต้าอะไมเลสเป็นหลัก การสร้างเอนไซม์เบต้าอะ ไมเลสเกิดขึ้นในส่วนของคัพพะ โดยการกระตุ้นของกรดจิบเบอเรลลิก (gibberellic acid) ที่ถูกสร้าง ในขณะที่เกิดการงอก นอกจากเอนไซม์เบต้าอะไมเลสแล้ว กรดจิบเบอเรลลิกยังเป็นตัวกระตุ้นให้เชื้อ หุ้มเมล็ดผลิตเอนไซม์อื่นๆ เช่น เบต้ากลูแคนเนส (β -glucanase) แพนโตแซนเนส (pantosanase) เป็นต้น หลังจากคัพพะและเชื้อหุ้มเมล็ดมีการผลิตเอนไซม์ต่างๆ ขึ้นมา ซึ่งเอนไซม์จะมีกิจกรรมใน การสลายสารอาหารต่างๆ ที่สะสมในส่วนเนื้อเมล็ด โดยการย่อยแบ่งและโปรตีนในเนื้อเมล็ดได้ น้ำตาลรีดิคซ์ เช่น กลูโคส มอลโตส ฟรุคโตส และกรดอะมิโน สิ่งที่ยังบอกว่าการงอกของเมล็ด คือ การเกิดจุขาว (white chit) เป็นส่วนของรากเทียม และแทงทะลุส่วนเพอริคาร์พและเชื้อหุ้ม เมล็ดออกมา จากนั้นจึงเกิดการสร้างรากแท้ (acrospires) ซึ่งสามารถแบ่งการงอกของเมล็ดข้าวเป็น 3 ระยะ ดังนี้



ภาพที่ 1 ระยะต่างๆ ในการงอกของเมล็ดพืช

ที่มา: Manna *et al.* (1995)

จากภาพที่ 1 การงอกของเมล็ดพืช ระยะแรก (phase I) การดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งกระตุ้นการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดต่างๆ และมีการย่อยสลายสารอาหารต่างๆ ภายในเมล็ดบางส่วน ระยะที่สอง (phase II) การดูดน้ำเข้าสู่เมล็ดลดลงจนอึดตัวและมีการสังเคราะห์เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายของผนังเซลล์ของชั้นอะลูโรน (aleurone layer) เช่น เบต้าอะไมเลส เบต้ากลูแคนเนส เมื่อเกิดการย่อยของผนังเซลล์จะทำให้เอนไซม์ชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นซึมผ่านเข้าไปสู่เนื้อเมล็ดเพื่อย่อยแบ่งให้ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์อื่นๆ เมื่อเกิดการย่อยผนังเซลล์แล้วเอนไซม์กลุ่มที่ย่อยโปรตีนที่มีอยู่ในเนื้อเมล็ดก็จะทำงานโดยย่อยโปรตีนให้เป็นกรดอะมิโนชนิดต่างๆ และระยะสุดท้ายระยะที่สาม (phase III) เกิดการเพิ่มปริมาณของเซลล์และเกิดการเจริญของต้นพืช

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอาหารที่สะสมในระหว่างกระบวนการแช่และกระบวนการงอกของข้าว สามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยหลักได้ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านวัตถุดิบ และปัจจัยด้านกระบวนการผลิต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยด้านวัตถุดิบ

1.1 ชนิดของพันธุ์ข้าว ได้มีผู้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของสาร GABA ในข้าวหลายๆ สายพันธุ์พบว่าข้าวต่างสายพันธุ์ที่มีขนาดของเมล็ดและขนาดของจุมข้าวที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร GABA โดย Horino *et al.* (1994) พบว่า ปริมาณการเพิ่มขึ้นของสาร GABA ในจุมข้าวหลังผ่านการแช่น้ำจะมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ โดยทำการศึกษาในข้าว 10 สายพันธุ์ พบว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีจุมข้าวขนาดใหญ่มีปริมาณการเพิ่มขึ้นของสาร GABA มากกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นๆ ที่มีขนาดของจุมข้าวเล็กกว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ito and Ishikawa (2004) ที่ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนในข้าวกล้อง 6 สายพันธุ์ โดยนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 30°C ระยะเวลา 20 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนอิสระในข้าวกล้องที่แตกต่างกัน ซึ่งข้าวแต่ละสายพันธุ์มีการเพิ่มขึ้นของสาร GABA ในปริมาณที่ต่างกัน โดยพบว่าข้าวพันธุ์ Ordinary grains มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นจาก 3.6 เป็น 6.1 mg/100 g พันธุ์ Calrose มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า คือ จาก 4.9 เป็น 10.9 mg/100 g พันธุ์ M401 มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า คือ จาก 2.7 เป็น 9.8 mg/100 g พันธุ์ Koshihikari และ Hitomebore มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 16.6 และจาก 10.5 เป็น 13.6 mg/100 g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ ภายในเมล็ดข้าวก็มีความแตกต่างกัน

1.2 ขนาดของคัพภะ ส่วนประกอบในเมล็ดข้าวบ่งบอกได้ถึงปริมาณสารอาหารที่มีในข้าว Horino *et al.* (1994) ได้ทดลองนำส่วนต่างๆ ของข้าวมาแช่น้ำและวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนพบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดอะมิโนแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นในการผลิตข้าวกล้องงอกควรทราบถึงสรีระของข้าว (rice physiology) และโครงสร้างของเมล็ดข้าวเบื้องต้น โดยข้าวที่ปลูกเพื่อการบริโภคเป็นอาหารมี 2 ชนิด คือ *Oryza sativa* ซึ่งเป็นข้าวที่มีปลูกทั่วไปในทุกประเทศ

และ *Oryza glaberrima* ซึ่งเป็นข้าวที่มีปลูกเฉพาะในแอฟริกาเท่านั้น ข้าวชนิด *Oryza sativa* ยังแบ่งออกได้เป็น Indica ปลูกมากในเขตร้อน และ Japonica ปลูกมากในเขตอบอุ่น ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นพวก Indica ซึ่งแบ่งออกเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว จากภาพที่ 2 เมล็ดของข้าวหมายถึงส่วนรวมที่เป็นแป้งที่เรียกว่า Endosperm เป็นแป้งที่ใช้บริโภค และส่วนที่เป็น Embryo เป็นส่วนที่มีชีวิตและงอกออกมาเป็นต้นข้าว ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้โดยเปลือกนอกที่เรียกว่า Lemma และ Palea เมื่อแกะเปลือกนอกออกก็จะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่าข้าวกล้อง (brown rice) มีสีน้ำตาลอ่อนๆ และเมื่อผ่าเมล็ดข้าวกล้องออกตามความยาวดังในภาพที่ 2 พบว่า เมล็ดข้าวประกอบด้วย เยื่อชั้นนอกบางๆ เรียกว่า Pericarp จำนวน 2 ชั้น เยื่อชั้นกลางหนึ่งชั้นเรียกว่า Tegmen และเยื่อชั้นในบางๆ อีกหนึ่งชั้นเรียกว่า Aleurone layer ถ้า Pericarp เป็นสีแดง เมล็ดข้าวกล้องก็จะเป็นสีแดงส่วนภายในที่เป็น Endosperm จะมีลักษณะเป็นแป้งสีขาวหรือใสเป็นจำนวนน้อย (ประมาณ, 25%) โครงสร้างของเมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้

