

ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมโมไลต์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงทน  
ของเมล็ดข้าวสาร



นางสาวจันวิภา ภูมรินทร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF DRYING METHODS, TEMPERATURES AND AMYLOSE CONTENT ON  
PHYSICO-CHEMICAL PROPERTY AND GRAIN STRENGTH OF MILLED RICE



Miss Janwipa Pummarin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมิโลสต่อ  
สมบัติทางเคมีกายภาพและความคงทนของเมล็ดข้าวสาร

โดย

นางสาวจันจิภา ภูมิรินทร์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

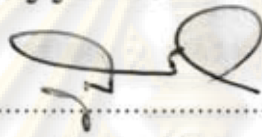
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานูนวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต




..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

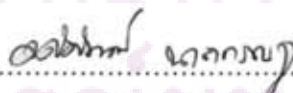


..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตูลยธัญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานูนวงศ์)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ นาดกรณกุล)



..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวณิช)

จันวิภา ภูมรินทร์ : ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและ ความคงทนของเมล็ดข้าวสาร. (EFFECTS OF DRYING METHODS, TEMPERATURES AND AMYLOSE CONTENT ON PHYSICO-CHEMICAL PROPERTY AND GRAIN STRENGTH OF MILLED RICE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม: อ.ดร.ชนิษฐา ธนานูวงศ์, 121 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อความคงทนของเมล็ดข้าวระหว่าง การขัดสี โดยศึกษาข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 วิธีการอบแห้ง 2 วิธี คือ เทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการเทมเปอรังตามด้วยการตากในที่ร่ม (FBTS) และเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม (FBS) อุณหภูมิในการ อบแห้ง 3 ระดับ คือ 90 150 และ 170 °C นำเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง มาศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวคั้น ข้าว ห้องไข่ ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (การเกิดเจลลาติโนเซชันและรีโทรเกรเดชัน) และระดับความเป็นผลึก ผลการทดลองพบว่า ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีปริมาณแอมิโลส เท่ากับ 5.18, 16.83 และ 24.60 g/100g dry flour ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วม (interactions) ระหว่างทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า มีอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส อุณหภูมิในการอบแห้ง และวิธีการอบแห้ง มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลส) และมีอิทธิพลร่วมระหว่างทั้ง 3 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวคั้น สมบัติทางความหนืด สมบัติทาง ความร้อน (การเกิดเจลลาติโนเซชันและรีโทรเกรเดชัน) และอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวห้อยไข่ อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวคั้นของข้าวทุกสายพันธุ์มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ยกเว้นข้าวพันธุ์ กข 6 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 90°C และ 150°C ไม่มีความแตกต่าง (p>0.05) วิธีการอบแห้งด้วย FBTS ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวคั้นสูงกว่า FBS ในข้าวทุกสายพันธุ์ ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวห้อยไข่ พบว่า ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลส สูงขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวห้อยไข่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวห้อยไข่มีแนวโน้มที่ ลดลง และวิธีการอบแห้งด้วย FBTS ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวห้อยไข่มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าวิธี FBS จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด ด้วย RVA พบว่าค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นและเห็นได้ชัดเจนในตัวอย่างข้าวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่าน การการอบแห้งด้วย FBTS ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดที่ลดลงมีแนวโน้มลดลงชัดเจนในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และข้าวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่าน การอบแห้งด้วย FBS และ FBTS ตามลำดับ และค่าเซตแบคมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น โดยจะเห็นผลชัดเจนในแป้งข้าว พันธุ์สุพรรณบุรี 60 มากกว่าแป้งข้าวสายพันธุ์อื่น ส่วนวิธีการอบแห้งด้วย FBTS ไม่ส่งผลต่อค่าเซตแบค อย่างชัดเจน เมื่อตรวจสอบสมบัติทางความ ร้อนจากเจลลาติโนเซชันและการหลอมผลึกแอมิโลเทคตินจากรีโทรเกรเดชันด้วย DSC พบว่าค่า  $\Delta H_{gel}$  และค่า  $\Delta H_{ret}$  มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ ในการอบแห้งสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งด้วย FBTS ทำให้ค่า  $\Delta H_{gel}$  และค่า  $\Delta H_{ret}$  ลดลงมากขึ้น ซึ่งเห็นผลชัดเจนในข้าวพันธุ์ สุพรรณบุรี 60 และข้าวพันธุ์ กข 6 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งจากเครื่อง SEM และระดับความเป็นผลึกที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วย X-ray diffraction โดยระดับความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วย FBTS จะมีระดับความเป็นผลึก ต่ำกว่าวิธี FBS ซึ่งจะเห็นลักษณะความสมบูรณ์ของเม็ดแป้งลดลงเช่นกัน การที่ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวคั้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากการหลอมเหลวของผลึก ไปบางส่วน และหรือการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันในระหว่างกระบวนการอบแห้งและการเทมเปอรัง จึงส่งผลให้เมล็ดข้าวมี ความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด สมบัติทางความร้อน ค่าระดับความเป็นผลึกและลักษณะรูปร่าง ของเม็ดแป้งที่เปลี่ยนแปลงไป

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อนิสิต..... จันวิภา ภูมรินทร์  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล  
ปีการศึกษา.....2551..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... ชนิษฐา ธนานูวงศ์

# # 4972246923 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : Rice / Drying methods / Amylose content / Physical and chemical properties / Tempering

JANWIPA PUMMARIN : EFFECTS OF DRYING METHODS, TEMPERATURES AND AMYLOSE CONTENT ON PHYSICO-CHEMICAL PROPERTY AND GRAIN STRENGTH OF MILLED RICE. PRINCIPAL THESIS ADVISOR : CHALEEDA BOROMPICHAICHATKUL, Ph.D., THESIS COADVISOR KANITHA TANANUWONG, Ph.D., 121 pp.

The objective of this research is to investigate effects of drying methods, drying temperatures and amylose content on grain strength during milling. Three paddy varieties (RD 6, KDML 105 and SR 60) were used in the experiment. The paddy was subjected to two drying methods, fluidization with tempering (FBTS) and fluidization with shade drying (FBS) at drying temperature of 90, 150 and 170°C. The changes of physical and chemical properties of paddy, including head rice yield, chalky grain, starch granule morphology, pasting properties, thermal properties (gelatinization and retrogradation characteristics) and degree of crystallinity were studied at the end of drying process. The experimental results showed that amylose content of RD 6, KDML 105 and SR 60 was 5.18, 16.83 and 24.60 g/100g dry flour, respectively. Statistical analysis showed that there were significant influence of above three main factors which were amylose content, drying temperatures and drying methods, as well as two-way (drying temperatures and amylose content) and three-way interactions of those main factors for percentage of head rice yield, pasting properties and thermal properties (gelatinization and retrogradation characteristics), but for the chalkiness of rice only the influence of above three main factors was significant. Drying at high temperatures led to increasing of head rice yield in all varieties (p<0.05), except RD 6 when drying at 90 and 150°C there was no significant (p>0.05). Drying with FBTS method, could increase head rice yield higher than drying with FBS method. Decreasing of the chalkiness of rice was seen from high drying temperature. In FBTS method, the chalkiness of rice was lower than FBS method (p<0.05). For pasting properties which was measured by using RVA, pasting temperature increased with increasing in drying temperature. It was showed clearly in RD 6 dried under FBTS method. Drying at high temperatures decreased of peak viscosity and breakdown markedly in SR 60 (FBS method) and RD 6 (FBTS method). Decreasing of setback was also a result of drying at high temperature, SR 60 showed more reduction than other varieties, while FBTS method had no clearly effect on setback. For thermal properties were measured by using DSC, It was found decreasing of  $\Delta H_{gel}$  and  $\Delta H_{ret}$  (p<0.05) when drying temperature was elevated especially drying with FBTS. Lowering of  $\Delta H_{gel}$  and  $\Delta H_{ret}$  as drying temperature increased was seen clearly in SR 60 ( $\Delta H_{gel}$ ) and RD 6 ( $\Delta H_{ret}$ ). The changes of starch granules were examined under SEM. The photograph showed partially melted of starch granules which indicated partially gelatinization occurred in some granules. The results from X-ray diffraction showed that degree of crystallinity had been decreased in all three varieties of rice. Therefore, increasing of head rice yield could be resulted from partially melting of starch granules, partially gelatinization and /or amylose-lipid complex during drying and tempering. These evidences supported the internal changes of grain which has led to strength of grain during milling.

Department .....Food Technology..... Student's signature.....  
Field of study.....Food Technology.....Principal Advisor's signature.....  
Academic year.....2008..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ โดยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนาณรงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด รวมถึงกรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ตูลย์ธัญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวิช และรองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาเสียสละเวลามาตรวจสอบ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความเสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านห้องปฏิบัติการและเครื่องมืออบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานีที่ให้ความอนุเคราะห์ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอบคุณพี่ น้องและเพื่อนๆ ปริญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน สำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอบคุณพี่เก่าที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา ผู้ที่ล่วงลับไปแล้ว รวมถึงขอกราบขอบพระคุณมารดาและครอบครัวภูมรินทร์ทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนให้ผู้วิจัยมีความอดทน ให้กำลังใจ และความหวังพร้อมทั้งสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์ให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ข้าว.....	3
2.1.1 สถานการณ์ข้าวของโลกในปัจจุบัน.....	4
2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	4
2.1.3 คุณภาพของข้าว.....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของข้าว.....	10
2.2.1 สตาร์ช.....	11
2.2.2 โปรตีน.....	15
2.2.3 ไขมัน.....	16
2.3 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช.....	17
2.4 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของแป้งข้าว .....	18
2.4.1 การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility) .....	18
2.4.2 ความหนืด.....	18
2.4.3 การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization).....	20
2.4.4 การเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation).....	21
2.5 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน (Fluidization) และการเทมเปอริง.....	21
2.5.1 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน.....	24
2.5.2 การเทมเปอริง.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและวิธีการอบแห้งด้วย เทคนิคฟลูอิดไอเซชันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงทนของเมล็ดข้าว....	26

บทที่	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ ของข้าว.....	31
3 การทดลอง.....	34
3.1 วัตถุประสงค์.....	34
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.3.1 วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในข้าว 3 สายพันธุ์.....	36
3.3.2 ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งและผลของอุณหภูมิในการอบแห้ง ข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว สายพันธุ์ต่างๆ.....	36
3.3.2.1 การเตรียมข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งด้วยเทคนิค ฟลูอิดเซชัน.....	36
3.3.2.2 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน.....	36
3.3.2.3 การตรวจสอบคุณภาพของข้าว.....	37
3.3.2.4 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	37
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
4.1 ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าว (Apparent amylose).....	38
4.2 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวตัง.....	38
4.3 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมิโลสต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่..	41
4.4 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว.....	43
4.5 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อสมบัติทางความหนืด.....	47
4.6 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการเจลาทีไนเซชัน.....	53
4.7 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการรีโทรเกรดชัน.....	59



บทที่	ณ หน้า
4.8 ผลของวิธีการอบแห้ง คุณหมูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลส ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง.....	65
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	83
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม.....	99
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	109
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุม.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121


  
**คุนย์วิทยทรัพย์ากร**  
**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

## สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
2.1	สถานการณ์การผลิตและการค้าข้าวของโลกปี 2550.....	4
2.2	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ และส่วนที่ได้จากข้าวเปลือกโดยการขัดสี...	11
2,3	การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส.....	15
3.1	รายชื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
4.1	ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าว (Apparent amylose).....	38
4.2	เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	39
4.3	เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข้ของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	42
4.4	การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	48
4.5	อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด.....	51
4.6	$T_0, T_p, T_c, (T_c - T_0)$ และ $\Delta H$ ของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์....	54
4.7	อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการ เจลลาทีโนเซชัน.....	57
4.8	$T_0, T_p, T_c, (T_c - T_0)$ และ $\Delta H$ ของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการ รีโทรเกรเดชันของแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์.....	60
4.9	$T_0, T_p, T_c, (T_c - T_0)$ และ $\Delta H$ ของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการ รีโทรเกรเดชันของแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์.....	64
4.10	ค่าระดับความเป็นผลึก (%) ของแป้งข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่อุณหภูมิและวิธีการอบแห้งที่ต่างกัน.....	66
ก.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของแป้งข้าว.....	93
ก.2	ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งที่เป็นแบบ A และแบบ V.....	98
ข.1	ความชื้นของข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการปรับความชื้น ก่อนการทดลอง.....	99
ข.2	ความชื้นของข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิค ฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ.....	99
ข.3	อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิค ฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ.....	100

ตารางที่	หน้า
ค.1 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของปริมาณแอมิโลสของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	109
ค.2 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	110
ค.3 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	111
ค.4 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความเหนียวของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	112
ค.5 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อนจากการเจลาทีไนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	114
ค.6 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อนจากการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	117

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของข้าวเปลือกทั้ง 3 ชนิด.....	3
2.2	โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	5
2.3	ลักษณะท้องไข่ของข้าว.....	8
2.4	โครงสร้างของแอมิโลส.....	11
2.5	ลักษณะเกลียวของแอมิโลส.....	12
2.6	โครงสร้างของแอมิโลเพกติน.....	13
2.7	โครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน.....	14
2.8	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A B และ V ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน.....	17
2.9	ค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่อง RVA.....	19
2.10	กลไกการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช.....	21
2.11	การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (a) และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกติน (b).....	22
2.12	ลักษณะ thermal curve ของแป้งข้าว จากเครื่อง DSC.....	23
4.1	ลักษณะรอยร้าวของเมล็ดข้าวจากการอบแห้ง.....	40
4.2	ลักษณะข้าวท้องไข่ของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ถ่ายภาพโดยเครื่อง Image Analyser.....	41
4.3	ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว โดยเครื่อง SEM.....	44
4.4	ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเก็บในที่ร้อน.....	44
4.5	ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว อบแห้งอบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริง.....	45
4.6	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	49
4.7	ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	49
4.8	ค่าความหนืดลดลงของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	50
4.9	ค่าเซตแบคของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	50
4.10	อุณหภูมิที่เริ่มต้นของการเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์.....	55

รูปที่	หน้า
4.11	คุณสมบัติที่ให้ค่า heat flow ของการเจลาทีโนเซชันสูงสุดของแป้งข้าว ทั้ง 3 สายพันธุ์..... 55
4.12	คุณสมบัติสุดท้ายของการเจลาทีโนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์..... 56
4.13	ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์..... 56
4.14	เอนทัลปีของการเจลาทีโนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์..... 57
4.15	คุณสมบัติที่เริ่มเกิดการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน..... 61
4.16	คุณสมบัติที่ให้ค่า heat flow ของการหลอมผลึกแอมิโลเพกติน จากรีโทรเกรเดชันสูงสุด..... 61
4.17	คุณสมบัติสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน... 62
4.18	ช่วงอุณหภูมิของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน..... 62
4.19	เอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน..... 63
4.20	ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์ กข 6..... 67
4.21	ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าว พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105..... 68
4.22	ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60..... 85
ก.1	ลักษณะกราฟมาตรฐานของแอมิโลสบริสุทธิ์..... 86
ก.2	เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด..... 87
ก.3	อุปกรณ์สำหรับการเทมเปอริง..... 90
ก.4	อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าว..... 91
ก.5	เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง..... 91
ก.6	เครื่องขัดข้าวชนิดหินขัด..... 91
ก.7	เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว..... 91
ก.8	ลักษณะสเปกตรัม พื้นที่ใต้พีค และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม จากการ วิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction..... 96
ก.9	ลักษณะสเปกตรัม พื้นที่ใต้พีค และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม จากการ วิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ อุณหภูมิในการอบแห้ง 150 °C และใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม..... 97

รูปที่	หน้า
ข.1	ลักษณะกราฟ RVAของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์กข 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 101
ข.2	ลักษณะกราฟ RVAของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 101
ข.3	ลักษณะกราฟ RVAของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์สุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 102
ข.4	กราฟการเกิดเจลลาทีในเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์ กข 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 103
ข.5	กราฟการเกิดเจลลาทีในเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 104
ข.6	กราฟการเกิดเจลลาทีในเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์สุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 105
ข.7	กราฟการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์ กข 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 106
ข.8	กราฟการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 107
ข.9	กราฟการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธ์สุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ..... 108

## บทที่ 1

### บทนำ

ข้าว นับว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ เพราะนอกจากเป็นอาหารหลักของคนไทยแล้วข้าวยังเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญที่สร้างรายได้เข้าประเทศปีละจำนวนมาก โดยในปี 2550 มีปริมาณการส่งออกถึง 8,6000,000 ตัน (เกษตรสหรัฐอเมริกา, 2550) ผลผลิตข้าวเปลือกส่วนใหญ่ที่ได้จากเกษตรกรจะถูกนำไปยังโรงสีข้าวเพื่อสีเป็นข้าวสารจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ การผลิตข้าวนอกจากคำนึงถึงผลผลิตแล้วยังต้องคำนึงถึงคุณภาพของเมล็ดควบคู่กันไปด้วย เนื่องจากคุณภาพข้าวเป็นปัจจัยในการกำหนดราคาข้าวซึ่งส่งผลต่อการแข่งขันทางการค้าในตลาดโลก การกำหนดมาตรฐานข้าวเพื่อการส่งออกของประเทศผู้ค้าข้าว มักใช้คุณภาพเมล็ดทางกายภาพในการจำแนกเกรดของข้าวทุกชนิดเนื่องจากมีความชัดเจนและสามารถตรวจสอบได้เร็ว มาตรการที่ใช้ในการประเมินราคาข้าวเปลือกและข้าวสารล้วนเป็นลักษณะที่มองเห็นหรือชั่ง ตวง วัดได้ รวมทั้งการตรวจสอบความยาวของเมล็ดหลังการขัดสี (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ดังนั้น คุณภาพการขัดสีข้าวเพื่อให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดปริมาณมากส่งผลให้ราคาข้าวสูงขึ้นโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ

ในการกำหนดราคาข้าวของตลาดโลก ผู้ส่งออกและผู้นำเข้าจะพิจารณาจากราคาข้าวของประเทศไทย สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย ในกรณีของข้าวคุณภาพดี ส่วนกรณีข้าวคุณภาพต่ำและปานกลาง จะพิจารณาจากราคาข้าวของประเทศไทย เวียดนาม พม่าและปากีสถาน ซึ่งราคาข้าวในตลาดโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของราคาขึ้นอยู่กับ ชนิด คุณภาพและปริมาณผลผลิต (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) ได้มีงานวิจัยชี้บ่งว่าวิธีการอบแห้ง คุณภูมิในการอบแห้งและความชื้นสุดท้าย มีผลต่อปริมาณข้าวต้นหลังการขัดสี โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงร่วมกับการเทมเปอริง สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้ (Taweerattanapanish *et al.*, 1999; Soponronnarit *et al.*, 1999 ; Cnossen and Siebenmorgen, 2000; Poomsa-ad *et al.*, 2001) แต่ยังไม่มีการศึกษาเชิงลึกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวที่ได้จากการอบแห้ง เช่น การตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน ได้แก่ การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (gelatinization) และการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด ที่ส่งผลให้ข้าวมีความคงทนในระหว่างการขัดสีมากขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณแอมิโลสอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวและสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของข้าวที่อาจส่งผลต่อความคงทนของข้าวในระหว่างการขัดสีได้

ตั้งนํ้างานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของปริมาณแอมิโลสในข้าวสายพันธุ์ต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิในการอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริงและการตากในที่ร่มต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวและความคงทนของเมล็ดข้าวระหว่างการขัดสี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

### 2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า (วงศ์ Graminae) ซึ่งเป็นพืชล้มลุก ลำต้นเป็นไม้เนื้ออ่อน มีใบชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) และมีระบบรากฝอย (fibrous root system) เจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ข้าวที่เพาะปลูกเพื่อใช้ในการบริโภคแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ *Oryza sativa* และ *Oryza glaberrima* แต่ข้าวที่นิยมปลูกในแถบเอเชียและมีการซื้อขายในตลาดโลกในปัจจุบันเป็น *Oryza sativa* เกือบทั้งหมด แบ่งเป็น 3 ชนิดย่อย (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ได้แก่

- Indica type เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดยาวเรียว ปลูกในเขตร้อน เช่น ไทย ฟิลิปปินส์ อินเดีย
- Japonica type เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดป้อมสั้น ปลูกในเขตอบอุ่น เช่น ญี่ปุ่น จีน เกาหลี สหรัฐอเมริกา
- Javanica type เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดอยู่ระหว่าง Indica type และ Japonica type ปลูกในประเทศอินโดนีเซีย



รูปที่ 2.1 ลักษณะของข้าวเปลือกทั้ง 3 ชนิด

ที่มา: ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี (2539)

### 2.1.1 สถานการณ์ข้าวของโลกในปัจจุบัน

ปริมาณการค้าข้าวของโลกในแต่ละปีไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประเทศผู้ผลิตและความต้องการบริโภคของแต่ละประเทศ ประเทศผู้ส่งออกข้าวที่สำคัญในตลาดโลกได้แก่ ประเทศไทย โดยมีปริมาณการส่งออกมากที่สุด รองลงมาคือ เวียดนาม อินเดีย สหรัฐอเมริกา ปากีสถาน และจีน (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 สถานการณ์การผลิตและการค้าข้าวของโลกปี 2550

หน่วย : ล้านตันข้าวสาร

ประเทศผู้ส่งออกปี 2550	ผลผลิต	การบริโภค	การนำเข้า*	การส่งออก
จีน	128.0	127.8	0.7	1.4
อินเดีย	92.8	87.4	-	4.5
เวียดนาม	22.7	18.5	-	4.7
ไทย	18.3	9.9	*	8.6
สหรัฐอเมริกา	6.2	4.1	0.7	3.3
ปากีสถาน	5.2	2.1	-	3.1

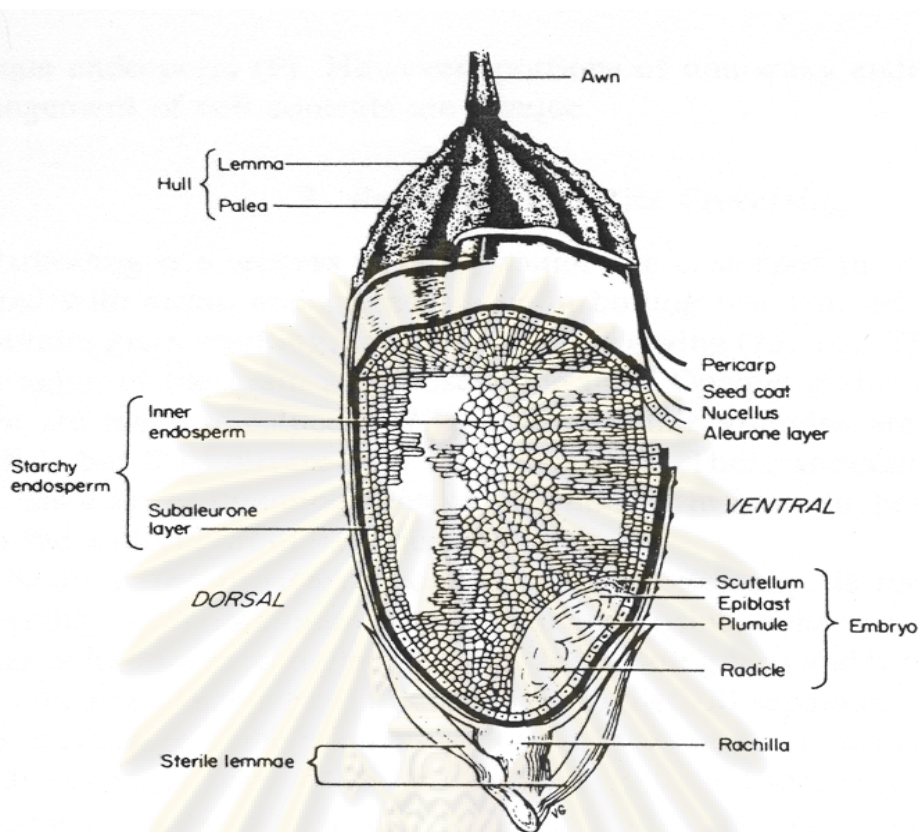
ที่มา : เกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA) เดือนกันยายน 2550

\* การนำเข้าข้าวจากการเปิดตลาดนำเข้าข้าวตามความตกลงองค์การการค้าโลก (WTO)

### 2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

อรอนงค์ นัยวิกุล (2547) ได้อธิบายโครงสร้างของเมล็ดข้าว ดังนี้ เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และส่วนเนื้อผล (caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : Juliano (1984)

**แกลบ** เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขน (pubescence) หาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบของเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel) แกลบจะมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 20% ของน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก และที่ชั้นนอกของเปลือกมี trichomes ซึ่งมีองค์ประกอบภายในส่วนใหญ่เป็น ลิกนิน (30%) เพนโตเซน (15%) และเถ้า (21%) ดังนั้นส่วนนี้จึงมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ

**ข้าวกล้อง (brown rice หรือ dehusk rice)** เป็นส่วนที่ใช้บริโภค ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ก) **เยื่อหุ้มผล (pericarp หรือ fruit coat)** เป็นส่วนผิวนอกของข้าวกล้องประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้นย่อย คือ เอพิคาร์พ (epicarp) หรือเปลือกที่อยู่นอกสุด เมโซคาร์พ (mesocarp) เป็นผนังชั้นกลาง และเอนโดคาร์พ (endocarp) เป็นเยื่อชั้นใน เยื่อหุ้มผลเหล่านี้มีลักษณะเป็นผนังเซลล์เส้นใย ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

ข) **เยื่อหุ้มเมล็ด** (seed coat หรือ tegmen) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผล ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกัน ภายใน (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมันอยู่มาก

ค) **นิวเซลลัส** (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างนิวเซลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกออกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

ง) **ชั้นแอลิวโรน** (aleurone layer) เป็นเยื่อถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น มีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนาแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ดป้อม-สั้น จะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น ชั้นแอลิวโรน เป็นชั้นที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ภายในชั้นแอลิวโรน ประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน วิตามิน และมีแป้งเล็กน้อย

จ) **เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว** (endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตหรือแป้ง แป้งข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (starch compound) กลุ่มแป้งหลายๆกลุ่ม จะรวมกันเป็นไมเซลล์ (micelles) โดยมีโปรตีนแทรกอยู่ และมีไขมันเพียงเล็กน้อย

ฉ) **คัพภะ หรือเชื้อชีวิต** (embryo) เป็นแหล่งสะสมอาหารที่อุดมด้วย โปรตีนและไขมัน โดยในส่วนของชั้นแอลิวโรนและคัพภะนี้ ไขมันจะอยู่ในลักษณะทรงกลม (spherosome) หรือ หยดน้ำมัน (oil droplet) ที่มีขนาด 0.1-1 ไมครอน (Juliano, 1985) คัพภะ จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน ต้นอ่อน เยื่อหุ้ม รากอ่อน เยื่อหุ้มต้นอ่อน ท่อน้ำ ท่ออาหาร และใบเลี้ยง ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมไปด้วยโปรตีนและไขมัน

### 2.1.3 คุณภาพของข้าว

คุณภาพของข้าวถูกกำหนดขึ้นเป็นเกณฑ์หรือมาตรฐานเพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกันสำหรับผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับข้าว ตั้งแต่ นักวิชาการ เกษตรกรผู้ปลูกข้าว เจ้าของโรงสีผู้ซื้อข้าวเปลือกมาแปรรูปเป็นข้าวสาร ผู้ค้าข้าวซึ่งจะมีทั้งผู้ค้าข้าวเปลือก ผู้ค้าข้าวสารขายข้าวให้ผู้ขายส่งและผู้ที่ย้ายปลีกที่ย้ายต่อให้ผู้บริโภค จึงจำเป็นต้องกำหนดคุณภาพเพื่อการซื้อขายโดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าว คุณภาพการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร คุณภาพเมล็ดในการหุงต้มและการรับประทาน เป็นต้น คุณภาพการขัดสีกำหนดจากการนำข้าวเปลือกมาทดลองสีเพื่อประเมินปริมาณแกลบ รำ ข้าวสารเต็มเมล็ด ข้าวต้นและข้าวหัก สิ่งสำคัญที่ใช้ในการประเมินราคาข้าวเปลือกคือ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

## คุณภาพตามมาตรฐานข้าวขาว ประกอบด้วย

2.1.3.1 ปริมาณความชื้น ตามมาตรฐานข้าวกำหนดว่าข้าวเปลือกต้องมีความชื้นไม่เกิน 14% มาตรฐานเปียก (wb) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.1.3.2 คุณภาพเมล็ดทางกายภาพ หมายถึง สมบัติต่างๆ ของเมล็ดที่สามารถมองเห็นหรือชั่ง ตวง วัดได้ (เครือข่าย อุตตะวิริยะสุข, 2536) ได้แก่

ก) น้ำหนักเมล็ด (Grain Weight) น้ำหนักเมล็ดข้าวประเมินได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำหนักต่อปริมาตร (weight per volume or density) เช่น กรัม/ลิตร หรือ กิโลกรัมต่อถัง และน้ำหนัก ต่อจำนวนเมล็ด (weight per grain) เช่น น้ำหนัก 100 เมล็ด หรือน้ำหนัก 1,000 เมล็ด เป็นต้น น้ำหนักเมล็ด เป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าว เพราะถูกควบคุมโดยลักษณะทางพันธุกรรม เป็นลักษณะคงที่มากที่สุด แปรปรวนตามปัจจัยที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของเมล็ด เช่น ชนิดของดิน ปุ๋ย การใส่ปุ๋ย ความชื้น และสภาพภูมิอากาศได้บ้าง (เครือข่าย อุตตะวิริยะสุข, 2536)

ข) สีของเมล็ดข้าวเปลือก (Hull Color) สีของข้าวเปลือกเป็นลักษณะประจำพันธุ์ สีของเมล็ดข้าวเปลือกจะแตกต่างจากเมล็ดอ่อนโดยสิ้นเชิง เมล็ดอ่อนที่มีเปลือกสีขาว เมื่อสุกอาจเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง น้ำตาลอ่อน น้ำตาลเข้ม ดำ หรือ ม่วงได้ ในทางตรงกันข้าม เมล็ดอ่อนที่มีสีแตกต่างกัน เมื่อเมล็ดแก่เปลือกอาจเปลี่ยนเป็นสีเดียวกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการแสดงออกของ Multiple Gene ที่ควบคุมลักษณะนี้อยู่ (เครือข่าย อุตตะวิริยะสุข, 2536)

ค) สีข้าวกล้อง ในเมล็ดข้าว สีข้าวกล้องจะออกที่เยื่อหุ้มผล (pericarp) ส่วน endosperm ของข้าวทุกชนิดมีสีขาวเสมอ ถึงแม้ข้าวกล้องจะเป็นสีอื่นๆ ก็ตาม ข้าวกล้องมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่ขาวแดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงเกือบดำ สีข้าวกล้องถูกควบคุมโดยยีนหลายคู่ ซึ่งแสดงออกในลักษณะต่างๆ ทั้ง complementary duplicate และอื่นๆ ข้าวกล้องที่มีแดงและม่วงมีสาร anthocyanin pigment อยู่ สีข้าวกล้องมีความสำคัญมากในทางเศรษฐกิจ ดังจะเห็นได้จากข้าวมาตรฐานสูง ราคาแพง ที่ส่งขายต่างประเทศจะไม่มีข้าวแดงปน (เครือข่าย อุตตะวิริยะสุข, 2536)

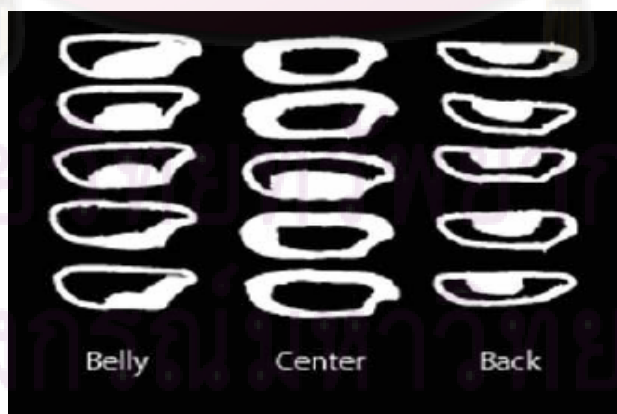
ง) ขนาดรูปร่างเมล็ด มีการปลูกข้าวในหลายทวีปทั่วโลก ทั้งในอเมริกา ยุโรป ออสเตรเลีย แอฟริกา และเอเชีย แต่พื้นที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ในเอเชียแถบประเทศอินเดีย พม่า ไทย เวียดนาม ญี่ปุ่น ไต้หวัน และเกาหลี เป็นต้น แต่ละประเทศ มีภูมิประเทศ ภูมิอากาศ วิธีการเพาะปลูก และความชอบในการบริโภคแตกต่างกัน ดังนั้นข้าวที่ปลูกอยู่ในแต่ละแห่ง จึงมีลักษณะรูปร่างเมล็ดแตกต่างกัน ขนาดรูปร่างเมล็ด หมายถึงความยาว (Length) ความกว้าง (Width) ความหนา (Thickness) และความป้อมหรือเรียวยาว (Shape) ของเมล็ด (เครือข่าย อุตตะวิริยะสุข, 2536)

จ) **ความยาวของเมล็ด** หมายถึง ระยะทางจากปลายยอดสุดของเมล็ดถึงโคนเมล็ด ความกว้างของเมล็ด หมายถึง ระยะทางส่วนที่กว้างที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ (Lemma) ถึงเปลือกเล็ก (Palea) ความหนาของเมล็ด หมายถึง ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ขนาดรูปร่างเมล็ดข้าวเป็นลักษณะแรกทางด้านคุณภาพเมล็ด ที่นักปรับปรุงพันธุ์ใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าว Indica type จะมีรูปร่างเมล็ดเรียวยาวค่อนข้างป้อม Japonica type เมล็ดจะสั้นและกลม ส่วน Javanica type เมล็ดจะกว้างและหนา (เครือวัลย์ อุตตะวีริยะสุข, 2536)

ฉ) **ความขาวของข้าวสาร (Milled Rice Whiteness)** ข้าวที่ผ่านการสีจนเป็นข้าวสาร จะมีสีขาวเสมอ เพราะเหลือส่วนที่เป็นแป้ง (Endosperm) ของเมล็ด แต่ข้าวสารอาจมีความขาวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระดับการขัดสี โดยความขาวของข้าวสารที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ทางการค้า มีค่าความขาวไม่ควรต่ำกว่า 37 (เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความขาว Kett Whiteness Meter (Kett C-300) ที่ calibrate เครื่องด้วย Standard pure white Barium Oxide ที่มีความขาว 86%) หรือความขาวสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่า 80% (Soponronnarit *et al.*, 1999) สูตรในการคำนวณค่าความขาวสัมพัทธ์ (%) คือ

$$\text{ความขาวสัมพัทธ์ (\%)} = \frac{\text{ความขาวของข้าวสารที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไต์เบด} \times 100}{\text{ความขาวของข้าวสารชุดเดียวกันที่ลดความชื้นโดยการตากในที่ร่ม}}$$

