หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชวงศ์หญ้า (วงศ์ Gramineae) มีความหลากหลายของชนิดอยู่ 23 ชนิด ในจำนวนนี้เป็นข้าวปลูกเพียง 2 ชนิดคือ ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* L.) และข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) ข้าวเอเชียนั้นมีการปลูกมากกว่าข้าวแอฟริกา และจากการศึกษาพันธุ์ข้าวเอเชียโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นพบว่า มีลักษณะข้าวที่แตกต่างกันเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวจาวานิกา แหล่งปลูกข้าวชนิดแรกนั้นอยู่ในประเทศเขตร้อน ได้แก่ ฟิลิปปินส์ เวียดนาม ไทย กัมพูชา ลาว พม่า ศรีลังกา อินเดีย บังคลาเทศ และอินโดนีเซีย และกลุ่มที่สองปลูกมากในประเทศญี่ปุ่นและเกาหลี ส่วนกลุ่มสุดท้ายนั้นพบในอินโดนีเซียบางพื้นที่ (เอก สงวน ชูวิสิฐกุล, 2544) นอกจากกลุ่มย่อยทั้งสามกลุ่มแล้วอาจมีการแบ่งกลุ่มย่อยของข้าวเพิ่มขึ้นอีกเป็น กลุ่มจาปอนิกาเขตมรสุม (Tropical japonica) ข้าวเหนียว และข้าวหอม (นิสากร ปานประสงค์, 2547)

การจำแนกประเภทของข้าว เราอาจจำแนกประเภทของข้าวได้ตามสมบัติที่เหมือนกันของข้าว ซึ่งสามารถแยกได้หลายวิธี เช่น การแยกตามสมบัติทางเคมี (แยกตามชนิดเนื้อแป้งในเมล็ดข้าว หรือแยกตามปริมาณแอมิโลสหรือแอมิโลเพกทิน) ประกอบด้วย

2.1.1 ข้าวเหนียว (Glutinous rice หรือ Waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวขุ่น เมื่อนึ่งแล้วจะได้ข้าวสุกที่จับตัวติดกันเหนียวแน่น และมีลักษณะใส นุ่มกว่า ข้าวเหนียวประกอบด้วยแอมิโลเพกทินเป็นส่วนใหญ่ประมาณ 95% และมีแอมิโลสอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ตัวอย่างข้าวเหนียว เช่น ข้าวพันธุ์กข 10 ข้าวพันธุ์สันป่าตอง เป็นต้น

2.1.2 ข้าวเจ้า (Nonglutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส เมื่อหุงหรือนึ่งสุกแล้วข้าวสุกจะมีสีขาวขุ่นและแข็งร่วนกว่าข้าวเหนียว ข้าวเจ้าจะมีปริมาณแอมิโลสอยู่ประมาณ 7-33% ที่เหลือเป็นแอมิโลเพกทิน ตัวอย่างข้าวเจ้า เช่น ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นต้น

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าคุณภาพสูงถูกบันทึกเป็นครั้งแรกว่านำมาจากบ้านแหลมประดู่ อำเภอพนัสนิคม จ.ชลบุรี เพื่อนำไปปลูกที่บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา ในปี 2488 ได้มีการรวบรวมข้าวขาวดอกมะลิมาทั้งสิ้น 199 รวง เพื่อนำไปปลูกและปรากฏว่าข้าวขาวดอกมะลิรวงที่ 105 เป็นสายพันธุ์ที่ดีที่สุดในเรื่องความหอมและคุณภาพของเมล็ด จึงได้ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกในปี 2502 ทั้งนี้โดยใช้ชื่ออย่างเป็นทางการว่า "ข้าวขาวดอกมะลิ 105" หรือที่ชาวบ้านเรียก ข้าว

หอมมะลิ มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ความสูงของต้นข้าวประมาณ 140 cm เมล็ดข้าวกล้องมีความยาว 7.4 mm ลักษณะรูปร่างข้าวเปลือกจะเรียว เมื่อสีเป็นข้าวสารจะได้ข้าวเมล็ดเรียว ยาว ขาว ใส เป็นเงา แกร่ง มีท้องไข่น้อยและมีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย ขณะที่ข้าวกำลังเดือดพล่านอยู่ในหม้อจะส่งกลิ่นหอมออกมากับไอน้ำ เมื่อหุงเป็นข้าวสุกจะมีรสชาติดี อ่อนนุ่ม (เอกสงวน ชูวิสิฐกุล, 2544)

2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ดข้าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน (รูปที่ 2.1) ดังนี้

2.2.1 เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด หรือ แกลบ (hull) เป็นส่วนของกลีบดอก 2 ชนิด (palea และ lemma) ซึ่งห่อหุ้มเมล็ดไว้ภายใน ประกอบด้วย เซลลูโลส ลิกนิน เพนโตเซน และเถ้า

2.2.2 เปลือกหุ้มผล (pericarp) เป็นเซลล์รูปแท่งห่อหุ้มอยู่รอบเมล็ดตามความยาวของเมล็ด มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้โครงสร้าง เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุอื่นๆด้วย

2.2.3 เมล็ด ภายในเมล็ดประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

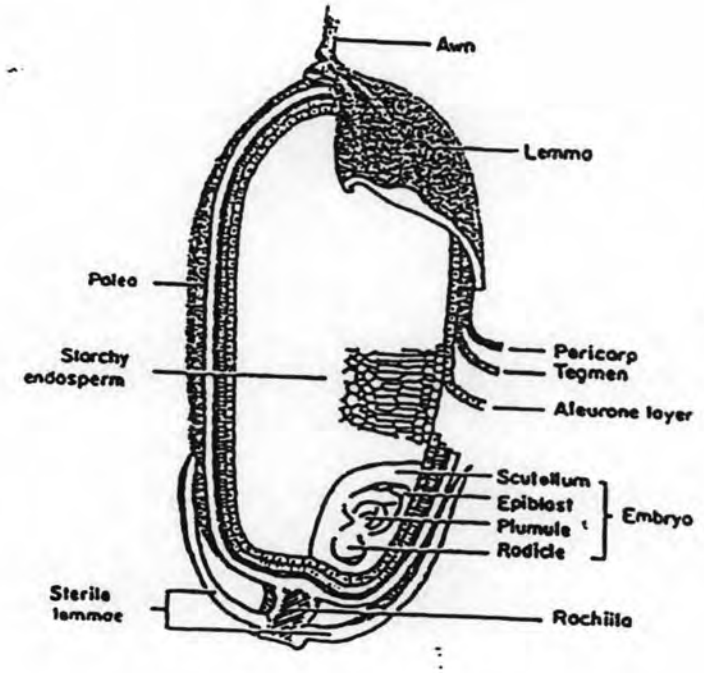
ก) เปลือกหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) เซลล์ในชั้นนี้มีไขมันสูงทำให้สามารถป้องกันไม่ให้น้ำเข้าสู่เนื้อเมล็ดได้

ข) ชั้นเนื้อเยื่อโปร่งแสง (hyaline layer หรือ nucellus) อยู่ติดกับชั้นของเปลือกหุ้มเมล็ด มีลักษณะที่โปร่งใส

ค) ชั้นแอลิวโรน หรือเยื่อหุ้มเมล็ด (aleurone layer) ผนังเซลล์หนา ประกอบด้วยโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นแหล่งสะสมของวิตามินหลายๆชนิด

ง) คัพภะ (germ หรือ embryo) เป็นส่วนของจมูกข้าวที่จะเจริญไปเป็นต้นอ่อนต่อไป จึงอยู่ด้านฐานใกล้รอยต่อของเมล็ด คัพภะประกอบด้วยส่วนที่จะงอกเป็นยอดอ่อน (plumule) และส่วนที่จะงอกเป็นรากแรกกำเนิด (radicle) นอกจากนี้แล้วส่วนของคัพภะทั้งหมดจะอยู่ในชั้นแอลิวโรน คัพภะอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน เอนไซม์ และวิตามิน

จ) เนื้อเมล็ด (endosperm) ในเนื้อเมล็ดประกอบด้วยสตาร์ชและโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ สตาร์ชที่เกิดขึ้นภายในผนังเซลล์ของเนื้อเมล็ดจะรวมอยู่ในเม็ดสตาร์ช (starch granule) ทั้งในลักษณะที่รวมกันเป็นกลุ่ม หรือเป็นเม็ดเดี่ยว โดยส่วนที่เป็นเม็ดเดี่ยวจะอยู่ร่วมกันกับโปรตีนและเกาะกันเป็นรูปร่างกลม (protein bodies) ซึ่งอยู่ติดกับชั้นแอลิวโรนเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
ที่มา: Juliano (1985)

2.3 คุณภาพข้าว

ปัจจุบันการผลิตข้าวนอกจากจะคำนึงถึงผลผลิตที่สูงแล้วยังต้องคำนึงถึงคุณภาพข้าวควบคู่กันด้วย ซึ่ง คุณภาพข้าวแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

2.3.1 คุณภาพด้านการหุงต้ม และการรับประทาน โดยคุณภาพในข้อนี้สัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้ บางคนชอบข้าวแข็ง บางคนชอบข้าวนิ่ม