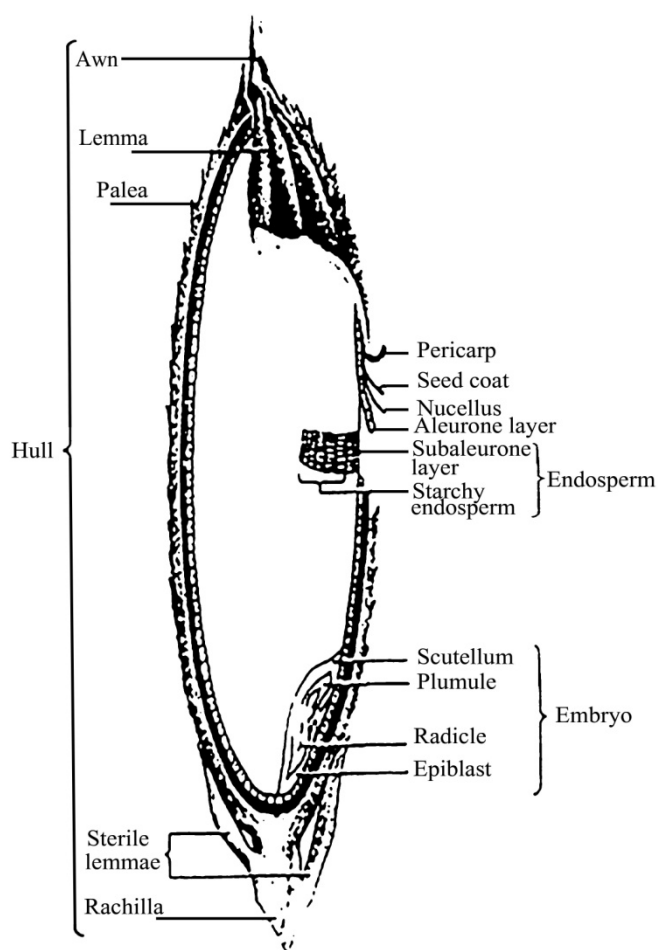
ก. เปลือกนอก (hull, husk) คือส่วนที่เรียกว่า แกลบ ประกอบด้วยเปลือก 2 ส่วน คือส่วนที่ใหญ่กว่า (lemma) และส่วนที่เล็กกว่า (palea)

ข. เปลือกเมล็ด (caryopsis) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มแป้งอยู่ภายใน ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ส่วน ด้วยกันคือ เพอริคาร์พ (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และชั้นของนุเซลลัส (nucellus) เมื่อแกะเปลือกนอกของเมล็ดออกจะได้ ข้าวกล้อง

ค. แป้ง (endosperm) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) ชั้นของอะลูโลน (aleurone layer) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของส่วนที่เป็นแป้ง จำนวนชั้นของเนื้อเยื่ออะลูโลนขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสิ่งแวดล้อม อาจมีถึง 3 ชั้น โดยชั้นของอะลูโลน มีธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียมอยู่มาก

2) ชั้นของเนื้อแป้ง (starchy endosperm) เนื้อแป้งนี้ประกอบด้วยเซลล์แป้งและโปรตีน โปรตีนในเมล็ดข้าวจะอยู่รอบนอกใกล้ๆ กับชั้นในของชั้นอะลูโลน ส่วนเซลล์แป้งจะอยู่ในชั้นถัดเข้าไป



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: อรอนงค์ (2538)

1.3 คัพภะ คือส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าว (germ) เป็นตำแหน่งรวมของส่วนที่จะงอกเป็นต้นข้าวใหม่ คัพภะประกอบด้วยส่วนที่จะงอกเป็นยอดอ่อน (plumule) ส่วนที่จะงอกเป็นรากและรากแรกกำเนิด (radical) ทั้งสองส่วนนี้ยึดติดกันด้วยปล้องที่สั้นมาก เรียกว่า มีโซคอตีล (mesocotyl) ยอดอ่อนจะห่อหุ้มด้วยลักษณะที่คล้ายใบเรียกว่าเยื่อหุ้มยอดอ่อน (coleptile) ขนาดของคัพภะมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณสารอาหารในข้าวที่ผ่านการแช่น้ำซึ่งถ้าคัพภะมีขนาดใหญ่ เป็นผลให้มีการเพิ่มปริมาณสารอาหารที่มากกว่าข้าวที่มีคัพภะขนาดเล็กกว่า และปริมาณสาร GABA ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแช่ข้าวเกิดจากการงอกของคัพภะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2005) ที่ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารที่มีในข้าวกล้องระหว่างพันธุ์ที่มีคัพภะขนาดใหญ่ (giant

embryo) กับพันธุ์ที่มีคัพพะขนาดปกติโดยการแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 30°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า พันธุ์ที่มีคัพพะขนาดใหญ่มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้น 2-3 เท่า จากปริมาณสาร GABA เดิมที่มีอยู่ในเมล็ด ซึ่งมากกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ ที่มีขนาดคัพพะเล็กกว่า แต่ในงานวิจัยของ พังศรีและคณะ (2547) พบว่า ข้าวเจ้ามีขนาดคัพพะโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าข้าวเหนียวทุกสายพันธุ์แต่ปริมาณสาร GABA ในคัพพะข้าวเหนียวโดยเฉลี่ยสูงกว่าคัพพะข้าวเจ้า แต่เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนของปริมาณสาร GABA ที่มีในเมล็ดข้าวทั้งหมด พบว่า ข้าวเจ้ามีปริมาณสาร GABA ในสัดส่วนที่สูงกว่าข้าวเหนียว

1.4 ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวหลังการเก็บเกี่ยว จากการศึกษากของ Horino *et al.* (1994) พบว่า ในคัพพะข้าวพันธุ์ Koshihikari ซึ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 28°C นานแตกต่างกัน ซึ่งที่ระยะเวลาในการเก็บรักษานาน 119 วัน พบว่า สัดส่วนของปริมาณสาร GABA ก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ (4 ชั่วโมง) มีค่าเท่ากับ 8.5 เท่า (ก่อนแช่ปริมาณสาร GABA เท่ากับ 25.4 mg/100 g หลังแช่ปริมาณสาร GABA เท่ากับ 215 mg/100 g) ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่เก็บรักษาไว้นาน 269 วัน ถึงเท่าตัว โดยมีสัดส่วนของปริมาณสาร GABA ก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ (4 ชั่วโมง) มีค่า เท่ากับ 4.4 เท่า (ก่อนแช่ปริมาณสาร GABA เท่ากับ 36.9 mg/100 g หลังแช่ปริมาณสาร GABA เท่ากับ 162 mg/100 g) ดังนั้นการเก็บรักษาข้าวเป็นเวลานานจะมีผลให้ปริมาณสาร GABA มีแนวโน้มลดลงได้