ช) **ลักษณะท้องไขของข้าว (Chalkiness of Grain)** ข้าวท้องไข มีชื่อเรียกต่างกัน เช่น ข้าวท้องปลาชิว ข้าวท้องขาว หรือข้าวจ๊กก็ เป็นต้น ท้องไขในเมล็ดข้าว หมายถึง จุดขาวขุ่นคล้ายชอล์ก ที่บวมใส เกิดจากการจับตัวกันอย่างหลวมๆ ของเม็ดแป้ง (Starch granule) กับโปรตีน (protein body) ในส่วนที่เป็นแป้งของเมล็ด (endosperm) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ลักษณะท้องไขในเมล็ดข้าว มี 3 ชนิดแสดงดังรูปที่ 2.3 คือ



รูปที่ 2.3 ลักษณะท้องไขของข้าว

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

- White Center หมายถึง ท้องไข่ที่เกิดขึ้นตรงกลาง endosperm
- White Belly หมายถึง ท้องไข่ที่เกิดขึ้นทางด้านข้างหรือ ด้านท้องของเมล็ดด้านเดียวกับ embryo
- White Back หมายถึง ท้องไข่ที่เกิดทางด้านหลังของเมล็ด ด้านตรงข้ามกับ embryo

ลักษณะข้าวท้องไข่พบได้ในข้าวเจ้าหรือข้าวที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบของสตาร์ชในข้าว สำหรับข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณแอมิโลเพกตินเกือบทั้งหมดในองค์ประกอบของสตาร์ช จะให้ลักษณะเมล็ดข้าวขาวขุ่นทั้งเมล็ดจึงไม่เห็นลักษณะข้าวท้องไข่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

### 2.1.3.3 คุณภาพการขัดสี

การสีข้าวมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเปลือก รำ และคัพภะออกจากเมล็ดข้าว ให้ได้ข้าวสาร การขัดสีที่ดีควรมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดมากที่สุด หรือมีข้าวหักน้อยที่สุด โดยผ่านกระบวนการ 4 ขั้นตอนพื้นฐาน คือ การทำความสะอาด การกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดแยก โดยปกติข้าวจะมีส่วนที่เป็นเปลือกประมาณ 20% รำข้าว 10% และเอนโดสเปิร์ม 70 % เมื่อขัดสีจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ข้าวต้น (head rice) ข้าวหัก (broken rice) และผลพลอยได้ คือ แกลบ คัพภะ รำข้าว และปลายข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

**ประสิทธิภาพการสี** หมายถึง ปริมาณผลผลิตจากข้าวเปลือกที่ได้เป็นข้าวสารเต็มเมล็ด และข้าวต้น ถ้าได้ปริมาณข้าวสารเต็มเมล็ด และข้าวต้นมาก แสดงว่ามีประสิทธิภาพการสีดี ประสิทธิภาพการสีขึ้นอยู่กับ พันธุ์ข้าว การปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสีข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

**ระดับการสี** หมายถึง ความหนักเบา หรือมากน้อยในการขัดข้าวกลั่นให้เป็นข้าวสาร สิ่งที่ได้จากการขัดคือ รำ คัพภะ และส่วนเนื้อเมล็ด โดยแบ่งระดับการสีออกเป็น 4 ระดับ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ดังนี้

- (1) สีดีพิเศษ (extra well milled) คือ การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามเป็นพิเศษ
- (2) สีดี (well milled) คือการสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามดี
- (3) สีปานกลาง (reasonably well milled) คือ การสีขัดเอารำออกเป็นส่วนมากจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพอสมควร
- (4) สีธรรมดา (ordinarily milled) คือ การสีขัดเอารำออกเพียงบางส่วน

คุณภาพการขัดสีของข้าวจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความแกร่งหรือการร้าวของเมล็ด การร้าวของเมล็ดมีสาเหตุจากการผสมข้าวที่มีความชื้นสูงกับข้าวที่ความชื้นต่ำ ข้าวที่แห้งแล้ว กลับมาเปียกฝนหรือน้ำค้าง การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและการจับตัวเป็นหยดน้ำในการเก็บรักษา (งามชื่น คงเสรี, 2545) และกระบวนการหรือขั้นตอนในการทำแห้งข้าวเปลือก

**ส่วนของเมล็ด (Parts of rice kernels)** หมายถึง ส่วนของข้าวเต็มเมล็ดแต่ละส่วนที่แบ่งตามความยาวของเมล็ดออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน (พาดิษฐ์, 2540)

**ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels)** หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ดไม่มีส่วนใดหักและให้รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป (พาดิษฐ์, 2540)

**ข้าวต้น หรือต้นข้าว (Head rice)** หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหัก แต่ไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีก ที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ ตั้งแต่ 80% ของเมล็ด (พาดิษฐ์, 2540)

**ข้าวหัก (Broken)** หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไปแต่ไม่ถึงความยาวของข้าวต้น และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีก ที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึง 80% ของเมล็ด (พาดิษฐ์, 2540) โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ทางการค้า ต้องมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์ ไม่ต่ำกว่า 80 (Soponronnarit *et al.*, 1999) สูตรในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสัมพัทธ์คือ

$$\% \text{ ข้าวต้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด}}{\text{น้ำหนักข้าวต้นของข้าวสารชุดเดียวกันที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม}} \times 100$$

## 2.2 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวมีผลจากพันธุ์ ภาวะการปลูก การเก็บเกี่ยวและกระบวนการแปรรูปเป็นข้าวสาร การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (proximate analysis) เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีหลักที่มีในข้าว คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ และส่วนที่ได้จากข้าวเปลือกโดยการขัดสี  
(กรัม / 100 กรัม)

ส่วนของข้าว	คาร์โบไฮเดรต	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใยอาหาร	เถ้า
ข้าวเปลือก	64-73	5.8-7.7	1.5-2.3	16.4-19.2	2.9-5.2
ข้าวกล้อง	73-87	7.1-8.3	1.6-2.8	2.9-3.9	1.0-1.5
ข้าวสาร	77-89	6.3-7.1	0.3-0.5	0.7-2.3	0.3-0.8
รำข้าว	34-62	11.3-14.9	15.0-19.7	24-29	6.6-9.9
แกลบ	2-34	2.0-2.8	0.3-0.8	66-74	13.2-21.0

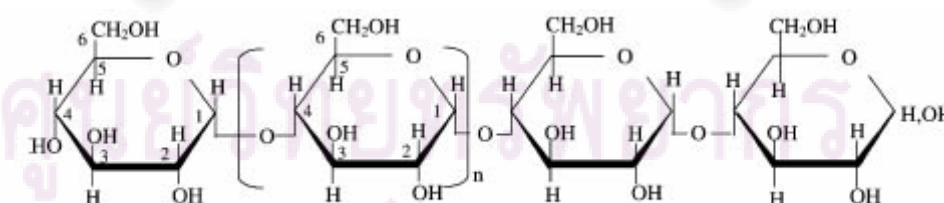
ที่มา: ดัดแปลงจาก อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

### 2.2.1 สตาร์ช

สตาร์ชเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีอยู่ในเอนโดสเปิร์ม (endosperm) อนุภาคของสตาร์ชมีขนาด 3-9 ไมโครเมตร และเป็นส่วนประกอบหลักของข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว กลุ่มของอนุภาคสตาร์ชเหล่านี้จะอยู่ในส่วนแอมิโลพลาส (amyloplast) (กล้านรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติทางด้านต่างๆ ของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (Juliano, 1972)

#### ก) แอมิโลส (amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage โครงสร้างของแอมิโลส แสดงดังรูปที่ 2.4

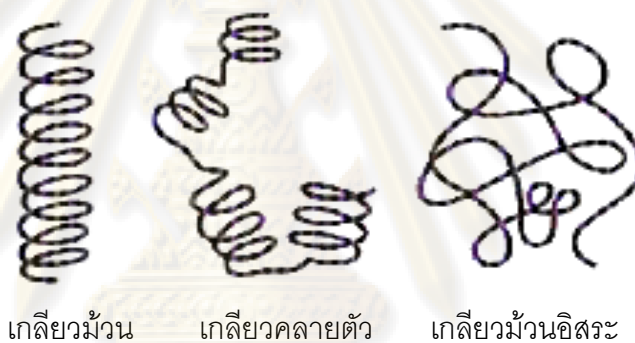


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Juliano (1972)

น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง  $10^5 - 10^6$  ดาลตัน สตาร์ชแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของแอมิโลสแตกต่างกัน ในธรรมชาติแอมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลาย จะมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวคลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง แอมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวคลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดแอมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอิสระ นอกจากนี้โครงสร้างของแอมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย โดยแอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 6,500-160,000 ดาลตัน โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (rigid coils, double helix) ส่วนแอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 และมากกว่า 160,000 ดาลตัน โมเลกุลจะเป็นเกลียวม้วนอิสระและอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler and Daniel, 1984)



รูปที่ 2.5 ลักษณะเกลียวของแอมิโลส

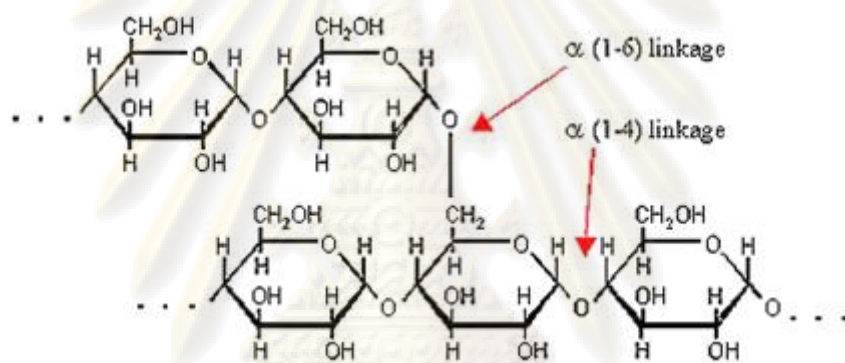
ที่มา: ดัดแปลงจาก Whistler และ Daniel (1984)

ตำแหน่งของแอมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง แอมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของแอมิโลเพกตินบางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลสสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่น กรดไขมัน surfactant และสารที่มีขั้ว (polar agent) แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน ให้สารสีน้ำเงิน ซึ่งใช้บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบได้ (Jane et al., 1999)

## ข) แอมิโลเพกติน (amylopectin)

แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านที่เป็นกลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,6-glucosidic linkage (รูปที่ 2.6) หน่วยกลูโคสที่มี  $\alpha$ -1,6-glucosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5 % ของจำนวนหน่วยกลูโคสในแอมิโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย แอมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของแอมิโลส คือประมาณ  $10^7$ – $10^9$  ดาลตัน (กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ความยาวของสายกิ่งของแอมิโลเพกตินมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกของสตาร์ช ซึ่งความยาวของกิ่งจะมีผลต่อสมบัติทางความเหนียว และสมบัติทางความร้อน ได้แก่ การเกิดเจลลาทีไนเซชัน และการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ช (Jane *et al.*, 1999)

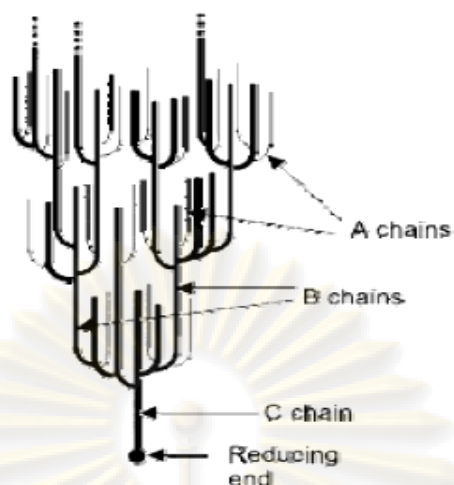


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแอมิโลเพกติน

ที่มา: Juliano (1972)

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งก้านของแอมิโลเพกติน ประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด (Zobel, 1984) (รูปที่ 2.7) ได้แก่

- 1 สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)
- 2 สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่าโครงสร้าง แอมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ B ในอัตราส่วน 1:1
- 3 สาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในแอมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน

ที่มา: Chaplin (2008)

ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก ซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วยสาย A และ สาย B ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมี DP ประมาณ 45 หน่วย ประกอบด้วยสาย B สายยาว สายเหล่านี้ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) ซึ่งในการจับกันเป็นกลุ่มของแอมิโลเพกติน ทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) โดยการเกิดเกลียวคู่ของแอมิโลเพกติน ต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรง Van der Waals ในการเชื่อมต่อกัน สายกิ่งแอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดเป็นผลึกได้ โดยสามารถเกิดได้ทั้งสายกิ่งที่อยู่ใกล้กันภายในกลุ่มก้อนเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มก้อนที่อยู่ใกล้เคียงกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลเพกตินถือว่ามีค่าสำคัญมากกว่าแอมิโลส ทั้งด้านโครงสร้างหน้าที่ และการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้น เมื่อมีแอมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

ปริมาณแอมิโลเพกตินมีผลต่อการพองตัวของสตาร์ชจากธัญชาติ (Wang and Wang, 2002) และความยาวของสายกิ่งของแอมิโลเพกตินมีผลต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันและรีโทรเกรดชัน (Jane *et al.*, 1999) โดยสตาร์ชที่ประกอบด้วยแอมิโลเพกตินที่มีความยาวของสายกิ่งสั้นกว่า จะมีอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำกว่า (Shi and Seib, 1992) นอกจากนี้ แอมิโลเพกตินที่มีความยาวของสายกิ่งมากกว่า จะมีระดับการรีโทรเกรดชันที่สูงกว่าแอมิโลเพกตินที่มีความยาวของสายกิ่งสั้นกว่า (Jane *et al.*, 1999)

ในการจำแนกประเภทข้าว นิยมใช้ปริมาณแอมิโลสเป็นเกณฑ์ แม้ว่าภายในเมล็ดข้าวจะมีปริมาณแอมิโลเพกทินมากกว่าปริมาณแอมิโลสก็ตาม (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส

ประเภทของข้าว	ปริมาณแอมิโลส	ตัวอย่างพันธุ์ข้าว
ข้าวเหนียว	น้อยกว่า 2%	ข้าวเหนียว กข 6
ข้าวแอมิโลสต่ำ	10-19%	ข้าวดอกมะลิ 105 / กข 15
ข้าวแอมิโลสปานกลาง	20-25%	สุพรรณบุรี 60 / กข 23
ข้าวแอมิโลสสูง	26-34%	สุพรรณบุรี 1 / ชัยนาท 1

ที่มา: ดัดแปลงจาก งามชื่น คงเสรี (2545)

## 2.2.2 โปรตีน

โปรตีนเป็นสารอาหารในข้าวที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากคาร์โบไฮเดรต โดยปริมาณโปรตีนในข้าวเปลือกมีเพียง 5-14 % โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งถือว่ามีความน้อยเมื่อเทียบกับคาร์โบไฮเดรต ปริมาณโปรตีนขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวและสายพันธุ์ โดยทั่วไปข้าวแต่ละสายพันธุ์จะมีปริมาณโปรตีนที่ใกล้เคียงกัน โปรตีนในข้าวประกอบด้วย อัลบูมิน (albumin) เป็นโปรตีนที่ละลายน้ำได้ โกลบูลิน (globulin) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ โปรลามีน (prolamine) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ และ oryzenin หรือกลูเตลิน (glutelin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ในกรดหรือด่างต่าง ๆ โดยในข้าวมีปริมาณกลูเตลินมากที่สุด คือประมาณ 85-90% ของโปรตีนทั้งหมด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในข้าวจึงเป็นการเปลี่ยนแปลงของกลูเตลินเป็นส่วนใหญ่ (Juliano, 1964)

โมเลกุลของโปรตีนที่รวมตัวกันอยู่เป็นรูปร่างโปรตีน (protein bodies) ซึ่งมีกลูเตลินเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในนั้นจะมี 3 รูปแบบ คือ แบบผลึก แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ ซึ่งโปรตีนที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเมล็ดจะเป็นโปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็ก ส่วนโปรตีนรูปร่างกลมขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยกว่า และจะมีมากในส่วนใจกลางของเมล็ดเท่านั้น โดยในองค์ประกอบของโปรตีนจะเป็นโปรลามีนร่วมกับกลูเตลิน สำหรับร่างแหโปรตีน (protein matrix) จะพบน้อยมากหรืออาจไม่พบเลยในเนื้อเมล็ดของข้าว ซึ่งต่างจากธัญพืชชนิดอื่น โดยถ้าพบก็จะมีลักษณะเชื่อมโยงเป็นเส้นใยโปรตีน (protein fibrils) เนื่องจากโปรตีนที่อยู่ในเนื้อเมล็ดจะแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดแป้ง มีผลต่อการเกิดเจลลาที่ในเซชันของเม็ดแป้ง โดยยับยั้งการพอง

ตัวทำให้เม็ดแป้งไม่เสียรูปร่างได้ง่าย ป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลแอมิโลสออกนอกเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดลดลง มีผลต่อลักษณะความอ่อนหรือแข็งของเจลเมื่อเย็นลง ซึ่งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

Hamaker และ Griffin (1993) พบว่าโปรตีนที่มีพันธะไดซัลไฟด์มีผลลดการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยการเพิ่มขึ้นของพันธะไดซัลไฟด์ที่เกิดจากการเชื่อมข้ามของพันธะซัลไฟด์ริล ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง และปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นมีผลยับยั้งการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ข้าวเปลือกที่มีปริมาณโปรตีนสูงเมล็ดข้าวมีความคงทนต่อการขัดสี ทำให้การขัดสีรำออกได้ยาก จึงอาจมีระดับการขัดสีต่ำ (มีรำเหลืออยู่มาก) เมื่อผ่านกระบวนการหุงต้ม ข้าวที่ได้จะมีความเหนียวน้อยลงและมีสีคล้ำ (งามชื่น คงเสรี, 2545)

### 2.2.3 ไขมัน

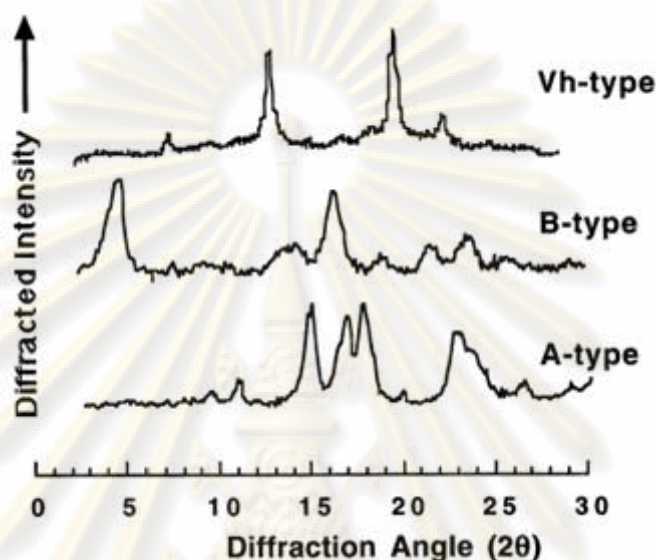
ข้าวมีไขมันประมาณ 1-3% ประเภทของไขมันในข้าวส่วนใหญ่ คือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) รองลงมา คือ ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ไกลโคลิพิด (glycolipids) และ เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ไขมันทั้งภายนอกและภายในเม็ดสตาร์ช เป็นไขมันประเภทสารประกอบมอโนแอซิล (monoacyl) ซึ่งกลุ่มของมอโนแอซิลเป็นชนิดกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) กรดไขมันในข้าวมีหลายชนิดและปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ กรดพาลมิติก (Palmitic acid 16:0) มีประมาณ 46.4-56.7% กรดโอเลอิก (Oleic acid 18:1) มีประมาณ 11.0-17.3 % และกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid 18:2) มีประมาณ 29.1-44.4% ในข้าวเหนียวพบเพียงกรดพาลมิติกเท่านั้น (Vandeputt *et al.*, 2003)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) มีผลต่อการพองตัว ความสามารถในการละลาย การเกิดเจลลิตีในเซชัน และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง (Eliasson and Krong, 1985) โดยทั่วไปสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน มีผลทำให้เม็ดแป้งพองตัวลดลง ปริมาณแอมิโลสที่ละลายได้ลดลง ความหนืดของเพสต์สตาร์ชลดลง (Jaisut *et al.*, 2008) ค่าการพองตัวที่ต่ำลงของสตาร์ชนั้น มีผลเนื่องมาจากการเกิดฟิล์มที่ไม่ละลายน้ำของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันบนผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง จึงลดการพองตัวได้ (Hoover, 1998)

Jane และคณะ (1999) พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ทำให้คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ลดลง และเม็ดแป้งมีความคงทนต่อแรงเฉือนมากขึ้น

## 2.3 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช

โครงสร้างของสตาร์ชมีลักษณะเป็นผลึกบางส่วน (semi-crystalline) ซึ่งการหลอมของส่วนผลึกและการทำลายโครงสร้างที่เป็นระเบียบนี้ เป็นส่วนสำคัญในการเกิดเจลาทีโนเซชัน แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบบ A B และ V ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน  
ที่มา : Buléon และคณะ (1998)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง X-ray diffraction พบว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชธรรมชาติมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ แบบ A พบในสตาร์ชจากธัญชาติที่มีปริมาณแอมิโลสไม่เกิน 40 % แบบ B พบในสตาร์ชจากพืชหัวและส่วนราก หรือจากพืชชนิดที่มีแอมิโลสสูง รวมทั้งสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรดแล้ว สำหรับแบบ C เป็นลักษณะที่รวมกันของแบบ A และ B พบได้ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และอีกรูปแบบหนึ่งคือ แบบ V พบได้ในสตาร์ชที่มีแอมิโลสสูงบางชนิด แต่โดยทั่วไปเป็นสตาร์ชที่เกิดเจลาทีโนเซชันแล้วและจับกับไขมันไว้ (Shelton and Lee, 2000) ดังนั้นแบบ V จึงแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชและไขมัน สำหรับความแตกต่างระหว่างแบบ A และแบบ B อยู่ที่การจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ (double helices) และจำนวนโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างผลึก (Billaderis, 1998) ดังนั้นสตาร์ชข้าวจึงมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นแบบ A ทั้งในสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้า โดยปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 15 องศา 1 พีค ตำแหน่ง 17 และ 18 องศา ซึ่งเป็นพีคที่เชื่อมกัน และพีคที่ 23 องศา 1 พีค (Buléon et al., 1998)

## 2.4 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของแป้งข้าว

### 2.4.1 การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วนผลึก (crystalline region) โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากสามารถเกิดอันตรกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วนอสัณฐานจับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วนผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น โมเลกุลในส่วนผลึกที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วนผลึกที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองตัวมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสลายมากขึ้น (Phillips and Williams, 2000; Singh *et al.*, 2006)

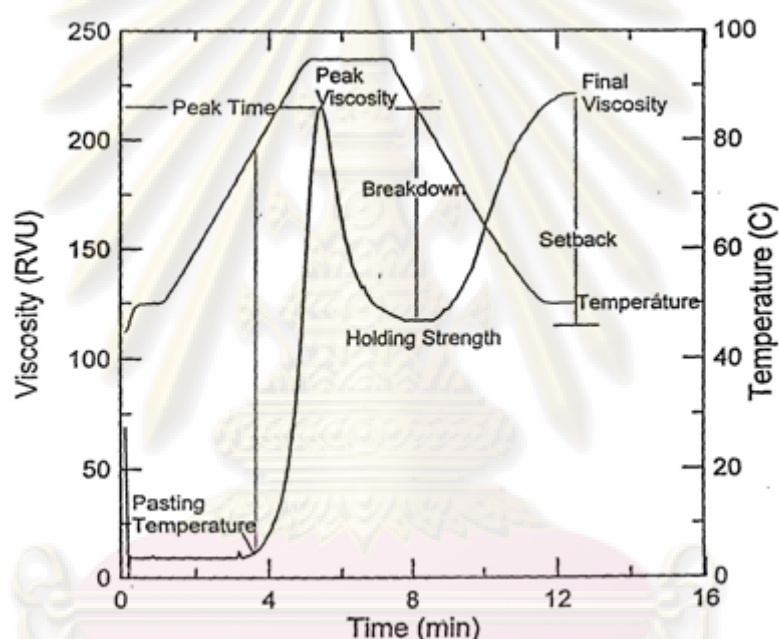
### 2.4.2 ความหนืด

เนื่องจากความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดขึ้นเมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแป้งเกิดเจลลาทีโนเซชัน ความร้อนจะทำลายพันธะในเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งดูดซึมน้ำและพองตัวขึ้นน้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อย เม็ดแป้งจึงเคลื่อนไหวได้ยาก ความหนืดจึงเกิดขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืด ได้แก่ 1) ขนาดของเม็ดแป้ง โดยขนาดของเม็ดแป้งใหญ่ จะมีกำลังการพองตัวสูงทำให้ค่าความหนืดสูงสุดสูง 2) ปริมาณแอมิโลส โดยปริมาณแอมิโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรดชัน ถ้าแป้งชนิดใดมีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูง 3) ปัจจัยภายนอก เช่น การใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกลมาก จะทำให้เม็ดแป้งแตกและมีค่าความหนืดที่ลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



เครื่องมือที่นิยมใช้วัดความหนืดของสสารระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น คือ เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) ในอุตสาหกรรมนิยมใช้เครื่อง RVA ในการควบคุมกระบวนการผสม การให้ความร้อนและลดอุณหภูมิ (Phillips and Williams, 2000) และใช้สำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะให้ความร้อน ข้อดีของเครื่อง RVA คือ สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เร็วและแม่นยำและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ รวมทั้งใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 13 นาที เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนได้ดีและใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ลักษณะกราฟ RVA ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่อง RVA

ที่มา: Singh และคณะ (2006)

ค่าที่ได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดมีดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 2 Rapid Visco Unit (RVU) ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็น °C
2. ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีหน่วยเป็น RVU
3. ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) มีหน่วยเป็น RVU
4. ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity, FV) มีหน่วยเป็น RVU

5. ค่าความหนืดลดลง (breakdown, BD) คือ ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

6. เซทแบค (setback, SB) คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

### 2.4.3 การเกิดเจลลิตินเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลลิตินเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งโดยการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งในภาวะที่มีน้ำเพียงพอ โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลงเม็ดแป้งเริ่มเกิดการพองตัว ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความเครียด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างผลึกอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปในส่วนโครงสร้างผลึก ทำให้เม็ดแป้งดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกเม็ดแป้งสลายไปเกิดเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ พร้อมกับสายโมเลกุลแอมิโลสแพร่ออกมานอกเม็ดแป้งเกิดเป็นวัญภาคต่อเนื่อง (Hermansson and Svegmarm, 1996)

Lund (1984) ได้สรุปขั้นตอนการเกิดเจลลิตินเซชันไว้ ดังนี้

1. เม็ดสตาร์ชดูดน้ำเกิดการพองตัวและเพิ่มขนาดขึ้นหลายเท่า
2. ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ของเม็ดสตาร์ชหายไป
3. สารละลายใสขึ้น
4. ความหนืดเพิ่มขึ้นจนมีความหนืดสูงสุดอย่างรวดเร็ว
5. โมเลกุลสายตรงละลายและแพร่ออกจากเม็ดสตาร์ช
6. เมื่อเพสต์เย็นตัวลงเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ (matrix gel)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลลิตินเซชันมีหลายประการ เช่น ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง ปริมาณโปรตีนและไขมัน ปริมาณแอมิโลส และความเป็นผลึกของเม็ดแป้งเนื่องจากปริมาณแอมิโลสและโครงสร้างของแอมิโลเพกติน (Hamaker and Griffin, 1993)

#### 2.4.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัวของแป้งสุก

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่แขวนลอยอยู่นั้นไม่เสถียร เพื่อทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นโมเลกุลจึงพยายามจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล (Hoseney, 1998; Sasaki, Yasui and Matsuki, 2000) โดยการพันกันเป็นเกลียวคู่ (double-helix) สายเกลียวคู่สามารถรวมตัวกันจนเป็นโครงสร้างผลึกสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเป็นลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล เรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชันและ syneresis จะทำให้เจลมีลักษณะขุ่นขาว และมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ดังแสดงในรูปที่ 2.10

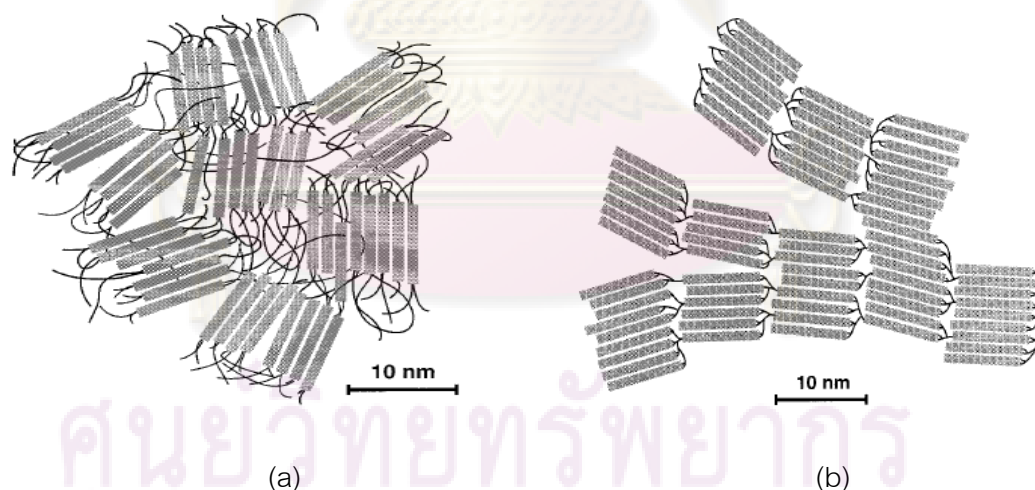


รูปที่ 2.10 กลไกการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้แตกต่างกัน โดยแอมิโลสเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลแอมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรง จึงสามารถรวมกันใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบมีความเสถียรเพิ่มขึ้น ส่วนแอมิโลเพกตินเกิดรีโทรเกรเดชันได้ช้าอาจใช้เวลาหลายวัน เนื่องจากโครงสร้างของแอมิโลเพกตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ทำให้เกิดการรวมตัวได้ยากกว่า

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส แสดงในรูปที่ 2.11 (a) เนื่องจากแอมิโลส สามารถเกิดเกลียวคู่ได้ทั้งระหว่างสายโมเลกุล (intermolecular) และภายในโมเลกุลเอง (intramolecular) เชื่อมต่อกันด้วยส่วนของออสัณฐาน เกลียวคู่ที่เกิดจากแอมิโลสเดียวกันจับกันด้วย พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ตำแหน่งที่ 6 กับอะตอมออกซิเจนของ D-glucosyl ที่เหลือที่อยู่ใกล้เคียงกัน ส่วนพันธะไฮโดรเจนที่ใช้จับกับโมเลกุลแอมิโลสสายอื่น เกิดจากการจับกันระหว่างหมู่ OH ตำแหน่งที่ 2 และหมู่ OH ตำแหน่งที่ 6 ของ glucosyl unit ของ สายโมเลกุลข้างเคียง (Tako and Hizukuri, 2000) ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกติน แสดงในรูปที่ 2.10 (b) สายเกลียวคู่ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการพันกันของสายกิ่งภายในโมเลกุล เดียวกัน หรืออาจเกิดขึ้นจากการพันกันของสายกิ่งของโมเลกุลข้างเคียง มีทิศทางการเรียงตัวใน แนวขนานกัน



รูปที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (a) และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกติน (b)

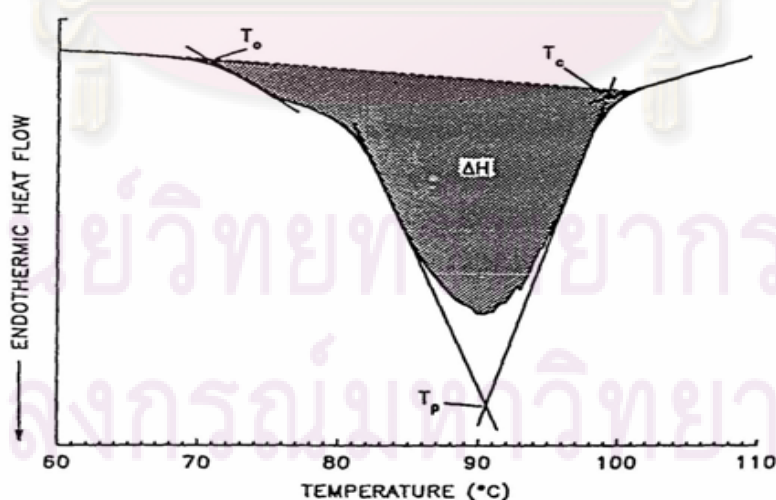
ที่มา : Putaux, Bulon และ Chaanz (2000)

Putaux และคณะ (2000) เสนอลำดับขั้นตอนการเกิดรีโทรเกรดเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ดังนี้

1. สายของโมเลกุลแอมิโลสหรือแอมิโลเพกตินเกิดอันตรกิริยา (interaction) กัน
2. สายโมเลกุลพันกันเป็นเกลียวคู่ (double helices)
3. รวมตัวกันจนเกิดลักษณะเป็นผลึก (crystallization)
4. เกิดเป็นโครงสร้างผลึกสามมิติ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรดเดชัน ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

วิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ศึกษาการเกิดเจลลิตินในเซชันและการเกิดรีโทรเกรดเดชันของแป้งข้าว คือ การวิเคราะห์ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยมีหลักการ คือ ติดตามการเปลี่ยนแปลงของ heat flow ที่เวลาต่างๆ เพื่อวัดค่าการดูดกลืนพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง และสามารถหาอุณหภูมิที่เริ่มต้น ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่ให้ค่า heat flow สูงสุด ( $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย ( $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดการดูดกลืนพลังงาน ( $T_c - T_o$ ) และเอนทัลปีของการดูดกลืนพลังงานเนื่องจากการเจลลิตินในเซชัน ( $\Delta H_{gel}$ ) หรือการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดเดชัน ( $\Delta H_{ret}$ ) จาก DSC thermogram ของแป้งข้าวได้ (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 ลักษณะ thermogram ของแป้งข้าว จากเครื่อง DSC

ที่มา : Marshall (1994)

ข้อดีของการใช้เทคนิค DSC ในการติดตามการเจลาทีไนเซชันและการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากรีโทรเกรดชันของแป้งข้าว สามารถสรุปได้ดังนี้ (Ghiasi, Hosenev and Maston, 1982; Karim, Norziah and Seow, 2000; Singh *et al.*, 2003)