2.3.2 คุณภาพด้านโภชนาการ เช่น ผู้บริโภคหันมาบริโภคข้าวกล้องมากขึ้นเนื่องจากมีสารอาหารที่มีประโยชน์ ตลอดจนนำเอาข้าวมาแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในอาหารในรูปแบบต่างๆ เช่น ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน

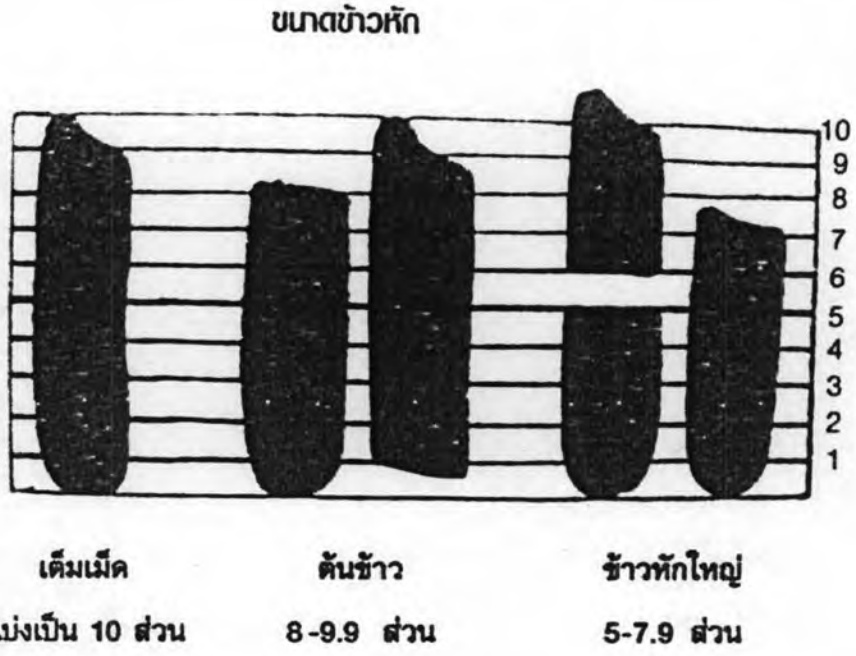
2.3.3 คุณภาพในการซื้อขาย

2.3.3.1 ความชื้น ควรอยู่ในช่วง 13-14% ถ้าความชื้นสูงกว่านี้ราคาข้าวจะต่ำลง

2.3.3.2 ลักษณะทางกายภาพของข้าว เช่น ท้องไข่ ความใสขุ่นของเมล็ด สิ่งเจือปน เป็นต้น

2.3.3.3 คุณภาพการสี โดยประเมินจากปริมาณข้าวต้นและข้าวหัก หากให้ข้าวเต็มเม็ดมีความยาวทั้งหมด 10 ส่วน ถ้าตัวอย่างข้าวมีความยาวอยู่ในช่วง 8 ส่วนขึ้นไปจะถือว่าเป็นข้าวต้น

และถ้ามีความยาวต่ำกว่า 8 ส่วนถือว่าเป็นข้าวหัก ในการผลิตข้าวสารถ้าข้าวสารให้ข้าวต้นมาก ราคาข้าวสารที่ได้จะสูง ด้วยเหตุนี้คุณภาพการสีจึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดราคาข้าวสาร ทั้งนี้เนื่องจากเป็นคุณภาพภายนอกที่ตรวจสอบได้ไว ง่าย และชัดเจน (งามชื่น คงเสรี, 2545) (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของข้าวต้นและข้าวหัก

ที่มา : งามชื่น คงเสรี (2545)

คุณภาพการสี

เป็นคุณภาพที่สำคัญที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดราคาข้าว

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพการสี

1. พันธุ์ข้าว (rice variety) คุณภาพการสีของข้าวอาจแปรปรวนได้ตามลักษณะต่างๆของพันธุ์ข้าว เช่น พันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดยาวมาก มีท้องไข่มาก จะให้ปริมาณข้าวต้นต่ำ เป็นต้น

2. ระยะเวลาและการเก็บเกี่ยว โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวนับจากวันออกดอกไป 28-30 วัน ความชื้นประมาณ 22-25% สังเกตได้ว่ารวงข้าวจะมีลักษณะโน้มลง เมล็ดที่โคนรวงยังมีสีเขียว 3-5 เมล็ด

3. การลดความชื้นเมล็ดข้าว เพื่อให้ความชื้นอยู่ในช่วง 12-14% ถือว่าเป็นช่วงความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเสื่อมคุณภาพในข้าว

4. การเก็บรักษา การเสื่อมคุณภาพในระยะนี้สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการทำลายของเชื้อรา

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การลดความชื้นในเมล็ดข้าว ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพการสี ทำให้ข้าวมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป แบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้

1.วิธีธรรมชาติ (sun drying) ซึ่งใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งให้ความร้อน พบว่าในการลดความชื้นให้เหลือ 12-14% ต้องใช้เวลาในการอบแห้ง 96 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเท่ากับ 40.10 ถือว่าวิธีนี้ใช้เวลาค่อนข้างนาน ไม่สามารถควบคุมคุณภาพข้าวได้ ดังนั้นจึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการพัฒนาวิธีการอบแห้งเมล็ดพืชขึ้นในข้อ 2

2. การใช้เครื่องอบ (artificial drying) วิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถปฏิบัติได้ทุกภาวะอากาศ ใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นไม่มากและยังสามารถควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติ เช่น การอบแห้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยการใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมแห้งที่อุณหภูมิ 30-40^{o}C ต้องใช้เวลาในการอบแห้ง 9-11 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเท่ากับ 60.14-61.26 ในขณะที่ใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่อุณหภูมิ 40-70^{o}C ต้องใช้เวลาในการอบแห้ง 8-9 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเท่ากับ 32.03-61.60 (Wongpornchai และคณะ, 2004) เครื่องอบแห้งทั้งสองข้างต้นพบว่าต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน ต่อมาจึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดขึ้นมาโดยอบแห้งข้าวพันธุ์ Langi Amaroo และ Chainart ที่อุณหภูมิอบแห้ง 100 125 และ 150 ^{o}C พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 2-4 นาทีเท่านั้น เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นอยู่ในช่วง 78.30-86.00 ส่งผลให้ราคาขายข้าวสูง ดังนั้นจึงนิยมนำเครื่องอบแห้งชนิดนี้มาใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งต่างๆมากขึ้น (Wiset และคณะ, 2003)

2.4 การอบแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

การอบแห้ง คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังอาหารพร้อมกับการถ่ายเทความชื้นจากอาหารไปยังอากาศ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวอาหารและ/หรือภายในอาหาร ในการอบแห้งอาหารทั่วๆไปมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งโดยความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ เมื่ออาหารได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวอาหารมายังกระแสอากาศ ขั้นตอนในการอบแห้งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (preheat period)

ช่วงนี้เป็นการเริ่มให้ความร้อนแก่อาหารเปียกเพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารและน้ำขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) ของอากาศร้อน การใช้อัตราความร้อนสูงจะทำให้ช่วงนี้มีระยะสั้น ซึ่งในการอบแห้งช่วงต่อไปจะมีระยะเวลานานกว่าช่วงนี้ จึงอาจจะไม่ต้องคำนึงถึงช่วงนี้ก็ได้

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate period)

ในช่วงนี้อุณหภูมิของอาหารจะมีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนตลอดเวลาที่ภายในตัวอาหารและผิวอาหารยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำอิสระ การถ่ายเทความชื้นระหว่างอาหารกับอากาศจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณรอบๆผิวอาหารเท่านั้น โดยอัตราเร็วของการอบแห้งจะมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงจุดที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนแปลงจากอัตราคงที่ไปเป็นอัตราลดลง

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period)

ในช่วงนี้ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของอาหารจะระเหยไปหมด เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากภายในอาหารเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำที่ออกจากผิวอาหาร ดังนั้นผิวของอาหารจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของอาหารจะเริ่มสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจะค่อยๆลดลง

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง (เปี่ยมศิลป์ ทองทิพย์, 2540)

สภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุมสภาวะภายนอกที่สำคัญและมีผลต่ออัตราการอบแห้งวัสดุได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆเช่น การกวน การแบ่งขนาดของชิ้นวัสดุ

2.4.1.1 อุณหภูมิของลมร้อน

โดยการอบแห้งแบบถาดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีดังกล่าวถือว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะอบแห้งจะถือว่าอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีการอบแห้งวัสดุที่ความเร็วลมร้อนคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของอากาศเท่านั้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นของอากาศมีค่าต่ำสุด ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแห้งเท่านั้นส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงวัสดุอบแห้งมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

2.4.1.2 ความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิและการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศแวดล้อม การนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศเวดล้อมทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของอากาศร้อนเปลี่ยนแปลงไปแต่จะไม่มีผลต่อความเร็วลมร้อน โดยปกติในการอบแห้งจะควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง ในกรณีที่

มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมร้อน ความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งเนื่องจากความเร็วลมร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นถ้าปัจจัยอื่นๆคงที่การอบแห้งความเร็วลมร้อนสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น