2. ปัจจัยด้านกระบวนการผลิต

2.1 อุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ข้าว (soaking temperature and time) อุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ต่างกันส่งผลต่อปริมาณสาร GABA และสารอาหารอื่นๆ แตกต่างกัน จากงานวิจัยของ Ito and Ishikawa (2004) พบว่า การแช่ข้าวในน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 30-40°C ระยะเวลาในการแช่นาน 2 ชั่วโมง หรือถ้าแช่ในน้ำเย็นต้องใช้เวลาในการแช่มากขึ้น (Watanabe *et al.*, 2004) และการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 30°C มีผลให้ปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Horino *et al.* (1994) ได้นำคัพพะข้าวพันธุ์ Koshihikari แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 และ 70°C นาน 0 1 2 4 8 และ 24 ชั่วโมง พบว่า การแช่ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 2 ชั่วโมง มีปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นมากและมีปริมาณคงที่ไปเรื่อยๆ ที่ระยะเวลาการแช่นานมากขึ้น แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการแช่ข้าวแล้วได้ปริมาณสาร GABA มากที่สุดคือที่ 40°C เช่นเดียวกับงานวิจัยของ จารุรัตน์ (2550) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแช่และกระบวนการงอกต่อปริมาณสาร GABA และปริมาณกลูตามะตในข้าวกล้องหอมมะลิ 105 โดยนำข้าวกล้องหอมมะลิ 105 แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (1 mmol, pH 5) ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C นาน 3 8 และ 12 ชั่วโมง พบว่า ข้าวที่ผ่านการ

แช่ที่อุณหภูมิ 40°C นาน 8 ชั่วโมง มีปริมาณสาร GABA สูงสุด (31.18 mg/100 g) และมีปริมาณแคลเซียม 2.77 mg/100 g เมื่อนำข้าวกล้องมาเพาะให้งอกที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C นาน 12 24 และ 36 ชั่วโมง พบว่า การเพาะข้าวกล้องให้งอกที่อุณหภูมิ 40°C นาน 36 ชั่วโมง มีปริมาณสาร GABA สูงสุด สูงขึ้นประมาณ 9.2 เท่า ในขณะที่ปริมาณกลูตามีนน้อยที่สุด (96.83 และ 453.27 mg/100 g) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องหอมมะลิ 105 ที่ไม่ผ่านการแช่ (GABA เท่ากับ 10.55 mg/100 g) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tungtrakul *et al.* (2004) ทำการวิจัยการเพิ่มปริมาณสาร GABA ในคัพพะข้าวเจ้าและข้าวเหนียวรวม 14 สายพันธุ์โดยการแช่น้ำ พบว่า ข้าวเจ้ามีปริมาณคัพพะโดยเฉลี่ยมากกว่าข้าวเหนียวทุกสายพันธุ์ แต่ปริมาณสาร GABA ในคัพพะข้าวเหนียวมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าคัพพะข้าวเจ้า และเมื่อเทียบเป็นสัดส่วนของปริมาณสาร GABA ที่มีในเมล็ดข้าวทั้งหมด พบว่าข้าวเจ้ามี GABA ในสัดส่วนที่สูงกว่าข้าวเหนียว และปริมาณสาร GABA เพิ่มขึ้นมากหลังจากการแช่คัพพะในน้ำนาน 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C ได้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับงานวิจัยของ วัฒนา และคณะ (2550) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของ pH อุณหภูมิ และเวลาการแช่ข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก พบว่า การผลิตข้าวกล้องงอก (germinated brown rice, GBR) โดยการควบคุม pH และอุณหภูมิของน้ำ รวมทั้งระยะเวลาในการแช่ข้าว สามารถเพิ่มคุณค่าทางอาหารของข้าวกล้องงอกได้ โดยข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่น้ำในสถานะที่มี pH 6 (เป็นกรดเล็กน้อย) อุณหภูมิ 35°C เวลาการแช่ 24 ชั่วโมง ทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีคุณภาพทางอาหารสูงกว่าข้าวกล้องงอกที่ใช้สถานะต่างๆ ในการงอก (pH 3 4 และ 8 อุณหภูมิ 25 35 และ 45°C เวลาการแช่ 12 และ 24 ชั่วโมง) โดยมีปริมาณสาร GABA กรดไฟติก และวิตามินบี 1 เท่ากับ 16.50 501.06 และ 0.526 mg/100 g ของข้าวกล้องงอกตามลำดับ ปริมาณแอมิโลสลดลงเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการงอก ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของแป้งสุกที่มีค่า peak viscosity ลดลง ส่วนสถานะที่ใช้ในการผลิตข้าวกล้องงอกของข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ทำให้ได้คุณภาพของข้าวกล้องงอกดีที่สุดนั้นเป็นสถานะเดียวกับข้าวกล้องงอกของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยมีปริมาณ GABA กรดไฟติก และวิตามินบี 1 เท่ากับ 14.51 486.03 และ 0.436 mg/100 g ของข้าวกล้องงอกตามลำดับ โดยปริมาณแอมิโลส ลดลงจาก 20.20% เหลือเท่ากับ 18.75%

2.2 อุณหภูมิและระยะเวลาในการงอกข้าว (germinating temperature and time) จากงานวิจัยของ Ohtsubo *et al.* (2005) ได้นำข้าวกล้องพันธุ์ Koshihikari เพาะให้งอกที่อุณหภูมิ 30°C ที่ระยะเวลาแตกต่างกันคือ 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณสารอาหารและ GABA ในข้าวกล้องงอกมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแตกต่างกัน โดยการเพาะให้งอกที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง มีปริมาณสาร GABA มากกว่า 72 48 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ (149.03 69.21 27.73

และ 11.0 mg/100 g ตามลำดับ) ปริมาณสาร GABA ของข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะไห้งอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 96 ชั่วโมง มีปริมาณสาร GABA มากเป็น 40 เท่าของข้าวขัดขาว (GABA ของข้าวขัดขาว เท่ากับ 1.7 mg/100 g) และ 11.5 เท่า ของข้าวกล้องที่ยังไม่เพาะไห้งอก (GABA ของข้าวกล้องที่ยังไม่เพาะไห้งอกเท่ากับ 6.0 mg/100 g) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Watanabe *et al.* (2004) นำข้าวกล้องพันธุ์ Koshihikari มาเพาะไห้งอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 16 และ 24 ชั่วโมง ส่งผลต่อปริมาณกรดอะมิโนในข้าวกล้องงอกต่างกัน พบว่า ปริมาณสาร GABA ในข้าวกล้องหลังจากการงอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 ชั่วโมง เท่ากับ 9.0 mg/100 g หลังจากการงอกนาน 16 ชั่วโมง เท่ากับ 9.6 mg/100 g และหลังจาก 24 ชั่วโมง เท่ากับ 13 mg/100 g ซึ่งปริมาณสาร GABA จะเกิดขึ้นได้ง่ายเพียงแต่การแช่น้ำอุณหภูมิ 30°C และพบว่า กลูตาเมตและกรดแอสพาราติก ลดลงมากจนถึงระยะเวลาการงอกที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการงอกของเมล็ด โดยพบว่าการลดลงครั้งหนึ่งของกลูตาเมตมีส่วนเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สาร GABA โดยเอนไซม์กลูตาเมตดีคาร์บอกซิเลส ดังนั้นระยะเวลาในการเพาะข้าวที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณของกรดอะมิโนและ GABA แตกต่างกันโดยอะลานีน ไทโรซีน ฮิสทีดีน GABA ไลซีน และไอโซลิวซีน เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ส่วนกลูตาเมต และกรดแอสพาราติก ลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น

