

# บทที่ 1

## บทนำ

### บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลกประเทศหนึ่ง และคุณภาพของข้าวไทยก็ยังเป็นที่ยอมรับจากต่างประเทศ โดยเฉพาะข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะเมื่อนำมาหุงจะได้ข้าวที่มีกลิ่นรสหอมเฉพาะตัว นุ่ม และเหนียว เป็นที่รู้จักกันไปทั่วโลกในนาม “Jasmine rice” (กฤษณา ชูติมา, 2545)

สารสำคัญที่ให้กลิ่นในข้าว ได้แก่ 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) (Buttery *et al.*, 1982) สารนี้สามารถพบในน้ำมันหอมระเหยของใบเตย โดยความเข้มข้นของ 2AP ในใบเตยมีมากกว่าในข้าวหอมที่ผ่านการขัดสีแล้วถึง 10 เท่า (Buttery *et al.*, 1983) สารให้กลิ่นรสชนิดอื่นในข้าวนอกจากนี้ ได้แก่ 2,4-decadienal, nonanal, hexanal, 2-nonenal และ octanal แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณและศักยภาพในการให้กลิ่นพบว่า 2AP เป็นสารให้กลิ่นรสหลัก เมื่อมีความเข้มข้นของ 2AP เพียง 0.1 ppb ในน้ำ มนุษย์ก็สามารถระบุกลิ่นรสชนิดนี้ได้ (Buttery *et al.*, 1988) ในขณะที่เก็บรักษาข้าวดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในองค์ประกอบของเมล็ดข้าวทั้งทางเคมีและกายภาพ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส และกลิ่นรสในข้าวสุก (Zhout *et al.*, 2002) ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าการผลิตสารคาร์บอนิลโดยเฉพาะ hexanal ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นข้าวเก่า โดยมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัว (Endo *et al.*, 1977)

กรรมวิธีในการทำให้ข้าวสุกนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนจากตู้อบ การใช้ความร้อนจากไอน้ำ การใช้ความร้อนจากหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และการใช้ความดัน เป็นต้น (Juliano, 1985) ความร้อนนอกจากมีผลต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของข้าวแล้วยังมีผลต่อการเกิดและการสลายหรือความคงตัวของสารให้กลิ่นรส (Mahatheeranont *et al.*, 2001) ส่วนการใช้ความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง Katapo และคณะ (2002) ทดลองใช้ระดับความดัน 690 เมกกะปาสกาลที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 นาทีและ 1 ชั่วโมง พบว่าแป้งข้าวที่ละลายในน้ำ หลังจากให้ความร้อนแล้วมีลักษณะเป็นเจลและเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ แป้งจะเกิดการเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้น และแป้งที่เกิดเจลาติไนซ์โดยการใช้ความดันสูงยังคงสภาพเดิมของเม็ดสตาร์ชอยู่ได้ การใช้ความดันสูงในช่วง 100-1000 เมกกะปาสกาล จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจและเป็นอีกแนวทางในการรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางอาหารไว้ได้ดีกว่าการใช้ความร้อน (Cheftel and Calioli, 1997)

โครงการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาผลการใช้ความร้อนเปรียบเทียบกับผลของการใช้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมีกายภาพและกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตลอดจนผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสารดิบนาน 1 ปี ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าว

## การตรวจเอกสาร

พันธุ์ข้าวที่มนุษย์เพาะปลูกในปัจจุบันพัฒนามาจากข้าวป่าในตระกูล Gramineae ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันแบ่งออกเป็นข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) และข้าวเอเชีย (*Oryza sativa*) โดยข้าวเอเชียนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 สายพันธุ์ย่อย ได้แก่ japonica เป็นข้าวเมล็ดป้อม ปลูกมากบริเวณแม่น้ำเหลืองของจีน เกาหลี และญี่ปุ่น indica เป็นข้าวเมล็ดยาว ปลูกในเขตร้อน เช่น ตอนใต้ของอินเดีย ศรีลังกา แหลมมาลายู หมู่เกาะต่าง ๆ และลุ่มแม่น้ำแยงซีของจีน ส่วน javanica หรือข้าวชวา ปลูกในอินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และญี่ปุ่น (มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2547) และข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่สุดของประเทศไทย มีการเพาะปลูกทั่วไปในทุกภูมิภาคเนื่องจากเป็นอาหารหลักของคนไทยและยังส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก ปริมาณการส่งออกข้าวในปี พ.ศ. 2546 มีปริมาณ 7.58 ล้านตัน (ข้าวสาร) คิดเป็นมูลค่าถึง 77,105 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2547) โดยข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จะมีปริมาณการส่งออกมากที่สุด

### 1. ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105, KDML105) อยู่ในสายพันธุ์ indica ปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย แต่แหล่งผลิตที่สำคัญและมีคุณภาพเมล็ดข้าวดีที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ความสูงลำต้นประมาณ 104 เซนติเมตร ข้าวเปลือกสีฟาง ข้าวกล้องเมล็ดเรียวยาว ปลายเมล็ดโค้งเล็กน้อย เมล็ดใส มีความเลื่อมมัน มีลักษณะจมูกข้าวเล็ก ซึ่งถือเป็นลักษณะที่ดีของข้าวสาร ความชื้นข้าวกล้องและข้าวสารไม่เกินร้อยละ 14 ปริมาณอะมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 13-18 (ถัดดาวัลย์ วรรณนุช, 2544) ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวหอมไทยที่มีความหอมเป็นเอกลักษณ์ และมีความนุ่มเหนียวที่โดดเด่นเมื่อหุงสุก สารสำคัญที่ให้กลิ่นในข้าวหอมสุกถูกระบุว่าเป็น 2AP (Buttery *et al.*, 1982; Petrov *et al.*, 1996; Widjaja *et al.*, 1996a) โดยพบในปริมาณที่แตกต่างกันไปในข้าวหอมแต่ละพันธุ์ และปริมาณของ 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ใหม่มีปริมาณ

มากกว่าข้าวเก่าเกือบประมาณเท่าตัว นอกจากนี้ปริมาณ 2AP ในข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขัดสี (Buttery *et al.*, 1983)

## 2. โครงสร้างและองค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบด้วยเปลือกแข็งหุ้ม เรียกว่ากลีบ ส่วนในที่มีเปลือกหุ้มคือส่วนของเมล็ด และเมล็ดข้าวที่ถูกเอาเปลือกออกแต่ยังไม่ขัดสีจะประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (testa) และเยื่อโปร่งใส (hyaline layer) เยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone) เนื้อเมล็ด (endosperm) เป็นเซลล์ที่มีผนังบางหุ้มเมล็ดสตา์ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหลัก มีประมาณร้อยละ 90 และสารอาหารอื่น ได้แก่ โปรตีนและไขมันอยู่ภายใน มีรูปร่างต่างๆ กันขึ้นอยู่กับบริเวณของเมล็ด ถ้าอยู่ใกล้ชั้นเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดจะมีรูปร่างยาวรี ถัดเข้ามายังเข้าใกล้ใจกลางเมล็ดจะยิ่งกลมมนขึ้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538; Juliano, 1985) ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าว ดังแสดงในภาพที่ 1

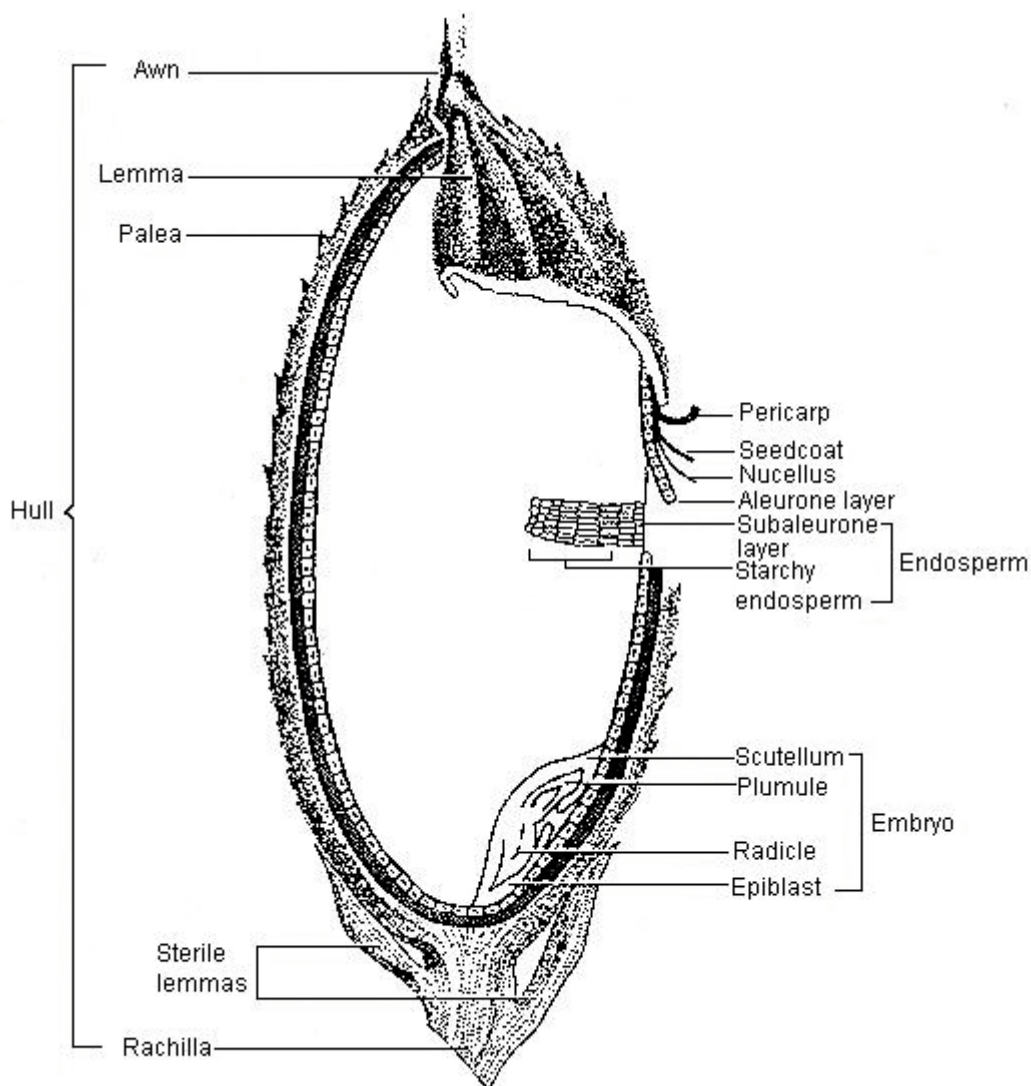
## 3. การเจริญเติบโตและสร้างเนื้อเมล็ดของข้าว

การปลูกและการเจริญเติบโตมาเป็นเมล็ดข้าว นับตั้งแต่เริ่มหว่านเมล็ดจนเก็บเกี่ยวได้นั้นใช้เวลาประมาณ 100-120 วันขึ้นกับชนิดข้าว โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ (Lu and Luh, 1991)

**3.1 ช่วงการเติบโตทางลำต้น (vegetative phase)** เป็นระยะที่นับตั้งแต่เมล็ดข้าวงอกจนถึงข้าวเริ่มสร้างช่อดอก แบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะกล้า (seeding stage) ใช้เวลาประมาณ 20-30 วัน และระยะแตกกอ (tillering stage) อีกประมาณ 45-60 วัน

**3.2 การเติบโตช่วงสืบพันธุ์ (reproductive phase)** เป็นระยะที่นับตั้งแต่ข้าวเริ่มสร้างช่อดอกจนถึงระยะดอกบาน แบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะเกิดช่อดอก (panicle stage) และระยะการออกรวง (heading stage) ใช้เวลาประมาณ 30 วัน

**3.3 การเติบโตช่วงเมล็ดแก่ (ripening phase)** เป็นระยะที่นับตั้งแต่ดอกข้าวบานจนถึงเมล็ดข้าวแก่จัด แบ่งออกได้ 3 ระยะ คือ ระยะเป็นน้ำนม (milk stage) เป็นระยะหลังการผสมพันธุ์ระยะแรกๆ ส่วนที่เป็นข้าวกล้องมีลักษณะเป็นน้ำเหนียวๆ ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นเป็นน้ำนม ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 8-13 วัน ระยะเมล็ดข้าวเริ่มแข็ง (dough stage) เป็นระยะที่น้ำนมค่อยๆเปลี่ยนเป็นแป้งอ่อน (soft dough) และกลายเป็นแป้งแข็ง (hard dough) ตามลำดับ ระยะนี้ใช้เวลาอยู่ระหว่าง 14-21 วัน ระยะเมล็ดแก่ (maturation stage) ใช้เวลาประมาณ 10-15 วัน เมล็ดจะแก่เต็มที่เมื่อมีการ



ภาพที่ 1 โครงสร้างเมล็ดข้าว

Rice grain structure

ที่มา: Juliano (1985)

วิวัฒนาการในด้านขนาด ความแข็ง ความใส และปราศจากสีเขียวแล้วมากกว่าร้อยละ 90 (เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข, 2534)

สำหรับข้าวที่มีการเติบโตช่วงเมล็ดแก่สมบูรณ์ใน 30 วัน ภายหลังจากดอกข้าวบานแล้ว จะพบเมล็ดตารซ์ในเมล็ดข้าวภายใน 4 วัน โปรตีนพบใน 7-8 วัน (Lu and Luh, 1991) การสังเคราะห์สตาร์ช โปรตีน และไขมัน ในเมล็ดข้าวเป็นไปด้วยอัตราเร็วมาก โดยจะมีเนื้อเมล็ดแก่สมบูรณ์ภายใน 14 วันหลังดอกบาน อัตราการสังเคราะห์โปรตีนจะสูงสุดในวันที่ 8-10 หลังดอก