1. สามารถศึกษาการเกิดเจลาทีไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรดชันของแป้งข้าวในอัตราส่วนแป้งข้าว : น้ำ ในช่วงกว้าง
2. ปริมาณน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการวิเคราะห์ เนื่องจากมีการปิดผนึกภาชนะใส่ตัวอย่างอย่างสนิท
3. วิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็ว และเทคนิคในการวิเคราะห์ไม่ยุ่งยาก
4. ใช้ปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย
5. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$
6. การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างมีความถูกต้องสูง สามารถตั้งโปรแกรมเพื่อหยุดการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆได้

ส่วนข้อจำกัดของการใช้เครื่อง DSC มีดังต่อไปนี้ (Ghiasi *et al.*, 1982; Karim *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2003)

1. ค่าใช้จ่ายทั้งเครื่องมือและภาชนะใส่ตัวอย่างสูง
2. ตัวอย่างที่ใช้ต้องเป็นตัวแทนที่ดี เนื่องจากใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย

## 2.5 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเดเซชัน (Fluidization) และการเทมเปอร์ริง (Tempering)

### 2.5.1 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเดเซชัน

คือ กระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น เช่น เมล็ดข้าวเปลือก สัมผัสกับของไหล เมล็ดหรือชิ้นของแข็งจะถูกวางไว้บนตะแกรงในหอตดลองซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหอทรงกระบอก ของไหลที่เป็นก๊าซหรือของเหลวจะถูกปล่อยมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับของแข็งอยู่ จากนั้นของไหลจะไหลผ่านชั้นของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอตดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดของแข็งเริ่มขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เนื่องจากมีการไหลเวียนของของแข็งภายในหอตดลอง (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2528)

ข้อดีของเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด (Soponronnarit, Prachayawarakorn and Wanggji, 1996)

1. วัสดุถูกทำให้ลอยตัว ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า
2. เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า และสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบได้สูงกว่าโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ
3. วัสดุมีการเคลื่อนที่คล้ายของไหล จึงทำให้สามารถนำมาใช้ทำงานแบบระบบต่อเนื่องได้
4. คุณภาพวัสดุหลังการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากวัสดุมีการผสมผสานกันระหว่างการอบแห้ง
5. สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับเม็ดของแข็งได้ง่าย โดยสิ่งปนเปื้อนที่มีน้ำหนักเบาจะลอยตามไปกับของไหล ส่วนสิ่งปนเปื้อนที่มีน้ำหนักมากจะค้างอยู่บนตะแกรง
6. ตัวเครื่องอบแห้งมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ทำให้ต้นทุนในการสร้างเครื่องต่ำลง และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย
7. ลดปัญหาการซ่อมบำรุงรักษา เพราะของแข็งเคลื่อนที่ด้วยแรงลมเป่าแทนการเคลื่อนที่ด้วยสายพานหรือเครื่องจักร

ข้อเสียของเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด (Soponronnarit *et al.*, 1996)

1. ขนาดของวัสดุมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เบด
2. เมื่อคำนวณความเร็วที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ทดลองได้แล้ว ไม่สามารถปรับความเร็วเพิ่มหรือลดได้ เนื่องจากถ้าใช้ความเร็วมากเกินไป วัสดุจะหลุดลอยออกจากหอทดลอง แต่ถ้าความเร็วน้อยเกินไป จะไม่เกิดลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด
3. ไม่สามารถใช้กับวัสดุที่เป็นยางได้ เพราะจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ และไหลตกลงมายังส่วนบนของเบด

## 2.5.2 การเทมเปอริน หรือ การเก็บในที่อับอากาศ

คือ การนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วบรรจุลงในภาชนะที่ปิดสนิท และให้ความร้อนต่อทันทีภายในตู้อบ โดยใช้อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งเป็นอุณหภูมิสำหรับการทำเทมเปอริน (สมชาติ และคณะ, 2541) เพื่อให้ความชื้นแพร่จากภายในเมล็ดมาที่ผิวของเมล็ด แต่ต้องไม่เกิดการแพร่ออกสู่บรรยากาศภายนอก (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540)

เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว มีความชื้นที่ผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางเมล็ดมาก โดยภายในเมล็ดจะมีความชื้นมากกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเทมเปอริง โดยมีวัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อให้ความชื้นภายในเมล็ดแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ด ทำให้มีความชื้นที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดมากขึ้น ความแตกต่างของความชื้น (moisture gradient) จึงลดลง เมื่อนำมาผ่านกระบวนการลดความชื้นในขั้นต่อไป จะสามารถพาความชื้นออกไปได้ง่ายกว่าจึงช่วยลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการเทมเปอริง (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540)

2. ทำให้อุณหภูมิและความชื้นที่ผิวและแกนกลางของเมล็ดแตกต่างกันน้อยลง จึงช่วยลดการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเม็ดแป้งที่ผิวนอก และการหดตัวของเม็ดแป้งภายในเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เมล็ดข้าวที่มีรอยร้าวเมื่อนำไปขัดสีจะเกิดการแตกหัก ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันลดลง (Cnossen and Siebenmorgan, 2000) ดังนั้นการเทมเปอริง จึงช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวตันได้

3. การเทมเปอริงโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เม็ดแป้งเกิดการหลอมรวมกันได้บางส่วน (partial gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งเย็นตัวลง เม็ดแป้งส่วนที่หลอมรวมกันจะเชื่อมติดกันแน่นทำให้โครงสร้างภายในของเม็ดข้าวแข็งแรงขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวตันได้ (Cnossen, Jimenez and Siebenmorgan, 2003)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงทนของเมล็ดข้าวสาร

Soponronnarit และคณะ (1999) ศึกษาแนวทางการจัดการข้าวเปลือกชื้น โดยการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน การเทมเปอริง และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณข้าวตัน และค่าความขาวของข้าวสาร คือ ระยะเวลาการเทมเปอริง อุณหภูมิที่ใช้ในการเทมเปอริง และความชื้นของข้าวเปลือกหลังอบแห้ง ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเทมเปอริงควรมีอย่างน้อย 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง



อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ และคณะ (2542) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันเพื่อเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ด โดยใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 23-31% wb อบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 140 และ 150°C จนได้ความชื้นสุดท้ายช่วง 13-29% wb จากนั้นแบ่งข้าวเปลือกหลังการอบแห้งเป็นสองส่วน ส่วนแรกปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20-30 นาที แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศเย็นภายในเครื่องอบแห้งแบบถาด จนความชื้นสุดท้ายเป็น 14% wb ส่วนที่สองนำมาเทมเปอริงเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศเย็นภายในเครื่องอบแห้งแบบถาด จนความชื้นสุดท้ายเป็น 14% wb พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 140 และ 150°C โดยไม่มีการเทมเปอริง เมื่อความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกสูงขึ้นสามารถเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดได้ โดยเพิ่มได้สูงสุดเมื่อข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 19-22% wb แต่ถ้าความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 19% wb ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดจะลดลง เนื่องจากข้าวเปลือกได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ซึ่งความร้อนส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว ส่วนการอบแห้งร่วมกับเทมเปอริงสามารถเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดได้มากกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการเทมเปอริง (ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งต่ำกว่า 19% wb) เนื่องจากการเทมเปอริงเป็นการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกโดยไม่มีการสูญเสียความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการเทมเปอริง ส่งผลให้เกิดการเจลาติไนเซชันบางส่วนขึ้นขณะเดียวกันการเทมเปอริงเป็นการยืดเวลาให้ข้าวเปลือกอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่าได้ เมื่อนำข้าวเปลือกไปขัดสี จึงได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดสูงขึ้น เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกมีความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดคือ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและการเทมเปอริง

Inprasit และ Noomhorm (2001) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจากการอบแห้งด้วยวิธีต่างกันต่อคุณภาพของข้าว ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเมล็ดแบ่ง โดยใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ความชื้นเริ่มต้น  $18 \pm 1\%$  wb และ  $26 \pm 1\%$  wb ตามลำดับ อบแห้งด้วยวิธีต่างกัน คือ 1) อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 120°C (เพื่อให้ได้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก 60°C และ 70°C) ร่วมกับการเทมเปอริง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 2) อบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45°C และ 60°C และ 3) การตากแดด จากนั้นนำมาตากในที่ร่มจนความชื้นสุดท้ายเป็น 14% wb โดยตัวอย่างควบคุม คือ ข้าวเปลือกที่ผ่านการตากในที่ร่ม พบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 120°C (อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเป็น 70°C) ร่วมกับการเทมเปอริง มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันสูงที่สุด เนื่องจากการการเทมเปอริงจะช่วยลดแรงเครียดภายในเมล็ดข้าวและลดความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวกับ

แกนกลางของเมล็ดข้าว และเกิดการหลอมรวมกันของผลึกเนื่องจากการเกิดเจลาทีไนเซชันบางส่วน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยพบว่า เม็ดแป้งมีความสมบูรณ์ลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งอื่น จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุด เนื่องจากเมล็ดข้าวมีความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น

ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร และสมชาติ โสภณภณฤทธิ (2546) ศึกษาลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยพิจารณาคุณภาพของข้าว ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข และสมบัติทางความเหนียว โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 30% wb โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 150 และ 170°C จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง โดยบรรจุภายในถุงที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนความชื้นสุดท้ายเป็น 13-15% wb พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งสูงกว่า 15%wb และเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 15% wb ซึ่งเป็นผลเนื่องจากข้าวที่ความชื้นเริ่มต้นสูงเมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งเกิดการพองตัวและเกิดเจลาทีไนเซชันบางส่วน ทำให้โปรตีนเสียหายและแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ทำให้ช่องว่างหรือรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวประสานกันอย่างสนิท เมล็ดข้าวมีลักษณะใส เหนียว และคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งสูงขึ้น สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไขได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งสูงขึ้น ให้ค่าค่าความเหนียวสูงสุด ค่าความเหนียวลดลง และ ค่าเซตแบค ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง แสดงว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อนำไปหุงสุกและปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีความแข็งต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง

Wiset, Srzednicki และ Driscoll (2003) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันต่อสมบัติทางความเหนียวของข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Langi, Amaroo และ ชัยนาท 1 ที่ความชื้นเริ่มต้น 27% wb ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 100 125 และ 150 °C จนมีความชื้นเป็น 19-20% wb จากนั้นนำข้าวเปลือกมาตากในที่ร่มจนความชื้นสุดท้ายเป็น 13% wb พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น อุณหภูมิเริ่มเกิดความเหนียวและค่าเซตแบคเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวสูงสุดและค่าความเหนียวที่ลดลงจะมีค่าลดลง

Tirawanichakul และคณะ (2004) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบต ต่อคุณภาพของข้าว ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน ค่าความขาว ค่าความแข็งของข้าวสุก ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง และสมบัติทางความร้อน โดยใช้ข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (มีปริมาณแอมิโลสสูง คือ ประมาณ 27%) และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (มีปริมาณแอมิโลสต่ำอยู่ในช่วง 14-17.8%) ความชื้นเริ่มต้น 25-32.5 % db (20-24.5% wb) อบแห้งโดยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบต จนได้ความชื้นเป็น 22.5 % db (18.4% wb) จากนั้นนำข้าวเปลือกมาเทมเปอริงเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนความชื้นสุดท้ายเป็น 16.5%db (14% wb) พบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่า 80°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า 80°C จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันเพิ่มขึ้นและค่าความขาวของข้าวลดลงเล็กน้อย ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกพิจารณาจากค่าความแข็งของข้าวสุกพบว่า ค่าความแข็งของข้าวสุกไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ กล่าวคือ อุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของข้าวสุก พบทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 40°C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 150°C ค่าความแข็งของข้าวสุกที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM พบว่าเมล็ดข้าวที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 150°C เม็ดแป้งมีความสมบูรณ์ลดลงมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Inprasit และ Noomhorm (2001) นอกจากนี้ แป้งข้าวที่ใช้ อุณหภูมิในการอบแห้ง 150°C มีค่า  $\Delta H$  ของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้น เป็นผลเนื่องจาก อุณหภูมิในการอบแห้ง และกระบวนการเทมเปอริง ที่ทำให้เกิดการหลอมรวมกันของผลึกเนื่องจากเกิดเจลลาทีโนเซชันบางส่วน ส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น

Borompichaichartkul และคณะ (2005) ศึกษาผลของผลของอุณหภูมิในการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันต่อสมบัติทางความเหนียวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 115 125 135 และ 150°C จากนั้นเทมเปอริงเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น อุณหภูมิเริ่มเกิดความเหนียวและค่าเซตแบคเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวสูงสุด ค่าความเหนียวลดลง และค่าความเหนียวต่ำสุดจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Wiset และคณะ (2003)

Jaisut และคณะ (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาการเทมเปอริงต่อคุณภาพของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความชื้น และเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน โดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้น 28.2-33.3% db (22-25% wb) อบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิโดซ์เบต โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 130°C และ 150°C จนความชื้นลดลงเหลือ 23% db (19% wb) จากนั้นนำมาเทมเปอริงเป็นเวลา 30 60 และ 120 นาที แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนความชื้นสุดท้ายเป็น 16%db (14% wb) พบว่าอุณหภูมิในการอบแห้ง 150°C มีค่า  $\Delta H$  ของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่าที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 130°C และระยะเวลาการเทมเปอริงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\Delta H$  ของการเกิดเจลลาทีโนเซชันต่ำลง และยังพบว่าข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 33.3% db (25% wb) สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันภายหลังจากกระบวนการอบแห้งและการเทมเปอริง โดยพบว่า ค่า  $\Delta H$  ของการหลอมเหลวสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 150°C และระยะเวลาการเทมเปอริง 120 นาที มีค่าสูงที่สุด สำหรับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความชื้น พบว่า ระยะเวลาการเทมเปอริงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความชื้นสูงสุด ค่าความชื้นที่ลดลงมีค่าลดลง ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความชื้นและค่าเซตแบคมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิในการอบแห้งที่และระยะเวลาในการเทมเปอริงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันสูงขึ้น เนื่องจากการหลอมรวมกันของเม็ดแป้งจะช่วยผลานรอยร้าวภายในเมล็ดข้าว ทำให้เมล็ดข้าวมีความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิโดซ์เบตโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงร่วมกับการเทมเปอริง สามารถเพิ่มปริมาณข้าวตันได้ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งจะส่งผลให้ข้าวมีความคงทนต่อการขัดสี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะของการทดลองและปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย ซึ่งความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกควรอยู่ในช่วง 24-26%wb ความชื้นหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิโดซ์เบตควรอยู่ในช่วง 18-20%wb และความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกก่อนการขัดสีควรอยู่ในช่วง 12-14%wb โดยจะนำช่วงความชื้นดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัยต่อไป

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

Chang และ Lui (1991) ตรวจสอบผลของปริมาณแอมิโลสที่มีต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวหุงสุกพันธุ์ต่างๆ คือ ข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง ข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ และข้าวกลุ่มข้าวเหนียว โดยนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 21 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันด้วยเครื่อง DSC พบว่าสตาร์ชข้าวกลุ่มที่มีแอมิโลสสูง และแอมิโลสต่ำ มีค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันสูงกว่า เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวกลุ่มข้าวเหนียว ซึ่งแสดงว่าข้าวกลุ่มที่มีแอมิโลสสูงสามารถเกิดรีโทรเกรดชันได้ดีกว่าข้าวในกลุ่มแอมิโลสต่ำ

Kim, Kim และ Shin (1997) ติดตามการเกิดรีโทรเกรดชันของแป้งข้าวเจ้า ด้วยเครื่อง DSC ที่ความเข้มข้นของแป้งต่างกันคือ 10 และ 50% โดยเก็บที่อุณหภูมิ  $-18, 2$  และ  $18^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1, 3 และ 6 วัน พบว่า แป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรดชันมากกว่า และเร็วกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ โดยแป้งที่มีความเข้มข้นสูง (50%) มีค่าการเกิดรีโทรเกรดชันสูงกว่าแป้งที่มีความเข้มข้นต่ำ (10%) จนกระทั่งถึงวันที่ 3 หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ แต่สำหรับแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำยังคงมีการเกิดรีโทรเกรดชันเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 6 ของการเก็บ

Jane และคณะ (1999) ศึกษาผลของความยาวของสายกิ่งของแอมิโลเพกตินและปริมาณแอมิโลสต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันและสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช พบว่าโครงสร้างแอมิโลเพกตินของสตาร์ชข้าวเหนียว มีความยาวเฉลี่ยของสายกิ่งสั้นกว่า และมีสายโซ่ที่สั้น (DP 6-12) ในสัดส่วนที่มากกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า ส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าทั้งนี้ เป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแอมิโลเพกตินที่มีมากกว่า

Sodhi และ Singh (2002) ศึกษาลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากพันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศอินเดีย 5 พันธุ์ ได้แก่ PR-103, IR-8, PR-106, PR-114 และ PR-113 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสเป็น 7.83, 15.62, 16.05, 16.13 และ 18.86% ตามลำดับ โดยนำข้าวเปลือกมาผ่านการขัดสีได้เป็นข้าวสาร แล้วจึงนำข้าวสารที่ได้ไปผลิตเป็นสตาร์ชข้าว จากนั้นนำสตาร์ชไปวิเคราะห์กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน พบว่าสตาร์ชจากข้าว PR-103 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด มีขนาดของเม็ดสตาร์ชและความสามารถในการละลายต่ำที่สุด แต่มีกำลังการพองตัวสูงที่สุด เมื่อ

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนด้วย DSC พบว่าสตาร์ชจากข้าว PR-103 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด มีค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  และค่าพลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชันและพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากรีโทรเกรเดชันสูงสุด ซึ่งการที่ค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ของการเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด มีค่าสูงที่สุดนั้น ชัดแย้งกับงานวิจัยของ Jane และคณะ (1999)

Vandeputte และคณะ (2003) ศึกษาผลของปริมาณแอมิโลสและความยาวของสายกิ่งของข้าวเหนียว 5 สายพันธุ์ และข้าวเจ้า 10 สายพันธุ์ ต่อการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน ด้วย DSC พบว่าเมื่อโครงสร้างของแอมิโลเพกตินมีสัดส่วนของสายโซ่ในช่วง DP 6-9 อยู่มาก จะทำให้ค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  มีค่าต่ำ และ  $T_c - T_0$  มีค่าสูง แต่ถ้ามีสัดส่วนของสายโซ่ในช่วง DP 12-22 มากกว่า ค่าของอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม ส่วนปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ต่ำลง แต่  $T_c - T_0$  มีค่าสูงขึ้น โดยพบในสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันปานกลางและสูงเท่านั้น ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันต่ำ พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีผลต่อค่า  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน มีผลทำให้  $T_0$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  มีค่าสูงขึ้น แต่  $T_c - T_0$  มีค่าต่ำลง

คำรบ สมะวรรณนะ (2546) ศึกษาผลของการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ต่อสมบัติทางความร้อน จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง RVA พบว่า เมื่อความเข้มข้นของข้าวทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดสุดท้าย มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนืดสุดท้ายของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าสูงกว่าข้าวเหนียว กข 6 เนื่องจากข้าวเจ้ามีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าข้าวเหนียว ส่วนค่าเซตแบค ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าค่าเซตแบคของข้าวเจ้าสูงกว่าข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC คือ พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าสูงกว่าของข้าวเหนียว กข 6 เมื่อเก็บที่  $4^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 14 วัน

คันสนีย์ อุดมระติ (2548) ศึกษาการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าว 4 พันธุ์โดยใช้ข้าวพันธุ์ กข 6 ขาวดอกมะลิ 105 กข 7 และเหลือง 11 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสเป็น 6.49, 20.56, 28.12 และ 36.42% ตามลำดับ โดยนำแป้งข้าวมาผลิตสตาร์ชข้าว จากนั้นนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน จากผลการทดลอง ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าพลังงานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน แต่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับ

อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน โดยปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นค่าพลังงานและอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันมีแนวโน้มสูงขึ้น ยกเว้นสตาร์ชจากข้าว กข 7 ซึ่งมีค่าพลังงานและอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันสูงที่สุด เนื่องจากสตาร์ชจากข้าว กข 7 มีโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่และมีความเป็นผลึกจากแอมิโลเพกตินที่มีสายยาวจำนวนมาก ( $DP > 100$ ) ทำให้สตาร์ชจากข้าว กข 7 ทนต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันจึงสูง

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่า ยังไม่มีการศึกษาเชิงลึกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน รวมถึงวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ได้จากข้าวต่างสายพันธุ์ อาจเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงทนของข้าวในระหว่างการขัดสีได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในที่เป็นผลจากวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมิโลสของข้าวเปลือกที่ส่งผลต่อความคงทนของข้าวในระหว่างการขัดสีได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบ

ข้าวเปลือกที่ใช้เป็นข้าวเปลือก 3 สายพันธุ์ ได้แก่

- พันธุ์ กข 6 (RD 6) จากจังหวัดเชียงราย เก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2549
- ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) จากจังหวัดมหาสารคาม เก็บเกี่ยวช่วงเดือน

ธันวาคม พ.ศ. 2549

- ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 (SR 60) จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี เก็บเกี่ยวช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2549

จำนวนสายพันธุ์ละ 30 กิโลกรัม ทั้ง 3 สายพันธุ์ มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10-13 % wb

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 รายชื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ / รุ่น / ประเทศผู้ผลิต	สถานที่ใช้
เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ตู้อบลมร้อน (Memmert)	600 / Germany	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง (Sartorius)	CP320S / Germany	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
เครื่องวัดความเร็วลม (Air- max)	SK-26A / Japan	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี



ตารางที่ 3.1 รายชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

อุปกรณ์	ยี่ห้อ / รุ่น / ประเทศผู้ผลิต	สถานที่ใช้
เครื่องกะเทาะเปลือกชนิด ลูกกลิ้งยาง (Jircas)	Jircas / Japan	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
เครื่องขีดขารชนิดหินขัด	Jircas / Japan	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว	Jircas / Japan	คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	JEOL / JSM-5400 LV/ Japan	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA)	Super 3 / Newport Scientific Instruments and Engineering / Australia	บริษัทจาร์พาเทคโนโลยีเตอร์ จำกัด
เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	Perkin-Elmer / Dimond- DSC / USA	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่อง X-ray Diffraction	Bruker axs / D8 ADVANCE /Germany	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)	Spectronic 20 / USA	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องปั่นไฟฟ้า (Blender)	Sharp/ EM-11 / Japan	
ขวดแก้วทรงกระบอกขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มีฝาปิด		
ถ้วยอลูมิเนียม		
เทอร์โมมิเตอร์		
โถดูดความชื้น		
นาฬิกาจับเวลา		

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1. วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุวรรณบุรี 60 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ตามวิธีของ Juliano, 1972) ทดลอง 3 ซ้ำ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.3.2 ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งและผลของอุณหภูมิในการอบแห้งข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวสายพันธุ์ต่างๆ

#### 3.3.2.1 การเตรียมข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน

ข้าวเปลือกทั้งหมดนำมาผ่านกระบวนการทำความสะอาดโดยผ่านเครื่องทำความสะอาดที่ใช้ลมเป่า (air-screen cleaner) คัดเอาสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟางหญ้า ฝุ่น รวมทั้งเมล็ดลีบออก ข้าวเปลือกที่ได้นำมาใส่ในกล่องพลาสติกแล้วเก็บในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4°C เพื่อรอเวลาที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ก่อนการทดลองประมาณ 10 วัน นำข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองมาหาความชื้น แล้วนำมาปรับความชื้นให้ได้ 24 - 26%wb โดยการเติมน้ำ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C คลุกเคล้าทุกวันเป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดลองนำข้าวเปลือกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิเมล็ดเท่ากับอุณหภูมิห้อง

#### 3.3.2.2 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน

อบแห้งข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ที่มีความชื้น 24 - 26% wb ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิ 90 150 และ 170 °C โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 2.5 และ 1 นาที ตามลำดับ ความสูงของเบด 9.5 เซนติเมตร ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งประมาณ 2.5 เมตร/วินาที (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3) นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาวิเคราะห์ดังนี้

- ปริมาณความชื้น โดยวิธีการอบแห้งในตู้อบลมร้อน โดยดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (1990) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

- อุณหภูมิเมล็ดของข้าวเปลือก (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน

(ความชื้นลดลงถึงระดับ 18-20% wb) มาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 นำไปเทมเปอริง โดยตั้งอุณหภูมิตู้อบให้เท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำมาตากในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรุงเทพฯ เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2550 ประมาณ 77% (เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2550) จนความชื้นลดลงถึงระดับ 12-14% wb ส่วนที่ 2 นำไปตากในที่ร่ม จนความชื้นลดลงถึงระดับ 12-14% wb ตัวอย่างควบคุม คือ

ข้าวเปลือกที่ผ่านการปรับความชื้น เป็น 24-26% wb นำมาตากในที่ร่ม จนความชื้นสุดท้ายเป็น 12-14% wb

### 3.3.2.3 การตรวจสอบคุณภาพของข้าว

นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 12-14% wb มาขัดสีแล้ว ตรวจสอบสมบัติดังนี้

- ปริมาณข้าวตัน (ตามวิธีของสุทธิณี วาณิชสำราญ, 2545) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

- ปริมาณข้าวท้องไข (ดัดแปลงจากวิธีของ Rordprapat *et al.*, 2004) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

- ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวโดยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8)

จากนั้นนำข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ที่ผ่านการขัดสี มาผลิตเป็นแป้งข้าวโดยวิธีการโม่แห้ง ด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า (Blender) โดยร่อนแป้งข้าวผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาดสม่ำเสมอโดยใช้ตะแกรง 100 เมช และนำแป้งข้าวมาตรวจสอบสมบัติ ดังนี้

- สมบัติทางความหนืด โดยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) (ตามวิธี AACC, 1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

- สมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ดัดแปลงจากวิธีของ Chang and Lin, 2006) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

- ระดับความเป็นผลึกและลักษณะผลึกของเม็ดแป้ง โดยเครื่อง X-ray Diffraction (ดัดแปลงจากวิธีของ Cheetham and Tao, 1998) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

### 3.3.2.4 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2x3x3 ในแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (2x3x3 Factorial in CRD) ปัจจัยในการทดลอง คือ 1) วิธีการอบแห้ง 2 วิธี 2) อุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ระดับ และ 3) พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน 3 สายพันธุ์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าว (Apparent amylose)

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ มีปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ ค.1) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยแป้งข้าวพันธุ์ กข 6 มีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นข้าวเหนียว ซึ่งมีปริมาณแอมิโลส เท่ากับ 5.18 g/100g dry flour ส่วนแป้งข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแอมิโลส รองลงมา คือ เท่ากับ 16.83 g/100g dry flour จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวแอมิโลสต่ำ และแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด คือ เท่ากับ 24.60 g/100g dry flour จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวแอมิโลสปานกลาง (Juliano, 1992)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าว (Apparent amylose)<sup>(A,B)</sup>

พันธุ์ข้าว	ปริมาณแอมิโลส (g/100g dry flour)
กข 6	5.18±0.49 <sup>a</sup>
ข้าวดอกมะลิ 105	16.83±0.23 <sup>b</sup>
สุพรรณบุรี 60	24.60±0.27 <sup>c</sup>

<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### 4.2 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

ข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ที่ผ่านการกระบวนการอบแห้ง เมื่อนำมาขัดสีจนเป็นข้าวสาร มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น ของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์<sup>(A,B)</sup>

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	%ข้าวต้นจากการตากในที่ร่ม	%ข้าวต้นจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับ	
			การตากในที่ร่ม	เทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ กข 6	-	28.96±1.15 <sup>abc</sup>	-	-
กข 6	90	-	27.34±0.04 <sup>a</sup>	32.76±0.48 <sup>def</sup>
กข 6	150	-	27.88±2.30 <sup>ab</sup>	34.22±2.30 <sup>fgh</sup>
กข 6	170	-	33.03±0.20 <sup>defgh</sup>	38.06±0.47 <sup>ij</sup>
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	-	32.96±0.86 <sup>defg</sup>	-	-
ขาวดอกมะลิ 105	90	-	27.92±0.43 <sup>ab</sup>	35.52±1.70 <sup>gh</sup>
ขาวดอกมะลิ 105	150	-	31.16±0.96 <sup>cde</sup>	41.74±1.35 <sup>k</sup>
ขาวดอกมะลิ 105	170	-	42.29±2.97 <sup>k</sup>	46.50±1.16 <sup>l</sup>
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์สุพรรณบุรี 60	-	30.03±0.13 <sup>bc</sup>	-	-
สุพรรณบุรี 60	90	-	26.83±0.66 <sup>a</sup>	30.38±0.68 <sup>bcd</sup>
สุพรรณบุรี 60	150	-	30.48±0.46 <sup>bcd</sup>	35.67±0.13 <sup>hi</sup>
สุพรรณบุรี 60	170	-	33.46±0 <sup>efgh</sup>	40.43±1.44 <sup>jk</sup>

<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

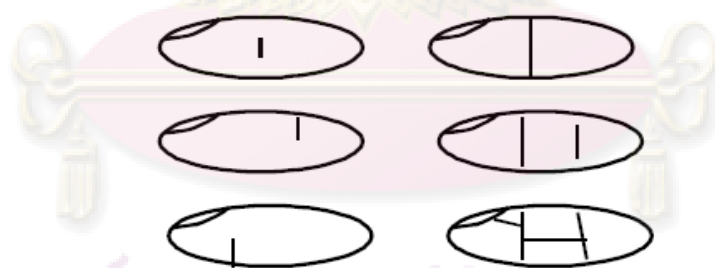
<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วม (interactions) ระหว่างวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลส ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (ตารางที่ 4.2) พบว่ามีอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยหลัก มีอิทธิพลร่วมระหว่างทั้ง 3 ปัจจัย และมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลส อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ ค.2) โดยอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวทุกสายพันธุ์มีค่าสูงขึ้น ยกเว้นข้าวพันธุ์ กข 6 (มีปริมาณแอมิโลสต่ำมาก) เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง

90°C และ 150°C ไม่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน เนื่องมาจากการเกิดเลาที่โนเซชันหรือการหลอมเหลวบางส่วนในเมล็ดข้าวเปลือก (สุทธิณี วานิชสำราญ, 2545; Meeso *et al.*, 2004) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tirawanichakul และคณะ (2004) ที่พบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่า 80°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ( $p>0.05$ ) ในขณะที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า 80°C จะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Taweerattanapanish และคณะ (1999) และ Poomsa-ad และคณะ (2001) พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริง มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันสูงกว่า หรือใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากการเทมเปอริง เป็นกระบวนการพักข้าวที่ทำให้ความชื้นแพร่จากภายในเมล็ดมาที่ผิวของเมล็ดอย่างช้าๆ ทำให้อุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดที่บริเวณผิวและแกนกลางแตกต่างกันน้อยลง ความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงการอบแห้งน้อยลง ซึ่งลดการแตกร้าวของเมล็ดข้าว (Cnossen and Siebenmorgen, 2000 ; Poomsa-ad *et al.*, 2005) เมื่อนำมาขัดสีทำให้เมล็ดข้าวเปลือกแตกหักน้อยลงและได้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันเพิ่มขึ้น

การร้าวของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งและภายหลังการอบแห้งสิ้นสุดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกต่างของความชื้นและอุณหภูมิภายในและที่ผิวนอกของเมล็ด (Cnossen and Siebenmorgen, 2000) การร้าวของเมล็ดข้าว แสดงดังรูปที่ 4.1



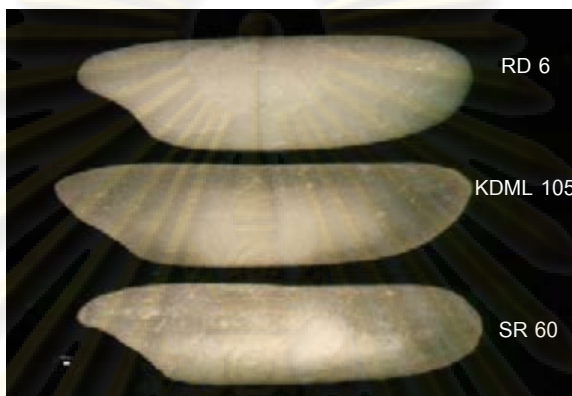
รอยร้าวบริเวณผิวเมล็ด รอยร้าวภายในเมล็ด

รูปที่ 4.1 ลักษณะรอยร้าวของเมล็ดข้าวจากการอบแห้ง

ที่มา : Cnossen, Jimenez และ Siebenmorgen (2003)

#### 4.3 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และปริมาณแอมิโลสต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข

ข้าวท้องไข เป็นจุดขุนขาว ทึบแสงภายในเมล็ดข้าว เกิดจากการจับตัวกันอย่างหลวมๆ ของเม็ดแป้ง (Starch granule) กับโปรตีน (protein body) ในส่วนที่เป็นเนื้อของเมล็ด (endosperm) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ลักษณะการเป็นท้องไขของข้าว ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง Image Analyser ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะข้าวท้องไขของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ถ่ายภาพโดยเครื่อง Image Analyser RD KDML และ SR หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ

ลักษณะความเป็นท้องไข จะพบในข้าวเจ้าหรือข้าวที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบของสสารภายในเมล็ดข้าว จากรูปที่ 4.3 พบว่า ข้าวพันธุ์ กข 6 ซึ่งเป็นข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลเพกตินเกือบทั้งหมดในองค์ประกอบของสสารภายในเมล็ดข้าว จะให้ลักษณะเมล็ดที่ขาวขุ่นและทึบแสงอยู่แล้ว จึงไม่เห็นลักษณะความเป็นท้องไข (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ของข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์<sup>(A,B)</sup>

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	%ข้าวท้องไข่จากการตากในที่ร่ม	%ข้าวท้องไข่จากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับ	
			การตากในที่ร่ม	เทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ กข 6	-	-	-	-
กข 6	90	-	-	-
กข 6	150	-	-	-
กข 6	170	-	-	-
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	-	0.020±0.020 <sup>abc</sup>	-	-
ขาวดอกมะลิ 105	90	-	0.013±0.008 <sup>ab</sup>	0.008±0.008 <sup>a</sup>
ขาวดอกมะลิ 105	150	-	0.010±0.005 <sup>a</sup>	0.007±0.006 <sup>a</sup>
ขาวดอกมะลิ 105	170	-	0.008±0.006 <sup>a</sup>	0.007±0.003 <sup>a</sup>
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์สุพรรณบุรี 60	-	0.037±0.006 <sup>de</sup>	-	-
สุพรรณบุรี 60	90	-	0.043±0.003 <sup>e</sup>	0.025±0.005 <sup>bcd</sup>
สุพรรณบุรี 60	150	-	0.032±0.008 <sup>cde</sup>	0.002±0.000 <sup>abc</sup>
สุพรรณบุรี 60	170	-	0.025±0.005 <sup>bcd</sup>	0.020±0.009 <sup>abc</sup>