2.3 ความเป็นกรดหรือเบส (pH) มีผลต่อปริมาณสาร GABA โดย Horino *et al.* (1994) ได้นำคัพเพาะข้าวพันธุ์ Koshihikari แช่นในสารละลายที่มี pH แตกต่างกันคือ 3 4 5 6 7 และ 8 ที่อุณหภูมิ 40°C นาน 1 และ 4 ชั่วโมง โดยศึกษาถึงปริมาณสาร GABA ที่สะสม พบว่า pH 5 มีความเหมาะสมในการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร GABA มากที่สุด แต่ที่ pH 8 จะมีปริมาณสาร GABA น้อยมากในระยะเวลาเดียวกัน ปริมาณสาร GABA ที่เพิ่มขึ้นในคัพเพาะข้าวโดยมากแล้วจะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนและเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในสภาวะที่เป็นเบส และเอนไซม์กลูตาเมตดีคาร์บอกซิเลสจะทำงานได้ดีที่ pH 5.9 ในขณะที่ปริมาณสาร GABA ที่ใช้ไพรูเวตทรานามิเนสจะทำงานได้ดีที่ pH 8.9 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ จารุรัตน์ (2550) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแช่และกระบวนการงอกต่อปริมาณสาร GABA และปริมาณกลูตาเมตในข้าวกล้องหอมมะลิ 105 โดยนำข้าวกล้องหอมมะลิ 105 แช่นในสารละลายที่มี pH แตกต่างกัน (pH 4 4.5 5 5.5 6 และ 6.5) ที่อุณหภูมิ 40°C นาน 3 ชั่วโมง พบว่า ข้าวที่ผ่านการแช่นในสารละลายที่ pH 5 มีปริมาณสาร GABA สูงสุด (21.93 mg/100 g)

2.4 การยับยั้งจุลินทรีย์ในข้าวกล้องงอก ในระหว่างกระบวนการแช่เมล็ดข้าวในน้ำนานกว่า 20 ชั่วโมง เช่น การผลิตข้าวเหนียว (parboiling rice) ในทางการค้ามีจุลินทรีย์เกิดขึ้น (Bandara *et al.*, 1991) ซึ่งวิธีการที่จะลดจุลินทรีย์ในข้าวกล้องงอกนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธีลดจำนวนจุลินทรีย์ด้วยการใช้ความดันสูง (Kinefuchi *et al.*, 1999) การใช้รังสียูวี (Suzuki and Maekawa, 1999) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้า (Feng *et al.*, 2004) จากงานวิจัยของ Komatsuzaki *et al.* (2005) ใช้ข้าวพันธุ์ Nipponbare 100 g แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองเอาน้ำออกนำไปวางบนลวดที่เป็นตาข่าย ขนาดกว้าง 15 cm ยาว 18 cm แล้วทำการพ่นไอน้ำนาน 10 20 และ 30 min จากนั้นนำไปแช่ในเอทานอล 70% v/v จำนวน 100 ml นาน 3 min วิเคราะห์ปริมาณสาร GABA และจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด พบว่า หลังจากการใช้ไอน้ำนาน 20 และ 30 min จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลง จาก 10^8 เป็น 10^2 cfu/g แต่การใช้ไอน้ำนาน 20 และ 30 min ร่วมกับเอทานอลมีผลให้ไม่พบจุลินทรีย์ ซึ่งโดยปกติจะพบบาซิลลัส (bacillus) และเชื้อรา เช่น แอสเพอร์จิลลัส (aspergillus) ในระหว่างการเก็บเมล็ดข้าว (Tsuruta *et al.*, 1984) นอกเหนือจากนี้การทำแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 10 min (Rijal and Fujioka, 2003) ยังมีสปอร์ของแบคทีเรียเหลือรอดและการใช้ความดันสูงสามารถลดแบคทีเรียในข้าวกล้องแต่มีสปอร์ของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นภายหลัง และการใช้ไอน้ำร่วมกับเอทานอลกับข้าวกล้องงอกไม่มีผลต่อปริมาณสาร GABA

ประโยชน์ของสารชีวภาพในข้าวกล้องงอกต่อโภชนาการบำบัด

สารชีวภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นในข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการแช่และกระบวนการงอกต่างมีผลต่อโภชนาการบำบัด ประโยชน์ของสารชีวภาพในข้าวกล้องงอกแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยเฉพาะสาร GABA มีความสำคัญกับระบบประสาทใช้รักษาผลกระทบจากการที่สมองเกิดความเสียหายหรือได้รับการกระทบกระเทือนจากการกระทบทุบตี และถูกเขย่า ช่วยรักษาระดับความดันโลหิตให้คงที่ และลดไขมันในเส้นเลือด (Zhang *et al.*, 2005) การรับประทานสาร GABA เข้าไปอย่างต่อเนื่อง 8 สัปดาห์ จะสามารถยับยั้งความดันโลหิตและช่วยให้นอนหลับง่ายขึ้น รักษาและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการทำงานอย่างอัตโนมัติระหว่างวัยหมดประจำเดือน (Okada, *et al.* 2000) และพบว่าข้าวกล้องงอกยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเสียหายของตับได้ (Jeon, *et al.* 2003)

ตารางที่ 2 ประโยชน์ของสารชีวภาพในข้าวกล้องงอกต่อโภชนาการบำบัด

สารชีวภาพ	ประโยชน์
แกมมาอะมิโนบิวเทอริกเอซิด (GABA)	มีผลต่อความดันโลหิตต่ำ เร่งเมตาบอริซึมของสมอง ป้องกันอาการปวดศีรษะ ลดความตึงเครียดภายหลังการใช้สมอง ป้องกันสภาวะผนังโลหิตแดงหนาและมีความยืดหยุ่นน้อย ป้องกันเส้นโลหิตในสมองแตกป้องกันความผิดปกติช่วงเปลี่ยนวัย โรคจิต และรักษากิจกรรมการทำงานของไต
เส้นใย (dietary fiber)	บรรเทาอาการท้องผูก ป้องกันมะเร็งในลำไส้ รักษาระดับน้ำตาลในเลือด
อินโนซิทอล (inosital)	เร่งการเผาผลาญไขมัน ป้องกันไขมันจับที่ตับ ป้องกันสภาวะผนังหลอดเลือดแดงหนาและมีความยืดหยุ่นน้อย
กรดเฟอร์ริก (feruric acid)	สารต่อต้านมะเร็ง ป้องกันการสะสมสารสีดำ
กรดไฟติก (phytic)	มีผลต่อต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันโรคเกี่ยวกับหัวใจ ป้องกันภาวะเกล็ดเลือดเป็นก้อน
โทโคโทเรโนลส์ (tocotorenols)	สารต่อต้านมะเร็ง ป้องกันผิวหนังจากแสงอัลตราไวโอเลต
แมกนีเซียม (magnesium)	ป้องกันโรคหัวใจ
โพแทสเซียม (potassium)	ป้องกันโลหิตต่ำ
สังกะสี (zinc)	ช่วยฟื้นฟูกิจกรรมและบทบาทของร่างกายให้ดีขึ้น ป้องกันเส้นโลหิตแข็งตัว
แกมมาออริซานอล (gamma-oryzanal)	ต่อต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันผิวเหี่ยวช่น ลดคอเลสเตอรอล (cholesterol)
Prolylendopeptidse inhibitor	ป้องกันโรคความจำเสื่อม