2.4.1.3 ความชื้นของลมร้อน

ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม และยังขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งที่เวลาใดๆ หากลมร้อนมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถในการดึงน้ำในวัสดุอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของลมร้อนลดลง นั่นคืออัตราการอบแห้งจะลดลงด้วยและในทางทฤษฎีสามารถที่จะควบคุมความชื้นของลมร้อนโดยการควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม ซึ่งหากเพิ่มการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นเท่าใดอัตราการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมได้แน่นอน และวิธีที่นิยมทดลองกันคือ การลองผิดลองถูกหรือหาความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างความชื้น อัตราการอบแห้งขณะใดขณะหนึ่งและสัดส่วนของการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมโดยการสมดุลมวลสาร

2.4.1.4 น้ำหนักของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือความหนาของชิ้นวัสดุ

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัสดุเท่านั้น ดังนั้นความหนาของวัสดุไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งในช่วงนี้เลย แต่เมื่อถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ของน้ำจากภายในสู่พื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดการระเหยจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ในช่วงนี้การเพิ่มความหนาของชิ้นวัสดุจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

2.4.1.5 ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากอุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ และความหนาของชิ้นวัสดุอบแห้งแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น การสลับตำแหน่งในชั้นวัสดุขณะทำการอบแห้ง ขนาดของของชิ้นวัสดุอบแห้ง

2.5 **การอบแห้งในถังเก็บ** (In-store drying) (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมชาย ฉิมสกลธนากร, 2533)

การอบแห้งในถังเก็บ (In-store drying) ลักษณะของการอบแห้งแบบนี้คือ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชแล้วจะขนย้ายมาไว้ในถังเก็บ ซึ่งมีการออกแบบให้มีการเป่าอากาศเข้าไปในกองของเมล็ดพืชภายในถังเก็บ มักใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ค่อนข้างต่ำ คือ ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม หรืออาจใช้อากาศแวดล้อมโดยที่ไม่มีการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนร้อนใดๆนอกจากพัดลมเท่านั้น เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีความสูงของชั้นเมล็ดพืชมากกว่า

เครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ อาจสูงถึง 6 m อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่ำ อากาศที่ใช้เป็นอากาศแวดล้อม อัตราการไหลของอากาศที่ใช้กันประมาณ 1-5 m^3/min ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือก การอบแห้งจะใช้เวลาหลายสัปดาห์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเจริญของเชื้อราความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืชจึงไม่ควรสูงเกินไป

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2532) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกในประเทศไทยโดยใช้การอบแห้งในถังเก็บ พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกในถังเก็บเป็นวิธีการที่เหมาะสม เพราะได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดีมากโดยให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเท่ากับ 60% สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่ำและการลงทุนครั้งแรกต่ำ แต่การอบแห้งต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน ส่วนการอบแห้งแบบเป็นงวด และแบบเมล็ดพืชไหลใช้เวลาในการอบแห้งน้อยมาก คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างสูงและการลงทุนครั้งแรกก็สูงด้วย นอกจากนี้แล้วการอบแห้งในถังเก็บควรกำหนดความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 20% wet basis (wb) ความหนาของชั้นข้าวประมาณ 3-4 m อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ประมาณ 2.0-3.6 m^3/min ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือก เวลาที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 200-270 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือเป็น 14%

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมชาย ฉิมสกลธนากร (2533) ได้ศึกษาการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบในถังเก็บและแบบเป็นงวด พบว่าหากต้องการการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างช้าๆ ควรเลือกการอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำ โดยเป่าอากาศเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมีค่าต่ำพอหรือเป่าอากาศอย่างต่อเนื่อง แต่อุ่นอากาศให้ร้อนขึ้นเล็กน้อยเฉพาะในช่วงเวลาที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าสูงกว่า 75% และหากต้องการอบแห้งอย่างรวดเร็วควรอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้อัตราการไหลของอากาศที่สูง

สมเกียรติ และคณะ (2537) ออกแบบและทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกในถังเก็บ โดยในงานวิจัยได้ออกแบบระบบอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยท่อลมหลักรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.7 mx0.8 m ทำจากสังกะสีแผ่นเรียบ ท่อลมแยกทั้งหมดเป็น 6 ท่อด้วยกัน สร้างจากเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm และเหล็กฉากประกอบเป็นโครงสร้างสำหรับรับน้ำหนักข้าวเปลือก พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีขนาดพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.18 m^2 มีมุ้งอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นตัวกระจายลมที่ใช้ในการอบแห้ง พัดลมที่ใช้เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มอเตอร์ขนาด 11.2 kw และมีวาล์วปีกผีเสื้อ 6 ตัว ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของลมในแต่ละท่อให้เท่ากัน สำหรับเครื่องมือวัดที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เครื่องมือวัดอุณหภูมิในกองข้าวเปลือก และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมโดยใช้สายเทอร์โมคับเปิล type K ต่อเข้ากับ data logger ซึ่งมีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$ และเครื่องมือวัดความสูญเสียความดันของระบบอบแห้งวัดโดยใช้มาโนมิเตอร์ โดยระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี การสูญเสียความดันในระบบอบ

แห้งส่วนใหญ่เกิดจากการไหลของอากาศผ่านกองข้าวเปลือก ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 16% wb เหลือเป็น 14% wb โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 2.03 m^3/min ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือกมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ย 19 บาท/ตันข้าวเปลือก คุณภาพของข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ดีไม่ว่าจะเป็นเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นหรือสีของข้าว โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมากกว่าตัวอย่างอ้างอิงซึ่งมีค่าเพียง 42.4% ส่วนความขาวของข้าวสารมากกว่า 39.8 และเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้ดีกว่าการอบแห้งโดยวิธีตากแดดประมาณ 11% ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้นประมาณ 14% wb ควรมีการระบายความร้อนจากกองข้าวเปลือกเป็นระยะๆโดยเป่าอากาศแวดล้อมผ่านกองข้าวเปลือกเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ถ้าไม่มีการระบายความร้อนออกจะทำให้เมล็ดข้าวเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง ซึ่งเกิดจากความร้อนจะไปเร่งช่วงปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้คุณภาพของเมล็ดข้าวลดต่ำลง จากการทดลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์พบว่าหากต้องการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 18%wb เหลือเป็น 14%wb อัตราการไหลของอากาศเป็น 1.3 m^3/min ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือก มีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 35 บาทต่อตันข้าวเปลือกและใช้เวลาในการอบแห้งโดยเฉลี่ย 179 ชั่วโมง

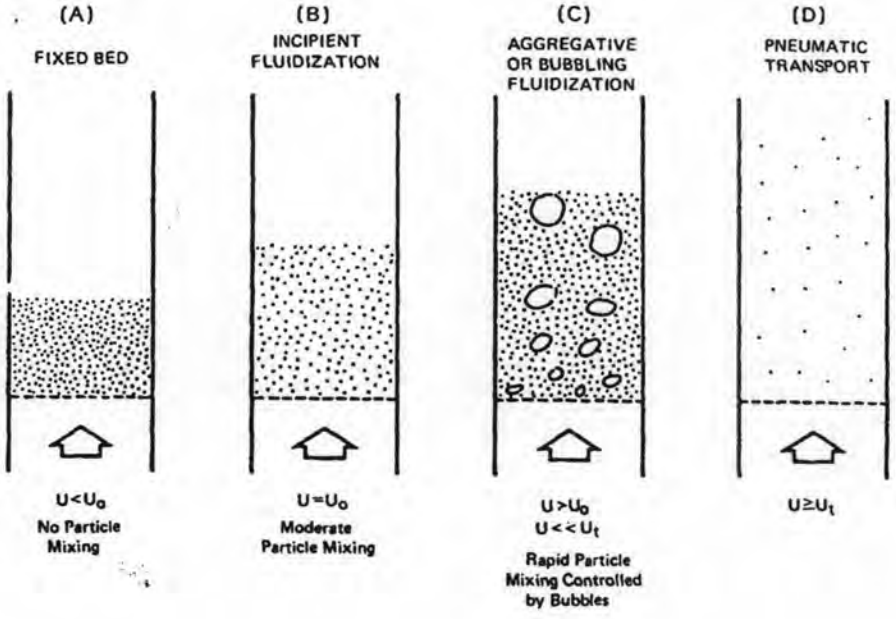
พิพัฒน์ อมตฉายา (2538) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการรักษาในสถานที่ใช้งานจริง รายงานว่าแนวทางที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกในเขตร้อนชื้น อาจทำได้โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงในช่วงแรกของการอบแห้งจะอบแห้งอย่างรวดเร็วโดยใช้เครื่องอบหรือตากบนลานเพื่อลดความชื้นลงเหลือ 18% wb แล้วนำมาอบต่อในช่วงที่ 2 ในโรงเรือนเก็บข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นลงจนถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา โดยมีความชื้นประมาณ 13-14% wb ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาในช่วงที่ 2 โดยใช้อากาศแวดล้อมเป่าผ่านกองข้าวเปลือกขนาด 105 ตันด้วยอัตราการไหล 0.57 m^3/min ต่อลูกบาศก์เมตรข้าวเปลือก เก็บข้อมูลที่ผิวบน, ที่ระดับความลึก 30 cm 2 m และ 4 m จากผิวบนกองข้าวเปลือกพบว่า ในการลดความชื้นข้าวเปลือกเฉลี่ย 17% wb ให้เหลือ 11.2% wb จะใช้เวลาในการอบแห้ง 9 สัปดาห์โดยชั้นความลึก 4 m และ 2 m จะแห้งเร็วกว่าที่ระดับความลึก 30 cm และที่ผิวบนตามลำดับ หลังจากที่อบแห้งและเก็บรักษาในที่เก็บนานประมาณ 10 สัปดาห์พบว่า ความขาวเฉลี่ยที่แต่ละระดับความลึกอยู่ในเกณฑ์ดีซึ่งมากกว่า 35 เมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวเปลือกอ้างอิง ส่วนเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้มีค่ามากกว่า 41% ซึ่งสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้จากการตากลาน 8%