<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



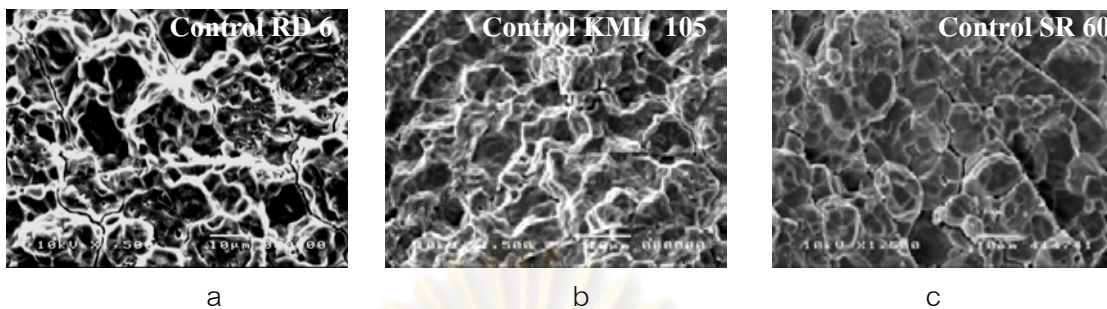
เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลส ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข (ตารางที่ 4.3) พบว่า มีอิทธิพลจากทั้ง 3 ปัจจัยหลักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แต่ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างทั้ง 3 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) (ตารางภาคผนวกที่ ค.3) โดยข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไขมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเครือข่าย อุตตะวีริยะสุข (2536) ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะความเป็นท้องไขของข้าวบางสายพันธุ์ในประเทศไทย พบว่าลักษณะความเป็นท้องไขของข้าวถูกควบคุมด้วยลักษณะทางพันธุกรรม และเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เช่น ข้าวสายพันธุ์ WP 65 เป็นข้าวท้องไขน้อยทุกแหล่งที่เพาะปลูก และทุกระดับปุ๋ยไนโตรเจน นอกจากนี้ยังได้จัดประเภทข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ว่าเป็นข้าวที่มีท้องไขน้อย

ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไขมีแนวโน้มที่ลดลง และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไขมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง สอดคล้องกับงานวิจัยของ วัทัญญ รอดประพัฒน์ และคณะ (2546) ที่พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง  $150^{\circ}\text{C}$  สามารถลดเปอร์เซ็นต์ความเป็นท้องไข ได้มากกว่าที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง  $130^{\circ}\text{C}$

ข้าวท้องไข จัดเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่บ่งบอกคุณภาพและราคาของข้าวเปลือก เนื่องจากเมล็ดข้าวที่มีลักษณะเป็นท้องไขมาก เมื่อนำไปขัดสีจะทำให้เมล็ดหัก ดังนั้นลักษณะการเป็นท้องไขของข้าวจึงมีผลต่อคุณภาพการขัดสีโดยตรง นอกจากนี้ลักษณะการเป็นท้องไขของข้าวยังเป็นลักษณะที่บ่งบอกถึงคุณภาพในลักษณะปรากฏแก่ผู้บริโภคซึ่งส่วนใหญ่ต้องการเมล็ดข้าวสารที่ใสมากกว่าข้าวสารที่มีจุดขุนขาวภายในเมล็ด (สมชาติ ไสภณวรรณฤทธิ์ สมเกียรติ ปรัชญาวารการ และชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, 2550)

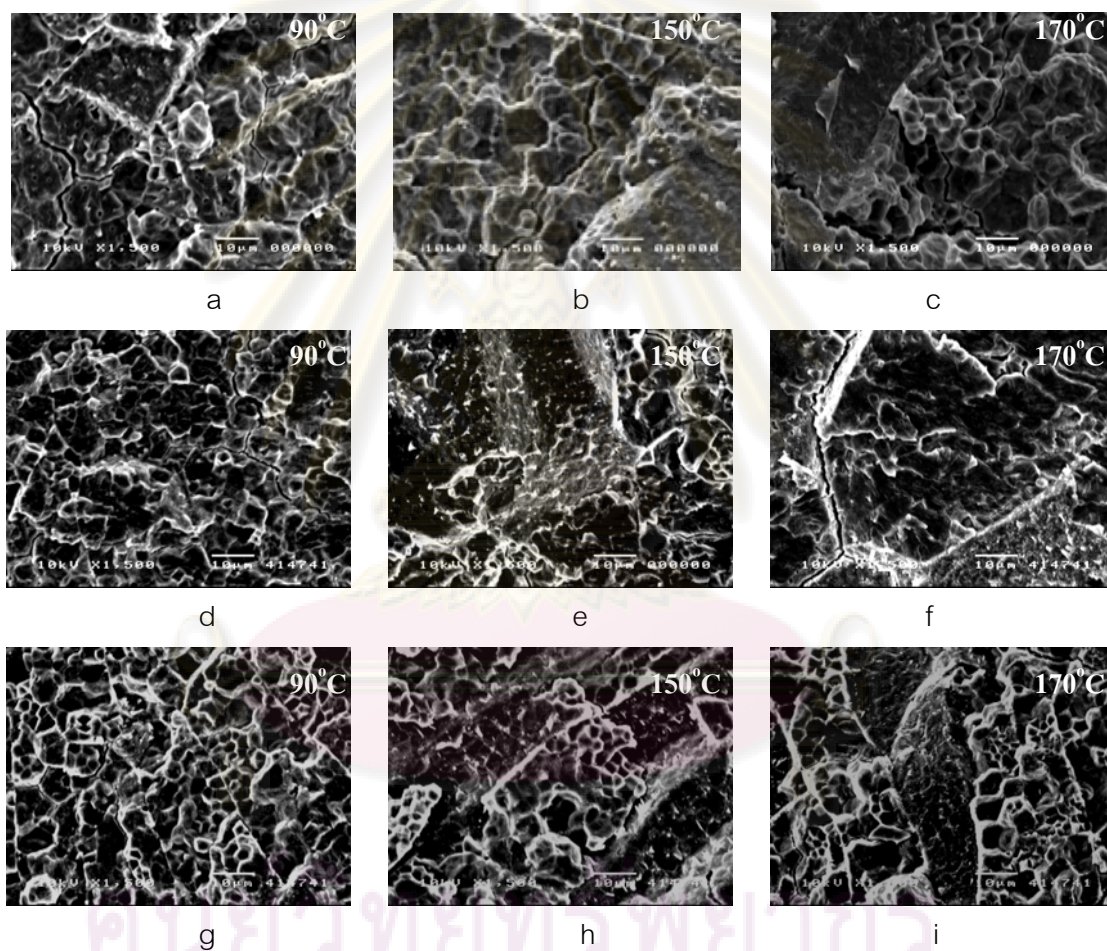
#### 4.4 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว

ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวของตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (รูปที่ 4.3 a-c) จะเห็นได้ว่าลักษณะของเม็ดแป้งยังคงมีความสมบูรณ์ สามารถเห็นเหลี่ยมคมชัดเจน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้ง 3 สายพันธุ์ เนื่องจากเม็ดแป้งไม่ได้สัมผัสกับความร้อนสูง



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว โดยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1500 เท่า

a b c คือ ตัวอย่างควบคุมของข้าวพันธุ์ กข 6 ข้าวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ

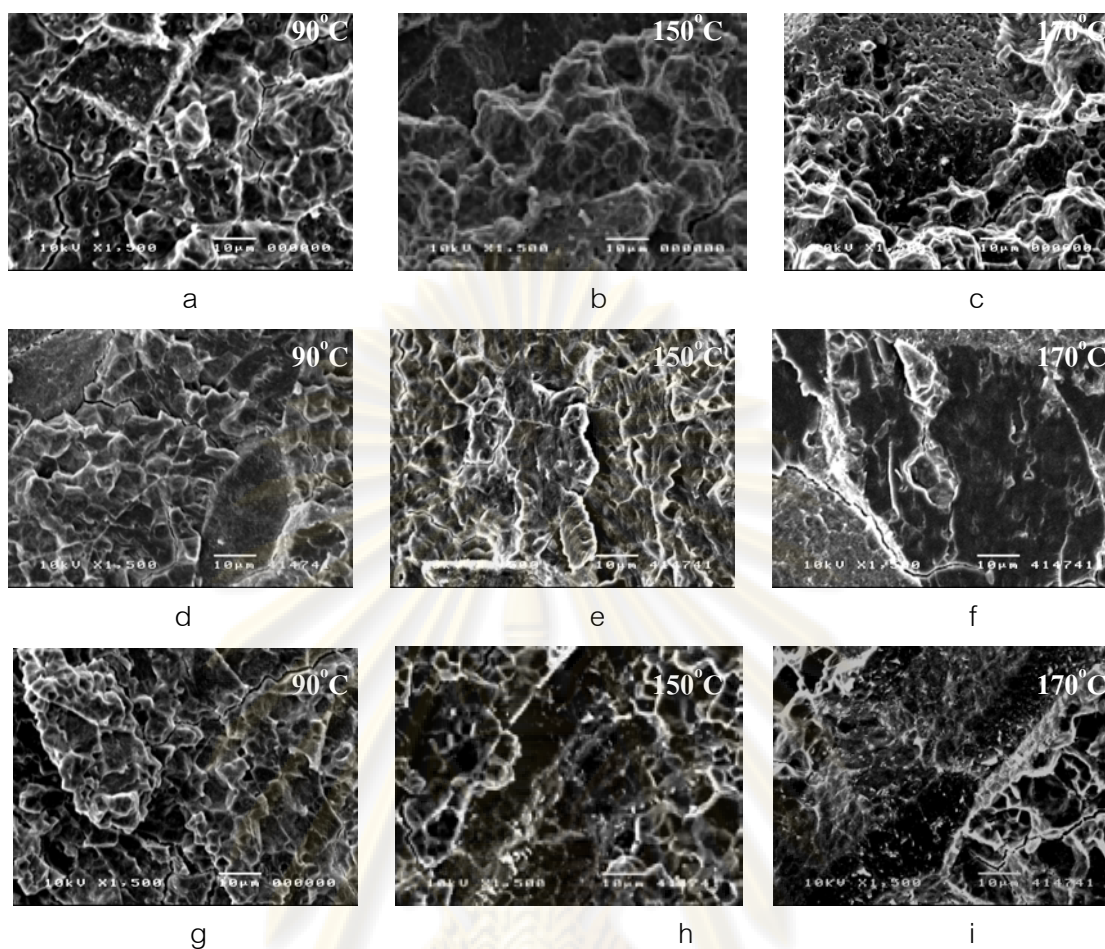


รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเก็บในที่ร้อน โดยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1500 เท่า

a b c คือ ข้าวพันธุ์ กข 6 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ

d e f คือ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ

g h i คือ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว อบแห้งอบด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง โดยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1500 เท่า

- a b c คือ ข้าวพันธุ์ กข 6 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ  
 d e f คือ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ  
 g h i คือ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง เป็น 90 150 และ 170 °C ตามลำดับ

ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 อุณหภูมิของเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไอเซชัน อยู่ในช่วง 79-83°C (ตารางที่ ข.3) ซึ่งเพียงพอต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันในภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างต่ำ (24-26% wb) (ตารางที่ ข.1) จึงไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึง อดุมระติ และคณะ (2546) ศึกษาผลของปริมาณน้ำต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันด้วยเครื่อง DSC ของแป้งข้าว 3 สายพันธุ์ ได้แก่ แป้งข้าวพันธุ์ กข 6 (ปริมาณแอมิโลส 5.64 g/100g dry flour) พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ปริมาณแอมิโลส 17.46 g/100g dry flour) และพันธุ์เหลือง 11 (ปริมาณแอมิโลส 34.23 g/100g dry flour)

โดยวิเคราะห์การเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวที่ผสมน้ำ ในอัตราส่วนน้ำ : ตัวอย่างแป้ง ข้าวเป็น 30:70 40:60 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 โดยน้ำหนักแห้ง แป้งข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์เหลือง 11 ความชื้นเริ่มต้นเป็น 12.53 10.63 และ 10.78% wb ตามลำดับ พบว่าแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ จำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งเพื่อให้เริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน ปริมาณดังกล่าวเท่ากับ 31.35 28.03 และ 28.95% ตามลำดับ นอกจากนี้ จำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำอย่างน้อย 58 59 และ 60% ตามลำดับ จึงจะเกิดเจลลาทีโนเซชันได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนับสนุนสมมติฐานที่ว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างต่ำ (24-26 % wb) (ตารางที่ ข.1) ร่วมกับการเทมเปอรัง ทำให้ผลึกของเม็ดแป้งเกิดการหลอมรวมกันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้  $\Delta H_{gel}$  มีค่าลดลง (Inprasit and Noomhorm; 2001 Tirawanichakul *et al.*, 2004; Jaisut *et al.*, 2008)

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเม็ดแป้งเนื่องจากการหลอมรวมกันของผลึกภายใน โครงสร้างของเมล็ดข้าว จะเห็นแนวโน้มชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นและใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอรัง (ดังแสดงในรูปที่ 4.5) โดยพบลักษณะความสมบูรณ์ของเม็ดแป้งลดลง (เห็นเหลี่ยมมุมของเม็ดแป้งน้อยลง) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tirawanichakul และคณะ (2004) ที่ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 25-32.5 %db (20-24.5 % wb) ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 40-150°C ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดแป้ง พบว่าอุณหภูมิ 40-90°C จะทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเมล็ดระหว่าง 35-75°C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 100-150°C ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเมล็ดระหว่าง 83-89°C ซึ่งการอบแห้งโดยอุณหภูมิสูงกว่า 90°C ทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกสูงถึงระดับที่ทำให้เกิดเจลลาทีโนเซชันขึ้น แต่เกิดขึ้นเพียงบางส่วนเท่านั้น

การหลอมรวมกันของเม็ดแป้งเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเจลลาทีโนเซชันบางส่วนขึ้นนี้ ส่งผลให้แอมิโลสและโปรตีนบางส่วนแพร่ออกนอกเม็ดแป้ง แทรกซึมไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดแป้ง ทำหน้าที่เหมือนซีเมนต์ช่วยเชื่อมเม็ดแป้งให้ยึดติดกันแน่นขึ้น และลดรอยร้าวภายในเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวเปลือกไปขัดสี จึงมีปริมาณข้าวหักลดลง เนื่องจากเมล็ดข้าวมีความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น (วิศิธา อิมภาประเสริฐ, 2549)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติทางความหนืด

ความหนืดจัดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดอย่างหนึ่งของแป้งข้าว เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้งในสถานะที่มีน้ำและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ได้แก่ การให้ความร้อนและการทำให้เย็น การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง RVA เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ประเมินและติดตามสมบัติทางความหนืดในขณะที่แป้งได้รับความร้อน รวมทั้งความคงตัวของสารละลายแป้งเมื่อเริ่มให้ความเย็น โดยมีการลดอุณหภูมิลงจาก 95 °C เป็น 50 °C (รุ่งนภาพงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546)

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าว จากการทดลอง พบว่าการให้ความร้อนในช่วงแรก (50-70°C) แป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ไม่มีความหนืดเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่เม็ดแป้งเริ่มดูดน้ำ (Phillips and Williams, 2000) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 75-95 °C ความหนืดของแป้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งพองตัวได้มากขึ้นและมีส่วนที่ละลายน้ำได้ละลายออกมานอกเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น (คันสนีย์ อุดมระติ, 2548) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature, PT) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity, PV) ค่าความหนืดลดลง (breakdown, BD) และค่าเซตแบค (setback, SB) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6-4.9 ตามลำดับ และลักษณะกราฟ RVA ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซนชันที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ ข. 1-3

ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์<sup>(A,B)</sup>

ตัวอย่าง <sup>c</sup>	PT (°C)	PV (RVU)	BD (RVU)	SB (RVU)
Control RD	69.20±0.64 <sup>ab</sup>	254.50±0.25 <sup>k</sup>	127.60±2.06 <sup>g</sup>	34.42±5.31 <sup>c</sup>
RD-90-S	67.58±0.60 <sup>a</sup>	192.71±2.42 <sup>ef</sup>	90.96±0.53 <sup>e</sup>	25.46±0.41 <sup>ab</sup>
RD-150-S	70.03±0.53 <sup>bcd</sup>	203.34±4.83 <sup>g</sup>	125.80±5.48 <sup>g</sup>	19.34±1.18 <sup>a</sup>
RD-170-S	69.63±0.04 <sup>bc</sup>	213.84±3.30 <sup>h</sup>	88.67±0.71 <sup>e</sup>	22.00±0.47 <sup>ab</sup>
RD-90-T+S	71.25±0.07 <sup>cd</sup>	230.00±0.35 <sup>i</sup>	111.90±4.48 <sup>f</sup>	23.54±0.65 <sup>ab</sup>
RD-150-T+S	71.73±1.59 <sup>de</sup>	193.25±2.94 <sup>f</sup>	80.46±0.88 <sup>d</sup>	26.54±0.41 <sup>b</sup>
RD-170-T+S	73.15±0.49 <sup>e</sup>	144.71±0.06 <sup>b</sup>	48.34±0.94 <sup>b</sup>	21.67±1.18 <sup>ab</sup>
Control KDML	75.55±0.57 <sup>f</sup>	318.09±3.06 <sup>l</sup>	162.00±2.30 <sup>h</sup>	97.55±0.53 <sup>efgh</sup>
KDML-90-S	83.45±1.70 <sup>g</sup>	239.67±7.19 <sup>j</sup>	88.59±1.29 <sup>e</sup>	89.89±1.39 <sup>gh</sup>
KDML-150-S	87.00±1.20 <sup>hijkl</sup>	213.38±0.29 <sup>h</sup>	72.71±0.88 <sup>c</sup>	93.96±1.00 <sup>defg</sup>
KDML-170-S	86.95±1.20 <sup>hijk</sup>	206.59±0.94 <sup>gh</sup>	71.50±1.65 <sup>c</sup>	100.20±0.42 <sup>d</sup>
KDML-90-T+S	85.05±0.71 <sup>gh</sup>	223.42±8.80 <sup>i</sup>	84.21±1.59 <sup>de</sup>	96.13±1.00 <sup>defgh</sup>
KDML-150-T+S	85.85±0.57 <sup>hi</sup>	230.67±3.42 <sup>i</sup>	90.22±7.35 <sup>e</sup>	95.69±1.61 <sup>defgh</sup>
KDML-170-T+S	87.41±1.69 <sup>ijklm</sup>	188.67±2.24 <sup>ef</sup>	53.17±1.06 <sup>b</sup>	91.37±0.88 <sup>de</sup>
Control SR	86.60±0.49 <sup>hij</sup>	183.88±0.53 <sup>e</sup>	50.33±4.24 <sup>b</sup>	126.90±5.18 <sup>k</sup>
SR-90-S	87.28±0.39 <sup>ijkl</sup>	173.92±4.95 <sup>d</sup>	52.92±0.47 <sup>b</sup>	119.20±0.64 <sup>j</sup>
SR-150-S	88.98±0.46 <sup>m</sup>	142.46±9.60 <sup>b</sup>	26.88±5.83 <sup>a</sup>	101.60±7.13 <sup>h</sup>
SR-170-S	88.30±0.42 <sup>klm</sup>	122.96±1.47 <sup>a</sup>	27.71±2.77 <sup>a</sup>	93.04±2.88 <sup>def</sup>
SR-90-T+S	86.13±0.44 <sup>hi</sup>	165.34±2.35 <sup>c</sup>	55.00±5.54 <sup>b</sup>	128.00±3.64 <sup>k</sup>
SR-150-T+S	88.73±0.88 <sup>klm</sup>	131.13±4.53 <sup>a</sup>	28.84±6.60 <sup>a</sup>	109.60±4.45 <sup>i</sup>
SR-170-T+S	89.33±0.04 <sup>m</sup>	124.42±1.18 <sup>a</sup>	26.25±1.41 <sup>a</sup>	98.75±0.00 <sup>fgh</sup>

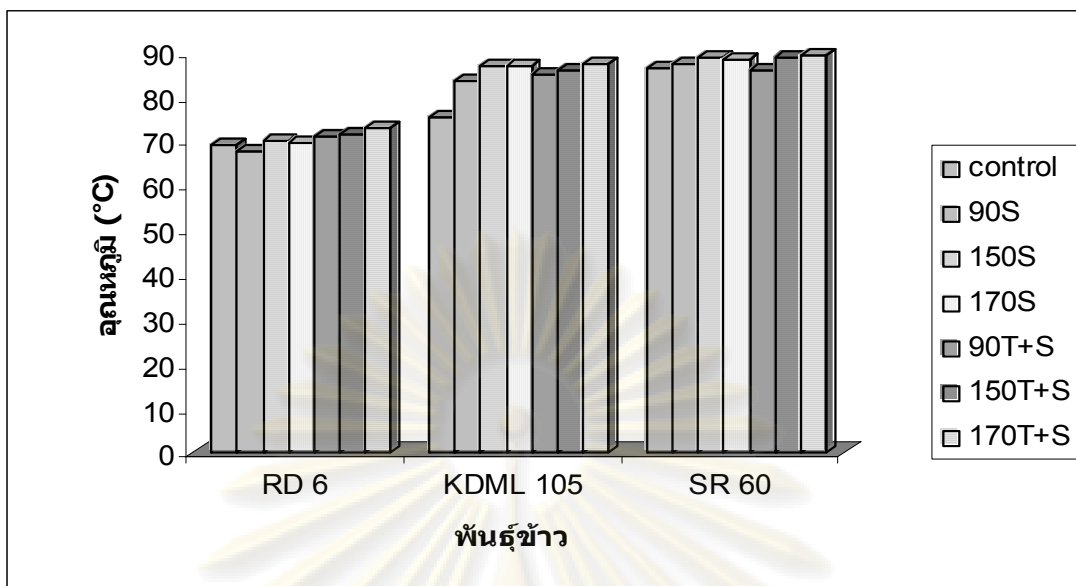
<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<sup>C</sup> RD KDML และ SR หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ  
ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

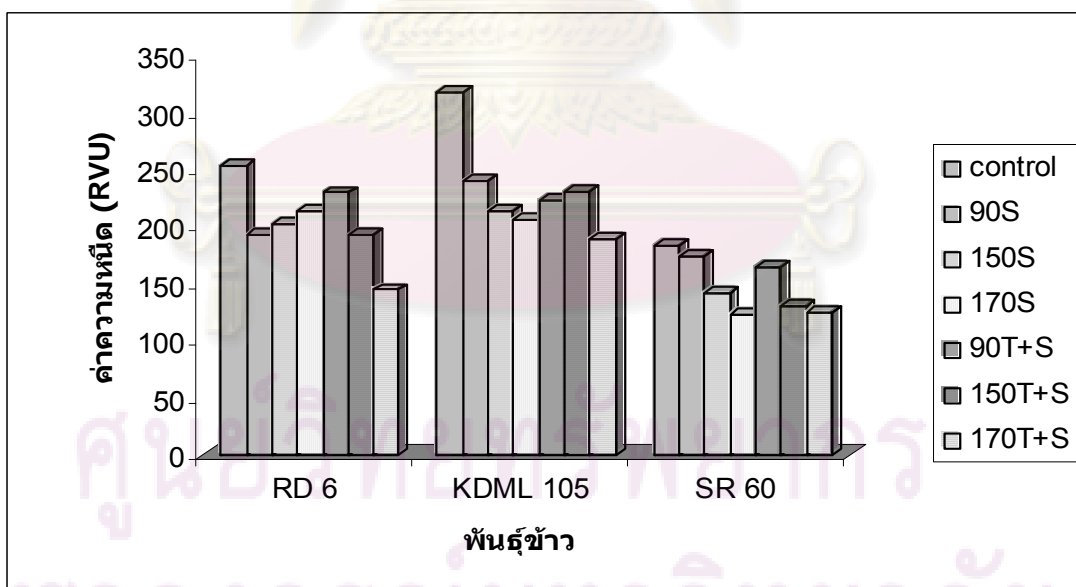
S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการอบแห้งตามด้วยการตากในที่ร่ม



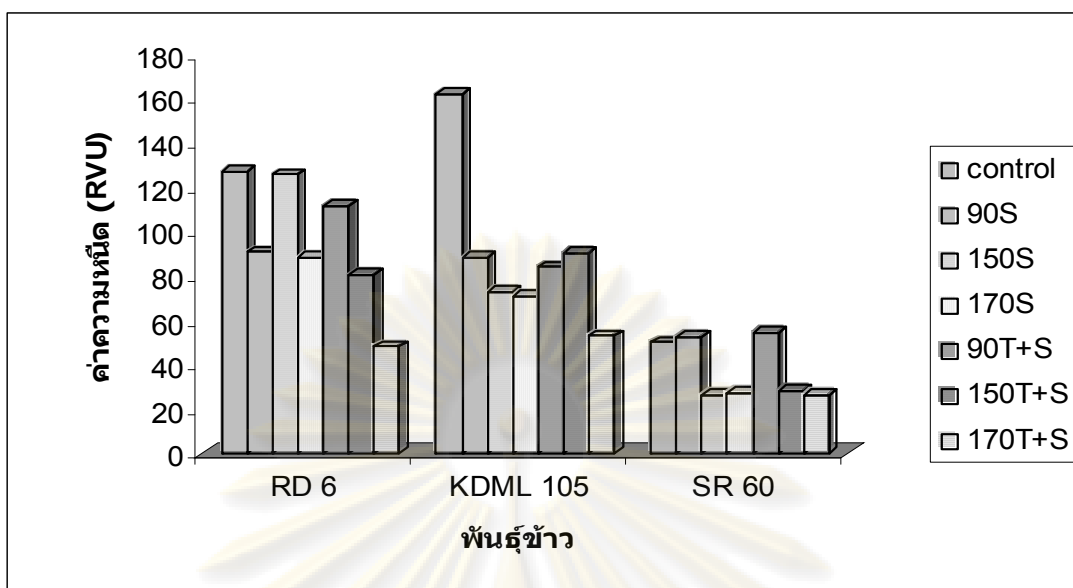
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความเหน็ดของแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์

RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



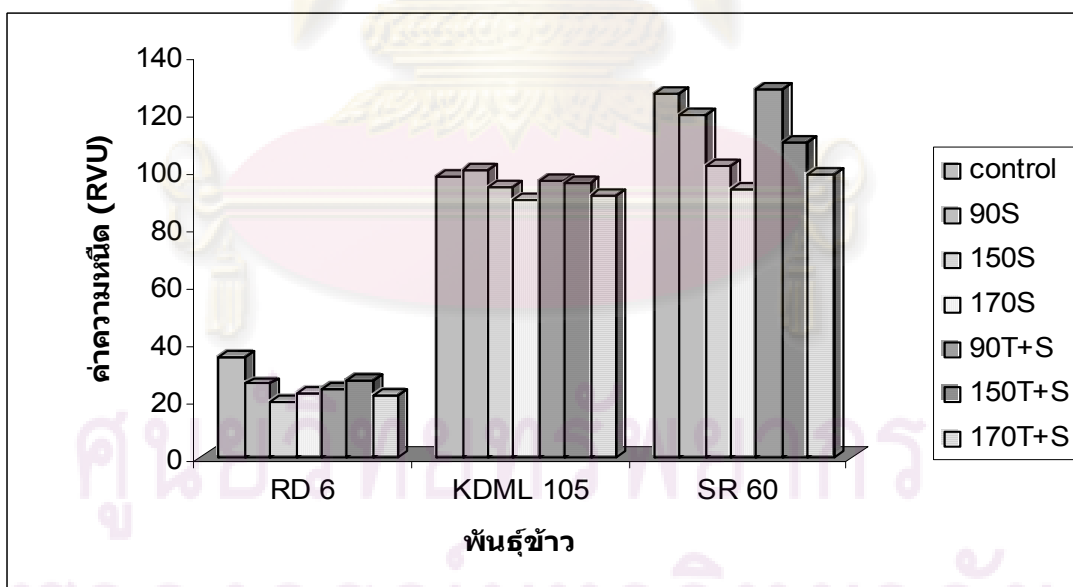
รูปที่ 4.7 ค่าความเหน็ดสูงสุดของแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์

RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.8 ค่าความหนีดที่ลดลงของแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์

RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.9 ค่าเซตเบคของแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์

RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิไลสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความเหนียว (ตารางที่ ค.4) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความเหนียว

ค่าที่วิเคราะห์	ผลของปัจจัยหลัก <sup>(A,B)</sup>	ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย <sup>(A,B)</sup>
อุณหภูมิเริ่มเกิดความเหนียว (PT)	a, b, c	a*c
ค่าความเหนียวสูงสุด (PV)	a, b, c	a*b, a*c, b*c a*b*c
ค่าความเหนียวที่ลดลง (BD)	a, b, c	a*b, a*c, b*c a*b*c
ค่าเซตแบค (SB)	a, b, c	a*b, a*c, b*c a*b*c

<sup>A</sup> a หมายถึง พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิไลสต่างกัน b หมายถึง อุณหภูมิในการอบแห้ง และ c หมายถึง วิธีการอบแห้ง

<sup>B</sup> มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความเหนียว (รูปที่ 4.6) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง โดยจะเห็นแนวโน้มทั้งสองประการนี้ชัดเจนที่สุดในข้าวพันธุ์ กข 6 ที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและกระบวนการเทมเปอริง ช่วยเพิ่มจำนวนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิไลสกับไขมันของข้าวที่มีปริมาณแอมิไลสต่ำมากได้ ส่วนข้าวที่มีปริมาณแอมิไลสสูง โครงสร้างของแอมิไลสสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิไลสกับไขมันได้มากกว่าข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิไลสต่ำแม้ในภาวะการอบแห้งที่ไม่รุนแรง ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิไลสกับไขมันที่เกิดขึ้นทั้งในระหว่างกระบวนการอบแห้งและการเทมเปอริง จะส่งเสริมให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น (Jane *et al.*, 1999) จึงขัดขวางการดูดซับน้ำของเม็ดแป้ง ส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Jaisut *et al.*, 2008)

ค่าความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวได้เต็มที่ ส่วนค่าความหนืดที่ลดลง (breakdown) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความคงทนของเม็ดแป้งต่ออุณหภูมิและแรงเฉือนจากการกวนของเครื่อง RVA หากค่าความหนืดที่ลดลงมีค่าต่ำ เม็ดแป้งจะพองตัวและแตกออกได้ยากในระหว่างการให้ความร้อนและมีการกวน แสดงว่าเม็ดแป้งมีความแข็งแรงและทนต่อแรงเฉือนได้ดี (Han and Hamaker, 2001) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดที่ลดลง (รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ) จะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจนในแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 แต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดที่ลดลงในลักษณะดังกล่าวอย่างชัดเจนในข้าวพันธุ์ กข 6 แต่เมื่ออบแห้งข้าวพันธุ์ กข 6 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดที่ลดลงจะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจนมากขึ้น อาจเนื่องมาจากจำนวนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งและการเทมเปอริง จะขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มที่ลดลง และเม็ดแป้งทนต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดที่ลดลงมีแนวโน้มลดลง (Jaisut *et al.*, 2008) และข้าวพันธุ์ กข 6 ต้องการภาวะการอบแห้งที่รุนแรงกว่าข้าวพันธุ์อื่น เพื่อให้เกิดผลจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เด่นชัดขึ้น

ค่าเซตแบค (setback) บ่งชี้ลักษณะของแป้งและผลิตภัณฑ์ได้ว่ามีลักษณะการเกิดเจลมากหรือน้อยเมื่อมีการให้ความร้อนและทำให้เย็น โดยค่าเซตแบคสูงแสดงว่าเม็ดแป้งสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี และมีแนวโน้มที่จะเป็นเจลแป้งที่แข็งแรง (Beta and Corke, 2001) เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น พบว่าค่าเซตแบค (รูปที่ 4.10) ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีแนวโน้มที่ลดลงชัดเจนกว่าแป้งข้าวสายพันธุ์อื่นที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า ส่วนวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริงไม่มีผลต่อค่าเซตแบคมากนัก การที่ค่าเซตแบคของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ต่ำลง เนื่องจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้มากกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ Becker, Hill และ Mitchell (2001) พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เกิดขึ้น ทำให้แอมิโลสมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลในการป้องกันการละลายของแอมิโลสออกนอกเม็ดแป้ง ทำให้มีปริมาณแอมิโลสที่จะเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงด้วยเหตุนี้ แป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จึงเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ และคณะ (2546) ที่ศึกษาลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 การอบแห้งใช้อุณหภูมิสูง ให้ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดที่ลดลง และค่าเซตแบค ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูง เม็ดสตาร์ชของตัวได้ลดลง ความหนืดสูงสุดจึงลดลง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ (2546) ที่ศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง (Granular and molecular structure) สมบัติทางกายภาพและหน้าที่ของฟลาวและสตาร์ชข้าวที่มีในประเทศไทย 16 สายพันธุ์ และความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม จากผลการทดลองพบว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง มีแนวโน้มที่ให้ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดและค่าเซตแบคสูงกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดที่แตกต่างกันนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเม็ดแป้งแล้ว ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในเม็ดแป้งด้วย

#### 4.6 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการเจลาติไนเซชัน

จากการวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่วงอุณหภูมิและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้แป้งข้าวเกิดเจลาติไนเซชันในภาวะที่มีน้ำมากเกินไป โดยใช้เครื่อง DSC ค่าที่วิเคราะห์ได้จาก DSC thermogram คือ อุณหภูมิที่เริ่มต้น ( $T_0$ ) อุณหภูมิที่ให้ค่า heat flow สูงสุด ( $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย ( $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดการดูดกลืนพลังงาน ( $T_c - T_0$ ) และเอนทาลปีของการดูดกลืนพลังงานเนื่องจากการเจลาติไนเซชัน ( $\Delta H_{gel}$ ) ซึ่งกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน (endothermic process) ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10-4.14 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6  $T_o, T_p, T_c, (T_c - T_o)$  และ  $\Delta H$  ของการเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์<sup>(A,B)</sup>