บาน กรดอะมิโนที่มีอยู่มากในระยะน้ำนม (10 วันหลังดอกบาน) ได้แก่ กรดแอสพาร์ติก แอสพาราจีน กรดกลูตามิก อะลานีน ฮีสทีดีน เซอรีน ออร์นิติน โฮโมเซอรีน อาร์จีนิน โพรลีน ทรีโอนีน และลิวซีน และโปรตีนที่ข้าวสังเคราะห์ขึ้นจำพวกหนึ่ง คือ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวเคมีในเมล็ดข้าว ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์แป้ง น้ำตาล ไฟติน โปรตีน และเมตาบอลิซึมของกรดนิวคลีอิก เมตาบอลิซึมของไขมัน การสังเคราะห์เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจและการเจริญเติบโตของเมล็ดข้าว (Juliano, 1985)

เวลาที่ใช้ในแต่ละระยะนั้นจะปรับเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม ได้แก่ ภูมิอากาศ ช่วงของแสง น้ำ พันธุ์ข้าว เป็นต้น ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวประเภทไวต่อแสง ปลูกได้เฉพาะนาปี คือ ช่วงเดือนพฤษภาคม-กันยายน และเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม (อานันต์ ผลวัฒน์ และคณะ, 2535)

## 4. คุณภาพของเมล็ดข้าว

### 4.1 น้ำหนักเมล็ด

น้ำหนักเมล็ดเป็นคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอมากที่สุด และควบคุมโดยพันธุกรรมเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำหนักเมล็ดจะแปรไปตามขนาดและรูปร่างของเมล็ด ความชื้นชนิดดิน การใส่ปุ๋ย และสภาพภูมิอากาศก็มีผลกระทบต่อน้ำหนักเมล็ดด้วย จากการตรวจสอบน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด ของพันธุ์ข้าวไทยจำนวน 344 พันธุ์ พบว่ามีน้ำหนักแปรปรวนระหว่าง 1.16-4.17 กรัม ข้าวพันธุ์ดีของไทยที่รัฐบาลส่งเสริมให้ปลูกจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิไทย ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 ข้าวเจ้าหอมพิชญ์โลก 1 ข้าวเจ้าหอมคลองหลวง 1 ข้าวหอมสุพรรณบุรี และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (ลัดดาวัลย์ กรรณนุช, 2544) จะมีน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ดระหว่าง 2.25-3.67 กรัม (เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข, 2534)

### 4.2 สีข้าวกล้อง

สีข้าวกล้องเกิดจากสารสีที่ส่วนเยื่อหุ้มผล ส่วนเนื้อในเมล็ดของข้าวทุกชนิดจะมีสีขาว จากการสำรวจพันธุ์ข้าวของศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี พบว่าข้าวกล้องมี 4 สี คือ ขาว น้ำตาล แดง และม่วง ส่วนใหญ่มีสีขาว ข้าวกล้องที่มีสีแดงและม่วง เนื่องจากมีสารสีพวกแอนโทไซยานิน (anthocyanin pigment) ข้าวกล้องที่มีสีน้ำตาลต้องใช้เวลาในการขัดรำนานหรือใช้แรงกดมาก เพื่อให้ส่วนของรำที่เป็นสีเข้มหลุดออก เป็นผลให้ข้าวหักมาก มีปริมาณข้าวสารน้อย ดังนั้นข้าวกล้องที่มีสีอ่อนจึงเป็นที่นิยม (เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข, 2534)

### 4.3 ขนาดและรูปร่างเมล็ด

ขนาดและรูปร่างเมล็ด หมายถึง ความยาว ความกว้าง ความหนาและความป้อมหรือเรียวยาวของเมล็ด (ตารางที่ 1 และ 2) ข้าวสายพันธุ์ *indica* จะมีรูปร่างเมล็ดเรียวยาว ค่อนข้างป้อม ข้าวสายพันธุ์ *javanica* มีเมล็ดกว้างและหนา ส่วนข้าวสายพันธุ์ *japonica* มีเมล็ดสั้นและกลม (เครือวัลย์ อุตตะวิริยะสุข, 2534)

#### ตารางที่ 1 การแบ่งลักษณะเมล็ดตามความยาวของเมล็ด

Classification of grain type by grain length

| Grain type | Length (mm) |
|------------|-------------|
| extra long | > 7.50      |
| long       | 6.61-7.50   |
| medium     | 5.51-6.60   |
| short      | < 5.50      |

ที่มา: ดัดแปลงจาก Jennings และคณะ (1979 อ้าง โดย Juliano, 1985)

#### ตารางที่ 2 การแบ่งรูปร่างเมล็ดตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง

Classification of grain shape by length-width ratio

| Grain shape | Length-width ratio |
|-------------|--------------------|
| slender     | > 3.0              |
| medium      | 2.1 - 3.0          |
| bold        | 1.1 - 2.0          |
| round       | < 1.1              |

ที่มา: ดัดแปลงจาก Jennings และคณะ (1979 อ้าง โดย Juliano, 1985)

### 4.4 ลักษณะท้องไข่

ลักษณะท้องไข่ หมายถึง จุดขาวขุ่นคล้ายชอล์กที่เกิดขึ้นในเนื้อของเมล็ดเป็นลักษณะที่เกิดจากการจับตัวอย่างหลวมๆ ของสตาร์ชกับโปรตีนในเนื้อเมล็ด ลักษณะนี้ควบคุมโดย

พันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม ลักษณะท้องไขเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพและราคาของข้าว ข้าวที่เป็นท้องไขมาก เมื่อนำไปสีจะมีข้าวหักมากและมีเกรดต่ำ ข้าวเกรดสูงจะมีท้องไขได้ไม่เกินร้อยละ 0.5 (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข, 2534)

#### 4.5 ความใสของเมล็ด

ความใสหรือความขุ่นของเมล็ด หมายถึง ความทึบแสง (opaque) หรือความโปร่งแสง (translucent) ของเนื้อเมล็ด ซึ่งจะสังเกตความแตกต่างได้ในข้าวเจ้า ส่วนในเมล็ดข้าวเหนียวจะมีลักษณะขุ่นอย่างเดียว ปัจจุบันยังไม่พบสาเหตุของความใสหรือขุ่นในเนื้อเมล็ดข้าวเจ้า แต่คาดว่าอาจจะเนื่องมาจากทั้งพันธุ์ข้าวและพื้นที่เพาะปลูก เพราะพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีเมล็ดใส แต่ที่ปลูกในแถบภาคกลางบางแห่งข้าวสารจะค่อนข้างขุ่นเป็นต้น (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข, 2534)

#### 4.6 ความขาวของข้าวสาร

ความขาวของข้าวสาร ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี (degree of milling) ซึ่งเป็นตัวกำหนดเกรดของข้าว อายุการเก็บข้าว โดยข้าวที่เก็บไว้นานจะมีสีคล้ำกว่าข้าวใหม่ แต่จากการศึกษาของ Wongpornchai และคณะ (2004) ซึ่งศึกษาผลการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือกก่อนสีต่อความขาวของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้วิธีการทำแห้งทั้งหมด 6 แบบได้แก่ การใช้ตู้อบตัดแปลงบรรยากาศที่อุณหภูมิ 30 และ 40 °ซ การใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 70 °ซ และการผึ่งแดด ในการทำแห้งข้าวเปลือกให้มีความชื้นเหลือร้อยละ 13-15 บรรจุใส่กระสอบและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องนาน 10 เดือน พบว่าการทำแห้งโดยวิธีการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °ซ และการใช้ตู้อบตัดแปลงบรรยากาศที่อุณหภูมิ 40 °ซ ให้ข้าวสารหลังการสีที่มีค่าความขาวมากกว่าการทำแห้งด้วยวิธีอื่น นอกจากนี้เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข (2534) รายงานว่าข้าวสารที่มีโปรตีนสูงจะมีสีคล้ำกว่าข้าวที่มีโปรตีนต่ำ

#### 4.7 คุณภาพการสี

ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าวได้แก่ แกลบประมาณร้อยละ 20-24 รำร้อยละ 8-10 และข้าวสารร้อยละ 68-70 ของข้าวเปลือก ข้าวสารที่ได้ทั้งหมดจากการขัดขาวจะนำไปคัดแยกเป็นข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหัก ซึ่งจะได้แต่ละส่วนมากน้อยเพียงใดขึ้นกับคุณภาพข้าวเปลือกก่อนสี ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพการสี ได้แก่ พันธุ์ข้าว การปฏิบัติรักษาก่อนการเก็บเกี่ยว ระยะเวลาและวิธีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม การตากข้าวก่อนนวดและหลังนวด การนวดข้าว การเก็บรักษา และกระบวนการสี (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข, 2534) Wongpornchai และคณะ (2004) ศึกษาผลการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือกก่อนสีต่อคุณภาพการสีของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่าการทำแห้งโดยวิธีการใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °ซ ให้คุณภาพการสีที่ดีที่สุด โดยไม่ขึ้นกับ

ระยะเวลาการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละข้าวหักซึ่งมีค่าน้อยกว่าครึ่งของค่าร้อยละข้าวหักจากข้าวเปลือกที่ทำแห้งโดยวิธีอื่นๆ

#### 4.8 การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก

ในระหว่างการหุงต้ม เมล็ดข้าวจะดูดซับน้ำและขยายตัวออกรอบด้านโดยเฉพาะด้านยาว โดยทั่วไปผู้บริโภคนิยมข้าวพันธุ์ที่ยืดตัวได้มากกว่าพันธุ์ข้าวที่ยืดตัวได้น้อย ข้าวสุกที่ยืดตัวได้มากและไม่เหนียวติดกัน จัดเป็นข้าวที่หุงขึ้นหม้อ นอกจากนี้การที่เมล็ดขยายตัวได้มาก ทำให้เนื้อภายในโปร่งไม่อัดแน่นและช่วยให้ข้าวนุ่มมากขึ้น พันธุ์ข้าวที่มีการยืดตัวดี ได้แก่ พันธุ์ข้าวบาสมาคี 370 ซึ่งสามารถยืดตัวได้มากกว่า 2 เท่าของความยาวของเมล็ดข้าวสาร และข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ก็มีการยืดตัวดี ทำให้ข้าวสุก นารับประทานและนุ่ม แต่เนื่องจากข้าวมีอะมิโลสต่ำ ข้าวสุกจึงเหนียวและหุงไม่ขึ้นหม้อ (งามชื่น คงเสรี, 2531) อัตราการยืดตัวของเมล็ด (elongation ratio) หาได้จากสัดส่วนของความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก 10 เมล็ดต่อความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร 10 เมล็ด (Juliano and Perez, 1984)

#### 4.9 เนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวสุกมีใช้หลายวิธี โดยอาจรายงานในรูปของค่าความแข็ง (hardness) ค่าความเหนียว (stickiness) หรือค่าความคงตัว (consistency) วัดค่าโดยใช้เครื่องมือหรือการใช้ผู้ทดสอบ และวิธีในการเก็บรักษาข้าวสุกภายหลังจากการทำให้สุกด้วยความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสข้าวสุก โดยทั่วไปจึงเก็บรักษาข้าวสุกในภาชนะปิดในระหว่างรอให้อุณหภูมิลดลงเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียน้ำให้น้อยที่สุดซึ่งใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง (Juliano, 1982 อ้างโดย Juliano, 1985) Okabe (1979) รายงานว่าการเตรียมตัวอย่างข้าวสุกเพื่อหาค่าเนื้อสัมผัส ใช้เวลารอให้อุณหภูมิลดลงถึงระดับอุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมงจากการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 18-24 °C หรือประมาณ 1.5 ชั่วโมงจากการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากการแปรผันของอุณหภูมิมีผลให้คุณภาพในการทดสอบเนื้อสัมผัสต่ำ โดยเฉพาะการวัดค่าความเหนียวของข้าวสุก

#### 4.10 ปริมาณอะมิโลส

ในสตาร์ชข้าวจะมีอะมิโลเพกตินและอะมิโลสเป็นองค์ประกอบ อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ข้าวที่มีอะมิโลส สูงจะดูดน้ำและขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวอะมิโลสต่ำ ทำให้ข้าวสุกมีลักษณะทึบแสงไม่เลื่อมมัน ส่วนความนุ่มและความเหนียวของข้าวสุกขึ้นกับสัดส่วนอะมิโลเพกตินในสตาร์ช ข้าวเหนียวมักมีอะมิโลเพกตินเกือบทั้งหมด ทำให้ดูดน้ำและขยายตัวน้อยกว่าข้าวเจ้า สำหรับ



ข้าวเจ้าในประเทศไทย มีส่วนประกอบของสตาร์ชที่มีอะมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 12-31 โดยข้าวสุกที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 13-18 ซึ่งจัดเป็นข้าวอะมิโลสต่ำ (งามชื่น คงเสรี, 2531) (ตารางที่ 3)

### ตารางที่ 3 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะมิโลสและชนิดของเจลแป้ง

Classification of rices by amylose content and gel type

| Class                              | Amylose<br>(% of starch) | Gel type            |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| waxy rices                         | <2                       | soft                |
| very low-amylose nonwaxy rices     | 2-9                      | soft > medium       |
| low-amylose nonwaxy rices          | 9-20                     | soft > medium       |
| intermediate-amylose nonwaxy rices | 20-25                    | hard > medium, soft |
| high-amylose nonwaxy rices         | 25-33                    | hard                |

ที่มา: คัดแปลงจาก Juliano (1979 อ้าง โดย Juliano, 1985)

#### 4.11 ความชื้น

ความชื้น หมายถึง ความชื้นของข้าวที่วัดได้ หรือส่วนที่เป็นน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดข้าว (เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข, 2534) และปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการที่เมล็ดข้าวดูดซับน้ำและขยายตัวออกรอบด้าน การดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวสุกที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ การหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของข้าวสุก หรือการหาปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการหุงต้มโดยการหาปริมาณความชื้น (Juliano, 1982) ข้าวหอมมะลิไทยทุกประเภทและทุกชนิดต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 (กระทรวงพาณิชย์, 2541) ความชื้นในเมล็ดข้าวมีผลต่อการที่ข้าวหุงขึ้นหม้อและความร่วนของข้าว ข้าวที่มีความชื้นต่ำส่วนใหญ่มักเป็นข้าวเก่าซึ่งจะหุงขึ้นหม้อและมีความร่วนมากกว่าข้าวที่มีความชื้นสูงหรือข้าวใหม่