ที่มา: Kayahara and Tsukahara (2000)

พื้นฐานการอบแห้ง

1. การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

การอบแห้งทั่วไปมักจะใช้อากาศร้อนในการอบแห้ง ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจาก Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force) ในขณะที่ผิวของไอในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (pressure of vapor) ที่แตกต่างกันระหว่างไอในวัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอที่ผิวจะสูง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ ถ้าอุณหภูมิความชื้นและความเร็วของอากาศร้อนมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอที่บริเวณผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอที่ผิวของวัสดุจะลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่าความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความดันไอ จะเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับความชื้นสมดุล

2. การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว ดังนั้นความดันไอย่อย (partial pressure of vapor) จึงมีค่าเท่ากับความดันไอรวม (total pressure) ในการระเหยน้ำจึงต้องทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำในวัสดุ น้ำจึงสามารถระเหยได้ สามารถแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงแรกเป็นช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (heat up period) ช่วงที่สองเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate drying period) และสุดท้ายเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate drying period) ดังนี้

2.1 ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ ความร้อนที่ถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงประมาณอุณหภูมิกระเปาะเป็ยกสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำในวัสดุที่ความดันนั้นๆ ซึ่งเกิดการควบแน่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้งหมดที่ผิวของวัสดุและอุณหภูมิของไอ

น้ำที่ควบแน่นมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของวัสดุ ซึ่งปริมาณไอน้ำที่ควบแน่นที่ผิวของวัสดุขึ้นอยู่กับค่า Thermal diffusivity ของวัสดุ ความชื้นในวัสดุและ Degree of superheated ไอน้ำที่ควบแน่นนี้จะทำให้ความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น

2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ในช่วงที่มีอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง ส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัสดุและกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น สำหรับไอน้ำร้อนยังคงจะเป็นการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของไอน้ำไปยังวัสดุโดยมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยังคงและผิววัสดุเป็นตัวผลักดัน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุเต็มไปด้วยไอน้ำร้อนยังคง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านนอกจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่ (diffusional mass transfer) เหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่เกิดจากการพาของไอน้ำร้อนยังคงโดยมีความดันที่แตกต่างกันเป็นแรงขับเคลื่อน อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบจนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต

2.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุและเนื้อวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังไอน้ำร้อนยังคง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำลดลงในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลมายังวัสดุยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้น และความดันในวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าความดันไออิ่มตัว (over pressure) อัตราการอบแห้งลดลงจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุมากกว่าคุณสมบัติของตัวกลางที่ใช้อบแห้ง แต่การเพิ่มอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปอัตราการอบแห้งโดยรวมของกระบวนการอบแห้งระหว่างไอน้ำร้อนยังคงและอากาศร้อนไม่แตกต่างกันมากนัก จุดที่แตกต่างกันคือ การกลั่นตัวของไอน้ำบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิและการทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ซึ่งอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงจะเร็วหรือช้ากว่าอากาศร้อน ขึ้นอยู่กับ

ก. ปริมาณไอน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้น ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งก่อนทำการอบแห้ง

ข. อุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่งที่ใช้ออบแห้งสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน ถ้าอุณหภูมิไอน้ำร้อนชนิดยิ่งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนชนิดยิ่งจะเร็วกว่าอากาศร้อน

ค. ความร้อนของไอน้ำร้อนชนิดยิ่งในระบบการอบแห้ง ถ้าให้ความดันของไอน้ำร้อนชนิดยิ่งเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะสูงขึ้นเนื่องจาก คุณสมบัติของไอน้ำที่เปลี่ยนไป ความดันไอน้ำจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

3. ทฤษฎีการแพร่ของของเหลว

กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในวัสดุ ความร้อนจากตัวกลางของไหลร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิววัสดุและถูกใช้ไปในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการถ่ายเทมวล โดยทั่วไปสำหรับการอบแห้งที่สภาวะของตัวกลางคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วตัวกลางคงที่) อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุแทนที่ปริมาณน้ำที่ถูกระเหยออกไปจากผิววัสดุในช่วงการอบแห้งคงที่ ดังนั้นอัตราการอบแห้งในช่วงหลังจึงลดลง จากทฤษฎีการแพร่ของของเหลว (liquid diffusion theory) การอบแห้งในช่วงการอบแห้งลดลง เริ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำซึ่งระเหยจากผิวหน้าของวัสดุเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ทำให้บริเวณผิวหน้าของวัสดุมีความชื้นต่ำลงขณะที่ภายในวัสดุมีความชื้นสูงกว่า ดังนั้น ความชื้นจากภายในจะเคลื่อนที่สู่ภายนอกด้วยการแพร่ของของเหลว อัตราการแพร่จะขึ้นกับผลต่างของค่าความชื้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลว เมื่อให้อัตราการระเหยของความชื้นมาจาก อัตราการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุเพียงอย่างเดียว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

โดยทั่วไปแล้วอัตราการอบแห้งสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จุดใหญ่ที่แตกต่างกันคือการควบแน่นของไอน้ำบริเวณบนผิววัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเป็นผลให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

1. การควบแน่นของไอน้ำบนผิวของวัสดุในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (heat up period)

ปัจจัยที่มีผลต่อการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น ขนาดของวัสดุ และ Permeability (คุณสมบัติที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ของวัสดุ) ของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำปริมาณน้ำที่ควบแน่นจะสูงขึ้น และเมื่อวัสดุมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณการควบแน่นที่ผิวจะเกิดขึ้นสูง การระเหยตัวเป็นไปได้ยากขึ้น นั่นคือจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น อัตราการอบแห้งช้า ส่วนผลของค่า Permeability จะไม่มีผลในช่วงการควบแน่นของไอน้ำ เนื่องจากสมบัติตัวนี้เป็นผลเนื่องจาก Mass transfer ในวัสดุ ซึ่งในการควบแน่นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุเท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทมวล แต่ค่า Permeability จะส่งผลให้สามารถอบแห้งวัสดุได้เร็วขึ้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Chen (2000) ไม่ได้ศึกษาถึงสมบัติของไอน้ำร้อนยวดยิ่งบางตัวที่คาดว่าจะมีผลต่อช่วงการควบแน่น เช่น อุณหภูมิของไอน้ำ โดยสรุปปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ควบแน่นคือ

1. คุณสมบัติของวัสดุอบแห้ง เช่น ขนาดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ถ้าวัสดุมีขนาดเล็ก หรือมีอุณหภูมิเริ่มต้นสูง ปริมาณน้ำที่ควบแน่นจะน้อยลง

2. คุณสมบัติของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป็นต้น

ปริมาณการควบแน่นของไอน้ำในช่วงต้นของการอบแห้งส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งจะช้าลง แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาถึงปริมาณการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวเพียงอย่างเดียว อาจไม่สามารถสรุปภาพรวมของอัตราการอบแห้งในกระบวนการหนึ่งๆ ได้ ต้องพิจารณาผลของตัวแปรตัวอื่นๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิอินเวอร์ชันและสภาวะการอบแห้ง เป็นต้น

2. อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (inversion temperature)

ในการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ตำแหน่งอุณหภูมิที่อัตราการอบแห้งวัสดุด้วยตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากันเรียกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นว่า อุณหภูมิอินเวอร์ชัน โดยอุณหภูมิอินเวอร์ชันสามารถบ่งบอกอัตราการอบแห้งของวัสดุได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนในวัสดุต่างๆ ถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่ถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่ง ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิอินเวอร์ชันจากงานวิจัยต่างๆ ของ Schwartz and Brocker (2002) แสดงไว้ในตารางที่ 3 สรุปได้ว่า อุณหภูมิอินเวอร์ชันมีค่าไม่คงที่ และแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุอบแห้งและลักษณะทางกายภาพของการอบแห้ง

3. สภาพะอบแห้ง

สำหรับอัตราการอบแห้งวัสดุระหว่างการใช้ไอน้ำร้อนขดยิ่งและอากาศร้อนซึ่งเป็นตัวกลางที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับช่วงการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเป็นสำคัญ เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุจึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ซึ่งความเร็วในการอบแห้งของวัสดุหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ปริมาณไอน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้น ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งก่อนการทำการทดลอง ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนขดยิ่งสูงกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขดยิ่งจะเร็วกว่าอากาศร้อน และการเพิ่มความดันไอน้ำร้อนขดยิ่งให้สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มเร็วขึ้น นั่นก็จะทำให้การอบแห้งเร็วขึ้นด้วย

ตารางที่ 3 ค่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน จากงานวิจัยต่างๆ

Reference	Theory/Experiment	Description	Inversion temperature (°C)
Schwartz (2000)	Theory	Wetted wall column Turbulent	199
Yoshida and Hyodo (1970)	Experiment	Wetted wall column Turbulent	160-176
Chow and Chung (1983)	Theory	Flat plate Laminar	250
Chow and Chung (1983)	Theory	Flat plate Turbulent	190
Schwartz (2000)	Theory	Flat plate Turbulent	200
Haji and Chow (1988)	Experiment	Flat plate Turbulent	170-220
Hasan <i>et al.</i> (1986)	Theory	Moving flat surface and gas / Laminar	230-260
Al-taleb <i>et al.</i> (1987)	Theory	Moving flat surface Laminar	225
Wu <i>et al.</i> (1989)	Theory	Wedge Turbulent	200
Ramamurthy (1991)	Experiment	Impinging jets Laminar	218-230
Bond <i>et al.</i> (1944)	Experiment	Impinging jets Turbulent	175
Sheikholeslami and Wathinson (1992)	Theory	Equilibrium approach	164
Faber <i>et al.</i> (1986)	Both	Fluidized-bed Equilibrium approach	160

ที่มา: Schwartz and Brocker (2002)

แนวทางการอบแห้งข้าวกล้องงอก

Eiji and Kunze (1988) ศึกษาการแปรรูปข้าวกล้องจากการคัดแปลงเครื่องสีข้าวที่ใช้ในการทดลอง (Satake TMO5) โดยต่อท่ออากาศร้อนมาช่วยให้เกิดการอบแห้งไปพร้อมๆ กับการขัดสี จึงเรียกว่าเป็นการแปรรูปในขั้นตอนเดียว การทดลองใช้ความชื้นของข้าวกล้องอยู่ระหว่าง 18-20% w.b. พบว่า ค่าความแข็งแรงของข้าวขึ้นอยู่กับการค่าความชื้น เมื่อความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นความแข็งแรงเชิงกลของข้าวจะมีค่าลดลง สำหรับคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านความขาวพบว่า ค่าความขาวที่ได้มีค่าประมาณ 42 (วัดจากเครื่อง Kett-300C) ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแนะนำสำหรับอบแห้งข้าวกล้องเท่ากับ 55°C ซึ่ง Yamashita (1993) ให้ความเห็นว่าถ้าต้องการอบแห้งโดยให้ข้าวยังคงมีคุณภาพทางด้านรสชาติอยู่ การอบแห้งโดยใช้ป้มนความร้อนจะช่วยให้ข้าวขึ้นได้ และข้อดีอีกประการหนึ่งของการใช้ป้มนความร้อนคือ สามารถทำการควบคุมบรรยากาศในห้องอบแห้งได้ ถึงแม้ว่ากระบวนการอบแห้งจะเป็นอย่างใด การแตกหักของข้าวกล้องนั้นจะเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงในขณะที่ความชื้นในห้องอบแห้งมีค่าต่ำ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Kameoka and Itou (1998) ที่พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่า 40°C ในการอบแห้งข้าวกล้องขณะที่ทำการอบแห้งในปริมาณมาก เปอร์เซ็นต์การแตกหักจะเพิ่มสูงขึ้นมาก

Dong *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนอบแห้งข้าวที่มีชั้นหนา พบว่า ข้าวกล้องเกิดการแตกร้าวขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณด้านบนของข้าวแห้งที่รับคลื่นไมโครเวฟโดยตรงจะแตกหักสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และอัตราการไหลของอากาศส่งผลกระทบต่อการแตกร้าว เมื่อความเร็วของอากาศต่ำกว่า 0.12 m/s การแตกร้าวของข้าวกล้องจะเพิ่มสูงขึ้น

กริช (2543) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนและป้มนความร้อน พบว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของต้นข้าว เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นปริมาณต้นข้าวจะลดลง ในขณะที่ปริมาณต้นข้าวจากการอบแห้งข้าวเปลือกมีค่าคงที่ ปริมาณต้นข้าวที่ได้จากการอบแห้งข้าวกล้องมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือก 56-57% ป้มนความร้อนสามารถอบแห้งข้าวเปลือกและข้าวกล้องได้เร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนและปริมาณต้นข้าวหลังอบแห้งมีค่าต่ำกว่า ส่วนคุณภาพด้านความขาวของข้าวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย การอบแห้งข้าวกล้องสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 1.3-1.5 เท่า ของระยะเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวกล้องมีอัตราอบแห้งที่สูงกว่าข้าวเปลือก

วัญญู (2548) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องดันแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขนาดกำลังผลิต 100 kg/h โดยนำข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น 80 และ 70°C เป็นเวลา 3 และ 7-8 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ความชื้นประมาณ 28.7 และ 31.3% (w.b.) ตามลำดับ เมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 128-164°C และใช้ความสูงเบดข้าวเปลือก 8 cm ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3.8 m/s เวลาในการอบแห้งประมาณ 4-5 min พบว่า สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงเหลือ 17.9-22.8% (w.b.) โดยความชื้นของข้าวเปลือกลดลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิง ความขาวของข้าวสารจะลดลงตามอุณหภูมิต่ำลงที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกสุกหรือเกิดเจลลิ่งในเซชันได้ในขั้นตอนเดียวกัน ข้าวเปลือกจึงมีลักษณะเป็นข้าวหนึ่ง ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้เป็นการรวมการนึ่งและอบแห้งไว้ในขั้นตอนเดียวกัน สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่งได้ ซึ่งมีผลทำให้ลดต้นทุนและระยะเวลาในการผลิตข้าวหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการผลิตข้าวหนึ่งในเชิงพาณิชย์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ อิศเรศ (2543) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดความชื้นได้ต่ำกว่า 18% (d.b.) โดยที่เปอร์เซ็นต์ของต้นข้าวไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าลดความชื้นของข้าวเปลือกต่ำกว่านี้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยใช้เทคนิคเดียวกันของงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนประมาณ 30% และข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีสีคล้ำกว่าข้าวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่สีอ่อนกว่าข้าวหนึ่งที่ได้จากโรงสีข้าวหนึ่ง

คุณภาพข้าว

การยอมรับในการบริโภคข้าวนั้น ผู้บริโภคมักคำนึงถึงคุณภาพที่ต้องการ ซึ่งสามารถพิจารณาจากคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพในการหุงต้ม โดยมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะพันธุ์ข้าวรวมถึงการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว

1. คุณภาพทางกายภาพของข้าว (grain physical quality)

เป็นคุณสมบัติภายนอกของเมล็ดที่สามารถเห็นได้ง่าย ซึ่งแยกออกได้ดังนี้

1.1 ขนาดของเมล็ด (grain size) อาศัยจากความยาว กว้าง และหนาของเมล็ด แต่ในการพิจารณาคุณภาพเมล็ดทั่วไปจะหมายถึงความยาวของเมล็ด มาตรฐานข้าวไทย ได้กำหนดชั้นของเมล็ดเป็น 4 ขนาด สำหรับการกำหนดขนาดของเมล็ดข้าวของประเทศต่างๆ จะแตกต่างกัน เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แบ่งความยาวของเมล็ดข้าวของสหรัฐอเมริกาออกเป็น 4 ขนาด เช่นกัน แต่มีขนาดแตกต่างจากมาตรฐานข้าวไทย ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชั้นของเมล็ดข้าวตามมาตรฐานข้าวไทยและสหรัฐอเมริกา

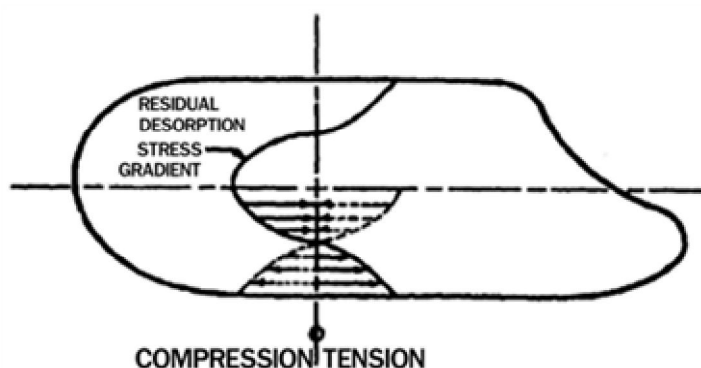
ชั้นของเมล็ด	ไทย (mm)	สหรัฐอเมริกา (mm)
เมล็ดยาวชั้น 1 (extra long)	> 7.0	> 7.50
เมล็ดยาวชั้น 2 (long)	6.6-7.0	6.61-7.50
เมล็ดยาวชั้น 3 (medium)	6.2-6.6	5.51-6.60
เมล็ดสั้น (short)	< 6.2	< 5.50

ที่มา: อธิคม (2546)

1.2 คุณภาพการสี ข้าวที่ผ่านการสีเป็นข้าวสารต้องมีข้าวหักน้อย ซึ่งต้องคำนึงถึงปริมาณข้าวสาร ต้นข้าว และข้าวหักที่ได้จากการสีข้าวด้วย ในการสีข้าวจะได้แกลบ 20-28% รำประมาณ 10% ส่วนที่เหลือคือข้าวสาร ในส่วนของข้าวสารนี้ประกอบด้วย ข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว (>8/10 ความยาวของเมล็ด) และข้าวหัก ข้าวคุณภาพดีควรจะสีได้ข้าวสารมาก โดยมีปริมาณข้าวหักน้อย ปัจจุบันที่

ทำให้ข้าวหักในระหว่างการสี ได้แก่ เมล็ดยาวมาก เมล็ดบิดเบี้ยวหรือไม่สมบูรณ์ เมล็ดมีท้องไข่มาก เมล็ดอ่อน การเกิดเมล็ดร้าวก่อนการสี เนื่องจากการเก็บเกี่ยวข้าวที่แช่น้ำหรือแฉะเกินไป รวมทั้ง การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวไม่เหมาะสม เช่น การลดความชื้นข้าวเปลือกแห้งมากเกินไป

1.3 การแตกร้าวของข้าวกล้อง การแตกหักที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปข้าวนั้นสามารถแยกได้เป็นสองส่วน คือ การแตกหักที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการอบแห้ง และการแตกหักระหว่างกระบวนการขัดสี สำหรับการแตกหักระหว่างกระบวนการอบแห้งสามารถอธิบายได้จากการศึกษาปัญหาการแตกร้าวของข้าวกล้องและข้าวสาร โดยเฉพาะการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแตกร้าวตามแนวเส้นรอบวง (fissuring) โดย Kunze (1993) ได้รวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณภาพของข้าวและได้สรุปผลกระทบของการเกิดการแตกร้าวของข้าวว่าการแตกร้าวของข้าวกล้องไม่ได้เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งแต่จะเกิดขึ้นเมื่อนำข้าวออกจากเครื่องอบแห้งราว 1-2 ชั่วโมง โดยรูปแบบของการแตกร้าวทั่วไปเป็นการแตกร้าวขึ้นรอบ ๆ ตามแนวเส้นรอบวงประมาณ 1-4 จุด เมื่อนำข้าวกล้องออกจากเครื่องอบแห้งมาไว้ในบรรยากาศ ข้าวกล้องที่มีความชื้นต่ำกว่าบรรยากาศจะดูดซับเอาไอน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ บริเวณผิวของข้าวเข้าไปสู่บริเวณผิวด้านนอกของเมล็ด ทำให้เมล็ดแบ่งในบริเวณผิวด้านนอกเกิดการพองตัวเกิดเป็นแรงอัดรอบผิวนอกของเมล็ด ซึ่งเมล็ดข้าวเป็นวัสดุที่สามารถขยายตัวในลักษณะอิสระเพื่อรักษาสมดุลของแรงขณะที่แรงกดด้านในของเมล็ดจะเกิดเป็นแรงดึงต้านกับแรงกดจากทางด้านนอก เมื่อไรก็ตามที่แรงกดทางด้านนอกมีค่าสูงจนสามารถเอาชนะแรงต้านแรงดึงทางด้านในแล้ว จะเกิดเป็นรอยร้าวรอบ ๆ เมล็ดของข้าว ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ข้าวเกิดการแตกร้าวในขณะที่ทำการขัดสี เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Grain fissuring effect ดังแสดงในภาพที่ 3 อีกกรณีหนึ่งคือการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงให้มีความชื้นลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นสำหรับการเก็บรักษาอย่างรวดเร็วจะพบว่า มีความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวกับเนื้อภายในเมล็ดค่อนข้างมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของความชื้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากความชื้นทางด้านในที่มีค่าสูงกว่าจะค่อย ๆ แพร่ออกมาที่ผิว ทำให้เมล็ดแบ่งบริเวณผิวของเมล็ดเกิดการขยายตัวซึ่งส่งผลให้เกิดแรงอัดที่บริเวณผิวและทางด้านในของเมล็ด แรงกดทางด้านในของเมล็ดเกิดจากการสูญเสียความชื้นเป็นผลให้เมล็ดแบ่งหดตัวลง การที่มีแรงทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกันนี้เป็นผลให้เกิดการเสียหายของเมล็ด เนื่องจากเกิดแรงดึงออกจากแนวศูนย์กลางของเมล็ด สำหรับอัตราการลดความชื้นของข้าวที่เกิดขึ้นได้โดยที่ไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของข้าวมากนัก Satake (1994) แนะนำที่ 0.2% (w.b.)/h ที่ 1% การแตกร้าว