ตัวอย่าง <sup>c</sup>	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนในเซชัน (°C)				$\Delta H_{gel}$ (j/g dry flour)
	$T_o$	$T_p$	$T_c$	$T_c - T_o$	
Control RD	62.93±0.46 <sup>a</sup>	71.23±0.28 <sup>b</sup>	79.43±0.59 <sup>ef</sup>	16.50±1.05 <sup>h</sup>	10.21±0.76 <sup>g</sup>
RD-90-S	63.24±0.40 <sup>a</sup>	71.77±0.14 <sup>bcd</sup>	78.94±0.46 <sup>cde</sup>	15.70±0.66 <sup>h</sup>	9.73±0.25 <sup>g</sup>
RD-150-S	67.07±0.25 <sup>defg</sup>	73.75±0.49 <sup>jk</sup>	79.66±0.40 <sup>ef</sup>	12.59±0.54e <sup>fg</sup>	6.90±0.50 <sup>e</sup>
RD-170-S	66.84±0.41 <sup>def</sup>	72.88±0.57 <sup>ghi</sup>	78.98±0.63 <sup>cde</sup>	12.14±0.99 <sup>defg</sup>	5.86±0.24 <sup>bcd</sup>
RD-90-T+S	65.37±1.00 <sup>bc</sup>	72.03±0.55 <sup>cdef</sup>	78.99±0.09 <sup>cde</sup>	13.62±1.04 <sup>g</sup>	8.24±0.93 <sup>f</sup>
RD-150-T+S	66.74±0.85 <sup>def</sup>	72.90±0.54 <sup>ghi</sup>	78.98±0.57 <sup>cde</sup>	12.24±0.71 <sup>defg</sup>	5.83±0.74 <sup>bcd</sup>
RD-170-T+S	68.59±0.30 <sup>hi</sup>	74.47±0.29 <sup>h</sup>	80.14±0.23 <sup>f</sup>	11.55±0.33 <sup>bcd</sup>	5.23±0.04 <sup>b</sup>
Control KDML	65.10±0.13 <sup>b</sup>	71.36±0.17 <sup>bc</sup>	77.52±0.33 <sup>ab</sup>	12.42±0.44 <sup>defg</sup>	8.61±0.49 <sup>f</sup>
KDML-90-S	66.06±0.60 <sup>bcd</sup>	71.66±0.35 <sup>bcd</sup>	78.38±0.76 <sup>bcd</sup>	12.31±0.47 <sup>defg</sup>	7.37±0.27 <sup>e</sup>
KDML-150-S	68.23±0.22 <sup>ghi</sup>	73.55±0.38 <sup>ij</sup>	79.16±0.15 <sup>cdef</sup>	10.93±0.33 <sup>abcd</sup>	5.52±0.48 <sup>b</sup>
KDML-170-S	68.20±0.08 <sup>ghi</sup>	73.17±0.34 <sup>hij</sup>	78.38±0.58 <sup>bcd</sup>	10.17±0.65 <sup>ab</sup>	5.39±0.36 <sup>b</sup>
KDML-90-T+S	66.32±0.24 <sup>cde</sup>	71.99±0.06 <sup>bcde</sup>	78.17±0.08 <sup>bc</sup>	11.85±0.19 <sup>cdef</sup>	7.13±0.49 <sup>e</sup>
KDML-150-T+S	68.91±0.28 <sup>i</sup>	73.83±0.37 <sup>jk</sup>	79.36±0.05 <sup>def</sup>	10.45±0.32 <sup>abc</sup>	6.68±0.61 <sup>de</sup>
KDML-170-T+S	68.85±0.26 <sup>i</sup>	73.65±0.12 <sup>ji</sup>	78.80±0.23 <sup>cde</sup>	9.96±0.43 <sup>a</sup>	5.83±0.16 <sup>bcd</sup>
Control SR	63.56±0.21 <sup>a</sup>	70.32±0.55 <sup>a</sup>	76.88±0.85 <sup>a</sup>	13.32±0.78 <sup>fg</sup>	8.40±0.42 <sup>f</sup>
SR-90-S	65.98±0.46 <sup>bcd</sup>	71.38±0.15 <sup>bc</sup>	78.19±0.09 <sup>bc</sup>	12.21±0.53 <sup>defg</sup>	6.50±0.60 <sup>cde</sup>
SR-150-S	67.63±0.24 <sup>fgh</sup>	72.95±0.50 <sup>ghi</sup>	78.66±0.38 <sup>cde</sup>	11.03±0.21 <sup>abcde</sup>	5.60±0.19 <sup>b</sup>
SR-170-S	67.49±0.13 <sup>efgh</sup>	72.67±0.60 <sup>efgh</sup>	78.64±0.04 <sup>cde</sup>	11.14±1.33 <sup>abcde</sup>	5.14±0.40 <sup>b</sup>
SR-90-T+S	66.89±0.73 <sup>def</sup>	72.23±0.45 <sup>defg</sup>	79.00±0.59 <sup>cde</sup>	12.11±1.21 <sup>defg</sup>	5.72±0.68 <sup>bc</sup>
SR-150-T+S	68.32±1.47 <sup>hi</sup>	73.23±0.75 <sup>hij</sup>	79.55±0.65 <sup>ef</sup>	11.23±2.07 <sup>abcde</sup>	5.17±0.17 <sup>b</sup>
SR-170-T+S	67.84±0.93 <sup>fghi</sup>	72.77±0.13 <sup>fgh</sup>	79.46±1.24 <sup>ef</sup>	11.62±0.44 <sup>bcd</sup>	2.57±0.11 <sup>a</sup>

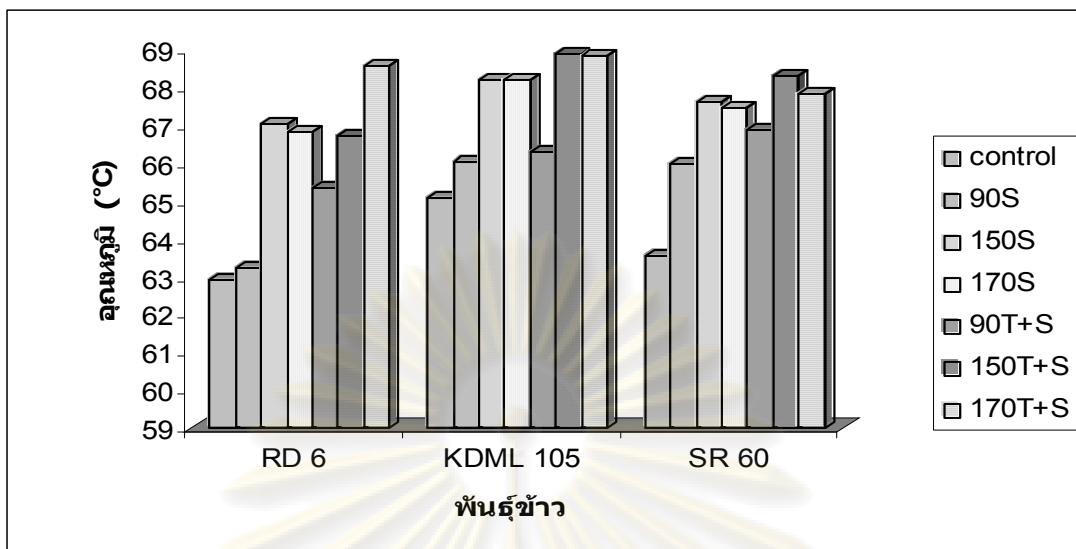
<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

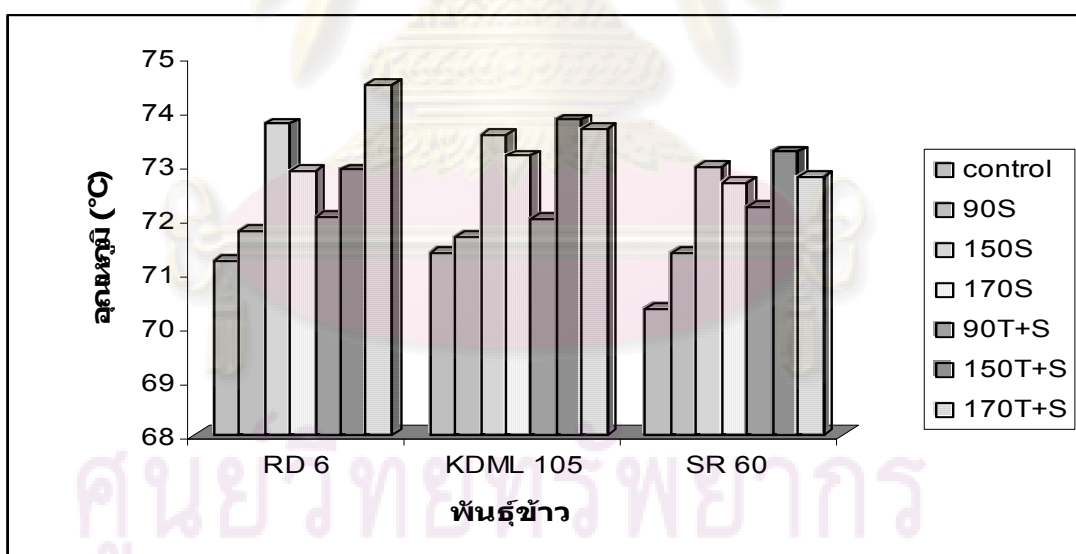
<sup>C</sup> RD KDML และ SR หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ  
ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

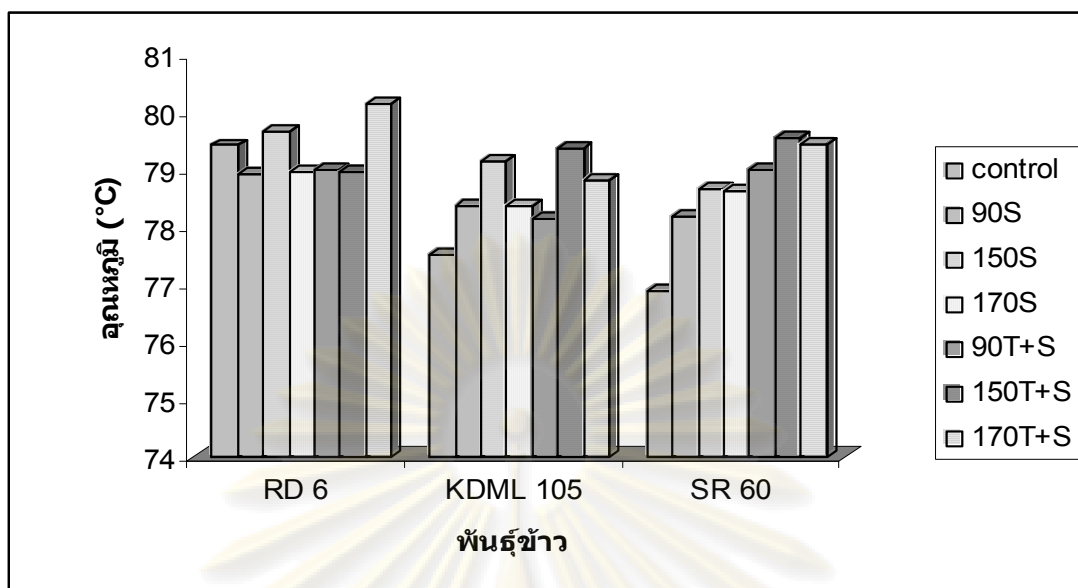
T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



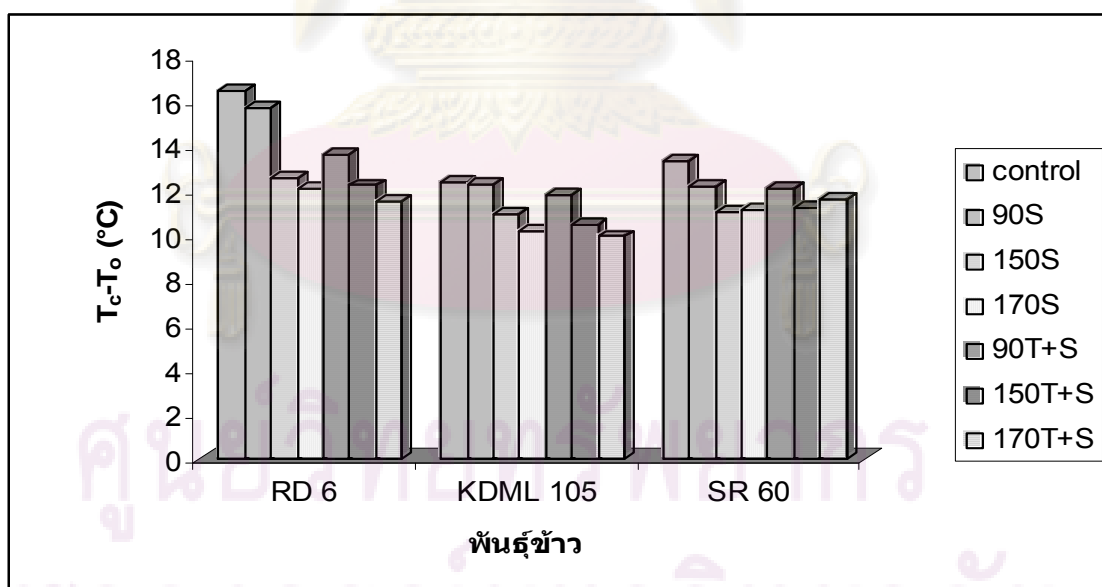
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิที่เริ่มต้นของการเจลาทีไนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



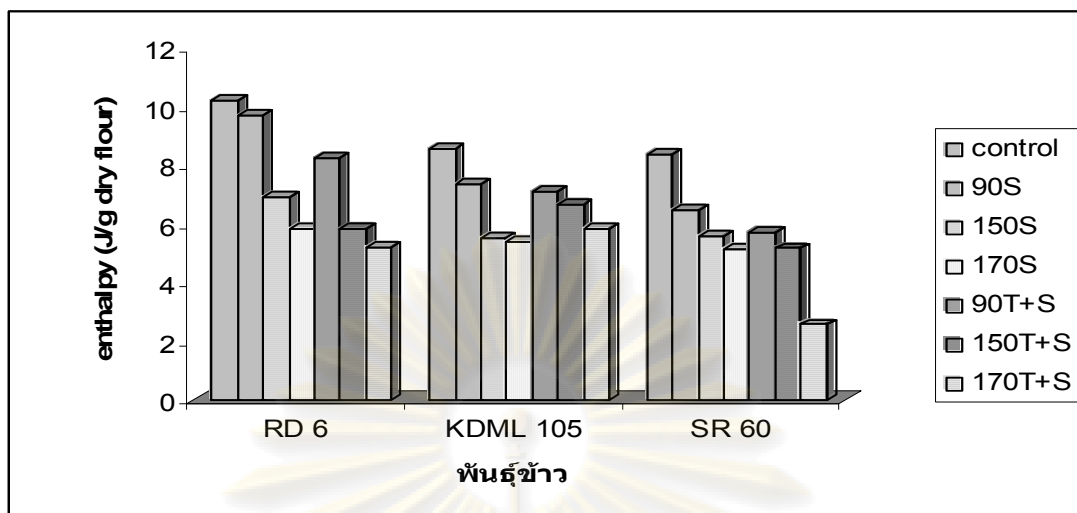
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิที่ให้ค่า heat flow ของการเจลาทีไนเซชันสูงสุด ของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.12 อุณหภูมิต่ำสุดท้ายของการเจลาทีไนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.13 ช่วงอุณหภูมิของการเกิดการเจลาทีไนเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.14 เอนทาลปีของการเจลลิ่งในเซชันของแป้งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์

RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร้อน

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการเจลลิ่งในเซชัน (ตารางที่ ค.5) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการเจลลิ่งในเซชัน

ค่าที่วิเคราะห์	ผลของปัจจัยหลัก <sup>(A,B)</sup>	ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย <sup>(A,B)</sup>
$T_o$	a, b, c	a*b, a*b*c
$T_p$	a, b, c	a*b, b*c a*b*c
$T_c$	a, b, c	-
$T_c-T_o$	a, b	-
$\Delta H_{gel}$	a, b, c	a*b, a*c, b*c a*b*c

<sup>A</sup> a หมายถึง แป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน b หมายถึง อุณหภูมิในการอบแห้ง และ

c หมายถึง วิธีการอบแห้ง

<sup>B</sup> มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นจาก 90°C เป็น 150°C ค่า  $T_0$  และ  $T_p$  (รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $T_c - T_0$  (รูปที่ 4.13) มีแนวโน้มลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 150°C เป็น 170°C ไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวมากนัก ยกเว้นกรณีของตัวอย่างแป้งข้าวพังก์ กข 6 ที่ใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น (90-170°C) ค่า  $T_0$  และ  $T_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $T_c - T_0$  มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้ ค่า  $T_0$  สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดจากเครื่อง RVA (หัวข้อที่ 4.5) สาเหตุอาจเนื่องมาจากจำนวนของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

$\Delta H_{gel}$  เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายผลึก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณโครงสร้างผลึกหรือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแอมิโลเพกตินที่มีอยู่ในข้าวแต่ละชนิด (Jane *et al.*, 1999) เมื่อพิจารณาค่า  $\Delta H_{gel}$  ของตัวอย่างควบคุม พบว่า ปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้น ค่า  $\Delta H_{gel}$  มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai (2001) ที่พบว่าสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลเพกตินสูง (มีปริมาณแอมิโลสต่ำ) ต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลที่ในเซชันสูงกว่า และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\Delta H_{gel}$  มีแนวโน้มที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง จะยิ่งทำให้ค่า  $\Delta H_{gel}$  ลดลงมากขึ้น ซึ่งเห็นชัดเจนในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 เนื่องจากข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีการหลอมรวมกันของผลึกบางส่วน (เกิดเจลที่ในเซชันได้ไม่สมบูรณ์) ทำให้ปริมาณโครงสร้างผลึกหรือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันเพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเกิดเจลที่ในเซชันได้ลดลง ดังนั้นจึงต้องการพลังงานในการเกิดเจลที่ในเซชันลดลง จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธิณี วานิชสำราญ (2545) และ Tirawanichakul และคณะ (2004) ที่พบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\Delta H_{gel}$  มีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ ค่า  $\Delta H_{gel}$  ที่มีแนวโน้มลดลงจะสอดคล้องกับลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวที่เห็นลักษณะการหลอมรวมกันของเม็ดแป้งนั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.7 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสตาร์ช ได้แก่ แอมิโลส และแอมิโลเพกติน เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจากการศึกษาของ Goodfellow และ Wilson (1990) พบว่าเกลียวม้วนของแอมิโลส (helix formation) สามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้เร็วกว่าการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกของโมเลกุลแอมิโลเพกติน ซึ่งโครงสร้างที่เกิดขึ้นสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่อง DSC โดยสามารถอุณหภูมิที่เริ่มต้น ( $T_0$ ) อุณหภูมิที่ให้ค่า heat flow สูงสุด ( $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย ( $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดการดูดกลืนพลังงาน ( $T_c - T_0$ ) และเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน ( $\Delta H_{ret}$ ) จาก DSC thermogram ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15-4.19 ตามลำดับ

เอนโดเทอร์ม (endotherm) ของการสลายโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวกันอีกครั้งภายหลังจากเกิดเจลาทีไนเซชันหรือที่เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวทั้งสามชนิดทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการอบแห้ง เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเอนโดเทอร์มของการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดเจลาทีไนเซชันในครั้งแรก เนื่องจากเมื่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถูกทำให้สลายหรือแยกออกจากกันในช่วงการเกิดเจลาทีไนเซชัน และการกลับมาเรียงตัวกันใหม่อีกครั้งหนึ่งของโมเลกุลแอมิโลเพกติน ไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบได้สมบูรณ์เหมือนอย่างเดิม ถึงแม้ว่าจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน (Takaya, Sano และ Nishinari, 2000) โดยลักษณะพีคของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากรีโทรเกรเดชันมีลักษณะกว้างกว่าพีคจากการเกิดเจลาทีไนเซชัน (Liu and Thomson, 1998)

ตารางที่ 4.8  $T_o, T_p, T_c, (T_c - T_o)$  และ  $\Delta H$  ของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันของแป้งทั้ง 3 สายพันธุ์<sup>(A,B)</sup>

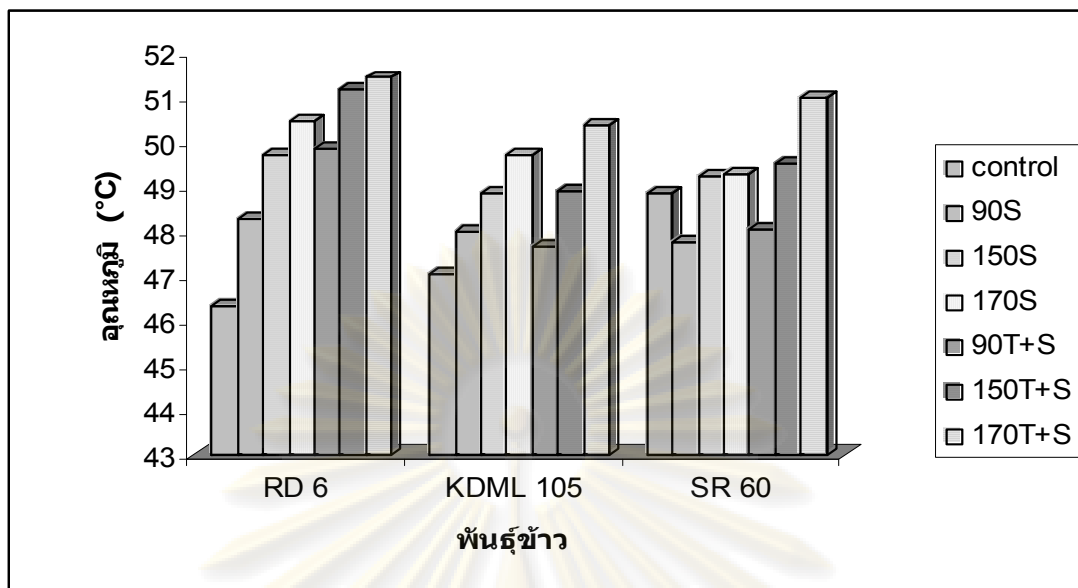
ตัวอย่าง <sup>c</sup>	อุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน <sup>c</sup>				$\Delta H$ (j/g dry flour)
	$T_o$	$T_p^{ns}$	$T_c^{ns}$	$T_c - T_o$	
Control RD	46.34±1.96 <sup>a</sup>	55.68±1.29	62.42±0.28	16.09±1.68 <sup>f</sup>	6.61±0.17 <sup>lm</sup>
RD-90-S	48.28±1.42 <sup>abcde</sup>	57.39±1.60	62.75±2.02	14.47±0.78 <sup>cdef</sup>	6.45±0.20 <sup>lm</sup>
RD-150-S	49.73±0.34 <sup>bcdef</sup>	57.47±0.12	62.356±0.12	12.63±0.46 <sup>ab</sup>	5.70±0.45 <sup>jk</sup>
RD-170-S	50.50±0.89 <sup>cdef</sup>	57.79±0.13	62.98±0.22	12.48±0.67 <sup>a</sup>	5.15±0.20 <sup>hij</sup>
RD-90-T+S	49.88±0.16 <sup>bcdef</sup>	57.70±0.00	62.87±0.10	12.99±0.25 <sup>abc</sup>	6.09±0.32 <sup>kl</sup>
RD-150-T+S	51.22±0.42 <sup>ef</sup>	58.61±0.35	63.65±0.74	12.43±0.33 <sup>a</sup>	3.52±0.10 <sup>bc</sup>
RD-170-T+S	51.46±0.48 <sup>f</sup>	58.78±0.35	63.85±1.00	12.39±0.52 <sup>a</sup>	2.29±0.10 <sup>a</sup>
Control KDML	47.04±0.61 <sup>ab</sup>	56.30±0.34	62.59±0.08	15.55±0.69 <sup>ef</sup>	5.63±0.24 <sup>ijk</sup>
KDML-90-S	47.99±0.52 <sup>abcd</sup>	57.42±1.70	63.15±1.07	15.16±0.54 <sup>def</sup>	4.83±0.36 <sup>gh</sup>
KDML-150-S	48.87±2.21 <sup>abcdef</sup>	57.38±1.64	63.47±0.86	14.6±0.035 <sup>cdef</sup>	4.73±0.41 <sup>fgh</sup>
KDML-170-S	49.71±0.06 <sup>bcdef</sup>	57.88±0	63.12±0.03	13.41±0.08 <sup>abcd</sup>	4.04±0.07 <sup>cde</sup>
KDML-90-T+S	47.65±0.55 <sup>abc</sup>	56.72±0.23	62.64±0.25	14.99±0.80 <sup>def</sup>	4.38±0.19 <sup>efg</sup>
KDML-150-T+S	48.93±2.64 <sup>abcdef</sup>	57.47±2.00	63.19±2.33	14.26±0.31 <sup>bcde</sup>	4.03±0.23 <sup>cde</sup>
KDML-170-T+S	50.41±0.50 <sup>cdef</sup>	58.37±0.47	63.84±0.40	13.43±0.10 <sup>abcd</sup>	3.27±0.45 <sup>b</sup>
Control SR	48.88±2.42 <sup>abcdef</sup>	57.70±1.86	64.17±0.85	15.29±0.16 <sup>ef</sup>	6.78±0.02 <sup>m</sup>
SR-90-S	47.77±0.30 <sup>abc</sup>	57.38±0.00	63.26±0.65	15.5±0.35 <sup>ef</sup>	5.06±0.15 <sup>hi</sup>
SR-150-S	49.23±1.57 <sup>abcdef</sup>	58.12±0.82	64.37±0.81	15.14±0.76 <sup>def</sup>	4.80±0.25 <sup>gh</sup>
SR-170-S	49.31±1.68 <sup>abcdef</sup>	57.99±1.00	64.04±1.04	14.73±0.64 <sup>cdef</sup>	4.18±0.23 <sup>def</sup>
SR-90-T+S	48.05±0.87 <sup>abcdef</sup>	58.15±1.10	62.45±1.27	14.40±0.40 <sup>cdef</sup>	4.84±0.06 <sup>gh</sup>
SR-150-T+S	49.55±1.48 <sup>bcdef</sup>	58.79±0.09	63.94±1.19	14.39±0.30 <sup>cdef</sup>	3.76±0.14 <sup>bcd</sup>
SR-170-T+S	51.03±0.49 <sup>def</sup>	58.69±0.47	63.34±0.34	12.32±0.15 <sup>a</sup>	3.60±0.44 <sup>bcd</sup>

<sup>A</sup> อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

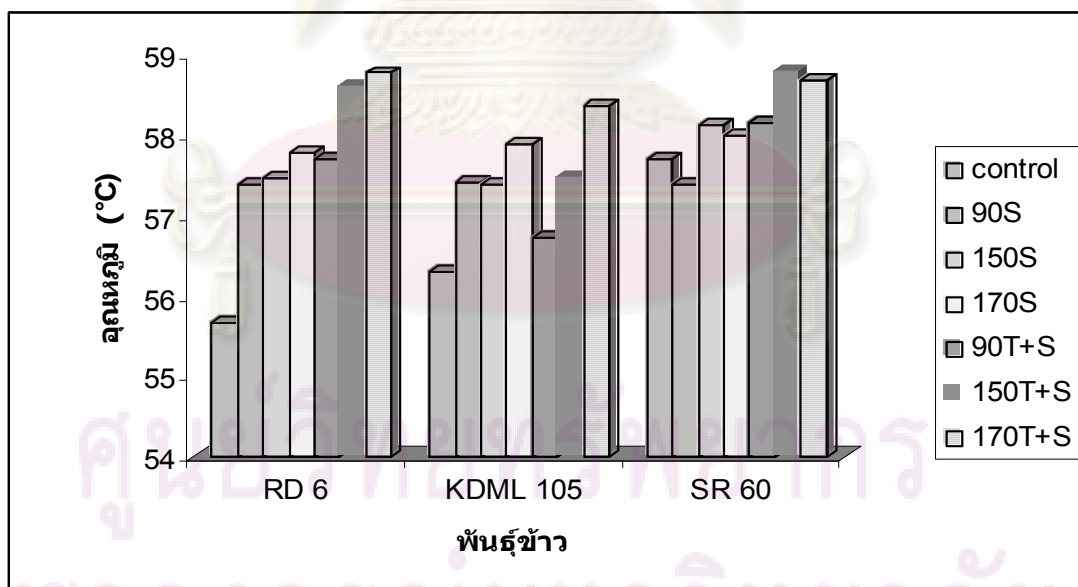
<sup>B</sup> ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<sup>C</sup> RD KDML และ SR หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

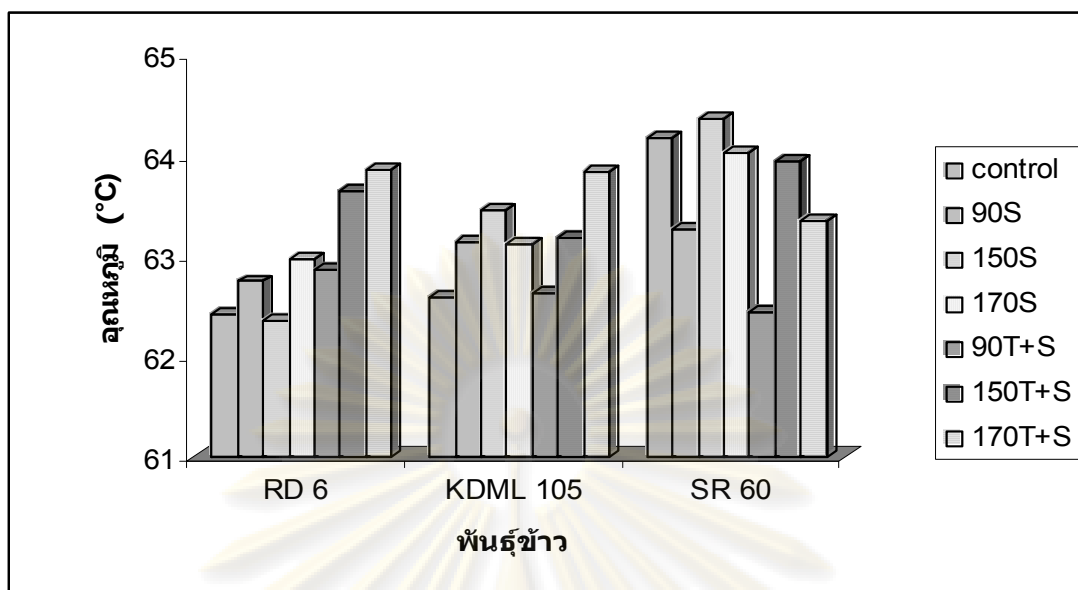
<sup>ns</sup> หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )



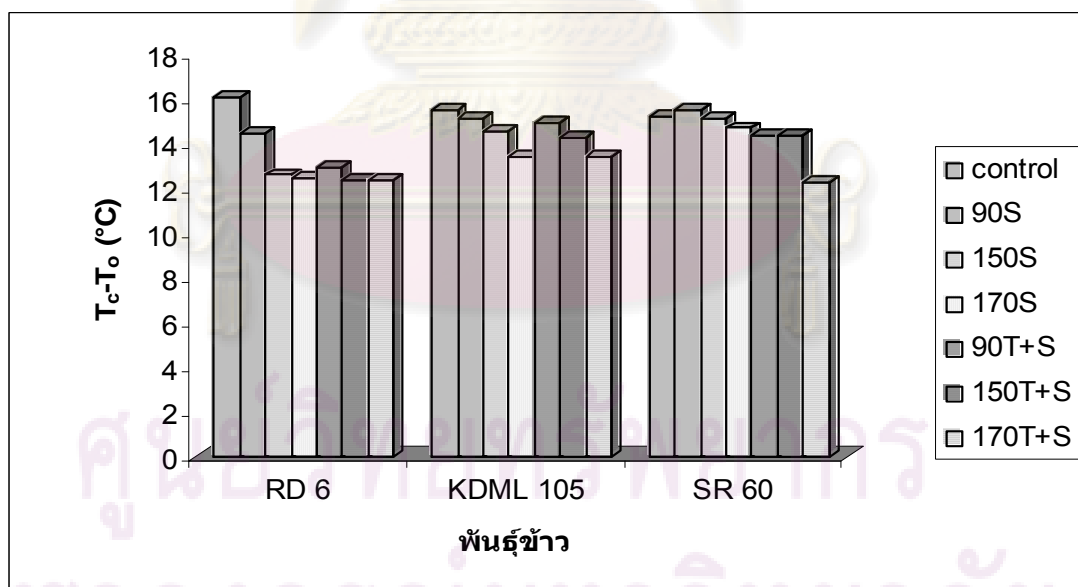
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



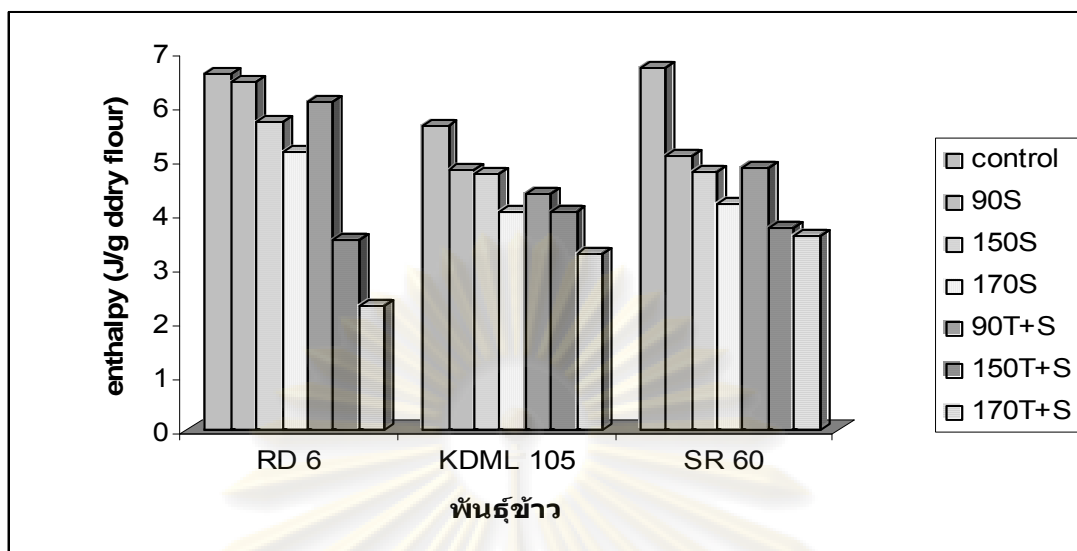
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิที่ให้ค่า heat flow ของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากรีโทรเกรดชันสูงสุด RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.18 ช่วงอุณหภูมิของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.19 เอนทัลปีของการหลอมผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน RD 6 KDML 105 และ SR 60 หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม และ T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดเซชันร่วมกับเทมเปอร้งตามด้วยการตากในที่ร่ม

ลักษณะ DSC thermogram ของการหลอมผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน (รูปที่ ข.7-9) มีลักษณะที่แตกต่างจากลักษณะ DSC thermogram ของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (รูปที่ ข.4-6) โดยพีคของการหลอมผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน มีลักษณะกว้างกว่า พีคของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานของการหลอมผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันมีค่าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน โดยผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลที่เป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้มีระดับความเป็นผลึกลดลง และถูกทำลายได้ง่ายกว่า ดังนั้น จึงใช้อุณหภูมิและพลังงานในการหลอมผลึกเอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (Sasaki *et al.*, 2000)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อตรวจสอบอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณแอมิโลสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการรีโทรเกรเดชัน (ตารางที่ ค.6) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนจากการรีโทรเกรเดชัน

ค่าที่วิเคราะห์	ผลของปัจจัยหลัก <sup>(A,B)</sup>	ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย <sup>(A,B)</sup>
$T_o$	b	-
$T_p$	-	-
$T_c$	-	-
$T_c-T_o$	a, b,c	-
$\Delta H_{gel}$	a, b, c	$a^*b, a^*c, b^*c$ $a^*b^*c$

<sup>A</sup> a หมายถึง พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน b หมายถึง อุณหภูมิในการอบแห้ง และ c หมายถึง วิธีการอบแห้ง