#### 4.12 อุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง

การเจลาติไนซ์ของแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด เม็ดสตาร์ชยังคงรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อมีการเติมสารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนซ์จะเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 โดยเม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลง เนื่อง

จากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เมื่อดาวจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อดาวจะมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ แปรที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะเข้าสู่ระยะที่ 3 โดยเมื่อดาวจะมีรูปร่างไม่แน่นอนและการละลายของแปรจะเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ช่วงอุณหภูมิเจลาติน (T<sub>g</sub>-T<sub>c</sub>) มีผลต่อระยะเวลาในการหุงสุกของข้าว โดยแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิเจลาตินเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (55-69.5 °ซ) ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (70-74 °ซ) และช่วงอุณหภูมิสูง (74.5-79 °ซ) ข้าวที่มีช่วงอุณหภูมิเจลาตินปานกลางหรือสูงจะใช้เวลาในการหุงสุกนานกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาตินต่ำ (Juliano, 1979 อ้างโดย Juliano, 1985)

#### 4.13 กลิ่น

ข้าวบางพันธุ์มีลักษณะที่ทำให้เป็นที่นิยมเป็นพิเศษคือ มีกลิ่นหอม เช่น ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 หรือข้าวหอมมะลิ กลิ่นหอมนี้ประกอบด้วยสารที่ระเหยได้กว่า 100 ชนิด Buttery และคณะ (1983) ระบุว่า 2AP เป็นสารให้กลิ่นหลักในข้าวหอม สารตัวนี้ไวต่อแสงและอุณหภูมิ เป็นเหตุให้ข้าวสารที่เก็บเป็นเวลานานมีความหอมลดลงจนใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ไม่หอม มีรายงานว่ากลิ่นจะลดลงร้อยละ 50 เมื่อเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิห้องปกติ (Laksanalamai and Ilanganlilike, 1993) แต่การเก็บรักษาข้าวกล้องที่อุณหภูมิประมาณ 4 °ซ นาน 12 เดือน กลิ่นจะลดลงเพียงร้อยละ 35 (Mahatheeranont *et al.*, 2001) ระหว่างการเก็บรักษาข้าวสารพบว่าการผลิตสารคาร์บอนิลโดยเฉพาะ hexanal เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นข้าวเก่าโดยมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัว (Endo *et al.*, 1977) นอกจาก hexanal ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างเก็บรักษาแล้ว ยังพบ (E,E)-2,4-decadienal, nonanal, (E)-2-nonenal, octanal, decanal, 4-vinyl-guaiacol และ 4-vinylphenol ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นข้าวเก่าในข้าวหอมหุงสุก (Buttery *et al.*, 1988) Wongpornchai และคณะ (2004) ศึกษาวิธีการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 40 °ซ มีความเข้มข้นของ 2AP มากกว่า และมีปริมาณของ n-hexanal และ 2-pentylfuran ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นข้าวเก่าน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง Widjaja และคณะ (1996a) รายงานว่าสารให้กลิ่นที่สำคัญทั้งพันธุ์ข้าวหอมและไม่หอมประกอบด้วย alkanals, alk-2-enals, alka-2,4-dienals, 2-pentylfuran, 2AP และ 2-phenylethanol แต่ในข้าวหอมมะลิจะมีสารประกอบอินโดลมากกว่าข้าวหอมพันธุ์อื่น

#### 4.14 โพรตีน

โพรตีนในเมล็ดข้าวอยู่กันหนาแน่นบริเวณผิวรอบนอกของเมล็ด พบในรูปโพรตีนบอดี ซึ่งประกอบด้วยโพรตีนและสตาร์ช นอกจากจะอยู่ในรูปของโพรตีนบอดีแล้วในข้าวยังมีกรด

อะมิโนอิสระและกรดนิวคลีอิกอยู่ด้วย กรดอะมิโนหลักที่พบในเมล็ดข้าว ได้แก่ อะลานีน แอสพาร์ติก แอสพาราจีน วาลีน กลูตามิก ฮีสติดีน และออร์นิติน (Lu and Luh, 1991) โดยทั่วไปมีปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวสารร้อยละ 6.2-6.9 (Singh *et al.*, 1998) ซึ่งถือว่าน้อย แต่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวสุก โดยปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงสุก คือ เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น มีผลให้ระยะเวลาในการหุงสุกนานขึ้น เนื่องจากโปรตีนเป็นตัวขัดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมล็ดข้าว และโปรตีนยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำของเมล็ด ทำให้เมล็ดดูดซึมน้ำได้น้อยลง ข้าวสุกมีความนุ่มและเหนียวลดลง (Juliano *et al.*, 1965) Onate และคณะ (1964) อ้างโดย Juliano, 1985) รายงานว่าข้าวสุกไม่ว่าจะเป็นสายพันธุ์ใดก็ตามที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ จะมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม มีความเหนียวและกลิ่นรสมากกว่าข้าวที่มีโปรตีนสูงกว่า

#### 4.15 ไขมัน

ไขมันที่มีอยู่ในองค์ประกอบตามธรรมชาติของธัญพืช คือ ไกลโคลิพิด ฟอสโฟลิพิด และนิวทรัลลิพิด โดยสัดส่วนของไขมันทั้ง 3 กลุ่มนี้ไม่แตกต่างกันระหว่างข้าว japonica และ indica แต่จะกระจายตัวต่างกันเมล็ด โดยส่วนเนื้อเมล็ดจะมีไขมันประเภทมีขี้วอยู่มาก (Mano *et al.*, 1999) โดยทั่วไปไขมันที่พบในเยื่อหุ้มเมล็ด และคัพพะ (embryo) จะอยู่ในรูปหยดไขมันเล็กๆ (spherosome) กระจายตัวอยู่มาก ส่วนในเนื้อเมล็ดนั้นไขมันจะอยู่ร่วมกับโปรตีนหรือสตาร์ช (starch lipids) ไขมันมีปริมาณมากที่สุดในส่วนคัพพะ รองลงมาคือส่วนของรำ (Lu and Luh, 1991) โดยทั่วไปมีปริมาณไขมันในข้าวกล้อง และข้าวสารอยู่ในช่วงร้อยละ 1-4 และ 0.2-2 ตามลำดับ (Juliano, 1985) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก Lugay และ Juliano (1964) ศึกษาสัดส่วนโดยเฉลี่ยของกรดไขมันแต่ละชนิดในรำข้าว ข้าวกล้อง และข้าวสาร 4 พันธุ์ คือ Malakit Sungsong, Puti Peta, Taichung 65 และ Taichung Glutinous 46 โดยใช้ Gas chromatography (GC) พบว่ามีกรดไขมัน 9 ชนิด คือ ลอริก ไมริสติก ปาล์มมิติก ปาล์มมิโตเลอิก สเตียริก โอเลอิก ลิโนเลอิก ลิโนเลนิก และอะราชิโคนิก โดยกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ โอเลอิก ลิโนเลอิก และปาล์มมิติกที่เหลือเป็นองค์ประกอบรอง ซึ่งร้อยละของกรดไขมันชนิดดังกล่าวในรำข้าว ข้าวกล้อง และข้าวสาร แสดงดังตารางที่ 4 Shin และคณะ (1986) พบว่าการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในข้าวกล้อง โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 35 °ซ) มีผลให้กรดลิโนเลอิกเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 5 °ซ ซึ่งปริมาณกรดลิโนเลอิกที่ลดลงจะแปรผันตรงกับปริมาณ hexanal ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ร้อยละขององค์ประกอบกรดไขมันในรำข้าว ข้าวกล้อง และข้าวสาร

Fatty acid composition (% of total) of bran, brown and milled rices

| Fatty acid  | Bran | Brown | Milled |
|-------------|------|-------|--------|
| lauric      | >0.1 | >0.1  | >0.1   |
| myristic    | 0.3  | 0.4   | 0.6    |
| palmitic    | 18.3 | 20.4  | 33.8   |
| palmitoleic | 0.2  | 0.2   | 0.4    |
| stearic     | 1.4  | 1.6   | 2.7    |
| oleic       | 41.1 | 41.3  | 43.3   |
| linoleic    | 37.3 | 34.5  | 18.0   |
| linolenic   | 1.1  | 1.0   | 0.6    |
| arachidonic | 0.6  | 0.6   | 0.4    |

ที่มา: Luguay และ Juliano (1964)

## 5. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในข้าวดิบระหว่างการเก็บรักษา

ในขณะที่เก็บรักษาจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในองค์ประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งมีผลสำคัญต่อคุณภาพข้าวกล้องและข้าวสารในการหุงต้มและการบริโภค โดยมีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวสารขณะเก็บรักษา อาจมีผลมาจากการปรับสภาพการละลายและการเกิดเจลของแป้งและโปรตีนในเมล็ดที่เติบโตเต็มที่ให้กลายเป็นสารที่คงตัวขึ้น และไม่ละลายในน้ำมากขึ้น มีผลให้เมล็ดข้าวแข็งขึ้นเมื่อนำข้าวสารที่เก็บรักษาไว้ระยะหนึ่งมาหุงต้ม จะพบว่าเมล็ดข้าวจะดูดซึมน้ำที่ใช้หุงต้มมากทำให้ปริมาตรของข้าวเก่าหุงสุกสูงกว่าข้าวใหม่ ลักษณะข้าวสุกจะแข็งและร่วนมากกว่าข้าวใหม่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

Moritaka และ Yasumatsu (1972) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันและโปรตีนที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาข้าวดิบ (ภาพที่ 2) โดยกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโนส และสารไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันแล้วสลายตัวต่อไปได้เป็นสารคาร์บอนิลที่สามารถเร่งการเกิดออกซิเดชันของโปรตีน (เกิดพันธะไดซัลไฟด์จากหมู่ซัลไฮดริล) ซึ่งส่งผลเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเมล็ดและยับยั้งการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แข็งขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ Hamaker

และ Griffin (1990) รายงานว่าความนุ่มเหนียวของเนื้อสัมผัสข้าวสุกเกี่ยวข้องกับการสูญเสียสภาพของ

| <u>Substrate</u> | <u>Storage change</u>                       | <u>Cooking effect</u>                    | <u>Sensory effect</u>                               |
|------------------|---|--|---|
| starch           | increase of strength<br>of miscelle binding | inhibit swelling<br>of starch granule    | texture   |
|                  |   | fatty acid-amylose<br>complex            | texture   |
|                  | hydrolysis                                  | free fatty acids<br>oxidation            |   |
| lipid            | oxidation                                   | hydroperoxides<br>carbonyl compounds     | increase of volatile<br>carbonyl compounds<br>aroma |
|                  | phenolic acid                               |  |   |
| cell wall        | rigidity                                    |  | texture   |
| protein          | oxidation                                   | -SH S-S<br>interaction among<br>proteins | decrease of volatile<br>sulfur compounds<br>aroma   |
|                  |   |  | inhibit swelling of<br>starch granule<br>texture    |

ภาพที่ 2 กลไกการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในเมล็ดข้าวสารระหว่างการเก็บรักษา

Mechanisms of the aging process in rice grain

ที่มา: Pomeranz (1992)

โปรตีนในเมล็ดข้าว โดยทดลองเติมสารละลาย dithiothreitol (DTT) ในน้ำที่ใช้หุงสุก พบว่าข้าวสุก

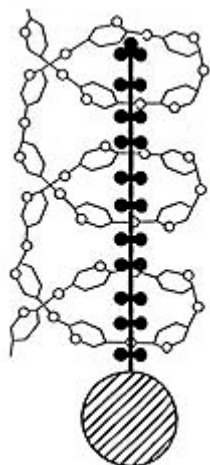
ที่ได้มีค่าความเหนียวของเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารรีดิวซ์ช่วยลดการสร้างพันธะไคซัลไฟด์จากหมู่ซัลไฟด์ที่มีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและมีผลต่อเนื้อสัมผัสข้าวสุก

Mod และคณะ (1983) รายงานว่าการเกิดออกซิเดชันของ ferulate esters ในส่วนของเฮมิเซลลูโลสก่อให้เกิด cross-linking แก่ผนังเซลล์ของเมล็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้พบว่า การเกิดปฏิกิริยาทั้งที่มีและไม่มีเอนไซม์ที่เกิดขึ้นในส่วนของผนังเซลล์สามารถปลดปล่อยกรดฟีนอลิกอิสระซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของผนังเซลล์ ในขณะที่เดียวกันกรดฟีนอลิกยังสามารถต้านการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระ มีผลให้กรดไขมันอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโนสได้มากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา

## 6. สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนสและไขมัน

อะมิโนสสามารถรวมตัวกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำภายในโครงสร้างแบบเกลียวของอะมิโนส (ภาพที่ 3) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนสและไขมันเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทางชีวเคมีภายในเมล็ดข้าว (Morrison, 1993; Morrison *et al.*, 1993) และสามารถเกิดขึ้นในระหว่างการเจลาติไนซ์ของแป้ง เนื่องจากไขมันที่อยู่ในองค์ประกอบตามธรรมชาติ หรือในตัวอย่างอาหารที่มีการเติมไขมันในส่วนผสม เช่น โมโนกลีเซอไรด์ และซอบีแทนโมโนสเตียเรท (Kugimiya *et al.*, 1980; Kugimiya and Donovan, 1981) Biliaderis และคณะ (1986a) รายงานการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนสและไขมัน แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเกิดการรวมตัวของสายโซ่อะมิโนสกับโมเลกุลของไขมันและมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง ส่วนช่วงที่สอง คือ การจัดเรียงตัวของสายโซ่อะมิโนสที่รวมตัวเชิงซ้อนกับไขมันภายในโครงสร้างแบบกิ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช และถูกสร้างขึ้นที่ระดับอุณหภูมิสูงที่สามารถหลอมผลึกบางส่วนของสารประกอบระหว่างอะมิโนสและไขมันในช่วงแรก โดยเรียกชื่อสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนสและไขมันชนิดที่ 1 และสารประกอบเชิงซ้อนในโครงสร้างแบบกิ่งผลึกชนิดที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 1 มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (amorphous) ขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบ V (V-type) โดยมีพีคแหลมที่ 7.36, 13.1 และ 20.1° 2 $\theta$  เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) โดยหลอดรังสีเอกซ์นี้ใช้คอปเปอร์เป็นแหล่งผลิตรังสี (Cu-source) (Biliaderis and Galloway, 1989) ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 1 และ 2 เมื่อวิเคราะห์ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนสและ

ไขมันชนิดที่ 1 และสารประกอบเชิงซ้อนในโครงสร้างแบบกิ่งผลึกชนิดที่ 2 มีช่วงอุณหภูมิการหลอม (melting temperature,  $T_m$ ) ที่ประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  และ  $120^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ Costas และคณะ (1993) ซึ่งศึกษาสมบัติในเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวสารพันธุ์ต่างๆ ด้วย DSC พบการเกิด



ภาพที่ 3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมโนสเตียรีนและอะมิโลส

Monostearin-amylose complex, with the whole chain inside the helical space

ที่มา: Carlson และคณะ (1979 อ้าง โดย Juliano, 1985)

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน โดยสารประกอบเชิงซ้อนชนิดแรกจะมี  $T_m$  ต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  และสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 2 มี  $T_m$  สูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  สอดคล้องกับหลายรายงานการทดลองที่ระบุว่าเทอร์โมแกรมของสตาร์ชที่วิเคราะห์ด้วย DSC นั้นจะมีพีคปรากฏในช่วงอุณหภูมิ  $85\text{-}130^{\circ}\text{C}$  (Enthalpy;  $\Delta H$  อยู่ระหว่าง  $0.2\text{-}2.6$  จูลต่อกรัม) โดยความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการหลอมขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุล หรืออาจพบพีคของสารประกอบดังกล่าวในเจลแข็งที่เกิดรีโทรกราเดชัน (Biliaderis *et al.*, 1986b; Biliaderis and Galloway, 1989; Biliaderis and Seneviratne, 1990; Donovan *et al.*, 1983; Galloway *et al.*, 1989)

## 7. การใช้ความร้อนในการหุงสุก

วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุก (cooking method) (Juliano, 1985) ได้แก่

1. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยใช้ตู้อบ (oven cooking method)
2. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยเติมน้ำปริมาณเล็กน้อยในข้าวที่หุง (cooking in a small

amount of water method)

3. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยเติมน้ำให้พอดีกับข้าวที่หุง (cooking in a medium amount of water method)

amount of water method)

4. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยเติมน้ำปริมาณมากในข้าวที่หุง (cooking in a large amount of water method)
5. วิธีการให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำในการนึ่งข้าว (steaming method)
6. วิธีการให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำในการนึ่งข้าวที่มีการเติมน้ำมันเล็กน้อยในน้ำที่ใช้หุง (steaming with oil added method)
7. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยเติมน้ำที่ใช้หุงในข้าวภายหลังการผัดกับน้ำมัน (cooking in water with oil added method)
8. วิธีการให้ความร้อนในการหุงสุกโดยใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (electric rice cooker method)

วิธีที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การใช้ความร้อนจากหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เพราะสามารถเตรียมได้ง่าย ก่อนการหุงข้าวถ้าข้าวสกปรกให้เลือกเศษผงออกก่อน แล้วให้ล้างฝุ่นละอองออก และไม่จำเป็นต้องล้างหากแน่ใจว่าข้าวขาวสะอาดเพียงพอ ปริมาณน้ำที่เติมในข้าวขึ้นกับวิธีการหุงข้าว ความเก่าใหม่ของข้าวและลักษณะข้าวสุกที่ต้องการ (Juliano, 1985) อัตราส่วนของน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวจะขึ้นกับปริมาณอะมิโลสโดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่เหมาะสมเท่ากับ 1.6-1.8 ต่อ 1 และข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลางจนถึงค่อนข้างสูง เช่น ข้าว กข 7 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่เหมาะสมเท่ากับ 1.7-2.5 ต่อ 1 (Juliano, 1985) เมล็ดข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เมื่อหุงสุกแล้วเมล็ดข้าวจะแข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เพราะปริมาณอะมิโลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของเมล็ดสตาร์ช โดยอะมิโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีและเกิดรีโทรกราเดชันอย่างรวดเร็ว ดังนั้นผู้บริโภคที่ชอบรับประทานข้าวที่อ่อนนุ่มจะต้องเลือกพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสประมาณร้อยละ 20-25

## 8. ผลของการใช้ความร้อนต่อคุณภาพเมล็ดข้าว

ลักษณะท้องไขที่เกิดขึ้นในส่วนแป้งของเมล็ดข้าวเกิดจากการจับตัวหลวมๆ ของสตาร์ชกับโปรตีนในเนื้อเมล็ดข้าวสารและเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการของวงการค้าข้าว และยังส่งผล



ต่อคุณภาพการขัดสีทำให้ข้าวหักมากตรงท้องไข่ (สถาบันวิจัยข้าว, 2540) Cheng และคณะ (2004) ศึกษาผลของลักษณะท้องไข่ต่อการเจลาติไนซ์เปรียบเทียบกับข้าวเมล็ดใส โดยใช้ DSC พบว่าข้าวท้องไข่มีช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์สูงกว่าข้าวเมล็ดใส เนื่องมาจากโครงสร้างส่วนภายในเนื้อเมล็ดที่มีการจับตัวกันหลวมๆ ระหว่างสตาร์ชกับโปรตีน และมีเม็ดสตาร์ชเดี่ยวกระจายตัวอยู่ จึงสามารถดูดซับน้ำในขั้นตอนการหุงสุกได้น้อย และต้องการพลังงานในการเกิดเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Singh และคณะ (2003) ศึกษาคุณภาพข้าวสุกของข้าวท้องไข่เปรียบเทียบกับข้าวเมล็ดใส ในข้าวพันธุ์ต่างๆที่ปลูกในอินเดีย จากการวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนซ์ด้วย DSC พบว่าข้าวท้องไข่มีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานเจลาติไนซ์สูงกว่าข้าวเมล็ดใสในทุกพันธุ์ข้าว เนื่องจากข้าวท้องไข่มีอะมิโลสในปริมาณน้อย จึงมีส่วนที่เป็นอะมิโลเพกตินซึ่งเป็นส่วนของผลึกมากกว่าข้าวเมล็ดใส มีผลให้ข้าวท้องไข่มีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานเจลาติไนซ์สูงขึ้น (Sasaki *et al.*, 2000)

คุณภาพการสีเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพข้าวสุก โดยจุดประสงค์ของการขัดสีเพื่อกำจัดส่วนของแกลบ รำและส่วนที่เจริญเป็นต้นอ่อนออกให้ได้ข้าวสารที่มีการแตกหักน้อยที่สุด (Spadaro *et al.*, 1980) Marshall (1992) ศึกษาผลของระดับการสีของข้าวสารต่ออุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง พบว่าข้าวกล้องซึ่งยังไม่ผ่านการขัดสีมีช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์สูงกว่าข้าวที่ขัดสีแล้ว เมื่อระดับการสีเพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง มีการลดลงของช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์อย่างรวดเร็วเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของข้าวกล้องที่ระดับการสีในช่วงระหว่าง 20-66 โดยน้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง มีการลดลงของช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระดับการสีไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง สอดคล้องกับการทดลองของ Champagne และคณะ (1990) ซึ่งศึกษาผลของระดับการสีและปริมาณไขมันที่ถูกกำจัดออกจากเมล็ดข้าวกล้องต่ออุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ช กำหนดระดับการสีเริ่มจากเมล็ดข้าวกล้องซึ่งยังไม่ผ่านการขัดสี ถึงระดับการสีร้อยละ 9.1 พบว่าข้าวสารที่ระดับการสีร้อยละ 1.3 ทั้งที่มีการกำจัดไขมันและไม่ได้ออกไขมันออกจากเมล็ด มีการลดลงของช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์อย่างรวดเร็วและลดลงเพียงเล็กน้อยที่ระดับการสีเพิ่มขึ้น การลดลงของอุณหภูมิเจลาติไนซ์เกิดจากการที่แวกส์และไขมันที่ผิวชั้นนอกของเมล็ดถูกกำจัดออกไป ทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวที่มากขึ้น (Juliano and Perez, 1983)

การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกภายหลังการทำให้สุกด้วยความร้อน เมล็ดข้าวจะดูดซับน้ำและขยายตัวออกรอบด้าน โดยเฉพาะด้านยาว (Juliano, 1982) โดยทั่วไปผู้บริโภคนิยมข้าวพันธุ์ที่ยืดตัวได้มากกว่าพันธุ์ข้าวที่ยืดตัวได้น้อย (ข้าวสุกที่ยืดตัวได้มากและไม่เหนียวติดกัน จัดเป็นข้าวที่หุงขึ้นหม้อ) (งามชื่น คงเสรี, 2531) จากการศึกษาของ Singh และคณะ (2005) โดยทดสอบคุณภาพการหุงต้มและบริโภคของข้าวสารใหม่พันธุ์ต่างๆในประเทศอินเดีย พบว่าระยะเวลาในการหุงสุก

อัตราส่วนน้ำที่ถูกดูดซับ ปริมาณการสูญเสียของแข็งที่ละลายได้และอัตราส่วนการยึดตัวของเมล็ดมีค่าเท่ากับ 13.3-24.0 นาที, 2.37-4.45, ร้อยละ 7.88-8.53 และ 1.29-1.74 ตามลำดับ ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาทั้งในรูปข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร สามารถดูดซับน้ำที่ใช้ในการหุงต้มมากขึ้น มีผลมาจาก การปรับสภาพการละลายและการเกิดเจลของแป้งและโปรตีนในเมล็ดที่เคี้ยวโตเต็มที่ให้กลายเป็นสารที่คงตัวและไม่ละลายในน้ำมากขึ้น ทำให้ปริมาตรของข้าวเก่าหุงสุกมากกว่าข้าวใหม่ ลักษณะข้าวสุกจะแข็งและร่วนมากกว่าข้าวใหม่ (Zhou *et al.*, 2002) Gujral และ Kumar (2003) ศึกษาผลของการเก็บรักษาแบบเร่งต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องและข้าวสาร โดยนำข้าวเปลือกใหม่มาปรับความชื้นเป็นร้อยละ 14, 18 และ 22 เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเย็นนาน 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนด้วยไอน้ำนาน 30 นาที และผึ่งให้แห้ง โดยกำหนดความชื้นสุดท้ายให้อยู่ระหว่างร้อยละ 9-11 จากการศึกษาพบว่าข้าวกล้องและข้าวสารที่ปรับให้มีความชื้นสูง มีค่าการยึดตัวของเมล็ด ค่าการดูดซับน้ำและเวลาในการหุงสุกเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลง

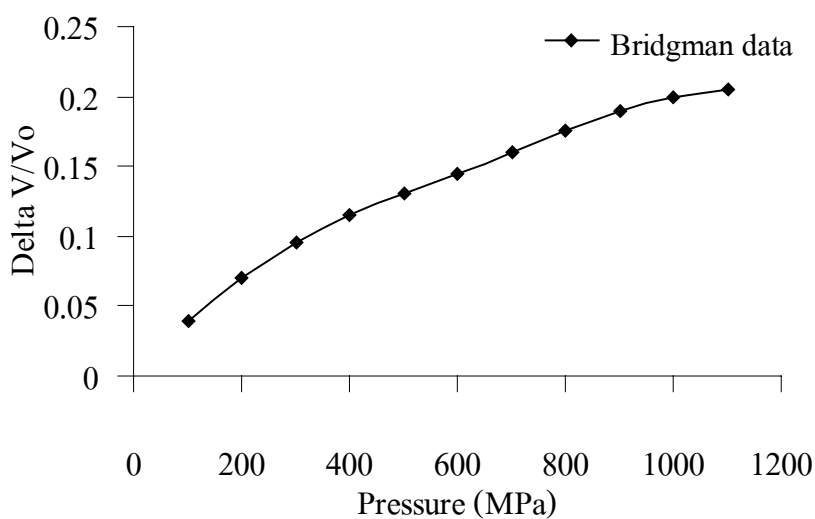
องค์ประกอบและสมบัติทางเคมีที่มีผลต่อคุณภาพข้าวสุก ได้แก่ ปริมาณอะมิโลส ความชื้นและอุณหภูมิในการเกิดเจล ในพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีผลให้ค่าความแข็งเนื้อสัมผัสมากและใช้เวลาในการหุงสุกน้อย ซึ่งจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรพบว่าปริมาณอะมิโลสแปรผกผันกับระยะเวลาในการหุงสุก แต่มีค่าแปรผันตรงกับปริมาณการสูญเสียของแข็งที่ละลายได้ (Singh *et al.*, 2005) Sujatha และคณะ (2004) ศึกษาคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องข้าวสารและข้าวที่ทำสุกบางส่วนจาก 2 แหล่งเพาะปลูกในอินเดีย ซึ่งจะสุกตัวอย่างในแต่ละฤดูกาลเป็นระยะเวลา 2 ปี พบว่าองค์ประกอบเคมีที่สำคัญ คือ ปริมาณอะมิโลสของข้าวทั้ง 2 แหล่งมีค่าไม่แตกต่างกัน จากการทดลองของ Hagenimana และคณะ (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการเจลาติไนซ์โดยใช้ DSC ในแป้งข้าวเจ้า 3 พันธุ์ ที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆของประเทศไทย ได้แก่ แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ Xian Mi (XM), Gong Mi (GM) และ Jin You Mi (JYM) ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 16.95, 23.04 และ 29.79 ตามลำดับ พบว่าแป้งข้าวเจ้าพันธุ์ XM, GM และ JYM มีช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ ( $T_g-T_c$ ) เฉลี่ยเท่ากับ 64.55-75.14, 59.58-70.65 และ 70.48-83.59 °ซ และมีค่าพลังงานเจลาติไนซ์เฉลี่ยเท่ากับ 11.24, 10.83 และ 10.70 จูลต่อกรัม ตามลำดับ แป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (ร้อยละ 29.79) มีช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์มากที่สุดเท่ากับ 13.11 °ซ ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (ร้อยละ 16.95) มีช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์น้อยสุดเท่ากับ 10.59 °ซ ความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานเจลาติไนซ์ในแป้งข้าวต่างชนิด เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวของผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้แป้งที่มีสัดส่วนอะมิโลสสูงกว่าอะมิโลเพกติน โมเลกุลของอะมิโลสสายโซ่ยาวจะขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และการมีสัดส่วน

ส่วนของอะมิโลเพกตินสายยาวมากกว่าอะมิโลเพกตินสายสั้น มีผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลลิตินซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและต้องการพลังงานเจลลิตินซ์เพิ่มขึ้นในการหลอมผลึก (Jane *et al.*, 1999; Gunaratne and Hoover, 2002; Vandeputte *et al.*, 2003) Iturriaga และคณะ (2004) ศึกษาสมบัติทางเคมีของแป้งข้าวและสตาร์ชที่แยกได้จากข้าวเจ้า 5 พันธุ์ และข้าวเหนียว 2 พันธุ์ จากการศึกษาอุณหภูมิในการเจลลิตินซ์ด้วย DSC ในข้าวที่ทำให้สุกด้วยปริมาณน้ำที่มากเกินไป พบว่าแป้งข้าวมียุณหภูมิเจลลิตินซ์สูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากแป้งข้าวยังมีองค์ประกอบอื่น เช่น ไขมัน โปรตีน น้ำตาลและเกลือแร่อยู่ในองค์ประกอบ จึงส่งผลต่อการดูดซับน้ำบางส่วนที่แป้งต้องการใช้ในการเจลลิตินซ์ (Chungcharoen and Lund, 1987; Eliasson, 1992) และข้าวเหนียวยุณหภูมิและค่าพลังงานเจลลิตินซ์สูงกว่าข้าวเจ้า ซึ่งข้าวเหนียวยุณหภูมิผลึกร้อยละ 48 สูงกว่าข้าวเจ้าที่มีปริมาณผลึกร้อยละ 37-40 จากสัดส่วนของผลึก (crystalline) ที่มากกว่าจึงต้องการพลังงานมากในการเกิดเจล (Huang *et al.*, 1994) การศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิจเจลลิตินซ์ระหว่างข้าวทั้งเมล็ดและแป้งข้าวโดยใช้ DSC พบว่าข้าวทั้งเมล็ดต้องการพลังงานเจลลิตินซ์มากกว่าแป้งข้าว โดยข้าวเจ้าพันธุ์ Mars ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสเท่ากับ 15.8 ในข้าวทั้งเมล็ดมีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานเจลลิตินซ์เท่ากับ 65.4-98.6 และ 15.8 จูลต่อกรัม ตามลำดับ และแป้งข้าวมียุณหภูมิและค่าพลังงานเจลลิตินซ์เท่ากับ 65.3-82.2 และ 10.5 จูลต่อกรัม ตามลำดับ ความแตกต่างของอุณหภูมิจเจลลิตินซ์ระหว่างข้าวทั้งเมล็ดและแป้งข้าวเนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างเมล็ด (Normand and Marshall, 1989)

## 9. กระบวนการใช้ความดันสูง

การใช้ความดันสูง (high pressure processing) หมายถึง การใช้ความดันสูงในการแปรรูปอาหาร เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ต้องใช้ความร้อน (non-thermal processing) สามารถทำได้ทั้งอาหารเหลวและอาหารแห้งทั้งที่มีบรรจุภัณฑ์และไม่มีบรรจุภัณฑ์ (Farkas and Hoover, 2000) ความดันที่ใช้เป็นความดันที่เกิดจากตัวกลางที่ส่งผ่านความดันที่อยู่รอบๆอาหาร ได้แก่ น้ำหรือสารละลายผสมของเอทานอลและน้ำมันละหุ่ง ระดับความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 100-1000 เมกะปาสคาล (megapascal, MPa) (Cheftel and Calioli, 1997) การใช้ความดันสูงนั้นใช้เวลาสั้นมากในการผลิต คือ อยู่ในช่วง 2-30 นาที (พันธ์จิต พัฒโนภาย, 2541) ขณะที่การใช้ความร้อนในการแปรรูปใช้เวลานานกว่าการใช้ความดันสูงส่งผลต่อการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของอาหารและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี ทั้งคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสภายหลังกระบวนการแปรรูป (Fellow, 1990)

กระบวนการใช้ความดันสูงจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่ทุกจุดของอาหาร โดยไม่ขึ้นกับรูปร่าง ขนาด และองค์ประกอบของอาหาร การใช้ความดันสูงมีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาหารเล็กน้อย โดยเกิดจาก adiabatic heating ซึ่งอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 3 °ซ ต่อการเพิ่มความดัน 100 เมกกะปาสคาล ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบของอาหาร เช่น อาหารที่มีปริมาณไขมันสูงจะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมากขึ้น ส่วนอาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 25 และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการให้ความดันจะทำให้อุณหภูมิกกระจายทั่วชั้นอาหาร และอุณหภูมิสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนของอาหารไปยังผนังหรือถ่ายโอนจากผนังของช่องอัดความดัน ดังนั้นช่องอัดความดันที่ดีควรมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ การให้ความดันทำให้เกิดการลดลงของปริมาณอาหาร (ภาพที่ 4) ด้วยเหตุนี้ภาชนะบรรจุที่ใช้กับอาหารที่นำมาผ่านกระบวนการนี้จะต้องสามารถทนการลดลงของปริมาตรได้ถึงร้อยละ 15 และยังคงสภาพเดิมได้ (Farkas and Hoover, 2000)



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของปริมาตรน้ำที่อุณหภูมิ 22 °ซ กับความดัน

Relationship between volumn decrease of water at 22 °C and pressure

ที่มา: Ting (1999 อ้าง โดย Farkas and Hoover, 2000)

## 9.1 วิธีการให้ความดัน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

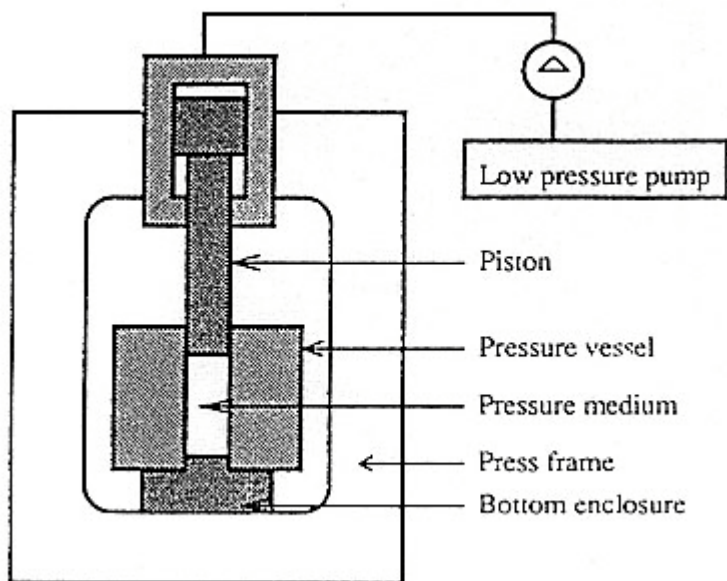
### 9.1.1 การอัดลูกสูบโดยตรง (direct compression)

ตัวกลางของความดันในช่องอัดความดันจะถูกอัดโดยตรงด้วยลูกสูบที่ด้านหนึ่งมีขนาดเล็ก และปลายด้านใหญ่ของลูกสูบจะถูกขับเคลื่อนด้วยปั๊มความดันต่ำ วิธีนี้ทำให้เกิดความดัน

ขึ้นอย่างรวดเร็ว การใช้จึงจำกัดเพียงในห้องทดลองหรือในโรงงานต้นแบบเท่านั้น (ภาพที่ 5)

**9.1.2 การอัดลูกสูบโดยอ้อม (indirect compression)**

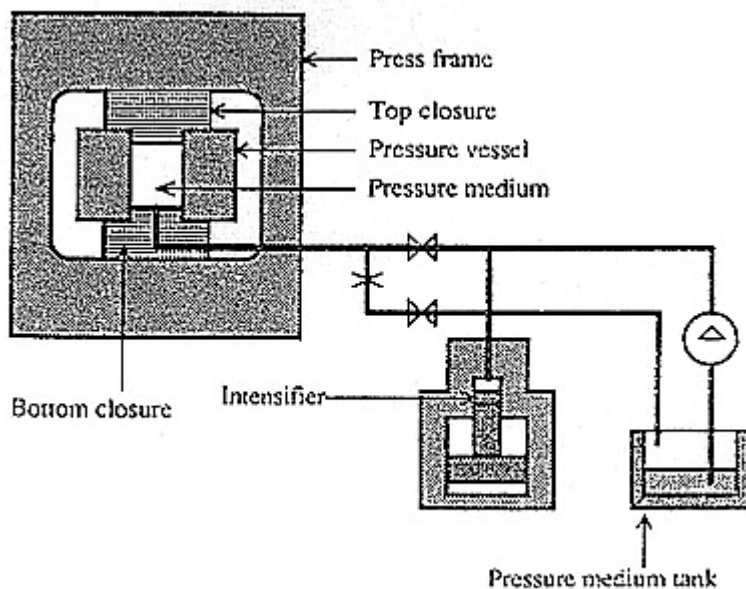
ตัวกลางส่งผ่านความดันจะถูกบีบเพิ่มความดันจากภาชนะที่เก็บ จนกระทั่งได้ความดันที่ต้องการ ซึ่งวิธีการให้ความดันโดยการอัดลูกสูบโดยอ้อมนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 5 การอัดลูกสูบโดยตรง

Direct compression

ที่มา: Palou และคณะ (1999)



## ภาพที่ 6 การอัดลูกสูบโดยอ้อม

Indirect compression

ที่มา: Palou และคณะ (1999)

### 9.1.3 การให้ความร้อนกับตัวกลางของความดัน (heating of pressure medium)

ตัวกลางจะถูกเพิ่มอุณหภูมิและแรงดัน ส่วนมากนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ด้วย (Palou *et al.*, 1999)

## 9.2 ประเภทของการใช้ความดัน แบ่งตามสภาวะการให้ความดันได้เป็น 3 ประเภท คือ

### 9.2.1 cold isostatic pressing

วิธีนี้ทำที่อุณหภูมิห้อง ตัวกลางที่ใช้คือ น้ำ อิมัลชันไฟเออร์ของน้ำ หรือน้ำมัน ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 เมกกะปาสกาล ในแต่ละรอบของการให้ความดันใช้เวลาประมาณ 1 นาที ใช้ในการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมเหล็ก เซรามิก คาร์บอนแกรไฟต์และพลาสติก โดยเดิมวัสดุที่เป็นผงลงในแม่พิมพ์แล้วให้ความดัน เครื่องกำเนิดความดันจะทำงานที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ใช้ในแต่ละรอบประมาณ 6-10 ชั่วโมง (Mertens, 1995)

### 9.2.2 warm isostatic pressing

วิธีนี้จะทำที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 250 °ซ ระบบนี้เหมาะสมที่จะใช้กับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการให้ความดัน ตัวกลางที่ใช้ คือ ก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจน ฮีเลียมหรืออากาศ เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบประมาณ 6-10 ชั่วโมง (Mertens, 1995)

### 9.2.3 hot isostatic pressing

วิธีนี้ใช้อุณหภูมิ 2,000-2,200 °ซ ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 100-400 เมกกะปาสกาล ตัวกลางความดันที่ใช้ส่วนมากเป็นตัวกลางส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กและเซรามิก โดยให้ความร้อนและความดันแก่วัสดุอย่างสม่ำเสมอ เช่น ก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจน ฮีเลียมหรืออากาศ เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบประมาณ 6-10 ชั่วโมง (Mertens, 1995)

## 10. ผลการใช้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของแป้ง

การใช้ความดันสูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเมล็ดข้าว Ahromrit และคณะ (2006) ศึกษาผลของการใช้ความดันสูงต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าวเหนียวพันธุ์ไทย โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 : 5 แล้วนำไปให้ความดันที่ระดับ 100-600

เมกกะปาสคาล โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้แตกต่างกัน คืออุณหภูมิในช่วง 20-70 °ซ และเวลา 5-120 นาที พบว่าเมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการให้ความดันสูงที่ระดับความดันและอุณหภูมิต่างๆ มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการให้ความดันเพิ่มขึ้น การยึดตัวของเมล็ดเกิดจากการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและรอยแยกที่เกิดจากการแทรกผ่านของน้ำ และที่ระดับความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Watanabe และคณะ (1991) พบว่าเมล็ดข้าวสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากที่ระดับความดันสูงกว่า 400 เมกกะปาสคาล มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเกิดการแตกออกของผนังเซลล์ในเมล็ด