ภาพที่ 3 Grain fissuring effect

ที่มา: Kunze and Calderwood (1985)

2. คุณภาพการหุงต้ม

เป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อ ทั้งนี้เนื่องจากความชอบของผู้บริโภคเป็นสำคัญ โดยสามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ข้าวพันธุ์ต่างๆ มีคุณภาพข้าวสุกแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

2.1 ปริมาณแอมิโลส (apparent amylose content) ในแป้งข้าวนั้น ประกอบด้วยโมเลกุลแอมิโลเพกทินและแอมิโลส โดยมีแอมิโลเพกทินในปริมาณที่มากกว่า แต่มักนิยมนำค่าถึงปริมาณแอมิโลสเป็นหลัก ปริมาณแอมิโลสเป็นสาเหตุให้ข้าวมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้น และทำให้ข้าวนุ่มน้อยลงด้วย เนื่องจากคุณสมบัติการคืนตัวของแอมิโลสที่สูงแล้ว ในการหุงต้มข้าวนั้นข้าวที่มีแอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อย หากใส่น้ำมากเกินไปทำให้ข้าวสุกและ ในทางกลับกันข้าวที่มีแอมิโลสสูงก็จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณน้ำในการหุงต้มด้วย

2.2 ความคงตัวของแป้งสุก (gel consistency) ข้าวที่มีแอมิโลสเท่ากันนั้น อาจมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน เนื่องจากมีอัตราการคืนตัวของแป้งสุกไม่เท่ากัน ข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกน้อยจะนุ่มกว่าข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกสูงในขณะที่ปริมาณแอมิโลสเท่ากัน

2.3 ระยะเวลาในการหุงต้ม (cooking time) การต้มข้าวให้สุกจะใช้เวลาประมาณ 14-24 min ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) โดยข้าวที่อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำจะใช้เวลาในการหุงต้มสั้นกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันสูง และข้าวที่มีเมล็ดหนาอาจเพิ่มระยะเวลาในการหุงต้มมากขึ้น

2.4 การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (elongation ratio during cooking) การขยายตัวของข้าวในขณะหุงต้มโดยเฉพาะตามแนวยาวของเมล็ดซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของข้าว ทำให้เมล็ดข้าวสุกขยายขึ้นที่เรียกว่าข้าวขึ้นหม้อ นอกจากนี้ยังทำให้ข้าวนุ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการขยายตัวทำให้เนื้อข้าวโปร่งขึ้นไม่อัดกันแน่น

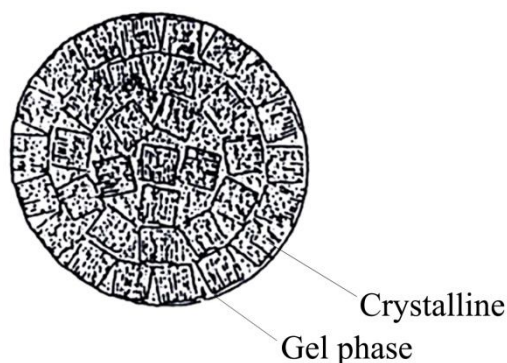
3. คุณสมบัติแป้งข้าว

จากงานวิจัยของ ศศิเกษม และ พรรณี (2530) ได้อธิบายการเกิดเจลาตินในเซชัน (geletinization) ดังนี้ ภายในเม็ดแป้ง (starch granule) จะประกอบด้วยแป้ง (starch) 2 ชนิด คือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน จัดเรียงกันเป็นโครงสร้างของเม็ดแป้ง มีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) ภายในเมล็ดข้าวประกอบด้วยแป้งประมาณ 84-93% โดยน้ำหนักแห้ง และมีโปรตีนประมาณ 5-14% แป้งสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. แอมิโลเพกทิน (amylopectin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลกลูโคส (glucose) จำนวนมาก และมีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันแบบแยกเป็นกิ่งก้าน (branched chain) เมื่อเชื่อมต่อกับไอโอดีนจะกลายเป็นสีน้ำตาลแดง เมื่อทำให้สุกในน้ำเดือดจะค่อนข้างคงสภาพเดิมไปได้นานและเป็นส่วนที่ทำให้ข้าวสุกเหนียวติดกัน

2. แอมิโลส (amylose) เป็นส่วนประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลกลูโคสจำนวนมากเช่นเดียวกัน แต่จะมีโครงสร้างโมเลกุลต่อกันเป็นแนวเส้นยาว (linear chain) เมื่อเชื่อมต่อกับน้ำยาไอโอดีนจะมีสีน้ำเงิน เมื่อทำให้สุกในน้ำเดือดและทำให้เย็นจะเกิดการคืนตัวเป็นของแข็งขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง และมีผลให้ข้าวสุกร่วนและแข็งกระด้างมากขึ้น ในแป้งข้าวเจ้าจะมีแอมิโลสประมาณ 10-34% ขึ้นกับพันธุ์ข้าว ส่วนที่เหลือเป็นแอมิโลเพกทิน เม็ดแป้งไม่สามารถละลายในน้ำเย็นเนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxygroup) จำนวนมาก จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน แป้งมีคุณสมบัติเป็น Hydrophilic จึงมี

ความสามารถดูดน้ำได้เมื่อทำให้เปียกหรือทิ้งไว้ในที่มีความชื้นสูง เมื่อเม็ดแป้งดูดน้ำจะพองตัวได้เล็กน้อย ซึ่งการพองตัวสามารถย้อนกลับได้ โดยเม็ดแป้งจะหดตัวเมื่อทำให้แห้ง ในเม็ดแป้งโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเหมือนผลึก มีการพองตัวอย่างจำกัด เรียกส่วนนี้ว่า Crystalline region อีกกลุ่มหนึ่งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบดูดน้ำได้ดี เรียกส่วนนี้ว่า Amorphous region หรือ Gel phase ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 บริเวณ Crystalline และ Gel phase ของเม็ดแป้ง

ที่มา: ศศิเกษม และ พรณี (2530)

การเกิดเจลาตินในเซชัน สามารถเกิดขึ้นเมื่อสารละลายน้ำแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวขึ้น ขณะเดียวกันพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจะค่อยๆ คลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำมากขึ้น และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น โมเลกุลน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน แป้งแต่ละชนิดมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันแตกต่างกันขึ้นกับสัดส่วนปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ปริมาณไขมัน และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในเม็ดแป้ง ซึ่งการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอกัน ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน การเกิดเจลาตินในเซชันไม่ได้เกิดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิ ช่วงของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) ของความร้อน ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันเฉื่อยนั่นเอง