<sup>B</sup> มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

ค่า  $T_o$  และ  $T_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $T_c - T_o$  มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้ค่า  $T_c - T_o$  มีแนวโน้มต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง ซึ่งจะเห็นชัดเจนที่สุดในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 แสดงว่าภายหลังกระบวนการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง หรือการเทมเปอริง เม็ดแป้งจะดูดกลืนพลังงานเพื่อหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันในช่วงอุณหภูมิที่แคบลง อาจเนื่องมาจากผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันมีจำนวนน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\Delta H_{ret}$  เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\Delta H_{ret}$  มีแนวโน้มที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอรัง ซึ่งจะเห็นผลชัดเจนในข้าวพันธุ์ กข 6 สอดคล้องกับค่า  $T_c - T_0$  ที่มีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากในระหว่างการเทมเปอรังจะช่วยเพิ่มจำนวนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันจะไปขัดขวางการเกิดผลึกแอมิโลเพกตินระหว่างรีโทรเกรดชันได้ Jaisut และคณะ (2008) พบว่า  $\Delta H_{gel}$  ของพืคที่สอง (เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 109-137°C) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 150°C และระยะเวลาในการเทมเปอรัง 120 นาที จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมและสูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง 130°C ที่ระยะเวลาในการเทมเปอรังเดียวกัน นอกจากนี้ Becker, Hill และ Mitchell (2001) พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เกิดขึ้น ทำให้แอมิโลสมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลในการป้องกันการละลายของแอมิโลสออกนอกเม็ดแป้ง ทำให้มีปริมาณแอมิโลสที่จะเกิดรีโทรเกรดชันลดลง ส่งผลให้  $\Delta H_{ret}$  มีค่าที่ลดลง

#### 4.8 ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างแป้งข้าว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) โดยคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคส่วนบนต่อพื้นที่ของสเปกตรัมทั้งหมดที่วัดได้ ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.10 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 แสดงดังรูปที่ 4.20-4.22 ตามลำดับ

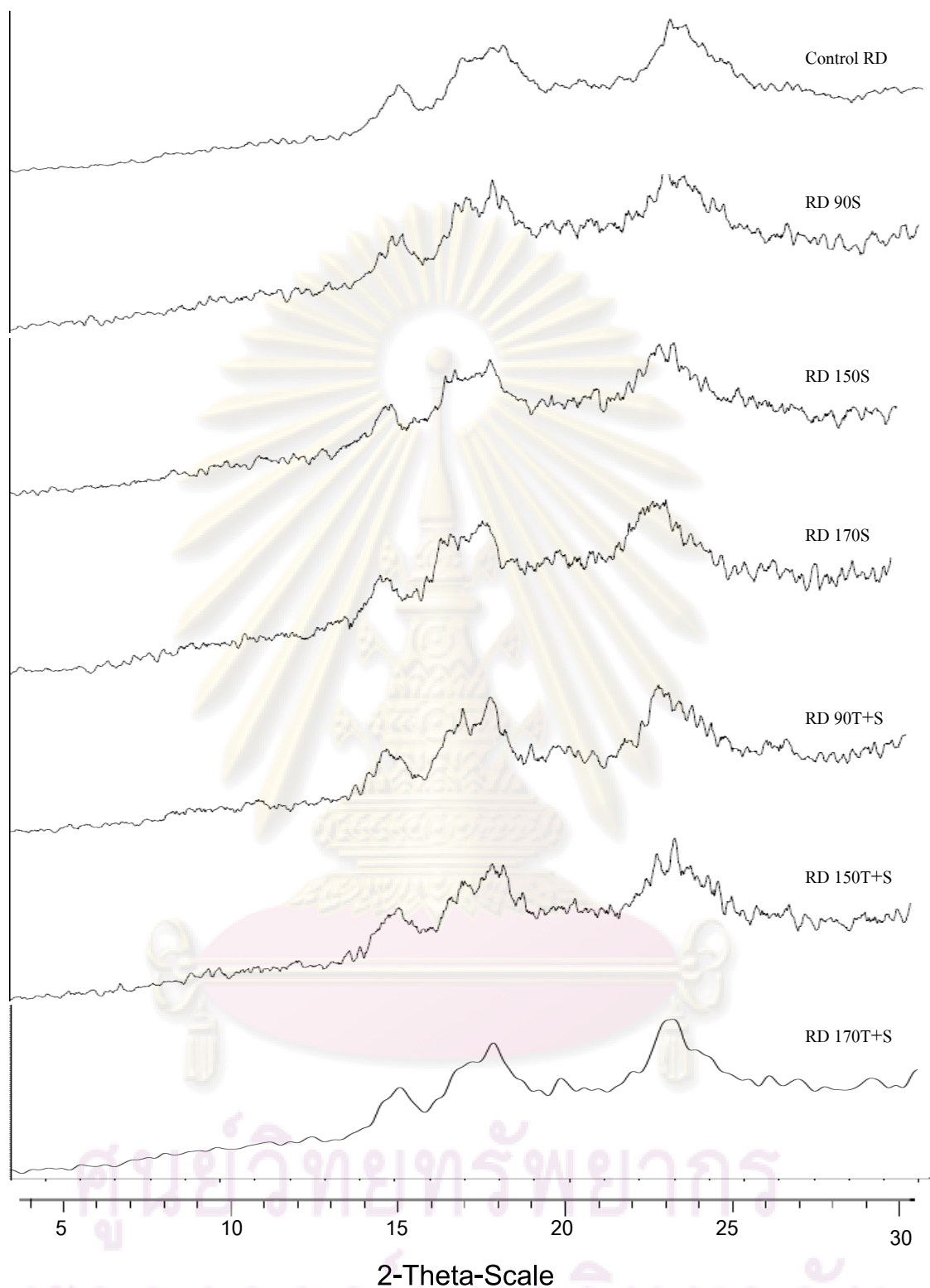
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ค่าระดับความเป็นผลึก (%) ของแป้งข้าวพันธุ์ กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่อุณหภูมิและวิธีการอบแห้งที่ต่างกัน

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ค่าระดับความเป็นผลึก (%) จากการตากในที่ร่ม	ค่าระดับความเป็นผลึก (%) จากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซน	
			รวมกับการตากในที่ร่ม	เทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ กข 6	-	34.76	-	-
กข 6	90	-	33.26	32.03
กข 6	150	-	31.92	30.55
กข 6	170	-	28.70	27.26
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	-	31.42	-	-
ขาวดอกมะลิ 105	90	-	28.76	25.21
ขาวดอกมะลิ 105	150	-	26.72	23.36
ขาวดอกมะลิ 105	170	-	24.71	19.15
ตัวอย่างควบคุม พันธุ์สุพรรณบุรี 60	-	29.42	-	-
สุพรรณบุรี 60	90	-	26.42	25.05
สุพรรณบุรี 60	150	-	24.49	22.51
สุพรรณบุรี 60	170	-	21.21	18.62

- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

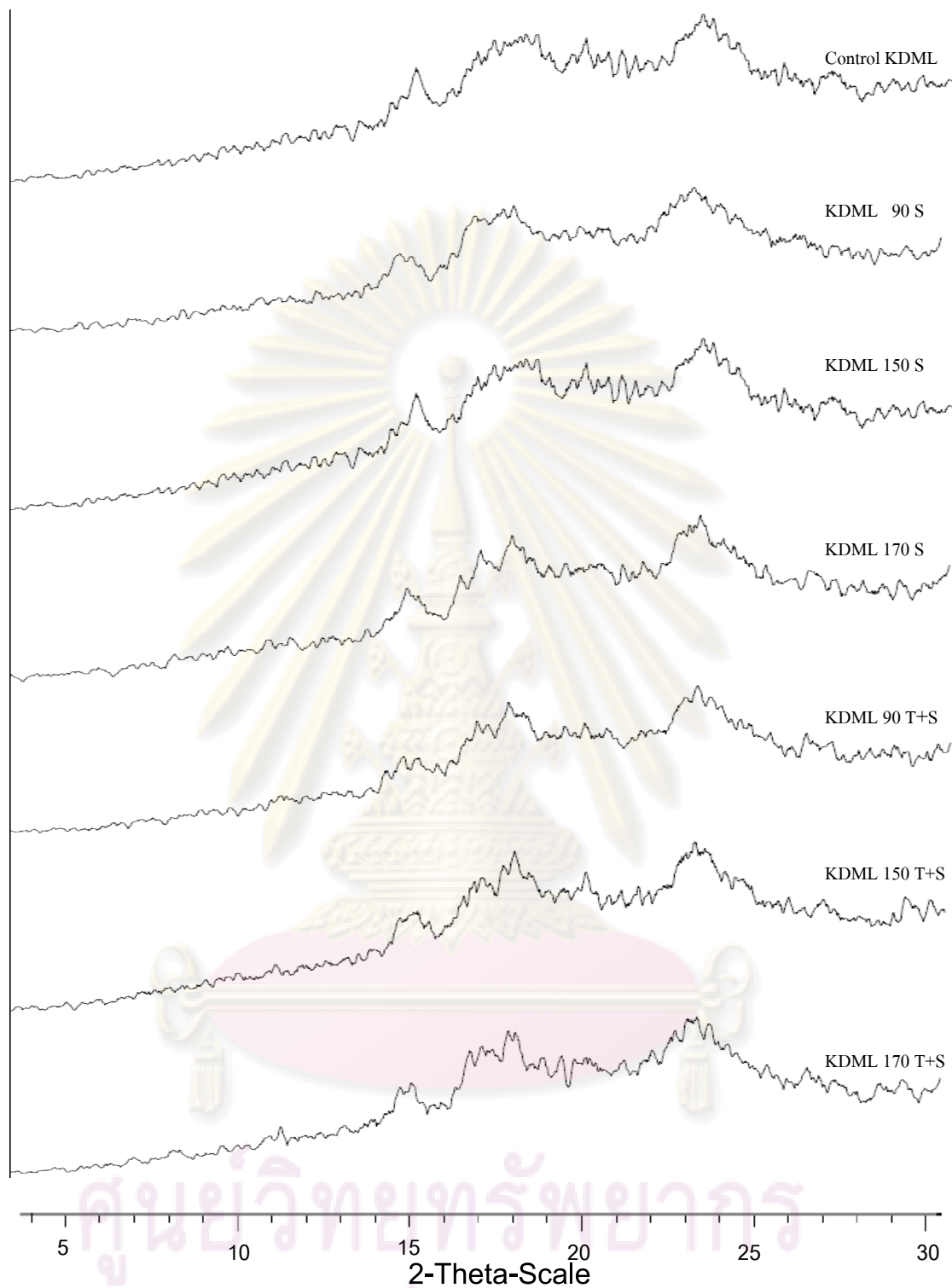




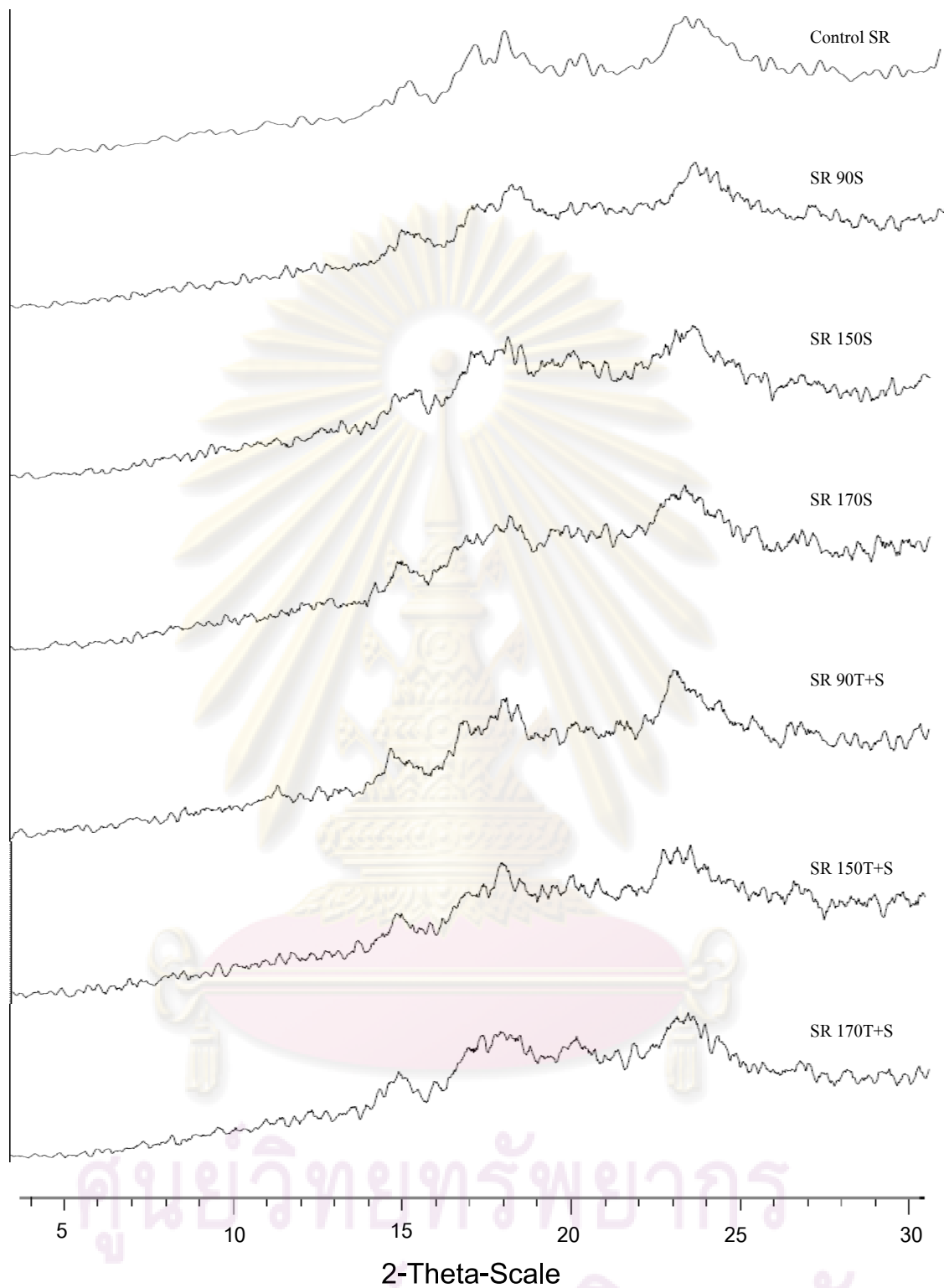
รูปที่ 4.20 ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพังก์ กข 6 RD หมายถึง ข้าวพังก์ กข 6 ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.21 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 KDML หมายถึง พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอริ่งตามด้วยการตากในที่ร่ม



รูปที่ 4.22 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 SR หมายถึง ข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากตามด้วยการตากในที่ร่ม

ตัวอย่างแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ จะปรากฏพืดหลัก ที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 15 องศา จำนวน 1 พืด ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 17-18 องศา จำนวน 2 พืด ที่เชื่อมต่อกันและตำแหน่ง 20 เท่ากับ 23 องศา จำนวน 1 พืด ซึ่งเป็นรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ A และเป็นแบบที่พบมากในสตาร์ชจากธัญชาติ (Buléon *et al.*, 1998)

จากการทดลอง พบว่าตัวอย่างแบ่งข้าวพันธุ์ กข 6 มีค่าระดับความเป็นผลึกสูงที่สุด รองลงมา คือ ตัวอย่างแบ่งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และตัวอย่างแบ่งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ เนื่องจากตัวอย่างแบ่งข้าวพันธุ์ กข 6 มีปริมาณแอมิโลสต่ำมาก (มีปริมาณแอมิโลเพกตินเกือบทั้งหมดในองค์ประกอบของสตาร์ช) ซึ่งโดยปกติโมเลกุลของแอมิโลเพกตินเป็นส่วนที่ทำให้เกิดโครงสร้างในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ช (Buléon *et al.*, 1998) ตัวอย่างแบ่งข้าวพันธุ์ กข 6 จึงมีค่าระดับความเป็นผลึกสูงที่สุด โดยค่าระดับความเป็นผลึกแปรผกผันกับปริมาณแอมิโลส กล่าวคือ ปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้น มีค่าระดับความเป็นผลึกลดลง (ตารางที่ 4.7) สอดคล้องกับงานวิจัยของ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ (2546) ที่ได้ศึกษาข้อมูลด้านสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพและหน้าที่ของฟลาวและสตาร์ชข้าว ที่มีในประเทศไทย 16 สายพันธุ์ และความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัปลักษณะของผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม จากผลการทดลอง พบว่าค่าระดับความเป็นผลึกที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อแบ่งข้าวมีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้น นอกจากนี้ Derycke และคณะ (2005) พบว่าข้าวพันธุ์ Puntal (มีปริมาณแอมิโลสเท่ากับ 24 g/100g dry flour) และข้าวพันธุ์ Jacinto (มีปริมาณแอมิโลสเท่ากับ 12 g/100g dry flour) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการผลิตเป็นข้าวหนึ่ง มีค่าระดับความเป็นผลึกเป็น 34 และ 41% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าระดับความเป็นผลึกลดลง แต่เมื่อข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ ผ่านกระบวนการผลิตเป็นข้าวหนึ่ง โดยใช้กระบวนการผลิตเป็นข้าวหนึ่ง 2 ภาวะ ได้แก่ 1) ภาวะไม่รุนแรง (แช่ข้าวเปลือกในน้ำอุณหภูมิ 112 °C เป็นเวลา 90 นาที) และ 2) ภาวะรุนแรง (แช่ข้าวเปลือกในน้ำอุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 360 นาที) พบว่าค่าระดับความเป็นผลึกลดลงและพบโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งเป็นลักษณะผลึกที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันเพิ่มขึ้นตามภาวะที่รุนแรงขึ้น โดยข้าวพันธุ์ Puntal พบโครงสร้างผลึกแบบ V มากกว่าข้าวพันธุ์ Jacinto

สำหรับรูปแบบโครงสร้างผลึกของตัวอย่างแบ่งข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ภายหลังจากอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซนทั้ง 2 วิธี ยังคงมีพืดปรากฏที่ตำแหน่งเดิมทั้ง 3 พืด แต่มีความหนาแน่นของผลึกลดลง นอกจากความหนาแน่นของผลึกลดลงแล้ว พบว่ามีพืดที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 20 องศา ปรากฏชัดเจนขึ้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงโดยจะเห็นผลชัดเจนในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ซึ่งพืดที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 20 องศา เป็นลักษณะของการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน (Buléon *et al.*, 1998)

ระดับความเป็นผลึก มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม จะมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม เนื่องจากโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกติน ถูกหลอมเหลวด้วยความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ค่าระดับความเป็นผลึกที่ลดลงนั้น สอดคล้องกับลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มีการหลอมรวมกันเนื่องจากการเจลาไทไนเซชันบางส่วน (จาก SEM) และ จากสมบัติทางความร้อน ค่า  $\Delta H_{gel}$  จะสอดคล้องกับค่าระดับความเป็นผลึก โดย  $\Delta H_{gel}$  ที่มีค่าต่ำ ก็จะมีระดับความเป็นผลึกต่ำเช่นกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง สามารถแบ่งประเภทข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์ ตามปริมาณแอมิโลส ได้แก่ ข้าวพันธุ์ กข 6 จัดอยู่ในประเภทของข้าวเหนียว ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในประเภทของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จัดอยู่ในประเภทของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง

ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว ได้แก่ สมบัติทางความหนืด สมบัติทางความร้อนจากการเจลาติไนเซชันและการรีโทรเกรเดชัน พบว่า สมบัติทางความหนืดมีการเปลี่ยนแปลง คือ ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดที่ลดลงและค่าเซตแบคมีแนวโน้มลดลง สมบัติทางความร้อนจากการเจลาติไนเซชันมีการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่า  $T_0$  และ  $T_p$  มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $T_c - T_0$  มีแนวโน้มที่ลดลง โดยข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นและใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ค่า  $T_0$  และ  $T_p$  มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และค่า  $T_c - T_0$  มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจน ส่วนค่า  $\Delta H_{gel}$  มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง จะยิ่งทำให้ค่า  $\Delta H_{gel}$  ลดลงมากขึ้น ซึ่งเห็นผลอย่างชัดเจนในข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง และสมบัติทางความร้อนจากการรีโทรเกรเดชันมีการเปลี่ยนแปลง คือ ค่า  $T_0$  และ  $T_p$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $T_c - T_0$  มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้ค่า  $T_c - T_0$  มีแนวโน้มต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง ซึ่งเห็นชัดเจนที่สุดในข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ส่วนค่า  $\Delta H_{ret}$  มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ซึ่งเห็นผลชัดเจนในข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ

ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อความคงทนของเมล็ดข้าวสาร โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน พบว่า อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของข้าวทุกสายพันธุ์มีค่าสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน

ร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริงในข้าวทุกสายพันธุ์ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการหลอมเหลวของผลึกภายในโครงสร้างของเมล็ดข้าวไปบางส่วนในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยพบลักษณะความสมบูรณ์ของเมล็ดแป้งลดลง ซึ่งเห็นผลได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงและใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง โดยการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 สายพันธุ์ สอดคล้องกับระดับความเป็นผลึกที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่า ระดับความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น และวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริง จะมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่มโดยไม่มีการเทมเปอริง นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและการเทมเปอริง พบว่ามีพีคที่ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 20 องศา ปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูง โดยเห็นผลชัดเจนในข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเช่นกัน

จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงทนของเมล็ดข้าวสาร ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน โดยในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและการเทมเปอริง ส่งผลให้ข้าวทั้ง 3 สายพันธุ์เกิดการหลอมเหลวของผลึกไปบางส่วนและหรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความคงทนในระหว่างการขัดสีมากขึ้น และนอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวจะส่งผลต่อคุณภาพในการหุงต้มและการรับประทานของข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป

## 5.2 ข้อเสนอนแนะ

ในการอบแห้งเพื่อเพิ่มผลผลิตโดยให้ได้ปริมาณข้าวตันสูง ต้องใช้ภาวะการอบแห้งที่รุนแรง โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 170°C ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม ซึ่งการอบแห้งที่ภาวะรุนแรงดังกล่าวส่งผลให้สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวเปลี่ยนแปลงไป คือ ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (จาก RVA) และอุณหภูมิเริ่มต้นของการเจลาไทไนเซชัน (จาก DSC) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นหากต้องการนำแป้งข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่ภาวะรุนแรงดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อให้แป้งเกิดความหนืดขึ้น จึงจะได้เป็นสารให้ความข้นหนืดตามที่ต้องการ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

เกษตรสหรัฐอเมริกา, กระทรวง (USDA). 2550. สถานการณ์ข้าวของโลกในปัจจุบัน. เข้าถึงโดย <http://www.dft.moc.go.th> [7 กันยายน 2550]

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแบ่ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 303 หน้า.

เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข. 2536. คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด ใน เอกสารประกอบการบรรยายฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง. ฝ่ายฝึกอบรมสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร. หน้า 54-70.

คำรบ สมะวรรณนะ. 2546. ผลของเวลาทีนเซชันและรีโทรเกรดชันต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

งามชื่น คงเสรี. 2545. คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์, สมเกียรติ ประญาวรรการ และ สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2546. ลักษณะเฉพาะของข้าวที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4. เค ยู โฮม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 269-277.

ณัฐพล ภูมิสะอาด. 2540. การจัดการข้าวเปลือกขึ้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน การเก็บในที่ลับอากาศและการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร.

เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กระทรวง. กรมอุตุนิยมวิทยา. 2550. รายงานผลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกรุงเทพฯ ของเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550.

พาณิชย์, กระทรวง. 2540. มาตรฐานข้าวไทย. ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าว พ.ศ.2540 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 114 ตอนที่ 31ง. วันที่ 17 เมษายน 2540.



- รริศรา อิมภาประเสริฐ. 2549. ผลของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอริง และอุณหภูมิในการเก็บต่อปริมาณ 2 AP และคุณภาพการสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *Oryza sativa* L. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, นาโอยาชิ อโนอูชิ, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาอนุวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. 2546. การศึกษาคุณสมบัติของ แป้งข้าวพันธุ์ต่างๆในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. สิ่งพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- วัญญู รอดประพัฒน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล, วารุณี เตีย และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2546. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้อากาศร้อน และไอน้ำร้อนชนิดยึ่ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4. เค ยู โฮม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 278-288.
- สุทธิณี วาณิชสำราญ. 2545. การเพิ่มปริมาณข้าวต้นของข้าวคุณภาพต่ำโดยการเข้าร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, อติเทพ ทวีรัตนพานิชน์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสวี และสุนันทา วงปียชน. 2541. ผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. 24(2): 49-64.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรีชญาวรรการ และชัยยงค์ เตชะไพโรจน์. 2550. การจัดการข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการปรับปรุงคุณภาพและการพัฒนาผลิตภัณฑ์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 38 : 5 (พิเศษ) : 291-300.
- สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. 2528. การสัมมนาวิชาการ เรื่อง ฟลูอิดไดเซชัน ครั้งที่ 2. วันที่ 31 กรกฎาคม – 3 สิงหาคม 2527. ห้องประชุมอาคารวิทยพัฒนา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- คันสนีย์ อุดมระติ, กิรตินาฏ พูลเกษร, สุพัตรา โพธิเศษ และสงวนศรี เจริญเหรียญ. 2546. ผลของปริมาณน้ำต่อการเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41. วันที่ 3-7 กุมภาพันธ์ 2546, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 407-412.
- คันสนีย์ อุดมระติ. 2548. การเกิดเจลาทีนในเซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าว 4 พันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี. 2539. ผลงานที่สำเร็จในรอบ 80 ปี. ใน เอกสารที่ระลึกในรอบ 80 ปี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี. สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี และสุนันทา วงปียชน. 2542. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันเพื่อการเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ด. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทยาศาสตร์). 33: 134-145.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 366 หน้า.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 366 หน้า.

### ภาษาอังกฤษ

AACC. 1995. Approved Method of the American Association of Cereal Chemists. 9<sup>th</sup> ed. St. Paul, MN: AACC.

AOAC.1990. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15<sup>th</sup> ed. Washington D.C.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. AOAC., Washington DC.

Becker, A., Hill, S. E. and Mitchell, J.R. 2001. Relevance of amylase-lipid complexes to the behavior of thermally processed starch. Starch/Stärke. 53 : 121-130.

Beta, T. and H. Corke, H. 2001. Noodle quality as relate to sorghum starch properties. Cereal Chemistry.78 (4) : 417-420.

Billiaderis, C.G. 1998. Structure and phase transition of starch polymers, *In* R.H. Walter, ed. Polysaccharide Association Structure in Food. New York : Marcel Dekker. pp. 57-141.

Borompichaichartkul, C., Wiset, L., Impaprasert, R., and Waedalor, I. 2005. Effects of combination of high temperature and intermittent drying on volatile compounds and other quality attributes of Thai fragrant rice. *In* A. B. Datta, K. M. Kundu, and A. G. P. Sinha (eds), Proceedings of the 4th Asia Pacific Drying Conference, India. pp 1166-1176.

- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. International Journal of Biological Macromolecules. 23 : 85–112.
- Chang, S. and Lui, L. 1991. Retrogradation of rice starches studied by differential scanning calorimetry and its role in gelatinization. Biopolymer. 45 : 323-332.
- Chang, Y. H. and Lin, J. H. 2006. Effect of molecular size and structure of amylopectin on the retrogradation thermal properties of waxy rice and waxy cornstarch. Food Hydrocolloids. 21 : 645–653.
- Chaplin, M. 2008. Starch [Online]. (n.d.). Available from: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>. [2008, 28 February]
- Cheetam, N.W.H. and Tao, L. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. Carbohydrate Polymers. 36: 277-284.
- Crossen, A. G. and Siebenmorgan, T. J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering effect on milling quality. Transaction of the ASAE, 23 : 661-1667.
- Crossen, A. G., Jimenez, M.J. and Siebenmorgan, T. J. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. Journal of Food Engineering. 59 : 61-69.
- Derycke, V., Vandeputte, G.E, Vermeulen, R., Man, D.W., Goderis, B, Koch M.H.J., and Delcour J.A. 2005. Starch gelatinization and amylose-lipid interaction during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. Journal of Cereal Science. 42: 334-343.
- Eliasson, A. C. and Krong, N. 1985. Physical properties of amylose-monoglyceride complexes. Journal of Cereal Science. 3 : 239–248.
- Ghiasi, K., Hosney, R. C and Maston, E.V. 1982. Gelatinization of wheat starch.III. Differential scanning calorimetry and light microscope. Cereal Chemistry. 59 : 258-262.
- Goodfellow, B., and Wilson, R.H. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. Biopolymers. 30: 1183-1189.
- Hamaker, B.R. and Griffin, V. K. 1993. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. Cereal Chemistry. 70 (4) : 377-380.

- Han, X.Z. and Hamaker, B.R. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. Journal of Cereal Science. 34 : 279–284.
- Hermansson, A.M., Svegmarm, K. 1996. Developments in the understanding of starch functionality. Trends in Food Science and Technology. 7 : 345-353.
- Hoover, R. 1998. Starch-lipid interactions. *In* R.H., Walter (ed.). Polysaccharide Association Structures in Food. New York. Marcel Dekker.
- Hoseney, R. C.1998. Principle of cereal science and technology. 2<sup>nd</sup> ed, The American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA. 378 p.
- Inprasit, C. and Noomhorm, A. 2001. Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of drying and operation on rice quality. Drying Technology. 19 : 389-404.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P., and Soponronnarit, S. 2008. Effects of drying temperature and tempering time on starch digestibility of brown fragrant rice. Journal of Food Engineering. 86 : 251-258.
- Jane, J., Chen, Y.Y., Lee, L.F., Mcpherson, A.E., Wong, K.S., Radosavljevic, M. and Kasemsuwan, T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chemistry. 76 : 629-637.
- Juliano, B.O. 1964. The Protein of Rice Grain. *In* Transaction of the Second Far East Symposium on Nutrition. The Republic of China and United States of America Interdepartmental Committee on Nutrition for National Development National Institutes of Health. Bethesda. Maryland.
- Juliano, B.O. 1972. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Science Today. 16 (10) : 334-340.
- Juliano, B.O. 1984. Rice starch: Production, properties and uses..*In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller, and E.F. Paschall (eds). Starch Chemistry and Technology. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, Inc. pp 507-528.
- Juliano, B. O. 1985. Criteria and tests for rice grain qualities. *In* B. O. Juliano (ed). Rice: Chemistry and Technology. Minnesota: The American Association of Cereal Chemists. pp. 443-523.

- Juliano, B.O. 1992. Structure, chemistry and function of the rice grain and its fraction. Cereal Food World. 37 : 772-778.
- Karim, A. A., Norziah, M. and Seow, C. C. 2000. Review methods for the study of starch retrogradation. Food Chemistry. 71 : 9-36.
- Kim, J.O., Kim, W.S. and Shin, M.S. 1997. A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, X-ray and  $\alpha$ -amylose methods. Starch/Stärke. 49 (2) : 71-75.
- Lai, H. M. 2001. Effects of hydrothermal treatment on physicochemical properties of pregelatinized rice flour. Food Chemistry. 72: 455-463.
- Liu, Q. and Thomson, D.B. 1998. Effect of moisture content and different gelatinization heating temperature on retrogradation of waxy-type maize starch. Carbohydrate Research. 314 : 221-235.
- Lund, D. 1984. Influence of time, temperature, moisture, ingredients and processing condition on starch gelatinization. Carbohydrate Polymers. 20 : 29-273.
- Marshall, W. E. 1994. Starch gelatinization in brown and milled rice: a study using differential scanning calorimetry. In W. E. Marshall, and J. I. Wadsworth (eds), Rice Science and Technology, pp. 205-227. New York: Marcel Dekker.
- Meeso, S., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. Journal of Food Engineering. 65 : 293-301.
- Phillips, O.G. and Williams, P.A. 2000. Handbook of Hydrocolloids. Woodhead Publishing, New York.
- Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Terdyothin, A. 2001. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidization technique. Drying Technology. 20 (1) : 195-210.
- Poomsa-ad, N., Terdyothin, A., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2005. Investigations on head-rice yield and operating time in the fluidized-bed drying process: experiment and simulation. Journal of Stored Products Research. 41 : 387-400.
- Putaux, L.J., Bulon, A. and Chaanzy, H. 2000. Network formation in diluted amylase and amylopectin studies by TEM. Macromolecular. 30 : 6416-6422.

- Rordprapat, W., Nathakaranakule, A., Tia, W. and Soponronnarit, S. 2004. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering. 71 : 28-36.
- Sasaki, T., Yasui and Matsuki, J. 2000. Effect of amylose content on gelatinization retrogradation and pasting properties of starches from waxy and non-waxy wheat and their F1 seed. Cereal Chemistry. 77:58-63.
- Shelton, D.R. and Lee, W.J. 2000. Cereal carbohydrates. In K. Kulp, ed. Handbook of Cereal Science and Technology. 2<sup>nd</sup> ed. New York : Marcel Dekker.
- Shi, Y.C. and Seib, P.A. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. Carbohydrate Research. 227 : 131-145.
- Singh, N., J. Singh, L. Kaur, N.S. Sodhi, B.S. Gill. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Food Chemistry. 81:219-231.
- Singh, N., Kaur, L., Sandhu, S.K., Kaur, J. and Nishinari, K. 2006. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. Food Hydrocolloids. 20 : 534-542.
- Sodhi, S.N and Singh, N. 2002. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. Food Chemistry. 80: 99-108.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Wanggji, M. 1996. Commercial fluidized bed paddy dryer. Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium. Krakow, Poland, 30 July-2 August. A : 638-644.
- Soponronnarit, S., Wetchakama, S., Swasdisevi, T and Poomsa-ad, N. 1999. Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. Drying Technology. 17 (1&2) : 345-353.
- Tako, M. and Hizukuri, S. 2000. Retrogradation mechanism of rice starch. Cereal Chemistry. 77(4): 473-477.
- Takaya, T., Sano, C. and Nishinari, K. 2000. Thermal studies on the gelatinization and retrogradation of heat-moisture treated starch. Carbohydrate Polymers. 41 : 97-100.