การให้ความดันสูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้ง Hibi และคณะ (1993) รายงานว่าที่ระดับความดัน 50-200 เมกกะปาสคาล มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกในแป้งข้าวเพียงเล็กน้อย ส่วนการให้ความดันระดับ 500 เมกกะปาสคาล รูปแบบโครงสร้างผลึกในแป้งข้าวจะเปลี่ยนจากแบบ A (A-type) เป็นแบบ B (B-type) บางส่วน เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกบางส่วนที่ถูกทำลายจากการให้ความดัน เช่นเดียวกับการทดลองของ Katapo และคณะ (2002) ซึ่งศึกษาผลการให้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกในแป้งข้าวที่ระดับความดัน 690 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที และ 1 ชั่วโมง พบว่าความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกจากแบบ A ให้พิคแหลมที่ประมาณ 15, 17.5 และ 22°2θ เปลี่ยนเป็นแบบ B ซึ่งให้พิคแหลมที่ประมาณ 6 และ 17.5°2θ ร่วมกับโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งปรากฏพิคที่ 8, 13 และ 20°2θ โดยโครงสร้างผลึกแบบ V เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง อะมิโลสและไขมัน

การให้ความดันสูงสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของแป้ง จากผลการส่องผ่านกล้องไมโครสโคปชนิดแสงโพลาไรซ์ พบการพองตัวของเม็ดสตาร์ชจำนวนมากและพบการหายไปของโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ในแป้งข้าวที่ใช้ระดับความดัน 500 เมกกะปาสคาล นาน 20 และ 60 นาที (Hibi *et al.*, 1993) Blaszcak และคณะ (2005) ศึกษาผลของการให้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแป้งมันฝรั่ง โดยใช้สารละลายน้ำแป้งในสัดส่วนน้ำที่มากเกินไป (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) และให้ความดันที่ระดับ 600 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 2 และ 3 นาที ที่อุณหภูมิ 20 °ซ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง โดยผลการวิเคราะห์ด้วย DSC พบว่าแป้งที่ผ่านการให้ความดันที่ 2 และ 3 นาที มีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการละลายในน้ำเท่ากับ 57.47- 71.00 °ซ, 5.55 จูลต่อกรัม และ 58.79-72.57 °ซ, 4.31 จูลต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันฝรั่งดิบซึ่งมีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการละลายในน้ำเท่ากับ 65.04-77.17 °ซ และ 15.96 จูลต่อกรัม สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย

Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าแป้งที่ผ่านการให้ความดันที่ระดับ 600 เมกกะปาสคาล นาน 3 นาที มีโครงสร้างแบบร่างแห ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดเจลและมีบางส่วนของเม็ดสตาร์ชที่แตกออก เป็นผลจากการดูดซับน้ำในส่วนออสติฐานและเกิดการหลอมในส่วนผลึก (Rubens and Heremans, 2000) และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชด้วย SEM พบว่าที่ระดับความดัน 300 เมกกะปาสคาล โครงสร้างบางส่วนในเนื้อเม็ดเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความดันมีผลต่อการเพิ่มการซึมผ่านของสารละลายภายนอกเข้าสู่ภายในเม็ดสตาร์ชและมีโปรตีนบางส่วนที่ละลายและถูกปลดปล่อยออกมา แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเม็ดสตาร์ช (Kato *et al.*, 2000)

การให้ความดันสูงทำให้แป้งเกิดเจลได้ในน้ำได้ โดยการให้ความดันที่ระดับ 690 เมกกะปาสคาลในแป้งข้าวละลายน้ำ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาทีและ 1 ชั่วโมง พบว่าแป้งข้าวละลายน้ำหลังจากให้ความดันแล้วเปลี่ยนลักษณะเป็นเจลแป้ง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อแป้งเข้าจะเกิดเจลได้น้ำเพิ่มสูงขึ้น (Katapo *et al.*, 2002) ส่วนการให้ความดันระดับ 500 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 45 °ซ นาน 1 ชั่วโมง ในน้ำแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่ายังคงมีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่ยังไม่เกิดเจลได้น้ำ (Ezaki and Hayashi, 1992) การเกิดเจลได้น้ำในแป้งสาลีและสมบัติของเจลแป้งที่ได้จากการให้ความดันที่ระดับ 600 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 25 °ซ นาน 15 นาที พบว่าน้ำแป้งสาลีความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่ผ่านการให้ความดันที่สภาวะดังกล่าวมีค่าการพองตัว ปริมาณอะมิโลสที่ปลดปล่อยออกจากเม็ดสตาร์ช และค่าความถ่วงจำเพาะไม่แตกต่างจากเริ่มต้น และในน้ำแป้งสาลีความเข้มข้นร้อยละ 30 ที่ความดันสภาวะเดียวกัน พบว่าเจลแป้งที่ได้มีความแน่นเนื้อมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจลแป้งที่เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 86 °ซ นาน 15 นาที (Douzals *et al.*, 1996) Bauer และ Knorr (2005) ศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเกิดเจลได้น้ำของแป้ง 3 ชนิด คือ แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่ง โดยใช้สารละลายน้ำแป้งร้อยละ 5 พบว่าแป้งสาลีซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ A ไวต่อการเปลี่ยนแปลงโดยความดันมากที่สุด และแป้งมันฝรั่งซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B ทนต่อการเปลี่ยนแปลงโดยความดันมากที่สุด โดยที่ระดับความดัน 700 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิต่ำกว่า 50 °ซ พบว่าแป้งเจลได้น้ำไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับการทดลองของ Slute และคณะ (1996) พบว่าที่ระดับความดัน 600 เมกกะปาสคาล ระยะเวลา 15 นาที ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสารละลายน้ำแป้งมันฝรั่งร้อยละ 5 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B ในขณะที่แป้งสาลีสามารถเจลได้น้ำอย่างสมบูรณ์ที่ระดับความดันสูงกว่า 300 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิเท่ากับ 29, 39 และ 48 °ซ และแป้งสาลีสามารถเจลได้น้ำได้อย่างสมบูรณ์ที่ระดับความดันเพียง 200 เมกกะปาสคาล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 57 °ซ ในระหว่างการให้ความดัน



การเปลี่ยนแปลงกลิ่นรสใน quick-cooking rice โดยใช้ตัวอย่างข้าว milled short-grain rice จำนวน 10 กิโลกรัม แช่น้ำ 30 ลิตร นาน 3 ชั่วโมง แล้วรินน้ำส่วนเกินออก นำไปให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในหม้อหนึ่งความดันสูงที่ความดันไอน้ำเท่ากับ 1.08 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 15 นาที และทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 °ซ จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 5 บรรจุใน paper-aluminium foil polyethylene laminate (PFP) ภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 °ซ นาน 4 เดือน พบการเปลี่ยนแปลงของสารคาร์บอนิลที่สำคัญ คือ formaldehyde, acetaldehyde, acetone, butanal และ hexanal ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นรสที่พบในข้าวหอมดียบ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ ยกเว้น acetone ที่มีปริมาณลดลง (Semwal *et al.*, 1996)

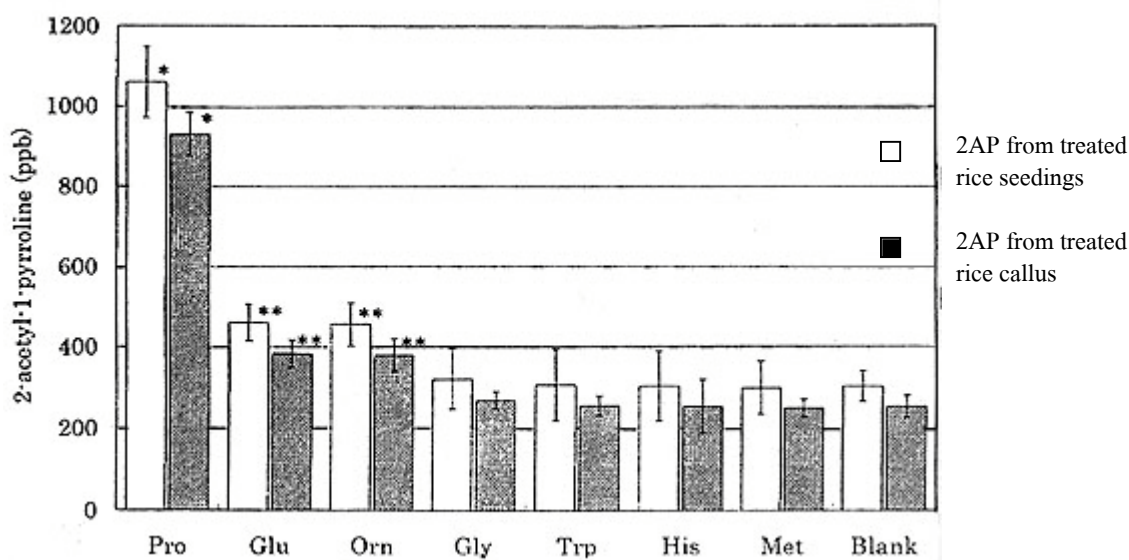
## 11. สารให้กลิ่นรสในข้าว

Buttery และคณะ (1982) พบว่า 2AP เป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นข้าวหอมสุก กลิ่น 2AP มีคล้ายกลิ่นข้าวโพดคั่ว นอกจากนี้ยังพบ 2AP ได้ในน้ำมันหอมระเหยของใบเตย โดยที่ความเข้มข้นของ 2AP ในใบเตยมีมากกว่าข้าวหอมที่ผ่านการขัดสีแล้วถึง 10 เท่า จากการทดลองของ Yoshihashi และคณะ (2002) ซึ่งศึกษาสารตั้งต้นของ 2AP ในข้าวหอมมะลิ 105 พบว่า 2AP ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนหรือเกิดขึ้นจากกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว แต่จะถูกสร้างขึ้นในส่วนยอดของลำต้นข้าวในระหว่างการเพาะปลูก ปริมาณ 2AP จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีโพโรลีน ออนิทิน หรือ กลูตามีนในสารละลายที่ใช้เป็นอาหารเลี้ยงต้นอ่อน โดยเฉพาะสารละลายที่มีกรดอะมิโนโพโรลีน จะพบปริมาณ 2AP เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 7) ซึ่งจากผลการทดสอบ โดยใช้ isotope dilution method ชี้ให้เห็นว่ากรดอะมิโนโพโรลีนเป็นแหล่งให้ไนโตรเจนในการเกิด 2AP (ภาพที่ 8) โดยในการเติบโตช่วงเมล็ดแก่จะพบ 2AP อิสระภายนอกโครงสร้างแบบกิ่งผลึกของ เม็ดสตาร์ช เนื่องจากการสร้าง 2AP จากกรดอะมิโนโพโรลีนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในระยะน้ำนม (10 วันหลังดอกบาน) (Juliano, 1985) การสร้างสารให้กลิ่นหอม 2AP จึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์โพโรลีน ซึ่งกรดอะมิโนโพโรลีนที่ได้รับจากภายนอกนั้นเป็นพิษกับพืชทุกชนิด และสารตั้งต้นในการ

สังเคราะห์โพโรลีนภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ 1-pyrroline-5-carboxylate (P5C) dehydrogenase ที่เร่งการสลายตัวของกรดอะมิโนโพโรลีนได้ เป็น P5C ซึ่งมีฤทธิ์เป็นพิษมากกว่ากรดอะมิโนโพโรลีนที่สิ่งมีชีวิตรับมาจากภายนอกถึง 10 เท่า และ การผลิต 2AP ยังเกี่ยวข้องกับปริมาณ dihydroxyacetone phosphate (DHAP) เนื่องจาก DHAP มีผลต่อการลดความเป็นพิษจาก P5C ซึ่งเอนไซม์จำเพาะที่ทำหน้าที่ผลิต DHAP คือ

fructose-1,6-biophosphate aldolase และเอนไซม์ trisephosphate isomerase (TPI) ซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการเร่งให้ glyceraldehydes-3-phosphate (G-3-P) เปลี่ยนเป็น DHAP ในกระบวนการหายใจ จึงสามารถสรุปได้ว่าเอนไซม์ TPI เป็นเอนไซม์หลักที่มีบทบาทสำคัญต่อการสร้าง 2AP โดยทำหน้าที่ผลิต DHAP (Suprasanna *et al.*, 1998)

Yoshihashi และคณะ (2004) ศึกษาผลของแหล่งเพาะปลูกที่แตกต่างกันในประเทศไทยต่อปริมาณ 2AP ในข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พบว่าข้าวกล้องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 7 ผลของการเติมกรดอะมิโนในต้นอ่อนของข้าวและเนื้อเยื่อส่วนของลำต้นข้าวต่อ

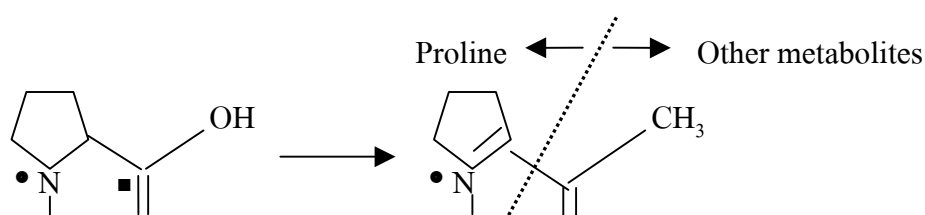
การสร้าง 2AP

Effect of amino acid addition to rice seedlings and callus on 2AP formation

Note: Pro = Proline Trp = Tryptophane Glu = Glutamine His = Histidine

Orn = Ornithine Met = Methionene Gly = Glycine

ที่มา: Yoshihashi และคณะ (2002)



H                    O                    H                    O

### ภาพที่ 8 กลไกในการสร้าง 2AP จากโพรลีน

Pathway for 2AP formation from proline

Note:     ● labeled nitrogen-15 on proline                    ■ labeled carbon-13 on proline

ที่มา: Yoshihashi และคณะ (2002)

ของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณทุ่งกุลาร้องไห้ มีปริมาณ 2AP มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากชนิดและความอุดมสมบูรณ์ของดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวร่วนปนทราย รวมถึงการใส่ปุ๋ยและมีน้ำปริมาณที่เหมาะสม มีอุณหภูมิต่ำในขณะที่ข้าวสร้างยอดอ่อนและออกรวง การเก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่ปล่อยให้ข้าวสุกคาต้นและไม่ตากข้าวในนาเป็นเวลานานเกินควร นอกจากนี้ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บได้จากช่วงฤดูแล้ง พบ 2AP ในปริมาณต่ำมาก เนื่องจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวประเภทไวต่อแสง จำเป็นจะต้องปลูกในช่วงนาปี (เดือนพฤษภาคม-กันยายน) (อานันต์ ผลวัฒน์ และคณะ, 2535) จากปริมาณน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้การสังเคราะห์กรดอะมิโนที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสร้าง 2AP ลดลง

Buttery และคณะ (1983) รายงานว่า 2AP ที่เป็นสารให้กลิ่นหลักในข้าวหอมมีปริมาณแตกต่างกันไปในข้าวหอมแต่ละพันธุ์ และพบ 2AP ในข้าวกล้องมากกว่าข้าวสารในปริมาณเกือบเท่าตัว (ตารางที่ 5) นอกจากนี้ปริมาณ 2AP ในข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขัดสี โดยข้าวที่ขัดสีแล้วร้อยละ 10 ยังคงเหลือสารประกอบ 2AP ประมาณหนึ่งในสาม นอกจากนี้พบว่าร้อยละของการขัดสีข้าวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของกลิ่นรส แสดงว่าสารให้กลิ่นส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวเมล็ดข้าว (Tsugita *et al.*, 1980) Buttery และคณะ (1986) วิเคราะห์ชนิดของสารให้กลิ่นรสหลักในข้าวหอมพันธุ์ Basmati พบว่า 2AP เป็นสารให้กลิ่นรสหลัก และพบว่าการสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์แบบต่อเนื่องตามแบบของ Likens-Nickerson ร่วมกับกรดเจือจางและไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด 2AP ลดพิศรวกวนที่มาจากสารที่ระเหยได้ชนิดอื่นที่มีเวลาออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกับ 2AP มีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณเชิงปริมาณ Buttery และคณะ (1988) ศึกษาเปรียบเทียบระดับของค่า odor threshold (T) ของสารให้กลิ่นรสในข้าวหอมหุงสุกพันธุ์ California long-grain โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและ สกัดสารให้กลิ่นรสจากข้าวด้วยกระบวนการ tenax trap isolation method และใช้ gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) ในการแยกชนิดและวิเคราะห์ปริมาณของสารให้กลิ่นรสและเปรียบเทียบค่า T จากสารให้กลิ่นที่แยกผ่านคอลัมน์ โดยอาศัยผู้ทดสอบที่มีความชำนาญ 16-20 คน พบว่าสารให้กลิ่นรสในข้าวมีจำนวน 64

ชนิดและค่า T ในจำนวน 64 ชนิด ของสารให้กลิ่นรสในข้าวนั้นมีสารให้กลิ่นรส 2 ชนิด คือ aldehydes(E)-2-nonenal (T=0.08 ppb), (E,E)-2,4-decadienal (T=0.007 ppb) ที่มีค่า T ต่ำสุด นอกจากนี้มีสารในกลุ่มแอลดีไฮด์อื่นๆ อีกที่มีค่า T ต่ำ เช่น (E)-2-decenal (T=0.4 ppb), octanal (T=0.7 ppb), nonanal (T=1 ppb) และ decanal (T= 2 ppb) ซึ่งเป็นกลุ่มของสารที่ระเหยได้ง่ายที่มีอิทธิพลต่อกลิ่นรสในอาหารโดยทั่วไป และสารกลุ่มอื่นเพียงชนิดเดียวที่มีค่า T น้อยกว่า 1 ppb คือ 2AP (T=0.1 ppb) โดยอธิบายคุณลักษณะของการให้กลิ่นรสของสารตัวนี้ว่ามีกลิ่นหอมเหมือนข้าวโพดคั่ว นอกจากนี้ Buttery และคณะ (1988) ศึกษาสารให้กลิ่นรสหลักในข้าวหุงสุกพันธุ์ California long-grain โดย

**ตารางที่ 5** ความเข้มข้นของ 2-acetyl-1-pyrroline ที่พบในข้าวสุกบางพันธุ์

Concentration of 2-acetyl-1-pyrroline found in some samples of cooked rice

| Variety                              | 2-acetyl-1-pyrroline concentration (ppm <sup>a</sup> ) |            |
|--------------------------------------|--|------------|
|                                      | Milled rice  | Brown rice |
| Malagkit Sungsong                    | 0.09   | 0.2        |
| IR841-76-1                           | 0.07   | 0.2        |
| Khao Dawk Mali 105                   | 0.07   | 0.2        |
| Milagrosa                            | 0.07   | -          |
| Basmati 370                          | 0.06   | 0.17       |
| Seratus Malam                        | 0.06   | -          |
| Azucena                              | 0.04   | 0.16       |
| Hieri                                | 0.04   | 0.1        |
| Texas Long Grain (non-fragrant rice) | <0.008   | -          |
| Calrose (non-fragrant rice)          | <0.008   | -          |

Note: <sup>a</sup> ppm = part per million (10<sup>6</sup>)

ที่มา: Buttey และคณะ (1983)

พิจารณาถึงค่าอัตราส่วนค่าความเข้มข้นของสารให้กลิ่นรสแต่ละชนิดต่อค่า T โดยแสดงในรูปของ odor unit พบว่าสารประกอบหลักที่ให้กลิ่นรสในข้าวหุงสุกพันธุ์นี้ประกอบด้วย 2AP, (E,E)-2,4-decadienal, nonanal, hexanal, (E)-2-nonenal, octanal, decanal, 4-vinyl-guaiacol และ 4-vinylphenol

Yajima และคณะ (1979) ศึกษาสารให้กลิ่นของข้าวหอมญี่ปุ่น Kaorimai เปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมพันธุ์ Koshihikari ที่ผ่านการขัดสีร้อยละ 20 พบว่าสารให้กลิ่นของข้าวหอมหุงสุกประกอบด้วยสารหลายชนิด และเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมพบว่าในข้าวหอมจะมีสารอินโดลมากกว่าและมี  $\alpha$ -pyrrolidine ในขณะที่ข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมจะไม่มีสารนี้ โดย  $\alpha$ -pyrrolidine เป็นสารประกอบที่เกิดจากกรดอะมิโน โพรลีน ส่วนข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมจะมี 4-vinylphenol, hexanol และ hexanal มากกว่าข้าวหอม

Mahatheeranont และคณะ (2001) ศึกษาชนิดและปริมาณของสารให้กลิ่นในข้าวกล้องพันธุ์ดอกมะลิ 105 คิบ โดยสกัดสารให้กลิ่นด้วยวิธี indirect steam distillation ในข้าวกล้องคิบ ปริมาณ 200 กรัม ภายใต้การปรับลดความดันและใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันผลจากความร้อนที่อาจทำลายสารให้กลิ่นรส จากการทดลองพบว่าสารให้กลิ่นที่สกัดได้มีจำนวนมากกว่า 140 ชนิด และสามารถระบุชื่อชนิดที่แน่นอนของสารได้ทั้งหมด 70 ชนิด สารให้กลิ่นหลัก คือ 2AP และจากการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ 2AP พบว่าคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยก 2AP คือ CP-Wax 51 for amines โดยสามารถวิเคราะห์หาปริมาณ 2AP โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แม้มีตัวอย่างข้าวเพียง 0.5 กรัม Mahatheeranont และคณะ (1995) รายงานว่า 2AP เป็นสารที่ไม่เสถียร สารสกัดใหม่จากข้าวหอมจะมีกลิ่นแรงเฉพาะตัว แต่เมื่อทิ้งไว้ 2-3 ชั่วโมง กลิ่นจะลดลงมาก และกลิ่นจะหายไปหมดเมื่อทิ้งไว้นานถึง 6-7 วัน ดังนั้น 2AP ที่สกัดได้ต้องเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และภายใต้สภาพสุญญากาศ แต่ก็ไม่สามารถเก็บไว้ได้นานเพราะของเหลวที่สกัดได้จะเปลี่ยนสีจากของเหลวใสเป็นสีแดง แต่ถ้าเก็บในลักษณะสารละลายเจือจางจะมีความคงตัวมากกว่า

Mahatheeranont และคณะ (2001) วิเคราะห์ปริมาณของสารให้กลิ่นที่สำคัญในข้าวหอมมะลิ 105 คิบ โดยเปรียบเทียบระหว่างข้าวกล้องและข้าวสารจากแหล่งต่างกัน พบว่าข้าวกล้องที่เป็นข้าวใหม่มีปริมาณของ 2AP มากที่สุด (0.34 ppm) ส่วนข้าวกล้องที่ผ่านการเก็บรักษามานาน 12 เดือนนั้นมีปริมาณของ 2AP ลดลงมาก (0.12 ppm) เมื่อเทียบกับข้าวกล้องใหม่และข้าวกล้องที่จำหน่ายในท้องตลาด (0.32 ppm) ส่วนข้าวสารมี 2AP ปริมาณน้อยกว่าข้าวกล้องและปริมาณ 2AP มีค่าแตกต่างกัน (0.25, 0.12 และ 0.05 ppm) ในข้าวสารต่างยี่ห้อที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เนื่องมาจากความแตกต่างของอายุการเก็บของข้าว แหล่งเพาะปลูก และสภาวะในการเก็บรักษา (Buttery *et al.*, 1983)

## 12. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นรสในข้าวดิบระหว่างเก็บรักษา

ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี ชีวเคมี การเปลี่ยนแปลง

ของกลิ่นรสในข้าว ปริมาณกรดไขมันอิสระและสารคาร์บอนิลเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Vidyasagar *et al.*, 1991) โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

### 12.1 ปริมาณความชื้น

Sowbhagya และ Bhattacharya (1976) ทดลองเก็บข้าวสารในขวดปิดสนิทในที่มืดที่อุณหภูมิ 60 °ซ นาน 2 ปี ที่มีระดับความชื้นในข้าวเริ่มต้นแตกต่างกัน คือ เท่ากับร้อยละ 14.6, 11.8, 9.3, 5.2 และ 4.1 พบว่าข้าวที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วและมีสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยามากกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง โดยวัดจากปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์และสารคาร์บอนิลที่เกิดจากการสลายตัวของเพอร์ออกไซด์ โดยข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 14.6 และ 11.8 มีปริมาณของเพอร์ออกไซด์ และคาร์บอนิลค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ ส่วนข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 9.3, 5.2 และ 4.1 มีปริมาณสารเพอร์ออกไซด์และคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นสูงสุดภายใน 50-100 วัน หลังการเก็บรักษา ข้าวที่มีความชื้นต่ำมีอัตราการเพิ่มของสารเพอร์ออกไซด์และสารคาร์บอนิลมากขึ้น เนื่องจากน้ำในองค์ประกอบของเมล็ดข้าวจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกลางระหว่างไขมันกับออกซิเจน เมื่อระดับความชื้นต่ำมีผลให้ไขมันบางส่วนสัมผัสกับออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ในทางตรงกันข้ามนั้นข้าวที่มีความชื้นสูงอาจเกิดปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเกิดการไฮโดรไลซ์ของไขมัน

Wongpornchai และคณะ (2004) ศึกษาวิธีการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้วิธีการทำแห้งทั้งหมด 6 แบบได้แก่ การใช้ตู้อบชนิดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 30 และ 40 °ซ การใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 70 °ซ และการผึ่งแดด ให้ข้าวมีความชื้นเหลือร้อยละ 13-15 บรรจุใส่กระสอบ แล้วเก็บที่อุณหภูมิห้อง นาน 4 สัปดาห์ จากการศึกษาพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณของ 2AP มากกว่าและมีปริมาณของ n-hexanal และ 2-pentylfuran ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นหืนน้อยกว่าการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง

### 12.2 อุณหภูมิ

Villareal และคณะ (1976) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 °ซ พบว่าเกิดการเพิ่มของสารคาร์บอนิลอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 2-4 สัปดาห์ โดยเฉพาะการเพิ่มของ hexanal ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นไม่ดีเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น ข้าวที่ขัดสีแล้วหรือยังไม่ขัดสีของพันธุ์ข้าว หอมในทางการค้าจะมีปริมาณสารที่ให้กลิ่นหลักในข้าว คือ 2AP ประมาณ 10-1104 นาโนกรัมต่อกรัมและมี hexanal ประมาณ 148-2541 นาโนกรัมต่อกรัม (Berman *et al.*, 2000) และในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 40 °ซ ปรากฏกลิ่นหืนเกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ propanal, pentanal และ hexanal ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยแปรผันตรง

กับปริมาณกรดลิโนเลอิกและลิโนเลนิกที่ลดลง เนื่องจากไขมันถูกไฮโดรไลซ์และออกซิไดซ์เป็นกรดไขมันอิสระส่งผลต่อค่ากรดที่เพิ่มสูงขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเพอร์ออกไซด์ ทำให้รสชาติรวมทั้งปริมาณสารให้กลิ่นในข้าวลดลง การเกิดสารคาร์บอนิลนั้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวและยังมีสารอื่นๆ เพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่ butanol, 2-methylpropanal และ 3-methylbutanal (Endo *et al.*, 1977)

Tsugita และคณะ (1980) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อคุณภาพกลิ่นรสในข้าวกล้องดิบ พบว่าข้าวกล้องเก็บที่อุณหภูมิ 40 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 นาน 60 วัน มีลักษณะของข้าวเก่าโดยพบสารที่ให้กลิ่นไม่ดี ได้แก่ acetone, pentanal, hexanal, pentanol และ hexanol โดย hexanal มีปริมาณสูงสุด และพบสารดังกล่าวนี้ในปริมาณสูงกว่าข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °ซ

Shin และคณะ (1986) พบว่าการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่มีอยู่ในองค์ประกอบตามธรรมชาติ คือ โกลโคลิพิด ฟอสโฟลิพิดและนิวทรัลลิพิดในข้าวจะมีมากเมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 35 °ซ) กรดลิโนเลอิกจะเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 5 °ซ โดยปริมาณกรดลิโนเลอิกที่ลดลงจะแปรผันตรงกับปริมาณ hexanal ที่เพิ่มขึ้น

Sharp และคณะ (1986) ศึกษาผลของภาชนะบรรจุและอุณหภูมิการเก็บรักษาข้าวกล้องต่อการเปลี่ยนแปลงกลิ่นรส พบว่าข้าวกล้องที่เก็บที่อุณหภูมิ 3 °ซ มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าการเก็บข้าวกล้องที่อุณหภูมิ 22 และ 38 °ซ ตามลำดับ และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระตลอดระยะเวลา 9 เดือน ที่อุณหภูมิ 3 และ 22 °ซ ค่อนข้างคงที่ ขณะที่อุณหภูมิ 38 °ซ จะมีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ และทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสพบว่าข้าวกล้องที่บรรจุในถุงโพลีเอทิลีนและเก็บที่อุณหภูมิ 3 °ซ มีการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นรสน้อยที่สุดและไม่พบความแตกต่างของชนิดและปริมาณสารให้กลิ่นรสไม่ว่าจะมีการบรรจุข้าวในกระป๋องหรือในสถานะสุญญากาศ

### 12.3 สถานะในการเก็บรักษาข้าวดิบ

Widjaja และคณะ (1996) ศึกษาการเก็บรักษาข้าวหอมพันธุ์ Australian YRF9 ในรูปของข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสารที่อุณหภูมิ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 ที่ระดับความดันบรรยากาศ และภายใต้สภาพสุญญากาศประมาณ 150 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 3 เดือน แล้วนำข้าวเปลือกและข้าวกล้องมาขัดสีให้อยู่ในรูปข้าวสารเพื่อวิเคราะห์สารให้กลิ่นด้วย GC-MS โดยใช้ตัวอย่างข้าวก่อนเก็บรักษาเป็นตัวเปรียบเทียบ พบการเปลี่ยนแปลงของสารให้กลิ่นในข้าว (ตารางที่ 6)

การเก็บรักษาข้าวในบรรยากาศปกติมีการเพิ่มขึ้นของสารที่ให้กลิ่นไม่ดีกว่าข้าวที่เก็บในสถานะ

สูญญากาศ และโดยเฉพาะข้าวสารมีการเพิ่มของสารแอลดีไฮด์และคีโตน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่ระดับความดันบรรยากาศปกติ การเก็บข้าวในรูปข้าวเปลือกและข้าวกล้องจะมีลักษณะกลิ่นหอมคงอยู่มากกว่าการเก็บในรูปของข้าวสาร เพราะเชื้อหุ้มเมล็ดและเปลือกข้าวจะช่วยป้องกันการเกิดกลิ่นรสไม่ดี โดยการฉีกขาดของเชื้อหุ้มเมล็ดจากการขัดสีมีผลเร่งกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซิจีเนสต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันที่ทำให้เกิดกลิ่นรสไม่ดีเพิ่มขึ้นในข้าวสารหลังการเก็บจะพบปริมาณของ hexanal ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นในข้าวเก่าเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของไขมันโดยการเร่งของเอนไซม์ไลเพสและไลพอกซิจีเนส ในขณะที่ข้าวที่เก็บภายใต้สภาวะสูญญากาศจะมีองค์ประกอบกลิ่นโดยรวมลดลง เช่น 2AP มีปริมาณลดลงเหลือร้อยละ

40-50

Yoshihashi และคณะ (2005) ศึกษาการเก็บรักษาข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 5 °ซ, 20 °ซ, 25 °ซ และ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 บรรจุในถุงโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และถุงไนลอนภายใต้สภาพบรรยากาศปกติ แล้วสุ่มตรวจปริมาณ 2AP ทุกๆ สัปดาห์ พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (25 °ซ และ 30 °ซ) มีผลให้ปริมาณของ 2AP ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงการเก็บรักษา 7 สัปดาห์แรก เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ คือ LDPE ไม่สามารถป้องกันการแพร่ออกของ 2AP อีสุระที่สามารถระเหยได้ง่าย โดยยังคงมีบางส่วนของ 2AP รวมอยู่กับสตาร์ชและโปรตีนในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ขณะที่การเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ 5 °ซ ยังมีปริมาณของ 2AP คงเหลืออยู่มาก

#### ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของสารที่ระเหยได้หลักในข้าวสารใหม่และที่ผ่านการเก็บรักษา

Concentrations of major volatile compounds in fresh and stored rice

| Treatment                         | 2AP<br>(µg/kg) | n-hexanal<br>(µg/kg) | (E)-2-hexanal<br>(µg/kg) | indole<br>(µg/kg) |
|-----------------------------------|----------------|----------------------|--------------------------|-------------------|
| fresh white                       | 670            | 1,396                | 233                      | 88                |
| stored under atmospheric pressure |                |                      |                          |                   |
| paddy <sup>a</sup>                | 344            | 3,194                | 18                       | 72                |
| brown <sup>a</sup>                | 321            | 3,184                | 20                       | 44                |
| white                             | 326            | 5,066                | 31                       | 27                |
| stored under vacuum               |                |                      |                          |                   |



|                    |     |       |   |    |
|--------------------|-----|-------|---|----|
| paddy <sup>a</sup> | 307 | 535   | 4 | 39 |
| brown <sup>a</sup> | 377 | 1,217 | 8 | 65 |
| white              | 241 | 1,047 | 8 | 55 |

Note: <sup>a</sup> Paddy and brown rices dehulled and/ or milled before analysis as the resultant white rice.

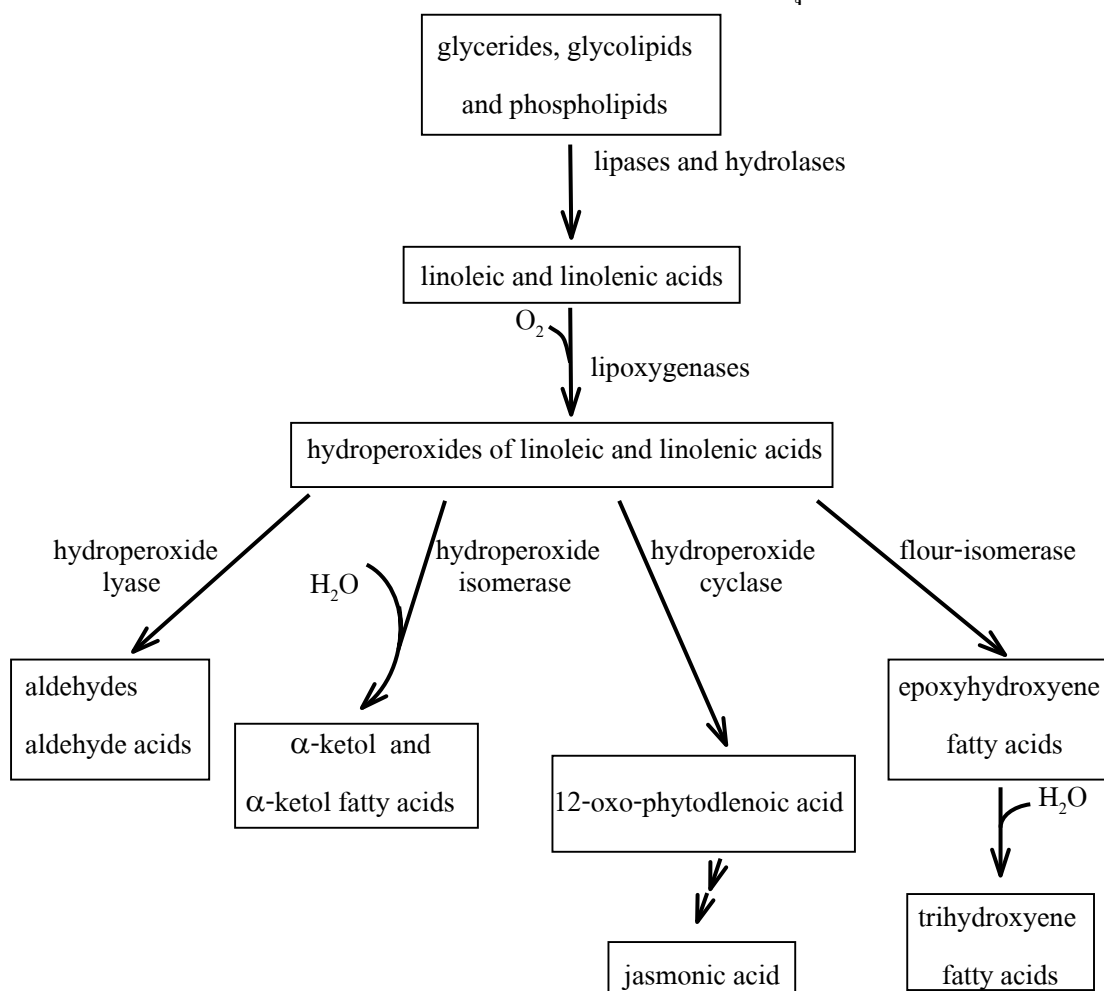
ที่มา: Widjaja และคณะ (1996)

## 12.4 เอนไซม์

เอนไซม์ไลพอกซีจีเนส (lipoxygenase, LOX) มีชื่อตามระบบ คือ linoleate: oxygen oxidoreductase, EC 1.13.11.12 พบได้ในพืชทั่วไปหลายชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง มันฝรั่ง ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าว (ปราณี อานเป็รื่อง, 2535) เป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว สารสำคัญที่ทำให้เกิดกลิ่นหืน ได้แก่ hexanal ซึ่งตรวจพบในข้าวหลังการเก็บรักษา (Yasumatsu *et al.*, 1966) เอนไซม์ไลพอกซีจีเนสมีความจำเพาะต่อพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะกรดไขมันพวกที่มี cis-cis penta-1,4-diene unit (-CH=CH-CH<sub>2</sub>-CH=CH-) เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ กรดลิโนเลอิก ลิโนเลนิก และอะราชิโดนิก ซึ่งมี diene unit มากกว่าหรือเท่ากับ 1 unit Gardner (1988) รายงานว่าไขมัน ฟอสโฟลิพิด และไกลโคลิพิดถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ไลเพสและไฮโดรเลส ได้เป็นกรดไขมันอิสระ เช่น กรดลิโนเลอิก และกรดลิโนเลนิก กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้จะถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสได้สารที่ไม่เสถียรพวกไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับองค์ประกอบอื่นๆในข้าว เช่น โปรตีนเกิดเป็นกลิ่นข้าวเก่าหรือกลิ่นหืนขึ้น (Ory และ Flick, 1992) หรือเกิดการสลายตัวต่อไปได้เป็น aldehydes และ aldehyde acids ได้จากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ hydroperoxide lyase ส่วน  $\alpha$ -ketol และ  $\alpha$ -ketol fatty acids เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ hydroperoxide isomerase และจากปฏิกิริยาการเร่งของเอนไซม์ hydroperoxide cyclase เกิดเป็น 12-oxo-phytodienoic acid ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ jasmonic acid และเอนไซม์ flour-isomerase เร่งปฏิกิริยาให้เกิดเป็น epoxyhydroxyene fatty acids ซึ่งจะถูไฮโดรไลซ์ต่อไปเป็น trihydroxyene fatty acids (ภาพที่ 9) Ida และคณะ (1983) พบว่าเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสในข้าวมี 3 ไอโซเมอร์ คือ ไลพอกซีจีเนส-1 ไลพอกซีจีเนส-2 และไลพอกซีจีเนส-3 การทำงานของเอนไซม์ดังกล่าวเกิดได้ดีที่พีเอช 4.5, 5.5 และ 7.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ Vick และ Zimmerman (1987) รายงานว่าเอนไซม์ไลพอกซีจีเนส-3 เป็นเอนไซม์หลักในการผลิต 9-ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดลิโนเลอิก ในขณะที่ ไลพอกซีจีเนส-1 และ 2 เป็นเอนไซม์รองในการผลิต 9 และ 13-ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บต่อกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซี

จินสและการทดสอบทางประสาทสัมผัสในข้าวหอมฟิลิปปินส์ โดยเก็บรักษาข้าวกล้องเป็นเวลา 3 เดือน แล้วนำมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่าข้าวหอมพันธุ์ที่มีกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจินเนสสูงจะเกิดกลิ่นหืนของข้าวเก่าอย่างชัดเจน ส่วนพันธุ์ที่มีกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจินสต่ำมีกลิ่นฟางข้าว เนื่องจากเอนไซม์ไลพอกซีจินสมีบทบาทในการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Sanchez และ Raymundo, 1991) Suzuki และคณะ (1999) ศึกษาการทำงานของเอนไซม์ไลพอกซีจินเนส-3 ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารให้กลิ่นรสในข้าวระหว่างการเก็บรักษา พบว่าเอนไซม์ไลพอกซีจินสมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดกลิ่นรสไม่พึงประสงค์ในหลายผลิตภัณฑ์ โดยกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจินเนสจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวซึ่งเป็นแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่มาก จึงเป็นสารตั้งต้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เกิดเป็น ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ โดยปริมาณกรดไขมันอิสระทั้งหมดและปริมาณกรดไขมันในเมล็ดในข้าวจำนวน 4 พันธุ์ มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ



ภาพที่ 9 การทำงานของเอนไซม์ไลพอกซีจินเนสในธัญพืช

Lipoxygenase pathways in cereals

ที่มา: Gardner (1988)

เวลาการเก็บนานขึ้น โดยปริมาณ propanal, pentanal และ hexanal ในข้าวคิบที่มีเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสอยู่มีค่าเพิ่มขึ้นมาก ขณะที่ข้าวคิบที่ไม่มีเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสจะไม่มี的增加ของสารให้กลิ่นดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าไลพอกซีจีเนส-3 เกี่ยวข้องกับการผลิตสารให้กลิ่นหืนในข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 คิบ
2. ศึกษาผลของการแปรรูปโดยใช้ความร้อนและความดันสูงต่อคุณภาพข้าวสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
3. ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาข้าวสารต่อคุณภาพข้าวสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105