2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

ฟลูอิไดเซชัน คือ กระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้น (ตัวอย่างอาหาร) สัมผัสกับของไหล (ก๊าซหรือของเหลว) ที่ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของของแข็ง ทำให้ของแข็งขยับตัวลอยขึ้นเป็นอิสระมีคุณสมบัติคล้ายเป็นของไหล

2.6.1 ลักษณะของ fluidized bed

อาณาเขตในการอบแห้งที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหล ซึ่งจะเริ่มนับตั้งแต่แผ่นตะแกรงรองรับเม็ดของแข็งขนถึงระดับสูงสุดที่ผิวของเม็ดของแข็งลอยอยู่ จะเรียกว่า เบด (bed) เมื่อเม็ดของแข็งถูกบรรจุเข้าไปในห้องอบแห้ง เมื่อเริ่มปล่อยของไหลผ่านขึ้นไปทางด้านบนของตะแกรงในห้องอบแห้งในขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยเม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัว เรียก เบดนิ่ง (fixed bed) (A) ถ้าหากของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนทำให้เม็ดของแข็งขยับลอยตัวเป็นอิสระ เรียก ฟลูอิไดซ์เบดหนาแน่น (densed phase fluidized bed) (B)ในภาวะนี้เม็ดของแข็งดูเหมือนว่ายังจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และถ้าหากเพิ่มความเร็วให้ของไหลอีกจนทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวมากขึ้น ระยะห่างระหว่างเม็ดของแข็งมีมากขึ้น จะเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบเจือจาง (diluted phase fluidized bed) (C) และถ้าหากเพิ่มความเร็วของไหลอีกเม็ดของแข็งก็จะถูกทำให้หลุดออกไปจากห้องอบแห้ง ซึ่งจะถูกพัดพาออกจากเบดติดไปกับของไหล จะเรียกว่า การถูกพัดพาของเบด (lean phase fluidized bed) ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การขนถ่ายของอากาศ (pneumatic transport) (D)

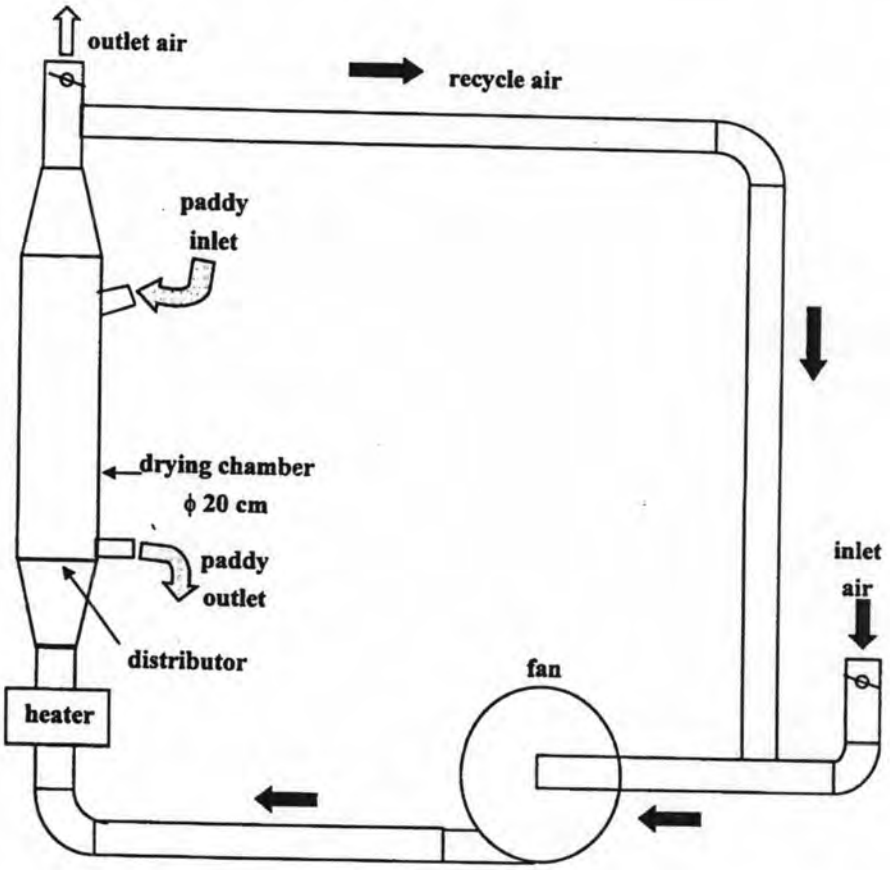


รูปที่ 2.3 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด

ที่มา: Hovmand (1987)

หลักการทำงานของเครื่องฟลูอิไดซ์เบด อธิบายได้ว่าเครื่องอบแห้งจะดูดอากาศที่บริเวณรอบๆแล้วไหลไปผสมกับอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซล แล้วไหลมาผสมกับอากาศอบแห้งที่หมุนเวียนกลับมาในห้องผสมอากาศ โดยมี Blower เป็นตัวดูดและเป่าเข้าห้อง

อบแห้ง หลังจากนั้นำตัวอย่างใส่ลงในห้องอบแห้ง เมื่อได้เวลาครบตามต้องการนำตัวอย่างออกจากห้องอบแห้ง อากาศส่วนน้อยจะออกไปในระหว่างการอบแห้งในขณะที่อากาศส่วนใหญ่ที่ยังคงร้อนอยู่จะไหลไปผสมกับอากาศที่ได้จากการเผาไหม้ต่อไป



รูปที่ 2.4 ลักษณะเครื่องฟลูอิไดซ์เบด

ที่มา: นเรศ มีโส (2541)

2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน

ข้อดี

1. ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น เนื่องจากอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อมวลผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งมีค่าสูง
2. ความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และอุณหภูมิภายในเบดมีความสม่ำเสมอทำให้สามารถอบแห้งในช่วงอุณหภูมิที่สูงๆได้
3. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่น้ำหนักน้อยจะอยู่ด้านบน เม็ดที่น้ำหนักมากจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้
4. แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อย

5. จากพฤติกรรมการไหลของเม็ดของแข็งจึงทำให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
6. พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง

ข้อเสีย

1. การทำงานมีข้อจำกัด ถ้าใช้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปจะทำให้เม็ดของแข็งหลุดลอยจากเบดไปพร้อมกับของไหล
2. เวลาในการสัมผัสกันของของไหลกับของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูงๆหรือหลายๆชั้น ดังนั้นจึงเปลืองเงินลงทุน
3. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกาะกันแล้วไหลตกลงมาส่วนล่างของเบด

อรอนงค์ ศรีพวาทกูล และคณะ (2537) ศึกษาเกียวกับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิไดซ์เบดอย่างต่อเนื่องโดยใช้สมการการอบแห้งของ Page พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศจำเพาะและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ อบแห้งที่อุณหภูมิ 115°C ความสูงของเบด 10 cm อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s-kg dry matter ความเร็วของอากาศ 2.3 m/s อัตราการหมุนเวียนกลับของอากาศ 80% ข้าวเปลือกที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสัมพัทธ์ 60-88% ค่าความขาวสัมพัทธ์ 88-97% ทั้งนี้ไม่ควรอบแห้งข้าวเปลือกให้มีความชื้นต่ำกว่า 22% dry basis(db) และยังให้คำแนะนำอีกว่าในระบบการอบแห้งควรมีแผ่นกั้นแบ่งส่วนอบแห้งเป็นห้องประมาณ 4-8 ห้อง ระยะระหว่างแผ่นกั้น 10-20 cm) จะทำให้ข้าวเปลือกมีพฤติกรรมการไหลคล้ายลูกสูบ

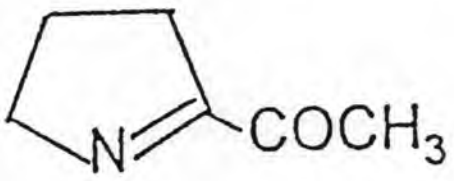
Soponronnarit และ Prachayawarakorn (1994) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการทำสภาพของไหลโดยทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 100-150°C พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C เปอร์เซ็นต์ต้นเพิ่มขึ้นสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าว สำหรับค่าความขาวพบว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100°C มีความขาวมากกว่าที่ 130 และ 150°C และยังได้สรุปเงื่อนไขการทำงานของระบบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานเกือบต่ำสุดและให้คุณภาพข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ควรใช้ภาวะที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันมีค่า 1.65 m/s อัตราการหมุนเวียนกลับของอากาศ 80% อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.1 kg/s-kg dry matter ความสูงของเบด 9.5 cm และอุณหภูมิในการอบแห้งไม่ควรเกิน 115°C

Taweerattanapanish และคณะ (1999) ศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้ฟลูอิไดซ์เบดต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น การทดลองได้นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23-31% wb อบแห้งโดยใช้เครื่องฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 140 และ 150°C จนความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกอยู่ในช่วง

13-29% wb จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปทดลองต่อใน 2 ลักษณะคือ ลักษณะที่ 1นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง 20-30 นาที เป่าด้วยอากาศเย็นภายในเครื่องอบแห้งแบบถาดต่อจนกระทั่งความชื้นเท่ากับ 14% wb หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการสีต่อไป ส่วนลักษณะที่ 2 นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาผ่านกระบวนการ tempering ซึ่งก็คือการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาให้ความร้อนต่อทันทีในขวดอับอากาศภายในตู้อบโดยใช้อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องฟลูอิไดซ์เบดเป็นอุณหภูมิสำหรับการ tempering สำหรับงานวิจัยนี้จะ tempering ที่ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นจะนำไปเป่าด้วยอากาศเย็นในเครื่องอบแห้งแบบถาดจนเหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก 14% wb แล้วนำไปสีต่อไป ผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นให้สูงได้เมื่อข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายหลังการอบด้วยฟลูอิไดซ์เบดอยู่ในช่วง 19-22% wb และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 และ 150°C ปริมาณข้าวต้นเพิ่มมากกว่าเดิมถึง 50% ด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์พบว่าข้าวที่ผ่านการ tempering จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์มากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering ส่วนในเรื่องความขาวพบว่าข้าวที่ผ่านการ tempering จะมีเปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ tempering ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการ tempering ข้าวเปลือกถูกพักไว้ในขวดอับอากาศทำให้ความร้อนยังคงอยู่ในตัวเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่า ความร้อนดังกล่าวนอกจากจะทำให้ข้าวเปลือกเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองมากขึ้นแล้วยังสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเมล็ดข้าวเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนิลซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดกลิ่นเหม็นได้ นอกจากนี้แล้วยังพบอีกว่าการ tempering ที่อุณหภูมิสูงถึง 80°C เปอร์เซ็นต์ความขาวสัมพัทธ์จะต่ำลงมากจนไม่สามารถซื้อขายได้

2.7 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP)

2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) เป็นสารระเหยที่มีจุดเดือดต่ำ โครงสร้างเป็นเฮเทอโรไซคลิกที่มี N เป็นองค์ประกอบทำให้มีสมบัติมีขั้ว (polarity) และค่อนไปทางเบสจึงทำให้สารนี้สามารถยึดเกาะอยู่ในเนื้ออาหารหรือตัวอย่างพืชได้โดยสร้างพันธะอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น แป้ง โปรตีน ไขมันและไม่ระเหยออกมามากในภาวะอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างสาร 2AP (C_6H_9NO)

Buttery และคณะ (1982, 1986) ได้รายงานว่า สาร 2AP ถือเป็นสารหอมที่สำคัญในข้าวสุก (*Oryza sativa* L.) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถรับกลิ่นคือ 0.1 nl/l ในน้ำ

Buttery และคณะ (1983a) ตรวจพบสาร 2AP ทั้งในข้าวหอมและข้าวธรรมดา โดยในข้าวหอมจะมีสาร 2AP ในปริมาณที่มากกว่า และยังพบว่าในใบเตยมีปริมาณสาร 2AP มากกว่าข้าวหอมและข้าวธรรมดาประมาณ 10 และ 100 เท่าตามลำดับ

Buttery และคณะ (1983b) ศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของสารหอม 2AP โดยวิธี steam volatile oils จากข้าวสุก 10 สายพันธุ์พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เป็นข้าวกล้องมีปริมาณสาร 2AP เท่ากับ 0.2 ppm มากกว่าในข้าวขาวซึ่งมีปริมาณสาร 2AP เพียง 0.07 ppm และรายงานเพิ่มเติมว่ากลิ่นของสาร 2AP มีลักษณะคล้ายกลิ่นข้าวโพดคั่ว

Mahatheeranant และคณะ (2001) รายงานว่าสาร 2AP สามารถตรวจพบได้ในข้าวสารดิบโดยทำการสกัดแบบใช้ตัวทำละลาย

Wongpornchai และคณะ (2003) รายงานว่าแหล่งของสาร 2AP นอกจากพบในข้าวแล้วยังพบในอาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน เช่น ข้าวโพดกระป๋อง ขนมปังข้าวสาลีอบ มันฝรั่งต้มสุก นมผงไขมันต่ำ งาอบ เมล็ดมะม่วงอบ เนื้อปูสุก แป้งข้าวโพด เผือกต้มสุก

Sunthonvit และคณะ (2003) ศึกษาผลของการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงต่อปริมาณสารหอมที่เป็นองค์ประกอบในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 100 125 และ 150°C อบแห้งจนกระทั่งความชื้นลดลงจาก 26% wb เป็น 18% wb จากนั้นจะนำข้าวเปลือกจากขั้นตอนแรกมาอบแห้งในโรงเก็บจนกระทั่งได้ปริมาณความชื้นเป็น 13-14% wb ผลการทดลองพบว่าสารระเหย (volatile compounds) ในข้าวที่พบมีทั้งหมด 44 ชนิด (ตารางที่ 2.1) ดังนี้

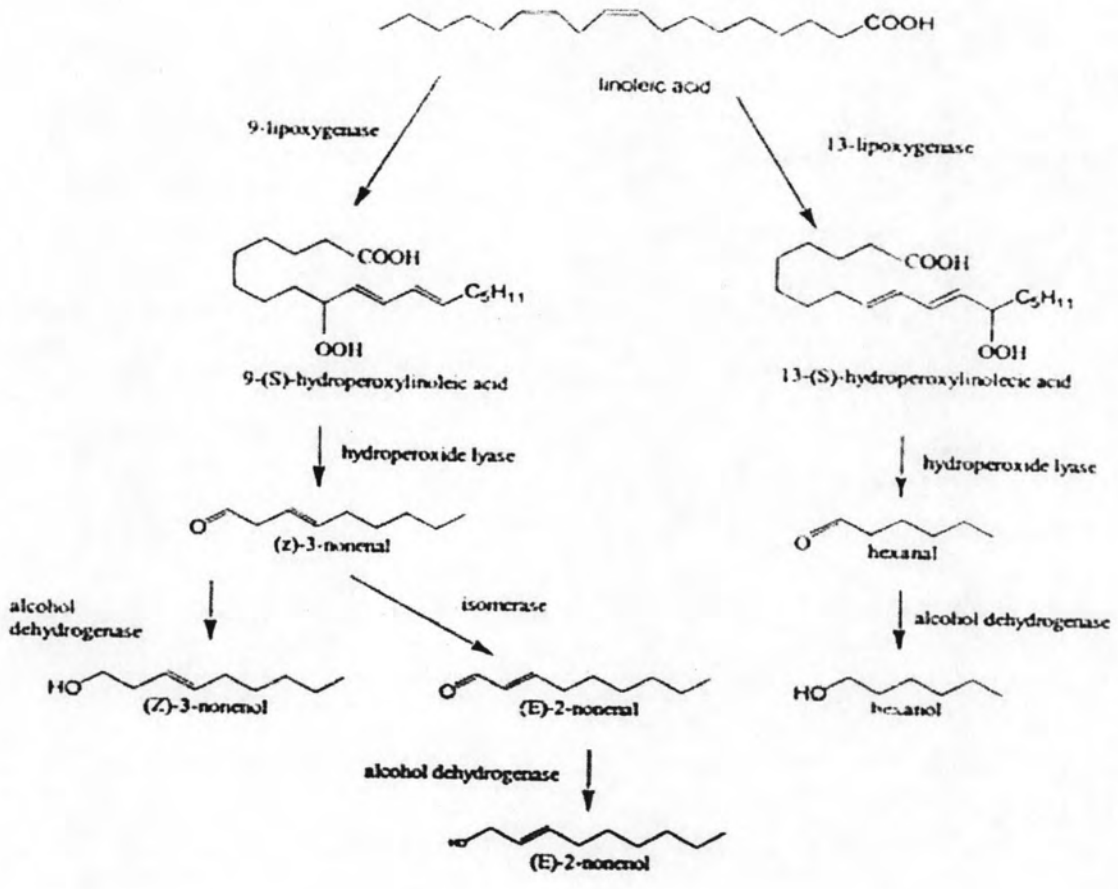
ตารางที่ 2.1 สารประกอบให้ความหอมในข้าวหอมทั้ง 44 ชนิด (Thai fragrant rice)

Compounds	*Odour description (Leung, 2001)*
Aldehydes	
Pentanal	fruity, woody, vanilla, nutty on dilution
Hexanal	green, grassy, fatty, powerful, penetrating
Heptanal	
Nonanal	
(E) 2-heptenal	green, heavy, pungent
(E) 2-octenal	green, herbaceous, spicy
(E) 2-nonenal	fatty, waxy, penetrating
Benzaldehyde	
2,4-decadienal, (E,E)	
2-isopropyl-5-oxohexanal	
Alcohols	
1-pentanol	sweet, heavy, strong balsamic
2-methylcyclopentanol	
1-hexanol	herbaceous, fragrant, woody, mild, sweet, mild, green
1-octen-3-ol	mushroom, mouldy
1-octanol	waxy, fatty, citrus, sharp
6-methyl-2-heptanol	
4-vinylguaiacol	
3,7,11-trimethyl-2,6,10 dodecatrien-1-ol	
Ketones	
3-hydroxy-2-butanone	
(E) 3-penten-2-one	
2-heptanone	fruity, spicy, fragrant
2-dodecanone	
2-tridecanone	warm, herbaceous, slightly spicy
Heterocyclic	
2-pentyl-furan	vegetable, green bean
2-acetyl-1-pyrroline	cooked rice, popcorn
Pyridine	sour, fishy, amine
Hydrocarbon	
5,7-dimethyl-undecane	
2,4-dimethyl-heptane	
2,6,10-trimethyl-dodecane	
Dodecane	
Hexadecane	
Acids	
Ethyl ester-propanoic acid	
Methyl ester-butanoic acid	
1-methyl ethyl ester-butanoic acid	
Hexanoic acid	
Octanoic acid	
Dodecanoic acid	
Tetradecanoic acid	
Hexadecanoic acid	
Octadecanoic acid	
Oleic acid	
9-hexadecanoic acid	
9,12-octadecadienoic acid (Z,Z)	
Miscellaneous	
Dibutyl phthalate	

ที่มา : Sunthonvit และคณะ (2003)

ส่วนสารที่พบในปริมาณมากที่สุดคือ hexanal ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นหญ้า (ใบไม้) เกิดจากกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (Linoleic acid) ผ่าน Lipoxygenase pathway ได้กรดไขมันอิสระที่ไม่เสถียร

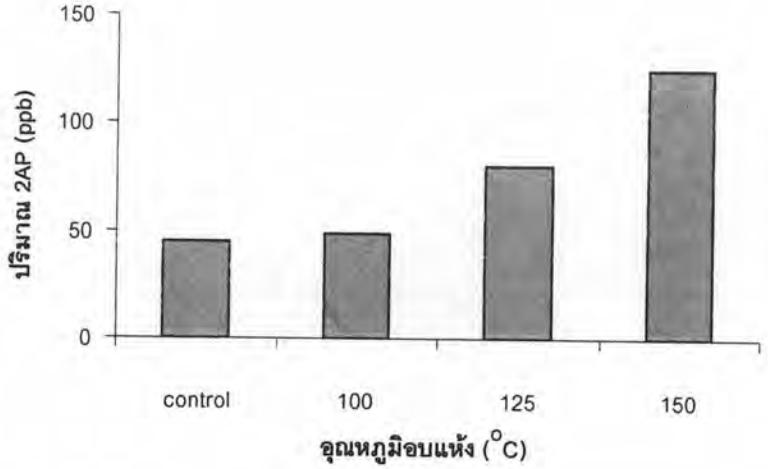
(hydroperoxide) จากนั้นจะถูกย่อยสลายต่อด้วยเอนไซม์ hydroperoxide lyase ได้สารประกอบ hexanal ซึ่งเป็นสาร aldehyde ที่ให้กลิ่นเกิดขึ้น (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดสาร Hexanal

ที่มา : Sunthonvit และคณะ (2003)

สำหรับสาร 2AP ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างสารหอมในข้าว พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 150°C ปริมาณสาร 2AP (ประมาณ 124.8 ppb) มีแนวโน้มสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร 2AP ต่ออุณหภูมิในการอบแห้ง
ที่มา : Sunthonvit และคณะ (2003)

นอกจากนี้แล้ว Sunthonvit และคณะ (2003) อธิบายเพิ่มเติมไว้ว่า สาร 2AP เกิดจากปฏิกิริยา Maillard reaction สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hofmann และ Schieberle (1998) ที่รายงานว่าสาร 2AP เป็นสารที่ให้กลิ่นใน roasty popcorn เกิดจาก Maillard reaction โดยเป็นปฏิกิริยาระหว่าง 1-pyrroline กับ 2-oxopropanal

2.7.1 กลไกการเกิดสาร 2AP

กลไกการเกิดสาร 2AP สรุปได้เป็น 2 แนวทาง คือ

1. Maillard reaction

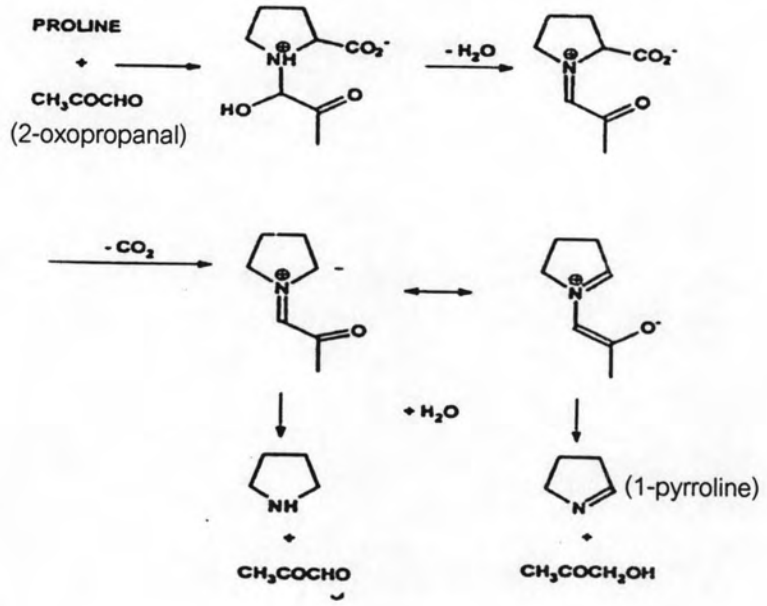
2. Gene หรือพืชสร้างขึ้นเอง

2.7.1.1. Maillard reaction ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

2.7.1.1.1 ขั้นตอนแรก (initial stage) เกิดการรวมตัวกันระหว่าง carbonyl group ของ reducing sugar กับ amino group ของ amine ได้โครงสร้างที่ผันกลับได้ระหว่าง enol form กับ keto form

2.7.1.1.2 ขั้นตอน 2 (intermediate stage) เกิดการแตกตัวของคาร์โบไฮเดรตออกจากโครงสร้างได้สารที่เป็นตัวกลาง คือ 2-oxopropanal ทั้งหมด 2 โมเลกุล เป็นสารตั้งต้นที่จะผลิตสารให้กลิ่นต่อไป

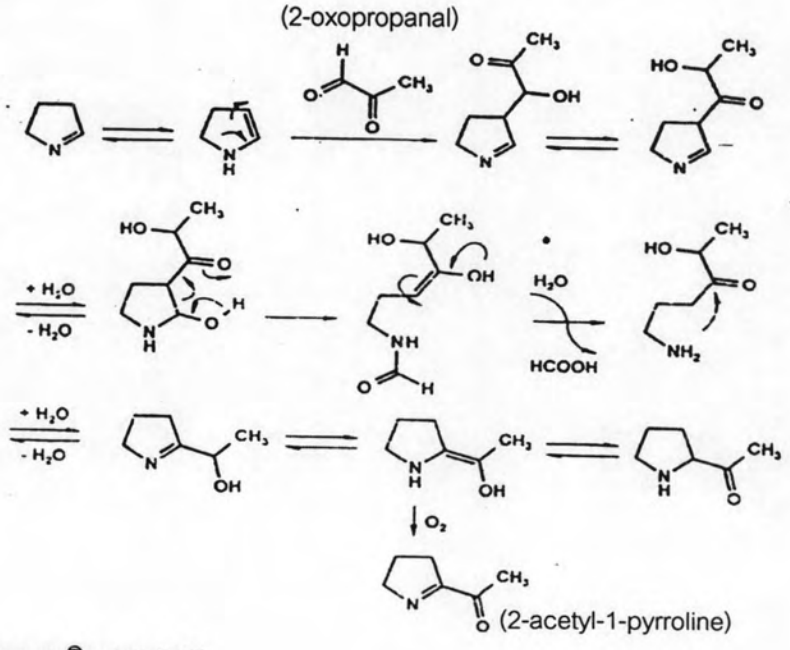
หลังจากขั้นตอนนี้สาร 2-oxopropanal 1 โมเลกุลจะมาทำปฏิกิริยากับ proline ในปฏิกิริยา Strecker degradation เกิดการ oxidative deamination และ decarboxylation ได้สาร heterocyclic ที่ให้กลิ่น คือ 1-pyrroline (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยา Strecker degradation ระหว่าง proline กับ 2-oxopropanal

ที่มา : Hofmann และ Schieberle (1998)

2.7.1.1.3 **ขั้นตอนที่** 3 (final stage) **สาร** 1-pyrroline **ที่เกิดขึ้นในข้างต้นทำ**ปฏิกิริยาต่อกับสาร 2- oxopropanal **ที่เหลืออีก** 1 โมเลกุล (**รูปที่** 2.9) **ได้เป็นสารหอมหลักในข้าว คือ สาร** 2AP

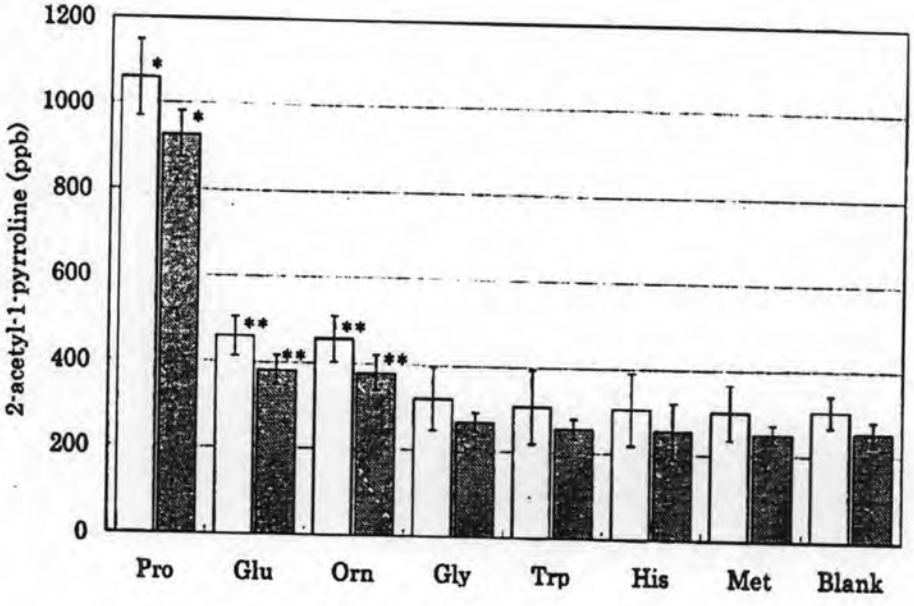


รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดสาร 2AP

ที่มา : Hofmann และ Schieberle (1998)

2.7.1.2 Gene **หรือพืชสร้างขึ้นเอง** โดย Lorieux และคณะ (1996) รายงานว่า ความหอมในข้าวเกิดจากยีนส์ที่ควบคุมความหอมในบริเวณ chromosome คู่ที่ 8

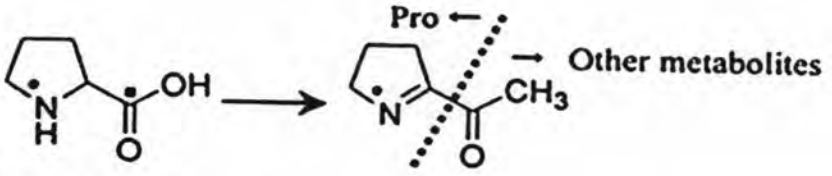
Yoshihashi และคณะ (2002) รายงานว่าสาร 2AP ไม่ได้เกิดขึ้นในระหว่างการหุงต้มหรือการแปรรูปข้าวหอมหลังการเก็บเกี่ยว แต่การสังเคราะห์สารหอม 2AP เกิดขึ้นภายในต้นข้าวระหว่างการปลูก โดยทดลองนำ amino acid เติมลงในอาหารสำหรับให้ต้นอ่อนจากเมล็ดและเนื้อเยื่อ บ่มที่ 27°C 8 ชั่วโมงพบว่า การเติม amino acid ชนิด proline ลงไปทั้งในต้นอ่อนจากเมล็ดและเนื้อเยื่อสามารถผลิตสาร 2AP ได้มากกว่าเดิมถึง 3 เท่า (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 ผลของการเติม amino acid ต่อปริมาณสาร 2AP (■ ปริมาณสาร 2AP ในต้นอ่อนจากเมล็ดหลังการเติม amino acid □ ปริมาณสาร 2APในเนื้อเยื่อหลังการเติม amino acid)

ที่มา : Yoshihashi และคณะ (2002)

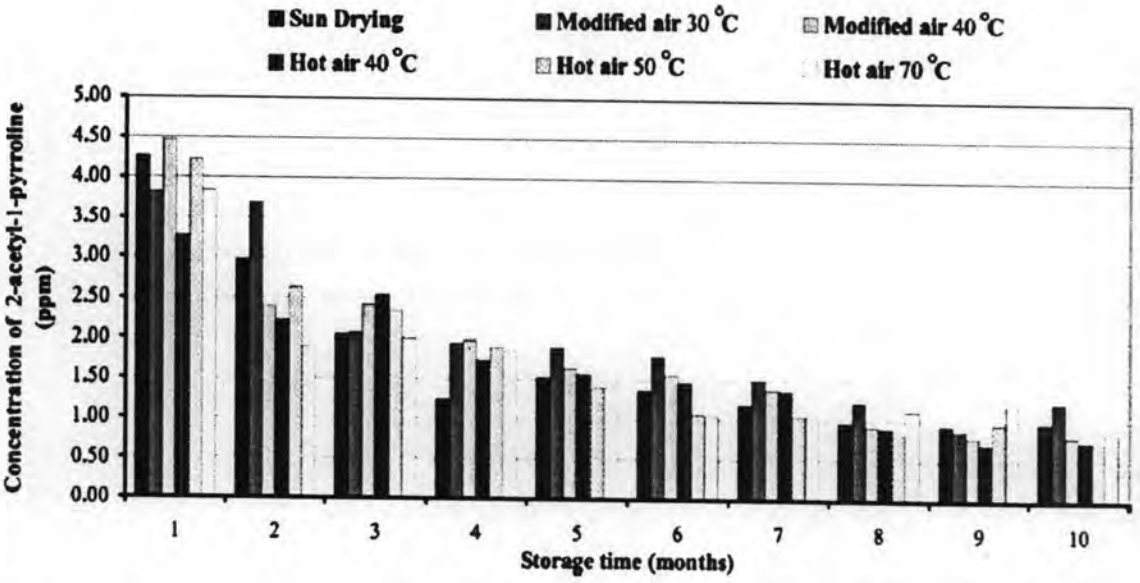
นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลึกลงไปถึงสารต้นตอและปฏิกิริยาการสังเคราะห์สาร 2AP ในต้นข้าว พบว่า N ในวง pyrroline ของ 2AP นั้นมาจาก N ของกรดอะมิโน proline (Pro) แต่ C ในส่วนของ acetyl group นั้นไม่ใช่ C ใน carbonyl group ของ proline (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 การเกิดสาร 2AP จาก proline

ที่มา : Yoshihashi และคณะ (2002)

Wongpornchai และคณะ (2004) ศึกษาถึงอิทธิพลของการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆและระยะเวลาในการเก็บที่มีผลต่อสารหอมตลอดจนคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่สีได้ โดยใช้วิธีการอบแห้งทั้งหมด 6 วิธี คือ ตากกลางแดด การใช้เครื่องลดความชื้นชนิดลมแห้งที่ 30 และ 40°C และเครื่องลดความชื้นชนิดลมร้อนที่ 40 50 และ 70°C อบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 28% wb ลดลงเป็น 13-15% wb เก็บเป็นเวลา 10 เดือน พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (30-40°C) ปริมาณสาร 2AP มีอยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่สูงเพิ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยเร่งการระเหยของสาร 2AP และในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเป็นเวลา 10 เดือนพบว่าปริมาณสาร 2AP จากเดิม (เดือนที่ 1) 4.02 $\pm$ 0.60 ppm ลดลงเป็น 0.89 $\pm$ 0.12 ppm (เดือนที่ 10) (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 ปริมาณสาร 2AP ของตัวอย่างข้าวที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ และเก็บรักษาเป็นเวลา 10 เดือน

ที่มา : Wongpornchai และคณะ (2004)

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.2 การพัฒนาวิธีการตรวจวัด 2AP

วิธีการตรวจสอบความหอมของเมล็ดข้าวได้มีการพัฒนาเรื่อยมา เริ่มตั้งแต่การประเมินกลิ่นหอมด้วยวิธีการดมโดยผู้เชี่ยวชาญ และให้ระดับความหอมของข้าวเป็นระดับตั้งแต่ "ไม่หอม" จนถึง "หอม" และ "หอมมาก" ต่อมาได้มีการนำเอาวิธีทางเคมีมาใช้ในการตรวจวัดปริมาณความหอมในเมล็ดข้าว ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณความหอมคือ Gas chromatograph (GC)

การพัฒนาวิธีการทางเคมีวิเคราะห์สำหรับหาปริมาณ 2AP ในเล็ดข้าวนั้น เริ่มจากรายงานการวิจัยของ Yajima และคณะ (1978) ได้รายงานถึงการศึกษาสารระเหยในข้าวพันธุ์โคชิฮิการิ ซึ่งสกัดด้วยไอน้ำโดยใช้ภาชนะขนาดใหญ่ โดยพบสารระเหยที่เป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยชนิด วิธีการวิเคราะห์แบบนี้ต้องใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์ครั้งละ 6 kg.ทำซ้ำ 8 ครั้ง ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวอย่างทั้งหมดประมาณ 48 kg. นำมาวิเคราะห์ด้วย Gas chromatograph-mass spectrometry (GC-MS) และพบว่าสารที่สกัดได้อยู่ในระดับ 0.076-0.156 mg/l

ต่อมาได้มีการพัฒนานำเอาเทคนิคการแยกสารแบบการสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่อง (Likens Nikerson simultaneous steam disstillations / solvent extraction apparatus (SDS)) มาใช้ Buttery และคณะ (1983b) ได้นำเอาเทคนิคนี้มาใช้ในการทดลอง พบว่าใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์แต่ละครั้งประมาณ 250 g.

วิธีการวิเคราะห์ 2AP ในเมล็ดข้าวที่ใช้เทคนิคการสกัดแบบไม่ใช้ความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Mahatheeranont และคณะ (2001) จากการทดลองพบว่าสาร 2AP ที่วิเคราะห์ได้นั้นสร้างมาจากส่วนของเมล็ดข้าว ไม่ได้เกิดขึ้นจากความร้อนในระหว่างกระบวนการหุงต้มอาหาร เทคนิคนี้เป็นการใช้หลักของการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการเนื่องจากทำการสกัดได้ที่อุณหภูมิห้อง

ทินกร สีเสียดค้า (2548) นำเอาจุดเด่นของเทคนิคเฮดสเปซเข้ามาทดแทนขั้นตอนการเตรียมและการสกัดเพื่อวิเคราะห์ 2AP ได้สะดวกละรวดเร็วมากขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่า ในภาชนะที่ปิดสนิทภายในมีตัวอย่างอยู่ สารระเหยที่อยู่ภายในตัวอย่างจะถูกทำให้ระเหยออกมาอยู่ในที่ว่างเหนือตัวอย่างหรือเฮดสเปซจนเกิดสมดุลกับตัวอย่าง จากนั้นไอของตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติด้วยเครื่อง GC ต่อไป โดยผลการศึกษาพบว่าสามารถวิเคราะห์ 2AP ได้โดยใช้ตัวอย่าง 0.1 กรัม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมด 45 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการนี้ในการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP ในตัวอย่างข้าว

2.8 การเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

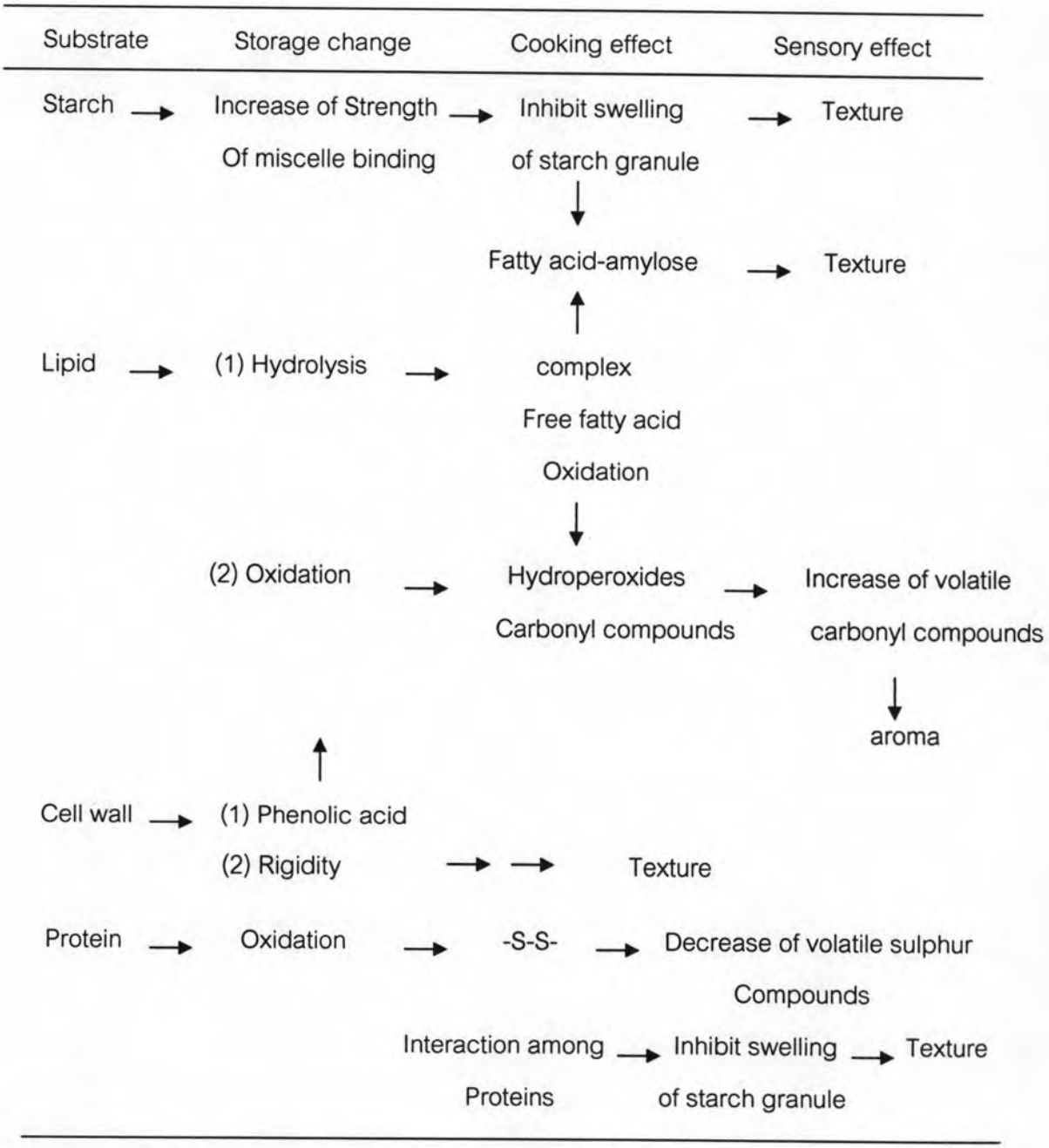
Widjaja และคณะ (1996) รายงานว่าการเก็บข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 84% ภายใต้ความดันปกติหรือเก็บภายใต้สุญญากาศที่ 0.150 kPa ไม่สามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของ 2AP ได้ 2AP ยังคงลดลงประมาณ 40-50% ภายใน 3 เดือน และพบว่าการมี (E)-2, (E)-4-decadienal ในปริมาณน้อยจะช่วยเสริมให้ข้าวมีกลิ่นหอม ในขณะเดียวกันถ้ามีสารนี้ในปริมาณมากจะทำให้เกิดกลิ่นหืนในข้าว นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเก็บข้าวไว้ในรูปข้าวเปลือกจะสามารถรักษาความหอมได้มากกว่าข้าวกล้องและข้าวสาร

เมธินี เหว่ซึ่งเจริญ และคณะ (2546) ศึกษาการเก็บรักษาข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้คงความหอมด้วยวิธี Grain Chilling โดยนำตัวอย่างข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 14% wb เก็บในถังสังกะสีที่มีการเป่าอากาศเย็นเข้าด้านล่าง แปรค่าอุณหภูมิการเก็บเป็น 10 และ 15°C และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C) เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บคือที่ 15°C และหากต้องการควบคุมคุณภาพข้าวให้คงที่อาจจะต้องเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 3 เดือนก่อนจะสีจำหน่ายทั้งนี้เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆไม่ว่าจะเป็นแป้ง ไขมัน และโปรตีนปรับตัวให้เข้ากัน (conditioning) รวมทั้งเป็นช่วงที่สารหอมค่อนข้างคงที่

พัสกร เจียตระกูล และคณะ (2546) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทดลองเก็บข้าวเปลือกที่ 10 และ 15°C และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28°C) เป็นเวลา 6 เดือนโดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า พบว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 15°C ปริมาณแอมิโลสคงที่ ส่วนข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิห้องจะมีแอมิโลสเพิ่มขึ้น ความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการหุงสุกนาน ในด้านกลิ่น 2AP ในข้าวกล้องจะพบมากกว่าข้าวสารเพราะข้าวสารเป็นข้าวเปลือกที่ถูกนำไปสีเอาเปลือกออกและขัดรำต่อซึ่งความร้อนดังกล่าวจะทำให้ 2AP ระเหยออกไปมากกว่า นอกจากนี้ปริมาณสาร 2AP ของตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิ 10 และ 15°C พบว่าไม่แตกต่างกัน

Zhou และคณะ (2002) รายงานว่าภายหลังการเก็บเกี่ยว เมล็ดข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นของ 3 องค์ประกอบ คือ แป้ง ไขมัน และโปรตีน โดยส่วนของแป้งจะเกิดการเพิ่มแรงเกาะกันระหว่าง miscelle ทำให้ไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง ส่วนของกรดไขมันอิสระที่ได้จากการย่อยของ enzyme เมื่อทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งจะมีผลไปยับยั้งการขยายตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม และส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสวยในขณะเดียวกันไขมันบางส่วนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ จะได้สารประกอบ Hydroperoxides carbonyl ทำให้ข้าวมีกลิ่นหืน ส่วนของโปรตีนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะได้สารที่มีส่วนประกอบของธาตุกำมะถันที่คงตัว (-S-S-) ที่คงตัวมากขึ้น ทำให้สารระเหยที่มีส่วนประกอบของซัลเฟอร์ลดลงและส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นในข้าวและสารนี้ยังมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม ข้าวสวยที่ได้มีความนุ่มลดลง ข้าวมีลักษณะของสีที่คล้ำขึ้น และสุดท้ายเป็นส่วนของเซลล์วอลล์จะปลดปล่อยกรดฟีนอลิก ทำให้ข้าวมีลักษณะที่แข็งขึ้น มีเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

ที่มา: Zhou และคณะ (2003)