- Taweerattanapanish, A., Soponronnarit, S., Wetchakama, S., Kongseri, N. and Wongpiyaachon, S. 1999. Effect of drying on head rice yield using fluidization technique. Drying Technology. 17 : 345-353.
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P. and Soponronnarit, S. 2004. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. Drying Technology. 22 (7) : 1731-1754.
- Vandeputte, G.E., Vermeylen, R., Geeroms J. and Delcour, J.A. 2003. Rice starches. III. Structure aspects provide in sight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. Journal of Cereal Science. 38: 61-68.
- Wang, Y.J. and Wang, L. 2002. Structures of four waxy rice starches in relation to thermal, pasting and texture properties. Cereal Chemistry. 79 (2) : 252-256.
- Whistler, R.L. and Daniel, J. R. 1984. Molecular structure of starch. *In* R.L., Whistlers, J.N., Bemiller, and E.F., Phaschall, (eds.). Starch: Chemistry and Technology. 2<sup>nd</sup> ed. Florida. Academic Press, Inc. pp. 153-178.
- Wiset, L., Szrednicki, G., and Driscoll, R. H. 2003. Effects of high temperature drying on physico-chemical properties of rice. *In* V. K. Jindal, A. Noomhorm, and I. Ahmad (eds), Proceedings of the 3rd Asia Pacific Drying Conference, pp 261-269.
- Zobel, H.F. 1964. X-ray analysis of starch granules. *In* R.L. Whistler, R.J. Smith, J.N. Bemiller and M.L. Wol (eds.). Method in Carbohydrate chemistry. Volume IV starch. Florida: Academic Press. pp 109-113.
- Zobel, H. F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pasted. *In* R. L. Whistler, J. N. Bemiller, and P. Eugene (eds), Starch: Chemistry and Technology. Florida: Academic Press. pp 285-305.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

### ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (Apparent amylose) (Juliano, 1972)

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 20)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
4. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

#### สารเคมี

1. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 %
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่ง NaOH หนัก 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร
3. สารละลายกรดแอสติกกลั่น ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยตวงกรด แอสติกกลั่น (glacial acetic acid) ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 ลิตร
4. แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylose) (Sigma, USA)
5. สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยชั่งไอโอดีน ( $I_2$ ) 0.2 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา

#### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.1000 กรัม ใส่ในขวด (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เพื่อเกลี่ยแป้งให้กระจายออก ระวังอย่าให้แป้งขึ้นมาเกาะตามผนังขวด
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแป้งที่เกาะอยู่ตามผนังขวด
4. นำแป้งไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

5. ถ่ายแบ่งลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำล้าง 2-3 ครั้งเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน
6. ปิเปตน้ำแบ่งปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
7. เติมสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร
8. เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที
9. ทำ blank โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรมาเติมสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีนปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร
10. วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของ blank เป็น 0
11. นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

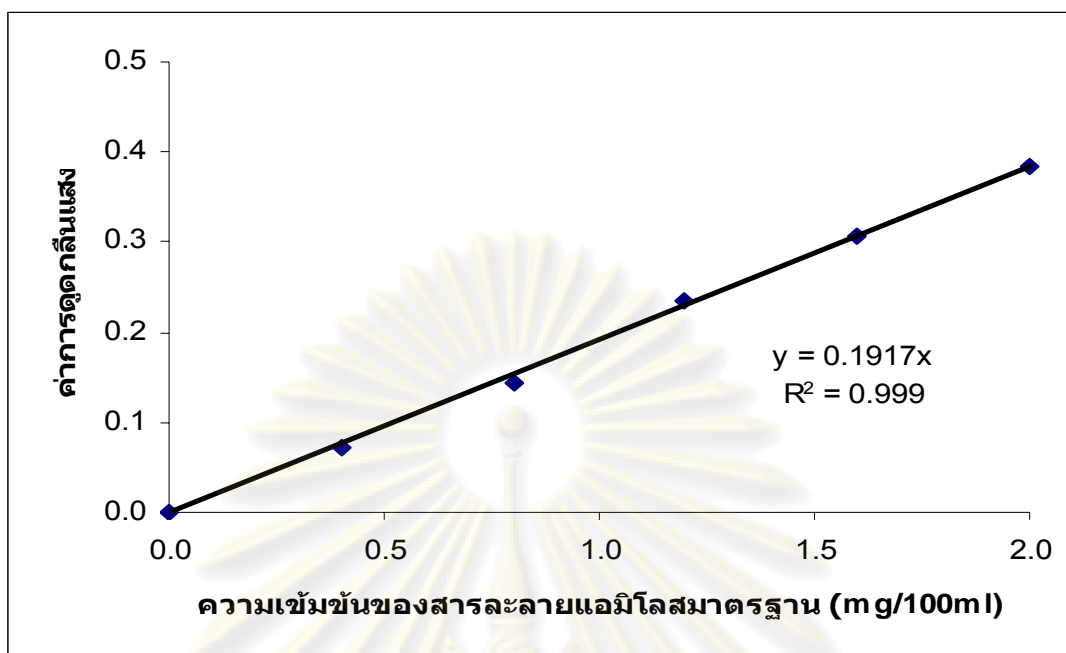
#### การสร้างกราฟมาตรฐาน (standard curve)

1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัม ใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 2.3.2-2.3.4 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน
2. ปิเปตแบ่งสารละลายมาตรฐาน 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดแอสซิติค ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยการเติมน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที
3. วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร
4. เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักแบ่งแห้ง (กรัม)}}$$

(มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)



รูปที่ ก.1 ลักษณะกราฟมาตรฐานของแอมิโลสบริสุทธิ์

## ก.2 วิธีการปรับความชื้นของข้าวเปลือก

1. วิเคราะห์ความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้น
2. คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไปในการปรับความชื้นตามสูตร

$$W_w = W_f - W_i$$

$$W_f = \frac{W_i \times (1 - MC_i)}{(1 - MC_f)}$$

เมื่อ  $W_w$  = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไป (กรัม)  
 $W_f$  = น้ำหนักเมล็ดข้าว (กรัม) + น้ำหนักน้ำ (กรัม)  
 $W_i$  = น้ำหนักเมล็ดข้าวเริ่มต้น (กรัม)  
 $MC_i$  = ความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้น (% wb / 100)  
 $MC_f$  = ความชื้นของข้าวเปลือกที่ต้องการ (% wb / 100)

1. เติมน้ำลงในข้าวเปลือกตามปริมาณที่คำนวณได้จากข้อ 2
2. คลุกเคล้าให้น้ำกระจายอย่างทั่วถึง
3. นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C และนำออกมาคลุกเคล้าทุกวันเป็นเวลา 7 วัน

### ก.3 วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบด

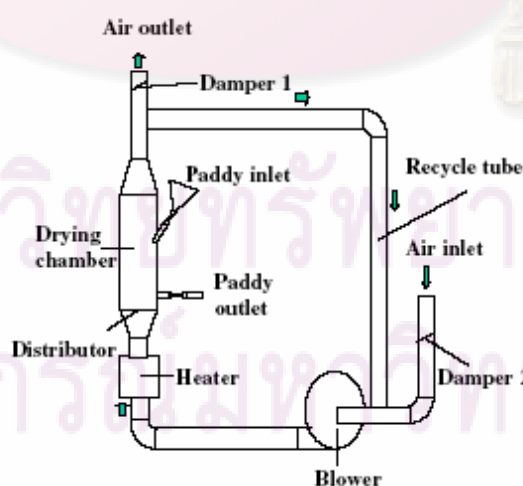
(สุทธิณี วานิชสำราญ, 2545)

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดความเร็วลม (Air-max รุ่น SK-26A, Japan)
2. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นเครื่องอบแห้งแบบวงวด ลักษณะอุปกรณ์เป็นดังรูปที่ ก.1

ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร พื้นที่ผิวของห้องอบแห้งและท่อลมทั้งหมดหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2.5 เซนติเมตร ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ พัดลมที่ใช้เป็นพัดลมแรงเหวี่ยง ใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เป็นตัวขับเคลื่อนพัดลม และมีอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของพัดลมทางกล เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการ มีลิ้นปีกผีเสื้อที่ทางออกของห้องอบแห้ง และที่ท่ออากาศเวียนกลับ สำหรับใช้ปรับปริมาณอากาศเวียนกลับ วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง โดยใช้ thermocouple type K ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ และแสดงอุณหภูมิที่วัดได้ มีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ต่อเข้าทางด้านบนของห้องอบแห้ง เพื่อใช้กรอกข้าวเปลือกที่จะใช้ทำการทดลอง ด้านล่างของห้องอบแห้งมีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ท่อทั้งสองปิดด้วยฝาเกลียวทำจากเหล็ก สำหรับปล่อยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ลงในขวดแก้วเพื่อนำไปเก็บในที่อับอากาศต่อไป



รูปที่ ก.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ที่มา: Rordprapat และคณะ (2004)

ในการทดลองใช้ความสูงเบด 9.5 เซนติเมตร ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง ประมาณ 2.5 เมตร/วินาที ปริมาณอากาศเวียนกลับประมาณ 80% ก่อนการทดลองทุกครั้งจะต้องเดินเครื่องที่อุณหภูมิที่จะทดลองทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้เครื่องมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และภายหลังจากอบแห้งแต่ละงวดต้องเปิดฝาทางเข้าและทางออกไว้เพื่อให้ข้าวเปลือกที่ค้างอยู่ภายในเครื่องให้ออกไปให้หมดแล้วจึงปิดเพื่อทดลองต่อไป

### 3. อุปกรณ์สำหรับการเทมเปอริง

ใช้ขวดแก้วทรงสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีแผ่นยางคั่นระหว่างฝาและปากขวด มีลวดสำหรับเกี่ยวเพื่อปิดฝา ทำให้เกิดแรงกดเพื่อป้องกันการรั่ว การป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ใช้วิธีเก็บไว้ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากับ อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบด ซึ่งอุณหภูมินี้จะต้องวัดทุกครั้งที่เปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้ง และขวดแก้วนี้ ต้องนำเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ด เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนให้กับขวดแก้ว ก่อนจะนำข้าวเปลือกที่อบแห้งแล้วมาใส่ (สมชาติ และคณะ, 2541) เวลาที่ใช้ในการเทมเปอริงเท่ากับ 45 นาที



รูปที่ ก.3 อุปกรณ์สำหรับการเทมเปอริง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด

1. เปิดเครื่องฟลูอิดไชน์เบด ตั้งอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่ 90°C และความเร็วของอากาศเท่ากับ 2.5 เมตร/วินาที เปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ภาวะการทำงานคงที่
2. เริ่มอบแห้งโดยป้อนข้าวเปลือกให้ได้ความสูงเบด 9.5 เซนติเมตร (ประมาณ 1900 กรัม สำหรับข้าวเปลือกที่ความชื้น 26 % wb) ลงไปในห้องอบแห้ง
3. ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ (เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการ ประมาณ 18-20 % wb)
4. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปล่อยข้าวเปลือกลงในภาชนะที่มีฉนวนหุ้มเพื่อเก็บความร้อน เสิบบเทอร์โมมิเตอร์ลงไปวัดอุณหภูมิภายในกองเมล็ดข้าวเปลือก บันทึกอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้
5. ปล่อยข้าวเปลือกที่เหลือในห้องอบแห้งออก ทิ้งเครื่องไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ภาวะการทำงานคงที่
6. ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-4 อีก 1 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้ตามข้อ 4 นำค่าที่ได้ไปตั้งอุณหภูมิของตู้อบที่ใช้สำหรับการหมักเปอริง
7. ปล่อยข้าวเปลือกที่เหลือในห้องอบแห้งออก ทิ้งเครื่องไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ภาวะการทำงานคงที่
8. ป้อนข้าวเปลือกที่จะทำการอบแห้งลงไปในห้องอบแห้ง
9. ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ต้องการ (เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการ ประมาณ 18-20 % wb)
10. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปล่อยข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้ง โดยส่วนที่ 1 ปล่อยลงในขวดแก้วที่ใช้สำหรับการหมักเปอริงทันที ส่วนที่ 2 ใส่ในภาชนะสำหรับตากในที่ร่ม จากนั้นหาความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้หลังจากผ่านการอบด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด จำนวน 2 ซ้ำ
11. นำขวดแก้วที่บรรจุข้าวเปลือกจากส่วนที่ 1 มาเก็บไว้ในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิตามข้อ 6 ไว้แล้ว เป็นเวลา 45 นาที
12. เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำข้าวเปลือกออกจากขวดแก้วใส่ในภาชนะสำหรับตากในที่ร่ม
13. ข้าวเปลือกทั้ง 2 ส่วน ตากในที่ร่มจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12-14% wb
14. ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-13 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็น 150 และ 170 °C ตามลำดับ

ตัวอย่างควบคุม คือ ข้าวเปลือกที่ผ่านการปรับความชื้น เป็น 24-26% wb นำมาตากในที่ร่ม จนความชื้นสุดท้ายเป็น 12-14% wb

#### ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (1990) โดยใช้อุณหภูมิ  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  ใช้เมล็ดข้าวเปลือก  
ประมาณ 30 กรัม อบแห้งนาน 72 ชั่วโมง

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น 600, Germany)
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งของ Sartorius รุ่น CP3202s, Germany ชั่งน้ำหนักสูงสุด 3200 กรัม
3. ถ้วยอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร
4. โถดูดความชื้น

##### วิธีการทดลอง

1. นำถ้วยอลูมิเนียมไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยอลูมิเนียมเปล่าที่แน่นอนเก็บไว้
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือก ประมาณ 30 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียม
3. บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอนเก็บไว้
4. นำถ้วยอลูมิเนียมที่มีเมล็ดข้าวเปลือกเข้าตู้อบ และตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  โดยเปิดฝาของถ้วยอลูมิเนียมไว้
5. เมื่อครบ 72 ชั่วโมง นำถ้วยอลูมิเนียมที่มีเมล็ดข้าวเปลือกออกจากตู้อบพร้อมปิดฝาถ้วยอลูมิเนียม ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม
6. นำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า และคำนวณหาปริมาณความชื้นตามสูตรดังนี้

$$\text{ความชื้น (\% wb)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างข้าวก่อนอบ}} \times 100$$

#### ก.5 การวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแอลกอฮอล์ ที่มีสเกลตั้งแต่  $0-100^{\circ}\text{C}$
2. ภาชนะที่มีฝาปิดพร้อมฉนวนหุ้มป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก

### วิธีการทดลอง

1. นำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชันบรรจุลงในภาชนะที่มีฉนวนหุ้ม (รูปที่ ก.4) ทันที
2. เสียบเทอร์โมมิเตอร์ ลงในช่องขนาดเล็กที่เจาะไว้ที่ฝาภาชนะ
3. ใช้ผ้าหุ้มภาชนะไว้อีกชั้นหนึ่ง พร้อมกับอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้ทุกๆ 5 วินาที
4. จุดบันทึกอุณหภูมิที่วัดได้ อุณหภูมิของเมล็ดจะเล็ดออกจากค่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้



รูปที่ ก.4 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าว

### ก.6 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (สุทธิณี วานิชสำราญ, 2545)

ซึ่งนำหนักข้าวขาวที่ได้จากการขัดสีแล้ว ซึ่งเป็นเมล็ดข้าวที่มีความยาวไม่ต่ำกว่า 80% ของข้าวเต็มเมล็ด

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องคัดแยก (Aspirator)
2. เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง (Jircas, Japan)
3. เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด (Jircas, Japan)
4. เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (Jircas, Japan)
5. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น CP320S, Germany) ซึ่งนำหนักสูงสุด 3200 กรัม





รูปที่ ก.5 เครื่องกะเทาะเปลือกชนิดลูกกลิ้งยาง



รูปที่ ก.6 เครื่องขัดขาวชนิดหินขัด



รูปที่ ก.7 เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว

### วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดข้าวเปลือก โดยผ่านเครื่องคัดแยก (Aspirator) เพื่อดูเอาเมล็ดลีบ ระแง้ (แขนง หรือกิ่งที่เชื่อมเมล็ดข้าวกับรวงข้าว) และสิ่งเจือปนต่างๆออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ส่วนหิน กรวด ทราย หรือเหล็ก คัดแยกออกด้วยมือ
2. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ตัวอย่างละ 250 กรัม บันทึกค่าไว้
3. นำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกจนเปลือกหลุดออกหมด
4. ชั่งน้ำหนักข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะเปลือกออกแล้วบันทึกค่าไว้
5. นำมาขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวชนิดหินขัด เป็นเวลา 45 วินาที ที่ข้าวสารไว้ให้เย็น
6. ชั่งน้ำหนักข้าวสารที่ได้จากการขัดขาว แล้วบันทึกค่าไว้
7. นำข้าวสารที่ได้ทั้งหมดไปแยกส่วนที่เป็นข้าวต้น และข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว
8. ชั่งน้ำหนักข้าวต้นที่ได้ แล้วบันทึกค่าไว้
9. นำค่าที่ได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ ข้าวต้ม} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวต้ม}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

ก.7 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ข้าวต้มไข่ (ดัดแปลงจากวิธีของ Rordprapat *et al.*, 2004)  
 นำข้าวสารเต็มเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด แยกเมล็ดข้าวที่มีจุดช้ำ ทึบแสงตั้งแต่ 50 % ขึ้นไป  
 ออกโดยใช้แสงไฟส่องบันทึกรับจำนวนข้าวต้มไข่ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์ข้าว  
 ต้มไข่

ก.8 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวโดยกล้อง  
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Scanning Electron Microscopy (JEOL รุ่น JSM-5400 LV, Japan)
2. เครื่องฉาบทอง (ion sputter) (SPI-Module Sputter Coater)

#### วิธีการทดลอง

ตรวจดูลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์  
 อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยควบคุมภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10  
 กิโลโวลท์ และใช้กำลังขยายที่ 1,500 เท่า แล้วบันทึกภาพตัวอย่าง

ก.9 สมบัติทางความหนืด โดยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) (AACC, 1995)

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่อง Rapid Visco Analyser (Super 3, Newport Scientific Instruments and  
 Engineering, Australia)

#### วิธีการทดลอง

1. ชั่งแป้งข้าวปริมาณ  $3 \pm 0.01$  กรัมใส่ลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร  
 $25.0 \pm 0.1$  มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมทรงกระบอก
2. ใส่แป้งลงในถ้วยอลูมิเนียมทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยอลูมิเนียม  
 ทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าแป้งยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีก  
 ครั้ง
3. ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอกและสวมใบพายเข้ากับที่ยึดโดยให้ใบพาย

อยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่ต้องระวังคืออย่าผสมแป้งกับน้ำนานกว่า 1 นาทีก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับแป้งข้าว มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของแป้งข้าว

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (นาที:วินาที)
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	
50.0	1:00
95.0	4:45
95.0	7:15
50.0	11:06
สิ้นสุดการทดสอบ	12:30

สำหรับความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงใช้ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีคงที่ตลอดการทดสอบ

4. บันทึกอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback) เป็นความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

## ก. 10 สมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

(ดัดแปลงจากวิธีของ Chang and Lin, 2006)

### ก.10.1 การเกิดเจลลิ่งในเซชัน

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (Perkin-Elmer รุ่น Dimond-DSC, USA) ที่เชื่อมต่อกับ Pyris™ operation software และ purge ด้วยแก๊สไนโตรเจน
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น Explorer, Switzerland)
3. Aluminum volatile sample pan (Perkin-Elmer, kit number 0219-0062, USA)

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแป้งผสมน้ำกลั่น อัตราส่วนแป้ง : น้ำเท่ากับ 1:3 ใส่ลงใน DSC volatile sample pan น้ำหนักแป้งและน้ำรวม 15 มิลลิกรัม
2. ปิดฝา pan ด้วยเครื่องปิดฝาให้สนิท แล้วเก็บ pan ที่ปิดฝาแล้ว ไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน เพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่ภาวะสมดุล
3. นำ pan ใส่ในช่อง sample และนำ pan เปล่าที่ปิดฝาสนิทใส่ในช่อง reference ของเครื่อง DSC จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC โดยกำหนดภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
  - คงไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 1 นาที
  - เพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 85°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C / นาที
  - คงไว้ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 นาที
4. คำนวณค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลในเซชัน โดยใช้ระบบ Autocalculation ของ Pyris™ operation software และบันทึกค่าต่างๆ ได้แก่
  - อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลในเซชัน (onset temperature,  $T_o$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันสูงสุด (peak temperature,  $T_p$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลในเซชัน (conclusion temperature,  $T_c$  หน่วย °C)
  - ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชัน (enthalpy,  $\Delta H_{gel}$  หน่วย J/g dry flour)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### ก.10.2 การเกิดรีโทรเกรดชัน

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (Perkin-Elmer รุ่น Dimond-DSC, USA) ที่เชื่อมต่อกับ Pyris™ operation software และ purge ด้วยแก๊สไนโตรเจน

### วิธีการทดลอง

1. นำ pan ที่ผ่านการวิเคราะห์การเกิดเจลในเซชันแล้ว ในภาคผนวก ก.11.1 เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 21 วัน และเมื่อครบกำหนด นำ pan มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
2. นำ pan ใส่ในช่อง sample และนำ pan เปล่าที่ปิดฝาสนิทใส่ในช่อง reference ของเครื่อง DSC จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC โดยกำหนดภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

- คงไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 1 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 85°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C /นาที
- คงไว้ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 นาที

4. คำนวณค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน โดยใช้ระบบ Autocalculation ของ Pyris™ operation software และบันทึกค่าต่างๆ ได้แก่

- อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน (onset temperature,  $T_o$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิที่เกิดการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันสูงสุด (peak temperature,  $T_p$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน (conclusion temperature,  $T_c$  หน่วย °C)
  - ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน (enthalpy,  $\Delta H_{ret}$  หน่วย J/g dry flour)
- ทำการทดลอง 2 ครั้ง

#### ก .11 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้ง

(ดัดแปลงจากวิธีของ Cheetam and Tao, 1998)

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่อง X-ray diffraction (Bruker axs รุ่น D8 ADVANCE, Germany)

#### วิธีการทดลอง

1. นำแป้งจำนวนประมาณ 5 กรัมใส่ลงใน Petri dish แล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในมีสารละลายโบแตสเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัวบรรจุอยู่ ( $a_w = 0.973$ ) ที่อุณหภูมิห้อง (28-30°C) เป็นเวลา 4 วัน เพื่อให้ตัวอย่างแป้งที่จะนำไปวิเคราะห์มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน (19-20%)
2. บรรจุแป้งที่ปรับความชื้นแล้วลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่างโดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ
3. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งด้วยเครื่อง X-ray diffraction โดยกำหนดภาวะการทดสอบคือ ใช้ Target เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 4.00 ถึง 30.00 องศา  $2\theta$  ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศา  $2\theta$  ต่อวินาที

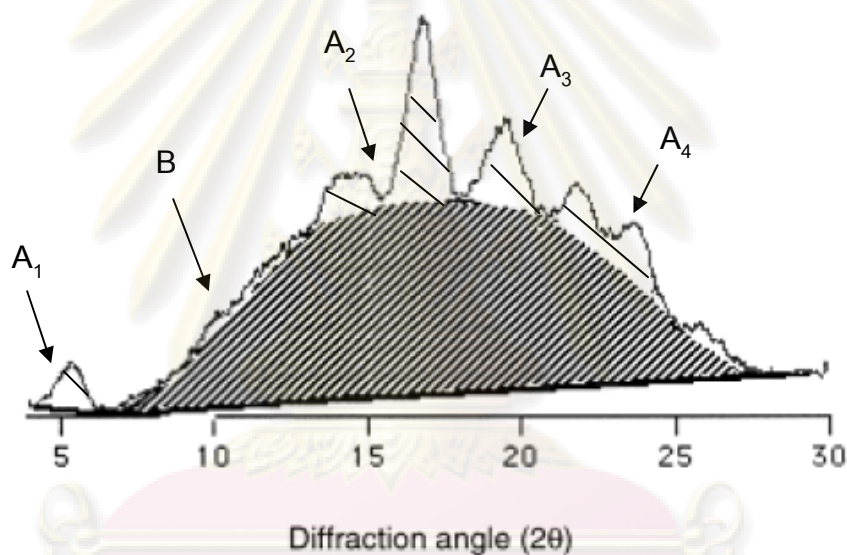
4. บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ และคำนวณค่า % ความเป็นผลึก (Relative crystallinity) (รูปที่ ก.8) โดยคำนวณจากสูตร

$$\% \text{ ความเป็นผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค } (A_1+A_2+A_3+A_4) \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของกราฟ } (A_1+A_2+A_3+A_4 + B)}$$

จากรูปที่ ก.8 A คือ ส่วนที่เป็นผลึก

B คือ ส่วนอสัณฐาน

5. เปรียบเทียบค่า  $2\theta$ , d-Spacing และ Intensity ที่ได้จากการวิเคราะห์กับลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้งที่เป็นรูปแบบมาตรฐาน (Zobel, 1964) ดังตารางภาคผนวกที่ ก.1



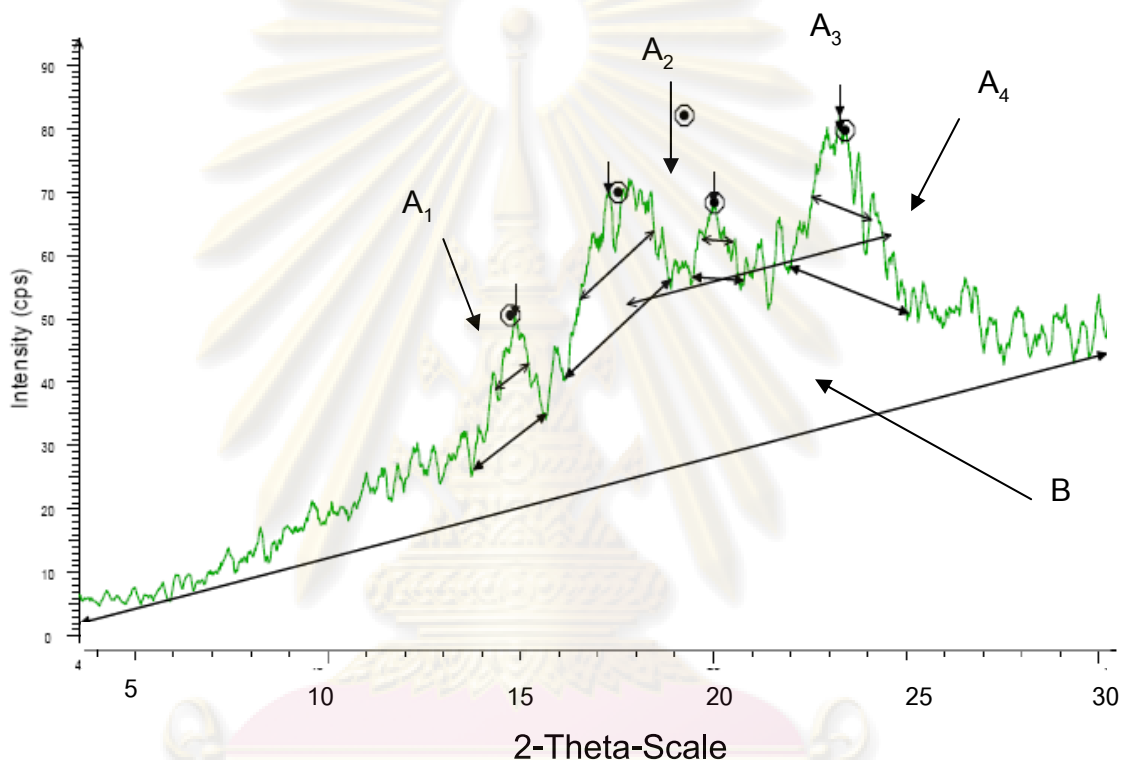
รูปที่ ก.8 ลักษณะสเปกตรัม พื้นที่ใต้พีค และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction

ที่มา : Cheetam และ Tao (1998)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณ % ความเป็นผลึก (จากรูปที่ ก. 9)

$$\begin{aligned} \% \text{ ความเป็นผลึก} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค } (A_1+A_2+A_3+A_4) \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของกราฟ } (A_1+A_2+A_3+A_4+B)} \\ &= \frac{(28.75+60.52+12.69+64.65) \times 100}{740} \\ &= 22.51\% \end{aligned}$$



รูปที่ ก.9 ลักษณะสเปกตรัม พื้นที่ใต้พีค และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 150 °C และใช้วิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งที่เป็นแบบ A และแบบ V

Starch X-ray powder diffraction patterns					
A-type			V-type		
d-Spacing, A°	Intensity*	2θ	d-Spacing, A°	Intensity*	2θ
8.72	w-	10.10	<u>12.0</u>	m	7.36
7.70	w-	11.50	7.46	w	11.70
<u>5.78</u>	s	15.30	<u>6.75</u>	s	13.10
<u>5.17</u>	s	17.10	5.80	w-	15.30
<u>4.86</u>	s-	18.20	5.16	w	17.20
4.37	m	20.30	4.80	w	18.50
<u>3.78</u>	s	23.50	<u>4.42</u>	s	20.10
3.30	w+	27.00	3.93	w+	22.60
2.88	w	31.00	3.52	w	25.30
			3.24	w	27.50

\* Intensity scale: strong (s), medium (m), weak (w), less than (-) และ more than (+)

ที่มา : Zobel (1964)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ข**  
**ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม**

ตารางที่ ข.1 ความชื้นของข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการปรับความชื้นก่อนการทดลอง

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (% wb)
กข 6	25.140±0.101
ขาวดอกมะลิ 105	24.897±0.061
สุพรรณบุรี 60	25.420±0.104

ตารางที่ ข.2 ความชื้นของข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	ความชื้น (% wb)
กข 6	90	18.734±0.552
	150	19.225±0.460
	170	19.481±0.509
ขาวดอกมะลิ 105	90	19.195±0.049
	150	18.788±0.283
	170	19.96±0.085
สุพรรณบุรี 60	90	19.039±0.198
	150	19.835±1.160
	170	19.558±0.170

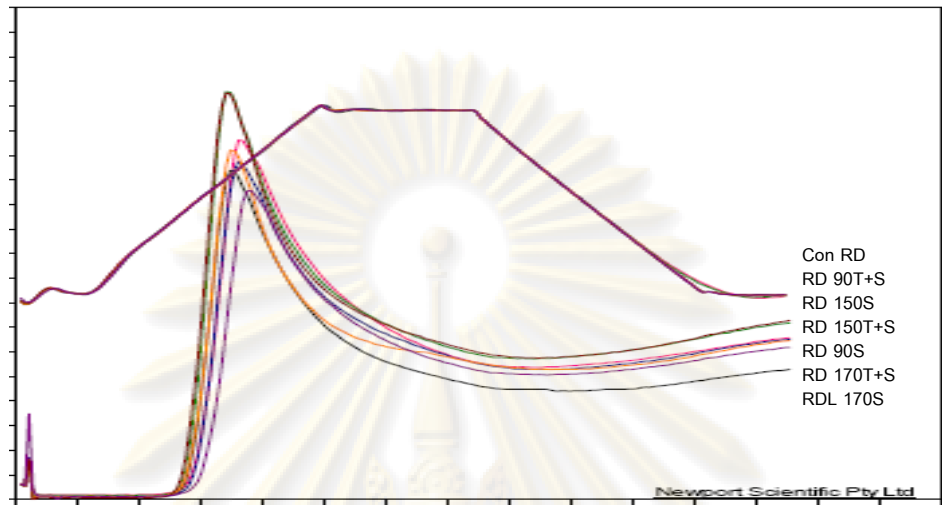
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 คุณหมุมิของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 สายพันธุ์ หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (°C)
กข 6	90	80.25±1.06
	150	82.50±0.71
	170	80.00±0.71
ขาวดอกมะลิ 105	90	79.75±0.35
	150	82.75±0.35
	170	81.00±0.71
สุพรรณบุรี 60	90	79.50±0.71
	150	81.50±0.71
	170	79.25±0.71

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.1 ลักษณะกราฟ RVA ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กช 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



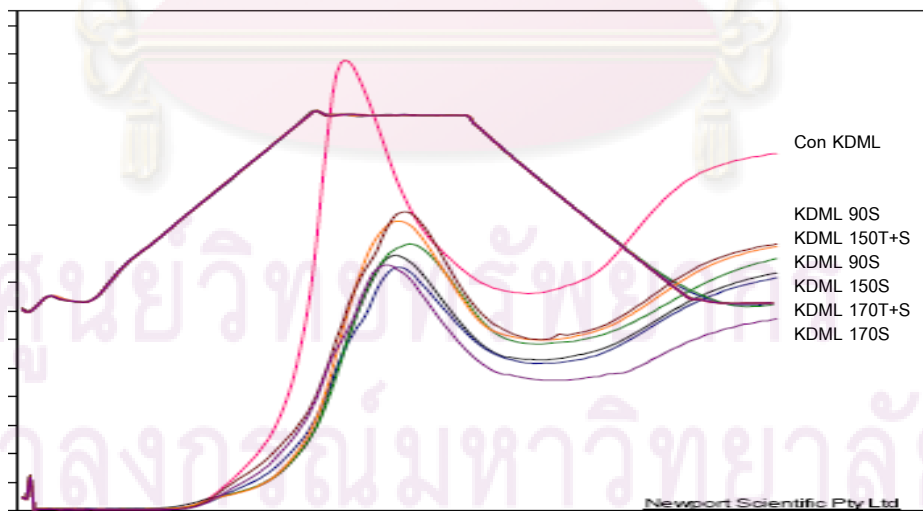
RD หมายถึง ข้าวพันธุ์กช 6

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอรินตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.2 ลักษณะกราฟ RVA ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



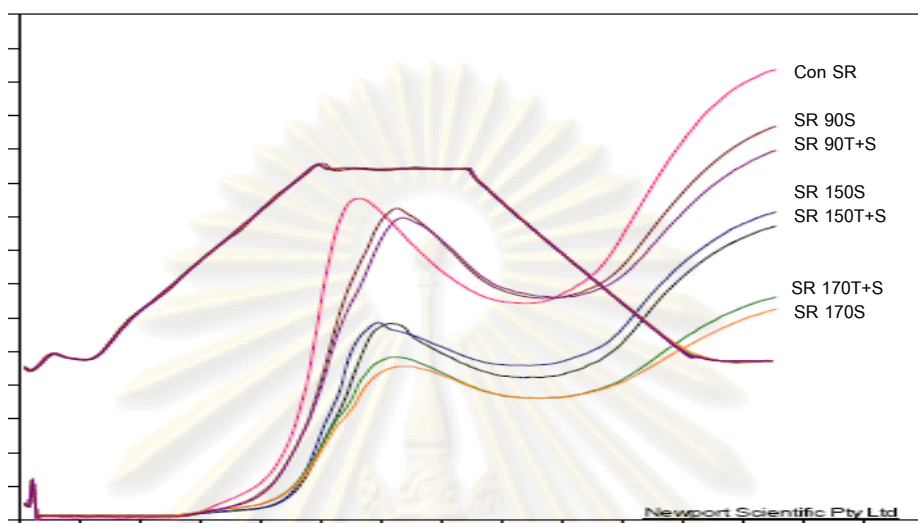
KDML หมายถึง ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอรินตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.3 ลักษณะกราฟ RVA ของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



SR หมายถึง ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60

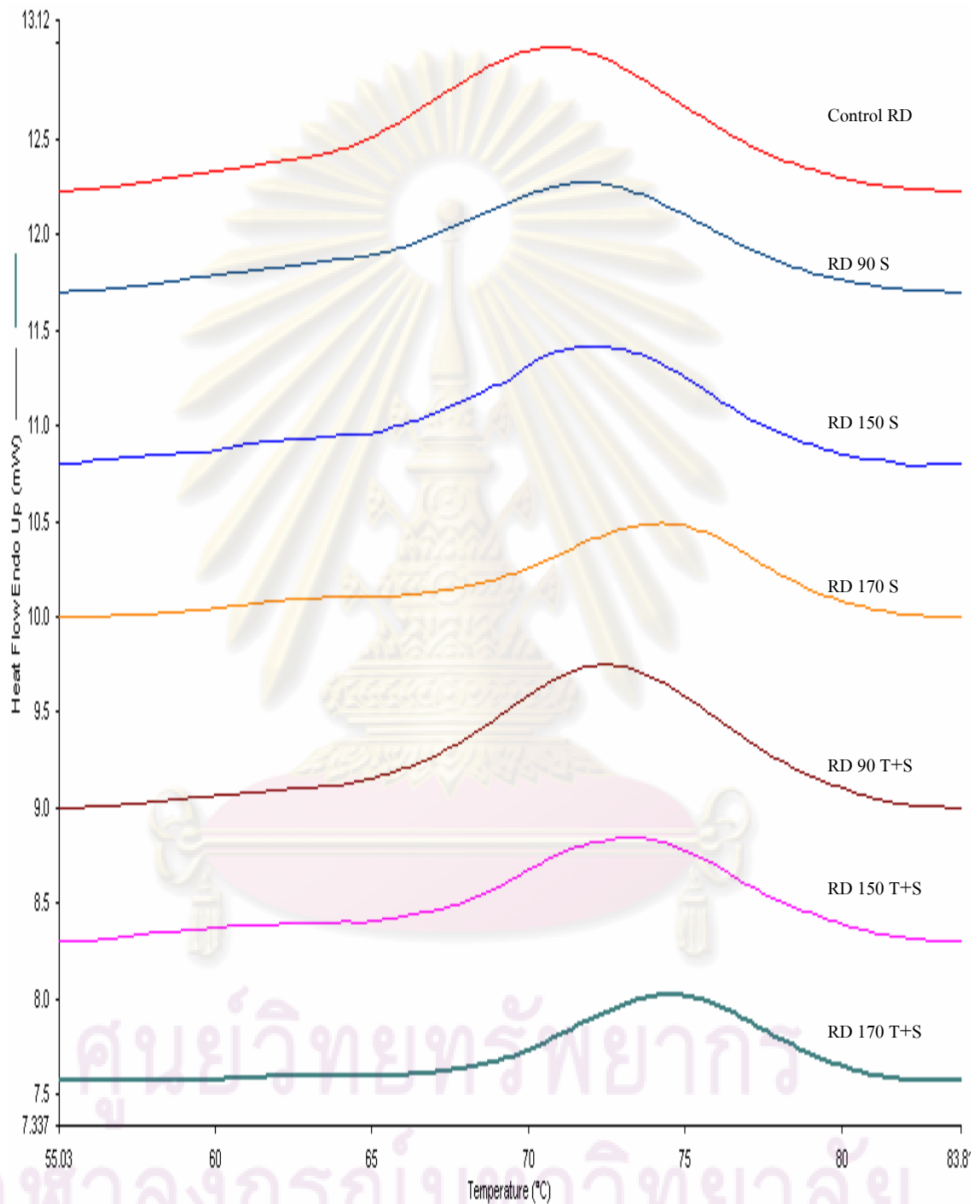
ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับเทมเปอร้งตามด้วยการตากในที่ร่ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.4 DSC thermogram ของการละลายในเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพังก์ กข 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



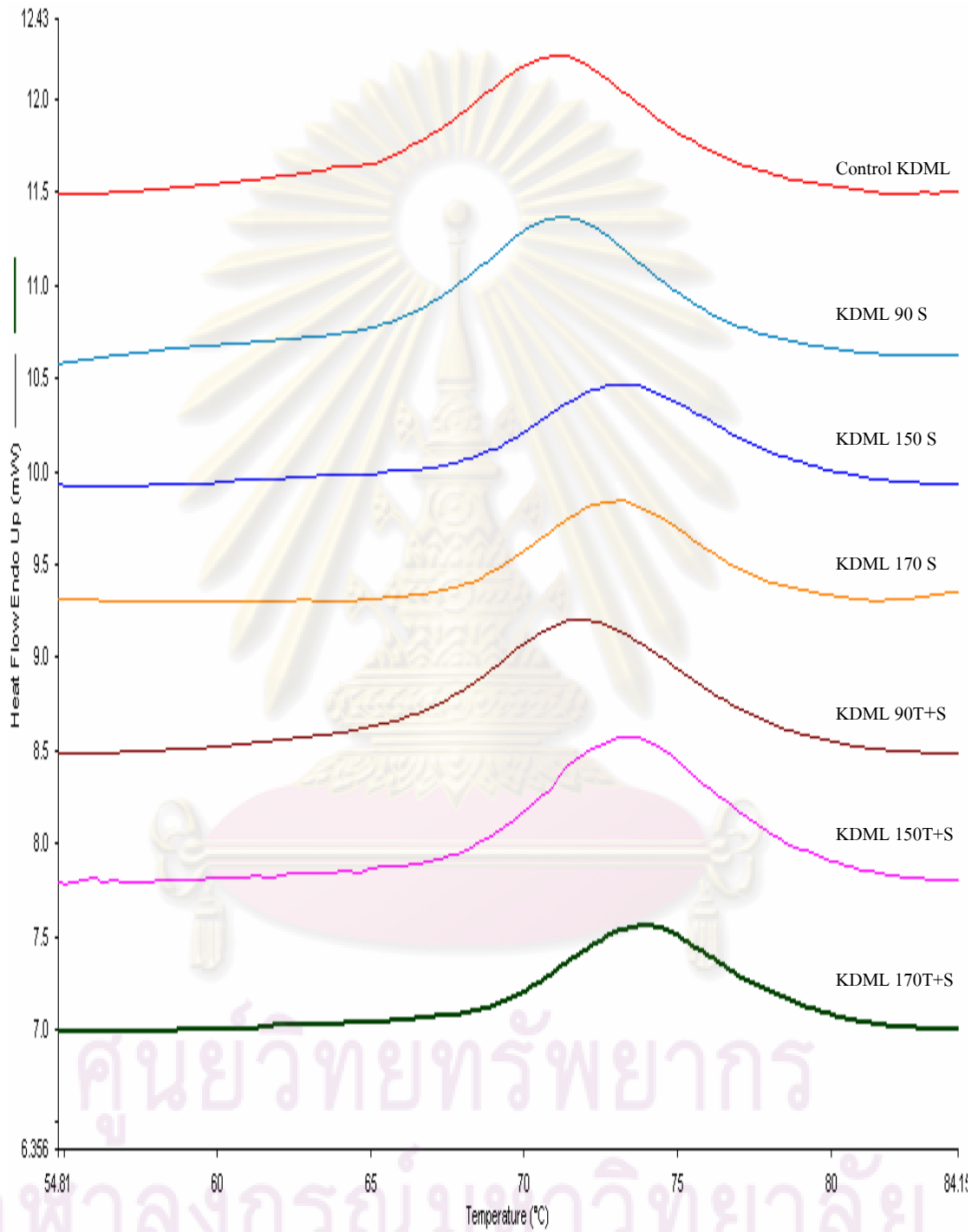
RD หมายถึง ข้าวพังก์ กข 6

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.5 DSC thermogram ของการเจลาทีไนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



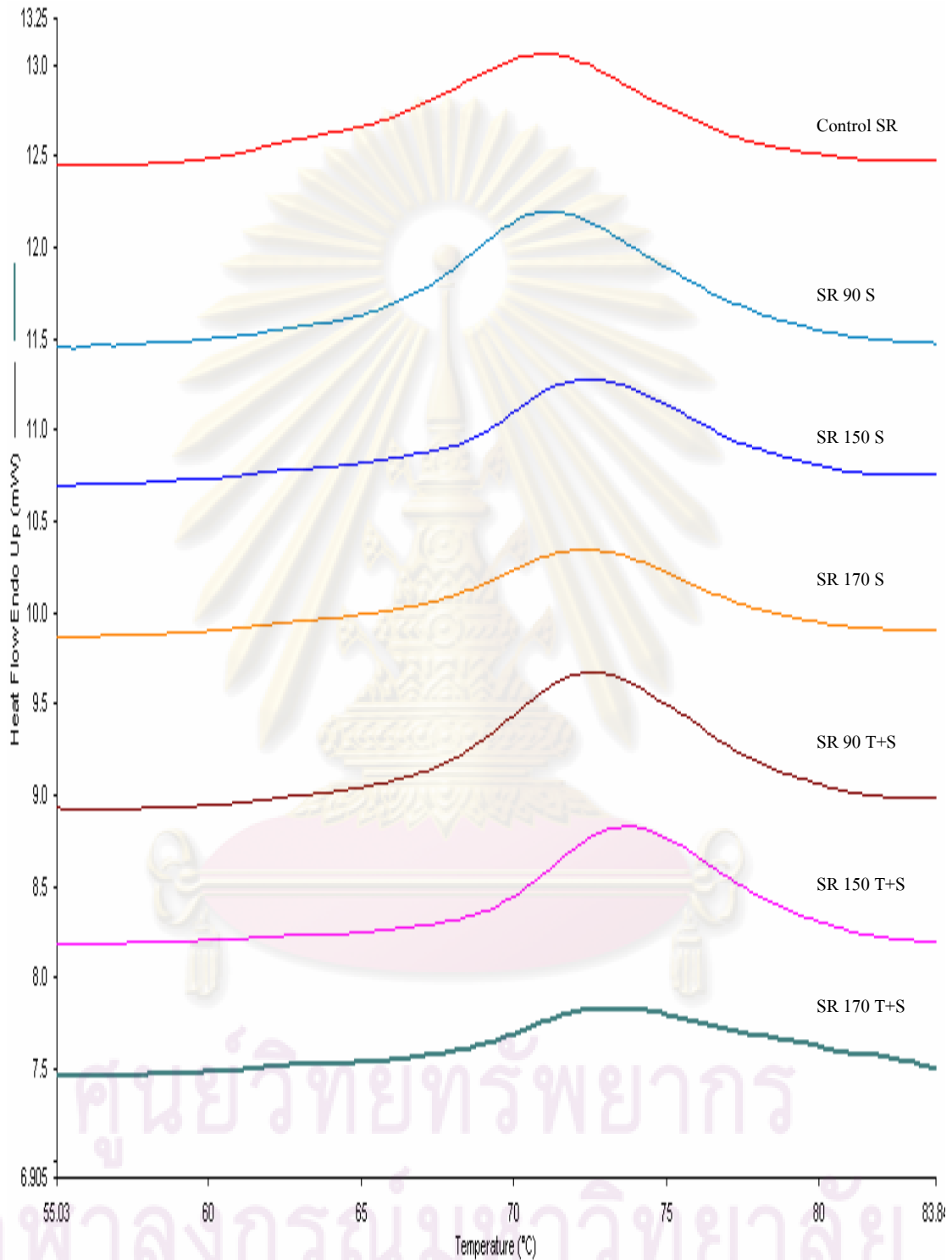
KDML หมายถึง ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.6 DSC thermogram ของการละลายในเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



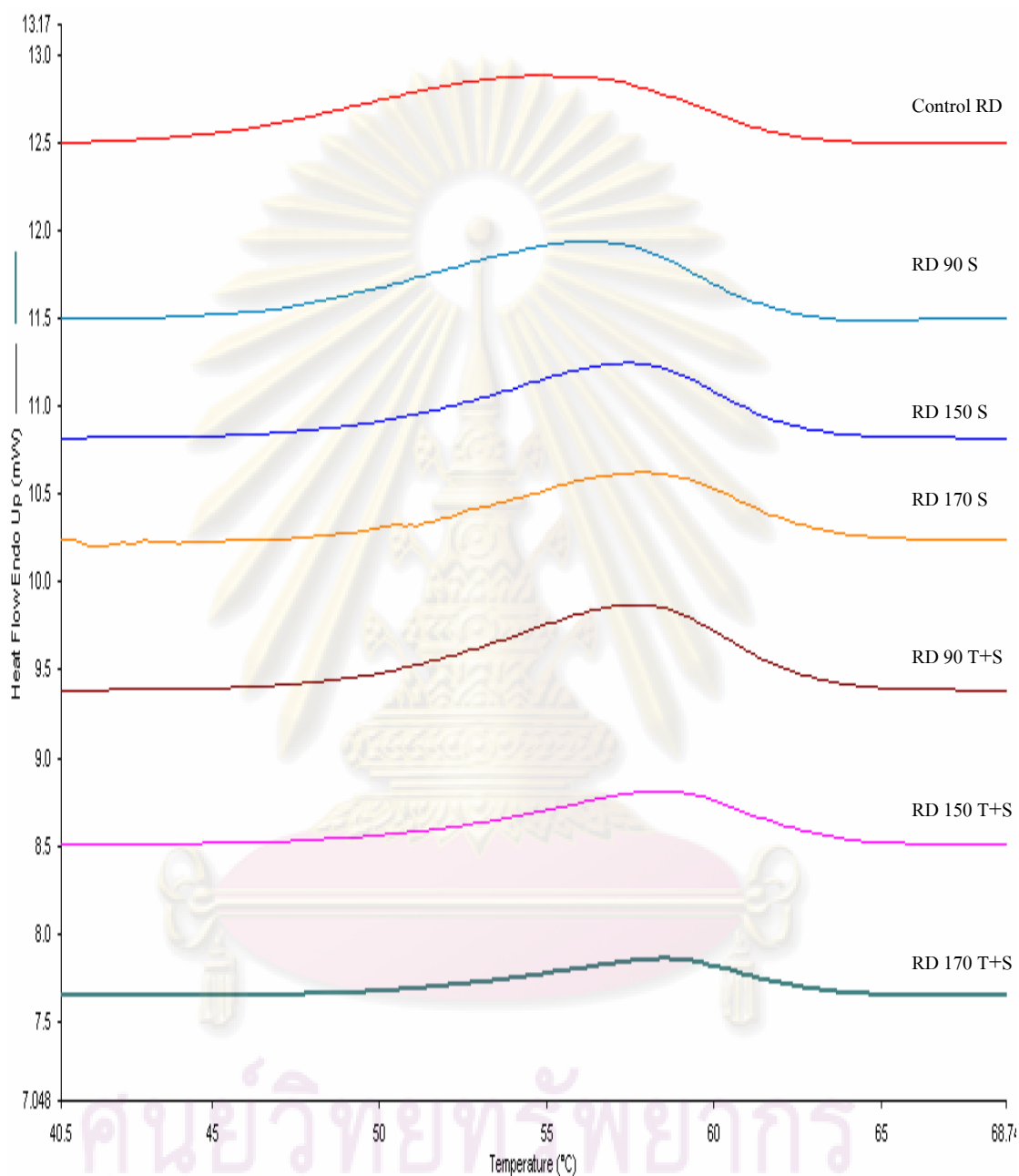
SR หมายถึง ข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.7 DSC thermogram ของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่าง แป้งข้าวพันธุ์ กข 6 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



RD หมายถึง ข้าวพันธุ์ กข 6

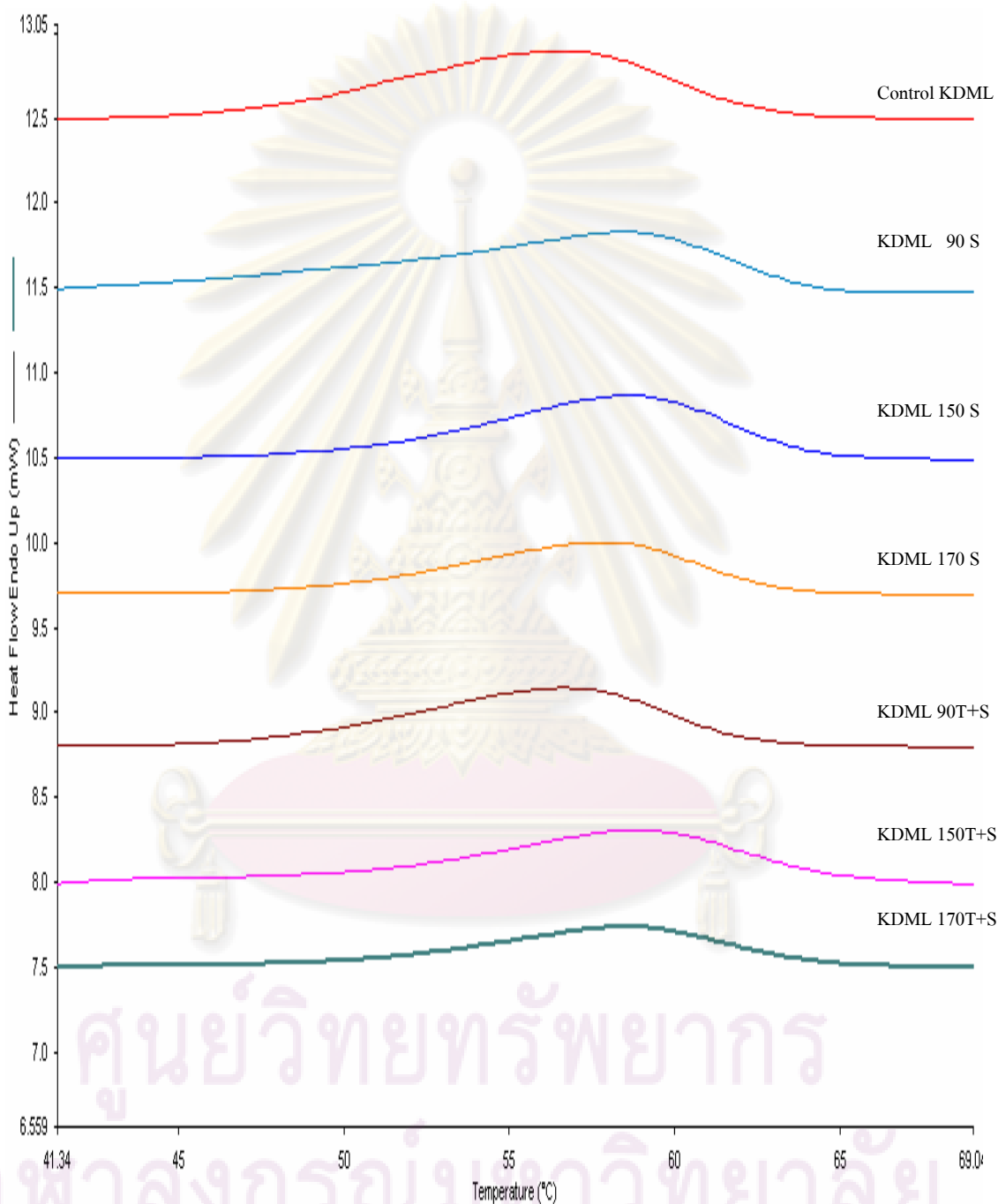
ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร้อน



รูปที่ ข.8 DSC thermogram ของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่าง แป้งข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิ ต่างๆ



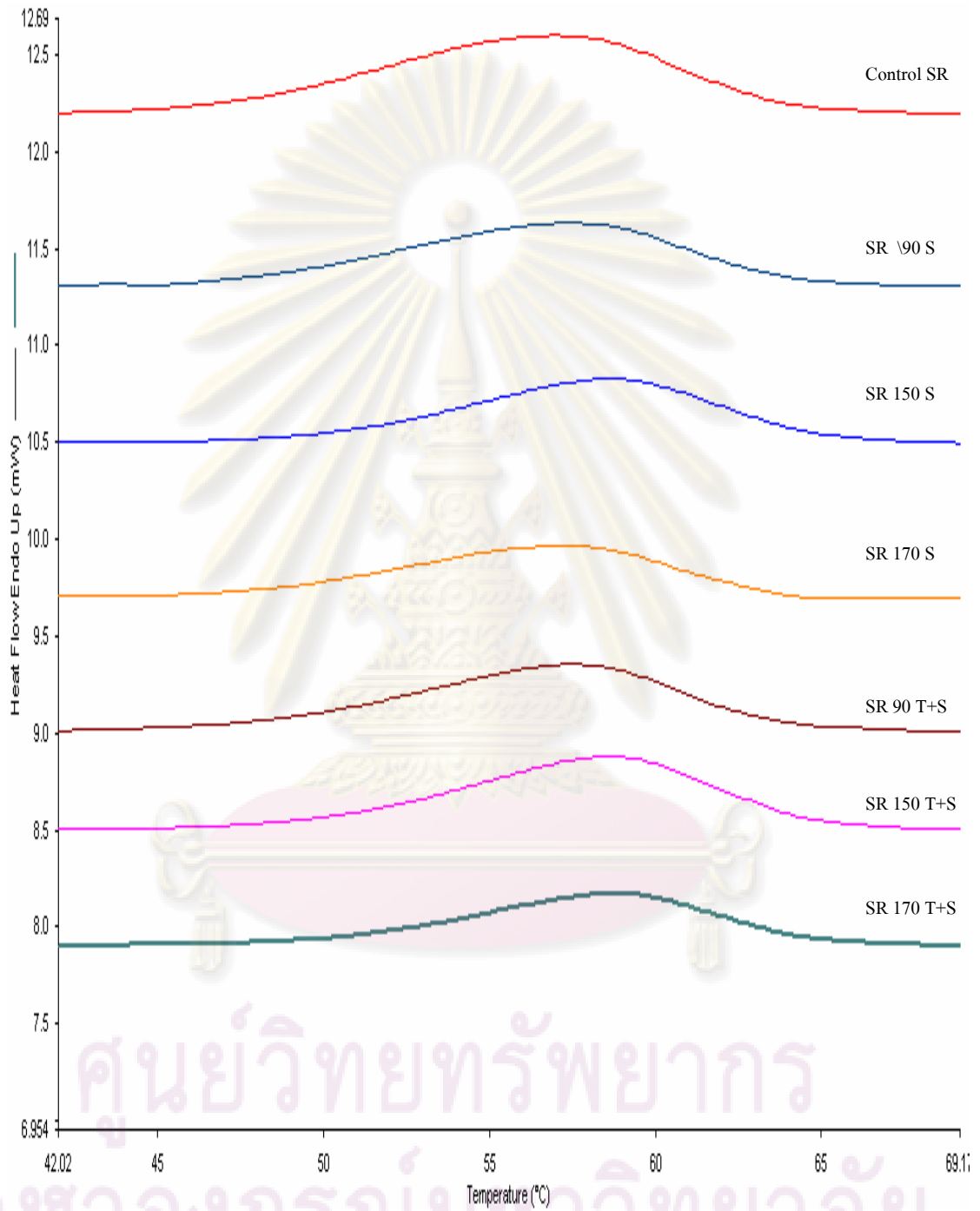
KDML หมายถึง ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

รูปที่ ข.9 DSC thermogram ของการหลอมผลึกแอมิโลเพกตินจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่าง แป้งข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 หลังจากการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ



SR หมายถึง ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60

ตัวเลข หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

S หมายถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการตากในที่ร่ม

T+S หมายถึง การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับเทมเปอริงตามด้วยการตากในที่ร่ม

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์ผลทางสถิติ**

ตารางที่ ค.1 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของปริมาณ แอมิโลสของ  
ตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับ  
ความเชื่อมั่น 95%

Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
Corrected Model	1147.262	2	573.631	4736.288	0.000
Intercept	4345.838	1	4345.838	35882.195	0.000
variety	1147.262	2	573.631	4736.288	0.000
Error	1.817	7	0.121		
Total	5494.917	9			
Corrected Total	1149.079	8			

R Squared = 0.998 (Adjusted R Squared = 0.998)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของ  
ข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น  
95%

Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
Corrected Model	1189.236	20	59.462	44.872	0.000
Intercept	42616.015	1	42616.015	32159.274	0.000
variety	184.280	2	92.140	69.532	0.000
temp	476.707	2	238.354	179.869	0.000
method	334.585	1	334.585	252.488	0.000
variety * temp	59.257	4	14.814	11.179	0.000
variety * method	8.550	2	4.275	3.226	0.060
temp * method	7.292	2	3.646	2.752	0.087
variety * temp * method	19.754	4	4.938	3.727	0.019
Error	27.828	42	1.325		
Total	48900.543	63			
Corrected Total	1217.064	62			

R Squared = 0.977 (Adjusted R Squared = 0.955)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ข้าวทองไข่  
ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
Corrected Model	0.005	13	0.000	4.719	0.000
Intercept	0.017	1	0.017	217.966	0.000
variety	0.003	1	0.003	36.956	0.000
temp	0.001	2	0.000	3.731	0.037
method	0.001	1	0.001	8.866	0.006
variety * temp	4.97E-005	2	2.49E-005	0.316	0.731
variety * method	9.80E-005	1	9.80E-005	1.247	0.274
temp * method	0.000	2	0.000	1.491	0.242
variety * temp * method	1.24E-005	2	6.19E-006	0.079	0.924
Error	0.002	28	7.86E-005		
Total	0.023	42			
Corrected Total	0.007	41			

R Squared = 0.687 (Adjusted R Squared = 0.541)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทาง

ความเหน็ดของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
คุณหมุมิเริ่ม เกิดความเหน็ด (PT)	Corrected Model	2685.571	20	134.279	185.916	0.000
	Intercept	248450.202	1	248450.202	343993.607	0.000
	variety	2127.933	2	1063.967	1473.123	0.000
	temp	37.428	2	18.714	25.910	0.000
	method	9.881	1	9.881	13.680	0.001
	variety * temp	1.580	4	0.395	.547	0.703
	variety * method	16.843	2	8.421	11.660	0.000
	temp * method	4.171	2	2.086	2.888	0.078
	variety * temp * method	4.452	4	1.113	1.541	0.227
	Error	15.167	21	0.722		
	Total	277657.192	42			
Corrected Total	2700.739	41				
ค่าความเหน็ด สูงสุด (PV)	Corrected Model	91847.737	20	4592.387	273.649	0.000
	Intercept	1570333.748	1	1570333.748	93572.291	0.000
	variety	51923.041	2	25961.520	1546.983	0.000
	temp	8353.978	2	4176.989	248.896	0.000
	method	663.234	1	663.234	39.520	0.000
	variety * temp	656.994	4	164.248	9.787	0.000
	variety * method	131.102	2	65.551	3.906	0.036
	temp * method	1836.085	2	918.042	54.704	0.000
	variety * temp * method	4728.368	4	1182.092	70.438	0.000
	Error	352.423	21	16.782		
	Total	1690724.700	42			
Corrected Total	92200.160	41				

ตารางที่ ค.4 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทาง

ความเหนียวของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กช 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ต่อ)

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
ค่าความเหนียวที่ลดลง (BD)	Corrected Model	54034.207	20	2701.710	217.251	0.000
	Intercept	241705.185	1	241705.185	19436.087	0.000
	variety	30071.375	2	15035.687	1209.055	0.000
	temp	4842.658	2	2421.329	194.705	0.000
	method	503.628	1	503.628	40.498	0.000
	variety * temp	1377.461	4	344.365	27.691	0.000
	variety * method	903.605	2	451.803	36.331	0.000
	temp * method	1040.504	2	520.252	41.835	0.000
	variety * temp * method	2346.481	4	586.620	47.172	0.000
	Error	261.154	21	12.436		
	Total	287285.186	42			
Corrected Total	54295.361	41				
ค่าเซตแบค (SB)	Corrected Model	61796.758	20	3089.838	407.253	0.000
	Intercept	234075.096	1	234075.096	30852.041	0.000
	variety	54233.852	2	27116.926	3574.120	0.000
	temp	521.381	2	260.690	34.360	0.000
	method	78.677	1	78.677	10.370	0.004
	variety * temp	1089.442	4	272.361	35.898	0.000
	variety * method	98.865	2	49.433	6.515	0.006
	temp * method	78.472	2	39.236	5.171	0.015
	variety * temp * method	93.961	4	23.490	3.096	0.038
	Error	159.327	21	7.587		
	Total	310335.396	42			
Corrected Total	61956.086	41				

ตารางที่ ค.5 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อน  
จากการเจลาทีไนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุฯ 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ  
พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
T <sub>o</sub>	Corrected Model	194.343	20	9.717	23.777	0.000
	Intercept	253359.378	1	253359.378	619934.549	0.000
	variety	25.837	2	12.918	31.609	0.000
	temp	61.008	2	30.504	74.639	0.000
	method	8.323	1	8.323	20.365	0.000
	variety * temp	7.384	4	1.846	4.517	0.004
	variety * method	1.104	2	0.552	1.351	0.270
	temp * method	1.386	2	0.693	1.696	0.196
	variety * temp * method	4.302	4	1.075	2.631	0.048
	Error	17.165	42	0.409		
	Total	280268.845	63			
Corrected Total	211.508	62				
T <sub>p</sub>	Corrected Model	65.602	20	3.280	19.041	0.000
	Intercept	301620.794	1	301620.794	1750910.833	0.000
	variety	4.148	2	2.074	12.039	0.000
	temp	26.263	2	13.131	76.227	0.000
	method	1.841	1	1.841	10.686	0.002
	variety * temp	1.807	4	0.452	2.622	0.048
	variety * method	.016	2	0.008	0.045	0.956
	temp * method	1.589	2	0.795	4.613	0.015
	variety * temp * method	3.370	4	0.842	4.890	0.002
	Error	7.235	42	0.172		
	Total	331785.231	63			
Corrected Total	72.837	62				



ตารางที่ ค.5 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อน จากการเจลาทีนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กษ 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ต่อ)

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
T <sub>c</sub>	Corrected Model	33.105	20	1.655	5.983	0.000
	Intercept	356862.325	1	356862.325	1289804.625	0.000
	variety	10.600	2	5.300	19.155	0.000
	temp	3.709	2	1.855	6.703	0.003
	method	2.003	1	2.003	7.239	0.010
	variety * temp	1.379	4	0.345	1.246	0.306
	variety * method	1.393	2	0.696	2.517	0.093
	temp * method	1.200	2	0.600	2.169	0.127
	variety * temp * method	1.696	4	0.424	1.532	0.210
	Error	11.621	42	0.277		
	Total	391453.811	63			
	Corrected Total	44.726	62			
T <sub>c</sub> -T <sub>o</sub>	Corrected Model	157.021	20	7.851	11.439	0.000
	Intercept	8841.900	1	8841.900	12883.165	0.000
	variety	66.450	2	33.225	48.411	0.000
	temp	36.099	2	18.050	26.300	0.000
	method	2.160	1	2.160	3.147	0.083
	variety * temp	6.748	4	1.687	2.458	0.060
	variety * method	3.223	2	1.612	2.348	0.108
	temp * method	1.591	2	0.796	1.159	0.324
	variety * temp * method	1.382	4	0.345	0.503	0.733
	Error	28.825	42	0.686		
	Total	9483.148	63			
	Corrected Total	185.846	62			

ตารางที่ ค.5 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อนจากการเจลาทีไนเซชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ต่อ)

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
$\Delta H_{gel}$	Corrected Model	186.674	20	9.334	39.948	0.000
	Intercept	2716.453	1	2716.453	11626.362	0.000
	variety	32.578	2	16.289	69.717	0.000
	temp	54.745	2	27.373	117.154	0.000
	method	5.270	1	5.270	22.557	0.000
	variety * temp	8.455	4	2.114	9.046	0.000
	variety * method	7.918	2	3.959	16.945	0.000
	temp * method	1.790	2	0.895	3.832	0.030
	variety * temp * method	4.197	4	1.049	4.491	0.004
	Error	9.813	42	0.234		
	Total	2901.441	63			
	Corrected Total	196.487	62			

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อน จากการหลอมผลึกแอมิโกลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
T <sub>o</sub>	Corrected Model	75.922	20	3.796	2.300	0.032
	Intercept	87300.494	1	87300.494	52896.872	0.000
	variety	17.565	4	4.391	2.661	0.061
	temp	27.836	2	13.918	8.433	0.002
	method	5.100	1	5.100	3.090	0.093
	variety * temp	0.517	4	0.129	0.078	0.988
	variety * method	2.210	2	1.105	0.669	0.523
	temp * method	0.634	2	0.317	0.192	0.827
	variety * temp * method	1.482	4	0.371	0.225	0.922
	Error	34.658	21	1.650		
	Total	101500.161	42			
	Corrected Total	110.580	41			
T <sub>p</sub>	Corrected Model	25.207	20	1.260	1.398	0.226
	Intercept	127219.573	1	127219.573	141139.637	0.000
	variety	5.053	2	2.526	2.803	0.083
	temp	3.853	2	1.927	2.138	0.143
	method	2.190	1	2.190	2.430	0.134
	variety * temp	0.675	4	0.169	0.187	0.942
	variety * method	1.321	2	0.660	0.733	0.493
	temp * method	0.630	2	0.315	0.350	0.709
	variety * temp * method	0.502	4	0.125	0.139	0.966
	Error	18.929	21	0.901		
	Total	139882.394	42			
	Corrected Total	44.136	41			

ตารางที่ ค.6 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อนจากการหลอมผลึกแอมิโกลเฟกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ต่อ)

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
T <sub>c</sub>	Corrected Model	15.117	20	.756	.791	0.698
	Intercept	153532.759	1	153532.759	160650.078	0.000
	variety	4.658	2	2.329	2.437	0.112
	temp	3.481	2	1.740	1.821	0.186
	method	0.009	1	0.009	0.009	0.925
	variety * temp	1.497	4	0.374	0.392	0.812
	variety * method	2.988	2	1.494	1.563	0.233
	temp * method	0.853	2	0.427	0.446	0.646
	variety * temp * method	0.773	4	0.193	0.202	0.934
	Error	20.070	21	0.956		
	Total	168093.221	42			
	Corrected Total	35.186	41			
	T <sub>c</sub> -T <sub>o</sub>	Corrected Model	58.383	20	2.919	5.240
Intercept		7866.883	1	7866.883	14121.070	0.000
variety		7.365	2	3.682	6.610	0.006
temp		12.785	2	6.393	11.475	0.000
method		4.689	1	4.689	8.416	0.009
variety * temp		1.758	4	0.439	0.789	0.545
variety * method		2.444	2	1.222	2.194	0.136
temp * method		0.409	2	0.204	0.367	0.697
variety * temp * method		2.401	4	0.600	1.077	0.393
Error		11.699	21	0.557		
Total		8448.100	42			
Corrected Total		70.083	41			

ตารางที่ ค.6 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติทางความร้อนจากการหลอมผลึกแอมิโกลเพกตินที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของตัวอย่างแป้งข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ต่อ)

Dependent variable	Source	Type III Sum of Squares (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-value	Sig.
$\Delta H_{ret}$	Corrected Model	54.923	20	2.746	40.144	0.000
	Intercept	938.072	1	938.072	13712.827	0.000
	variety	3.450	2	1.725	25.216	0.000
	temp	13.893	2	6.946	101.544	0.000
	method	9.294	1	9.294	135.854	0.000
	variety * temp	3.726	4	0.932	13.618	0.000
	variety * method	2.751	2	1.376	20.108	0.000
	temp * method	2.067	2	1.034	15.111	0.000
	variety * temp * method	1.680	4	0.420	6.138	0.002
	Error	1.437	21	0.068		
	Total	1002.412	42			
	Corrected Total	56.360	41			

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง  
ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุม

จันวิภา ภูมรินทร์, ซาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, ชนิษฐา ธนานุวงศ์. 2551. ผลของวิธีการอบแห้ง  
อุณหภูมิต่ำ และปริมาณแอมโมเนียต่อความคงทนของเมล็ดข้าวระหว่างการขัดสี. การประชุม  
เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9. 14-15 มีนาคม 2551.  
มหาวิทยาลัยบูรพา.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จันวิภา ภูมรินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจาก สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชา อุตสาหกรรมเกษตร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2547 เข้าทำงานที่บริษัท ซีพีเอฟ ผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ในปี พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย