

ผลของการ **annealing** ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันต่อโครงสร้างและ
คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

นางสาวเบญจลักษณ์ ศิริบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**EFFECT OF ANNEALING ON RICE CONTAINING
DIFFERENT AMYLOSE CONTENT ON STRUCTURAL
AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES**

Benjaluk Siriboon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Food Technology
Suranaree University of Technology
Academic Year 2007**

เบญจลักษณ์ ศิริบุรณ : ผลของการ annealing ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันต่อโครงสร้าง และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (EFFECT OF ANNEALING ON RICE CONTAINING DIFFERENT AMYLOSE CONTENT ON STRUCTURAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา, 153 หน้า.

การ annealing ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ ทำโดยแช่ข้าว หักในน้ำ 65 และ 75% ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (T_0) 7 และ 30 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน เมื่อศึกษาสมบัติการเกิดเจลลาตินในเซชันด้วย Differential Scanning Colorimetry พบการเพิ่มขึ้นของค่า T_0 , T_p (peak gelatinization temperature) และ T_c (conclusion gelatinization temperature) เมื่อทำการ annealing ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ ($p < 0.05$) ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่ และข้าวเจ้า ใหม่พันธุ์ กข 23 เพิ่มขึ้น เมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 30^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 วัน ในขณะที่พบการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวในแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 วัน และต่ำกว่า $T_0 + 30^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน ตามลำดับ ส่วนของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เพิ่มขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน และต่ำกว่า $T_0 + 30^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 วัน ตามลำดับ แป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เมื่อผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน แล้ว ผลต่างก่อนและหลังการ annealing ของ T_0 (ΔT_0) มีค่ามากที่สุด คือ 6.72°C สำหรับแป้งฟลาวร์ และ 7.11°C สำหรับแป้งสตาร์ช จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray powder diffractometer พบว่าโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวที่ผ่านการ annealing แล้วยังคงเป็นแบบ A ไม่ต่างจากก่อนการ annealing นอกจากนี้การ annealing ยังทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรด ในชั้นออสัญฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดจากผลของการ annealing แป้งฟลาวร์ข้าวเก่า และแป้งสตาร์ชข้าวทั้ง 4 พันธุ์ เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว พบว่าค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าเบรกดาวน ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค ต่ำลง แต่ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น ($p < 0.05$) โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ นาน 3 วัน ทั้งในน้ำ 65 และ 75% ($p < 0.05$) ส่วนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความ

เหน็ดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่ที่มีการผ่าน annealing ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าผลต่างก่อนและหลังการ annealing ของค่าความเหน็ดแตกต่างกันตามพันธุ์ของข้าว

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่า แป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่ และแป้งสตาร์ชข้าวทั้ง 4 พันธุ์มีค่าต่ำลงหลังการ annealing ($p < 0.05$) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 , 7°C นาน 3 วัน ทั้ง 2 ระดับน้ำ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าผลต่างก่อนและหลังการ annealing ของกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้งแตกต่างกันตามพันธุ์และความเก่า-ใหม่ของข้าว รวมทั้งผลการเตรียมแป้งสตาร์ช

BENJALUK SIRIBOON : EFFECT OF ANNEALING ON RICE
CONTAINING DIFFERENT AMYLOSE CONTENT ON STRUCTURAL
AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES: THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. SUNANTA TONGTA, Ph.D. 153 PP.

RICE ANNEALING/DSC/RVA/SWELLING POWER/SOLUBILITY/ AMYLOSE
LEACHING

Annealing of broken waxy rice (RD 6), low amylose rice (Khaodokmali 105) and high amylose rice (Suphanburi 90 and RD 23) with and without aging was conducted by soaking in 65 and 75% water content at 7 and 30°C below onset gelatinization temperature (T_o) for 12 hours, 1 day and 3 days. From Differential Scanning Calorimetry study, an increase in gelatinization temperatures (T_o , T_p : peak gelatinization temperature and T_c : conclusion gelatinization temperature) ($p < 0.05$) was observed in all samples annealed at 7°C below T_o . T_o , T_p and T_c of unaged waxy and RD 23 rice flour shifted to the higher temperatures as annealed at 30°C below T_o for 1 day while those shifts of aged waxy and RD 23 rice flour were noticed when annealed at 7°C below T_o for 1 day and at 30°C below T_o for 3 days respectively. For waxy and RD 23 rice starch, the shift of higher T_o , T_p and T_c was found as annealed at 7°C below T_o for 3 days and at 30°C below T_o for 1 day respectively. At annealing condition of 7°C below T_o for 3 days, the difference of T_o between before and after annealing (ΔT_o) of Suphanburi 90 was the greatest with ΔT_o of 6.72°C for its flour and 7.11°C for its starch. The X-ray diffractometry demonstrated that the annealed rice starch retained the typical "A" pattern. After annealing, acid hydrolysis in the

amorphous and crystalline region of all rice starches was higher.

Rapid Visco Analyzer showed that the pasting viscosity profile (peak viscosity, trough viscosity, breakdown, final viscosity and setback) of annealed aged rice flour and annealed rice starches from four varieties decreased but their pasting temperature became higher ($p < 0.05$), especially when annealed at 7°C below T_0 for 3 days in 65 and 75% water content ($p < 0.05$). However, changes in pasting viscosity profile of annealed unaged waxy and RD 23 rice flour were noticed, depending on annealing conditions. The differences of paste viscosity between annealing and unannealing was dependent on rice varieties.

The annealing was able to decrease swelling power, solubility and amylose leaching of annealed aged and unaged rice flour and annealed rice starches from four varieties ($p < 0.05$), especially when annealed at 7°C below T_0 for 3 days in both water contents ($p < 0.05$). However, the difference of swelling power, solubility and amylose leaching between annealing and unannealing was dependent on rice varieties, storage time and starch preparation.

School of food Technology

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 รายการอ้างอิง.....	4
2. ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ข้าว.....	7
2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	7
2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว.....	9
2.4 คุณภาพของข้าวขณะเก็บรักษา.....	13
2.5 ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากผลพลอยได้ของข้าว.....	14
2.6 การไม่ข้าว.....	14
2.7 แป้งฟลาวร์และสตาร์ช.....	15
2.8 คุณสมบัติของแป้ง.....	15
2.9 annealing.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10	รายการอ้างอิง.....	23
3.	ผลของการ annealing ต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่เป็นข้าวเก่าและข้าวใหม่.....	28
3.1	บทคัดย่อ.....	28
3.2	บทนำ.....	29
3.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	31
3.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	35
3.4.1	ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน.....	35
3.4.2	ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด.....	47
3.4.3	ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลส ที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง.....	58
3.5	สรุปผลการทดลอง.....	68
3.6	รายการอ้างอิง.....	69
4.	ผลของการ annealing ต่อโครงสร้าง และลักษณะทางเคมีกายภาพของแป้งสสารข้าวเหนียวและข้าวเจ้า.....	73
4.1	บทคัดย่อ.....	73
4.2	บทนำ.....	74
4.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	76
4.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	80
4.4.1	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน.....	80
4.4.2	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึก.....	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด.....	87
4.4.4	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด.....	89
4.4.5	ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลส ที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง.....	92
4.5	สรุปผลการทดลอง.....	92
4.6	รายการอ้างอิง.....	95
5.	การ annealing ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง และข้าวเจ้าที่มี อะมิโลสสูงต่อโครงสร้างและลักษณะทางเคมีกายภาพ.....	100
5.1	บทคัดย่อ.....	100
5.2	บทนำ.....	101
5.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	102
5.4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	107
5.4.1	ผลของ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน.....	107
5.4.2	ผลของ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึก.....	117
5.4.3	ผลของ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด.....	117
5.4.4	ผลของ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด.....	122
5.4.5	ผลของ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง.....	132
5.5	สรุปผลการทดลอง.....	138
5.6	รายการอ้างอิง.....	138
6.	บทสรุป.....	144
	ภาคผนวก.....	146
	ประวัติผู้เขียน.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....36-37
3.2	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....38-39
3.3	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....40-41
3.4	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....42-43
3.5	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งข้าวเหนียวเก่า และข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....45
3.6	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งข้าวเจ้าเก่า และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....46
3.7	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....49-50
3.8	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....52-53
3.9	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....54-55
3.10	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....56-57
4.1	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งสตาร์ช ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....82
4.2	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งสตาร์ช ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ช ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....90
4.4	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ช ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....91
5.1	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ ข้าวเก่าพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....108-109
5.2	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ ข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....113-114
5.3	T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสตาร์ช พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....115-116
5.4	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวร์ ข้าวเก่าพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....123-124
5.5	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวร์ ข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....127-128
5.6	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ช ข้าวพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....129-130

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าว.....8
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะมิโลส และ (b) อะมิโลเพกติน.....10
2.3	ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C.....10
2.4	ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง.....11
2.5	รูปแบบการเคลื่อนเบนของรังสีเอกซ์แบบ A B และ V.....12
2.6	ระยะในการเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดแป้ง.....16
2.7	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลัง กับน้ำ (30 :70) (T_o = Onset temperature, T_p = Peak temperature)..... 17
2.8	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer.....17
2.9	ปัจจัยสัมพัทธ์ของ annealing, gelatinization และ heat moisture treatment.....18
3.1	กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 65%.....59
3.2	กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 75%.....60
3.3	กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 65%.....61
3.4	กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 75%.....62
3.5	กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 65%.....64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6	
กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 75%.....	65
3.7	
กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 65%.....	66
3.8	
กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C ในน้ำ 75%.....	67
4.1	
รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชที่ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C.....	85
4.2	
รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C.....	86
4.3	
การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ก) และแป้งสตาร์ช ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 (ข) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 7°C.....	88
4.4	
กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C.....	93
4.5	
กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชที่ไม่จากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C.....	94
5.1	
รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....	118
5.2	
รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....	118
5.3	
รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูง พันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....	119

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา รวมถึงให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายวันชัย จอกกระโทก และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 1, 2 และ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทั้งที่เป็นข้าวเก่าและข้าวใหม่ เพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การเลี้ยงดู อบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี ตลอดมา

เบญจลักษณ์ ศิริบุรณ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวคือเมล็ดของธัญพืช ปลูกกันในประเทศร้อนเป็นส่วนมาก ใช้เป็นอาหารหลักของประชากรมากกว่าครึ่งโลก มี 2 ชนิดใหญ่ คือข้าวเหนียวและข้าวเจ้า โดยข้าวเหนียวมีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวประกอบด้วยอะมิโลเพกติน (amylopectin) เกือบทั้งหมด (99-100%) ส่วนข้าวเจ้ามีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวประกอบด้วยอะมิโลเพกติน และอะมิโลส (amylose) เป็นเปอร์เซ็นต์แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ลักษณะเนื้อข้าวสุก มีความร่วน แข็งหรือนุ่มต่างกัน ข้าวเป็นอาหารหลักและเป็นสินค้าส่งออกหลักชนิดหนึ่งของประเทศไทยมานาน นับจากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้ประเทศไทยก็ยังเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับหนึ่งติดต่อกันมาหลายปี ซึ่งประเทศไทยส่งออกข้าวในรูปข้าวสารเป็นส่วนใหญ่ โดยมีส่วนแบ่งการตลาดประมาณ 30% คิดเป็นปริมาณการส่งออกในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2549 ประมาณ 6.78 ล้านตัน มีมูลค่ากว่า 88,463 ล้านบาท (กรมการค้าต่างประเทศ, 2549) ซึ่งคุณภาพของข้าวสารอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสถานะและระยะเวลาในการเก็บรักษา ในข้าวใหม่ข้าวหุงสุกมีลักษณะนุ่มและ เเกาะติดกัน มีของแข็งละลายในน้ำมาก อุ่นน้ำได้น้อย ขยายปริมาตรไม่มาก ส่วนข้าวเก่ามีลักษณะข้าวหุงสุกร่วนแข็ง ไม่เกาะติดกัน มีของแข็งละลายในน้ำน้อย อุ่นน้ำมาก ขยายปริมาตรมาก กลิ่นรส และรสชาติของแป้งเก่าอาจเกิดความผิดปกติจากการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารที่เป็นองค์ประกอบของข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

นอกจากข้าวสารแล้ว ประเทศไทยยังส่งออกข้าวในรูปของแป้งข้าวด้วย โดยอุตสาหกรรมการผลิตแป้งข้าวส่วนใหญ่ใช้วิธีการโม่เปียก และแป้งที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่าแป้งฟลาวร์ แต่เมื่อสกัดเอาโปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่นๆออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์ส่วนใหญ่ เรียกว่าแป้งสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ในการผลิตแป้งข้าวนั้น ประเทศไทยมีโรงงานที่ผลิตแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้ารวม 202 โรง จากข้อมูลการส่งออกแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าในปี 2544 มีมูลค่า 722.1 ล้านบาท โดยตลาดส่งออกแป้งข้าวที่สำคัญของไทย ได้แก่ อาเซียน สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น แต่ส่วนใหญ่ผลิตเพื่อขายในประเทศ ซึ่งการใช้แป้งข้าวเจ้าและ ข้าวเหนียวในประเทศส่วนใหญ่ ใช้เพื่อเป็นส่วนผสมในอาหารและขนมประเภทขบเคี้ยว เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว ขนมจีน และขนมอบกรอบ เป็นต้น ขณะที่บางส่วนใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ เพื่อเพิ่มความมันวาวและความเหนียวร่วมกับกับแป้งมันสำปะหลัง ([www.oie.go.th / Industrystatus_2 / rice.3.doc](http://www.oie.go.th/Industrystatus_2/rice.3.doc))

(www.oie.go.th/Industrystatus_2/rice.3.doc)

ปัจจุบันแม้ว่าประเทศไทยจะมีการผลิตและส่งออกข้าวเป็นสินค้าออก แต่มูลค่าการส่งออกยังน้อย และการขยายตัวของอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวไทยยังไม่ขยายตัวมากนัก เนื่องจากปัญหาเรื่องวัตถุดิบที่มีความหลากหลายทางพันธุกรรม ทำให้คุณสมบัติต่างๆของข้าวแตกต่างกัน และส่งผลถึงการแปรรูปข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น คุณสมบัติการทำให้สุก ความเหนียว ความหนืด ความยากง่ายในการหุง ซึ่งเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ข้าวสุก และเนื่องจากวัตถุดิบที่หลากหลายทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ต้องมีการปรับกระบวนการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงเกินความจำเป็น ทำให้มีขีดจำกัดของตลาดได้ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิพา วันสุขศรี และบุญทิพา นิลจันทร์, 2546) ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนากระบวนการแปรรูปข้าวเป็นแป้ง พัฒนาผลิตภัณฑ์เดิม หรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยคำนึงถึงคุณภาพของแป้งข้าว รวมถึงความปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมด้วย

การ annealing เป็นการดัดแปรแป้งทางกายภาพโดยการแช่แป้งสตาρχในน้ำปริมาณมาก (มากกว่า 60% โดยน้ำหนัก) หรือปานกลาง (40-50% โดยน้ำหนัก) ในระยะเวลาหนึ่ง ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า glass transition temperature (T_g) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิ onset gelatinization temperature (T_o) (Jacob and Delcour., 1998) หลังจากผ่านการ annealing แล้วเม็ดแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระดับของผลึก (crystal) และอสัณฐาน (amorphous) แต่ลักษณะของโครงสร้างผลึกเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง X-ray diffractometer ไม่เปลี่ยนแปลง (Stute, 1992 ; Wang and Nakasawa, 2003) อุณหภูมิ T_g รวมทั้ง T_o เพิ่มขึ้น และทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_o$) แคบลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งสตาρχด้วย โดยทำให้ความหนืดของแป้งที่ปล่อยให้เย็นลงมีค่าสูงขึ้น (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995; Seow and Teo, 1993; Tester Debon and Sommerville, 2000) โดยปริมาณการย่อยด้วยกรดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับประเภทของแป้งสตาρχและสภาวะที่ใช้ในการ annealing (Hoover and Vasanthan 1994; Jacobs, Eerlingen, Rouseu, Colonna and Delcour, 1998)

การ annealing อาจเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิตแป้งข้าวแบบโม้เปียก ที่มีการแช่ข้าวเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนการโม้เปียก ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาวะในการแช่ข้าว และต่างจากคุณสมบัติแป้งข้าวที่ไม่ผ่านการแช่ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของแป้งที่กล่าวมา เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยเฉพาะคุณสมบัติการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ T_o ดังนั้นการ annealing จึงอาจช่วยลดปัญหาความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพแป้งได้ โดยการนำข้าวที่มีอุณหภูมิ T_o ต่ำกว่าข้าวพันธุ์อื่นมาทำการ

annealing เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ T_0 ให้ใกล้เคียงกัน ก่อนที่จะนำมาโมเป็นแป้ง จึงช่วยให้แป้งที่ผลิตได้มีคุณภาพสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เดิมให้ดีขึ้นอีกทางหนึ่ง ดังนั้น annealing จึงถือเป็นนวัตกรรมใหม่ในการคัดแปรรูปคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าว โดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น ที่เป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะที่ใช้ในการ annealing ต่อข้าวเก่าและใหม่ ที่มีอะมิโลสต่างกัน

1.2.2 เพื่อตรวจสอบโครงสร้างแป้งสตาร์ช หลังจากผ่านการ annealing ทั้งในส่วนของชั้นเปลือกและชั้นอณูฐานของข้าวเก่าและใหม่ ที่มีอะมิโลสต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ หลังจากผ่านการ annealing ของแป้งฟลาวัวร์ และแป้งสตาร์ชของข้าวเก่าและใหม่ ที่มีอะมิโลสต่างกัน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิของการ annealing มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวัวร์ และแป้งสตาร์ชของข้าวเก่าและใหม่ ที่มีอะมิโลสต่างกัน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ข้าวที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 โดยทำการทดลองทั้งในข้าวเก่าและข้าวใหม่

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะที่ใช้ในการ annealing คือปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวัวร์ และแป้งสตาร์ชของข้าวที่มีอะมิโลสต่างกัน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ ที่เหมาะสมต่อสภาวะที่ใช้ในการ annealing ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวัวร์ และ

แป้งสตาร์ชของข้าวเก่าและใหม่ ที่มีอะมิโลสต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปปรับปรุงคุณภาพแป้งข้าวให้สม่ำเสมอมากขึ้น และเพื่อนำไปคัดแปรคุณสมบัติแป้งข้าวให้เหมาะสมกับการใช้งาน

1.7 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาภูวัฒน์, รุ่งทิภา วันสุขศรี และบุญทิภา นิลจันทร์. (2546). **การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม**. ใน รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กองนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2. **อุตสาหกรรมแปรรูปข้าว 2544**. แหล่งที่มา : [http://www.oie.go.th/ Industrystatys 2/rice.3.doc](http://www.oie.go.th/Industrystatys 2/rice.3.doc).
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85-112.
- Jacob, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J.A. 1995. Influence of Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources. **Cereal Chem.** 72: 480-487.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. 1998. Annealing of wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. 1998. Hydrothermal modification of granular starch, with retention of the granular structure: a review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Spaepen, H., Grobet, P. J. and Delcour, J. A. 1998. Impact of annealing on the susceptibility of wheat, potato and pea starches to

- hydrolysis with pancreatin. **Carbohydr. Res.** 305: 193-207.
- Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H. J., Eerlingen, R. C., Delcour, J. A. and Reynaers, H. 1998. Evaluation of the impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches: a differential scanning calorimetry and small angle X-ray scattering study. **Carbohydr. Res.** 306: 1-10.
- Juliano, B. O. (1984). Rice starch: Production, properties and uses. In R. L. Whistler, J. N. Bemiller and E. F. Paschall (2 nd eds.), **Starch Chemistry and technology**. pp. 507-529. Academic press, Orlando, FL.
- Kruger, B. R., Knutson, C. A., Inglett, G. E., Walker, C. E. (1987). A differential scanning calorimetry study on the effect of annealing on gelatinization behavior of corn starch. **J. of Food Sci.** 52: 715-718.
- Lai, H. M. 2001. Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. 1991. Annealing of starch at intermediate water content. **Starch/Starck.** 43: 227-231.
- Lorenz, K. and Kulp, K. (1980). Steeping of wheat starches at various temperatures—Effects on functional properties. **Starch/Starke.** 32: 181-186.
- Seow, C. C and Teo, C. H. 1993. Annealing of granular rice starches interpretation of the effect on phase transitions associated with gelatinization. **Starch/Starke.** 10: 345-351.
- Stute, R. H. 1992. Hydrothermal modification of starches: the difference between annealing and heat/moisture-treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.
- Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V. P. 2004. Annealing of normal, low and high amylase starches

extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions.

Carbohydr. Polym. 56: 157-168.

Tester, R. and Debon, S. J. 2000. Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol.**

Macromol. 27: 1-12.

Tester, R.F., Debon, S.J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch.

J. Cereal Sci. 28: 259-272.

Tester, R. and Debon, S. J. and Sommerville, M. D. 2000. Annealing of maize starch.

Carbohydr. Polym. 42: 287-299.

Tester, R.F. and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches.

II. waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.

Wang, Y. J. and Nakazawa, Y. 2003. Acid hydrolysis of native and annealed starches

and branch-structure of their naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.

Yuryev, V. P, Genkina, N. K. and Wasserman, L. A. 2004. Annealing of starches

from potato tubers grown at different environment temperatures. Effect of heating

duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.

Yuryev, V. P, Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Founal, J., Blaszcak, W. and

Jelinski, T. 2005. Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM,

DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นธัญชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งได้มาจากเมล็ดของธัญพืชพวกหญ้า วงศ์แกรมินีอี (Gramineae) สามารถเจริญเติบโตได้ในลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศที่แตกต่างกันทั้งในเขตร้อน (Tropical zone) และเขตอบอุ่น (Temperate zone) ตั้งแต่พื้นที่น้ำท่วมสูงไปจนถึงพื้นที่สูงตามไหล่เขา ทำให้เกิดความหลากหลายของข้าวชนิดต่างๆ ที่แพร่กระจายไปทั่วโลก อย่างน้อย 23 ชนิด และมีชนิดใหญ่ 2 ชนิด คือ ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว โดยข้าวเหนียวมีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช (starch) ที่ประกอบด้วยอะมิโลเพกติน (amylopectin) 99-100% ส่วนในข้าวเจ้ามีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช ซึ่งประกอบด้วยอะมิโลเพกตินและ อะมิโลส (amylose) เป็นเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

Juliano (1984) จำแนกข้าวตามปริมาณอะมิโลสได้ ดังนี้

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมาก พบว่ามีน้ำหนักแห้งของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบ 0-2% เช่น กข 6, เหนียวสันป่าตอง เป็นต้น

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ พบว่ามีน้ำหนักแห้งของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบ 9-20% เช่น กข 15, ขาวดอกมะลิ 105 และปทุมธานี 1 เป็นต้น

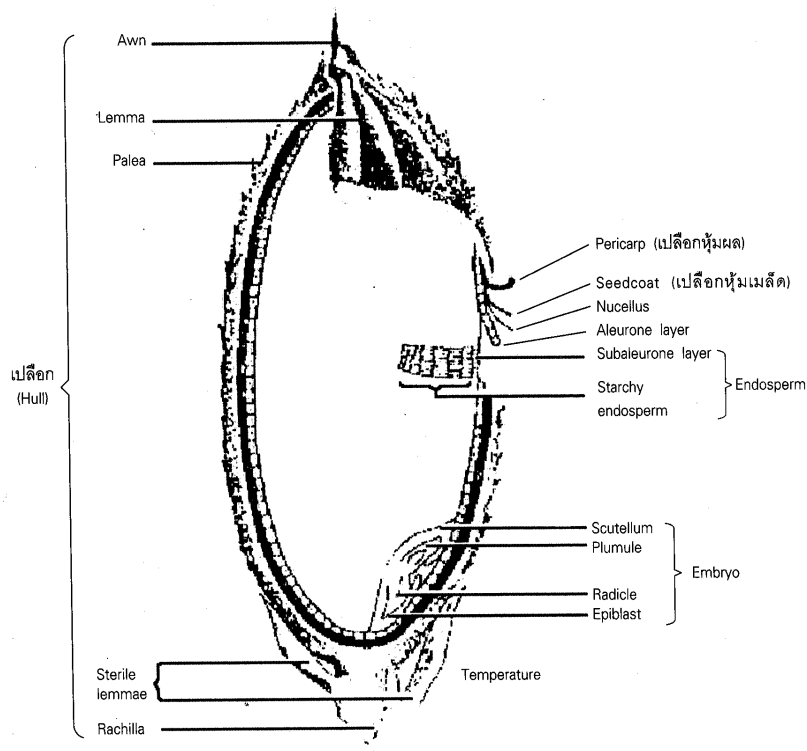
ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง พบว่ามีน้ำหนักแห้งของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบ 20-25% เช่น กข 7, ขาวตาแห้งและสุพรรณบุรี 60 เป็นต้น

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง พบว่ามีน้ำหนักแห้งของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบมากกว่า 25% เช่น ชัยนาท 1, ปทุมธานี 60 และเหลืองประทิว 123 เป็นต้น

2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว (ภาพที่ 2.1) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (หรือผล) เรียกว่าเกลบ (hull หรือ husk) และ (2) ส่วนเนื้อผลหรือผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ข้าวกล้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน แต่ละส่วนมีร้อยละที่เป็นองค์ประกอบ



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าว

แหล่งที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2538)

2 ถึง 3% และ starchy endosperm มี 89 ถึง 94% สำหรับชั้นของ aleurone มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก และในส่วนของ starchy endosperm ประกอบด้วยผนังของ parenchyma cell และเม็ดแป้งบรรจุอยู่อย่างมาก พบโปรตีนอยู่บ้าง โดยทั่วไปข้าวเจ้ามี endosperm ที่แข็งใส ส่วนข้าวเหนียวมี endosperm ชุ่ม ความแตกต่างทางคุณสมบัติทางกายภาพของ endosperm นี้เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะที่แตกต่างของสตาร์ชของข้าวทั้งสองชนิด การขัดสีข้าวจะกำจัดชั้นที่อยู่ด้านนอก ซึ่งประกอบด้วย pericarp, ชั้นของ aleurone ส่วนมากและส่วนของ embryo endosperm ส่วนที่ได้จากการขัดสีเป็นข้าวสาร ซึ่งในกระบวนการสีข้าวได้เป็นข้าวขาว 40 ถึง 55% ที่เหลือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ แกลบเป็น 20%, รำข้าว 10% และ ปลายข้าว 10 ถึง 22% ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปลายข้าวหรือข้าวท่อนได้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำหรือความชื้น

2.3.1 คาร์โบไฮเดรต

สตาร์ช เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ที่พบมากที่สุดได้ในเนื้อเมล็ดของข้าว ประมาณร้อยละ 90 โดยโมเลกุลของสตาร์ชรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีขนาด 3-5 ไมครอน รูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม รวมตัวกันอยู่ภายในแอมิโลพลาสต์ (amyloplast) หรือคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ของเซลล์จำนวน 20-60 เม็ดสตาร์ชเป็นกลุ่มก้อนกลมหรือยาวรี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มเม็ดสตาร์ชในแอมิโลพลาสต์นี้ประมาณ 7-39 ไมครอน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวที่มีขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด ได้แก่ อะมิโลส และอะมิโลเพกติน (ภาพที่ 2.2)

อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรง ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-หนึ่ง,สี่-ไกลโคซิดิก (α -1,4-glycosidic linkage) ส่วนอะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสายตรงขนาดสั้นที่มีน้ำตาลกลูโคส ประมาณ 10-60 หน่วย (Degree of polymerization, DP = 10-60) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-หนึ่ง,สี่-ไกลโคซิดิก และถูกเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะแอลฟา-หนึ่ง,หก-ไกลโคซิดิก (α -1,6 glycosidic linkage) ซึ่งมีปริมาณ 5% ของปริมาณพันธะไกลโคซิดิกทั้งหมด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกติน ดังภาพที่ 2.3 โดยโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิดคือ

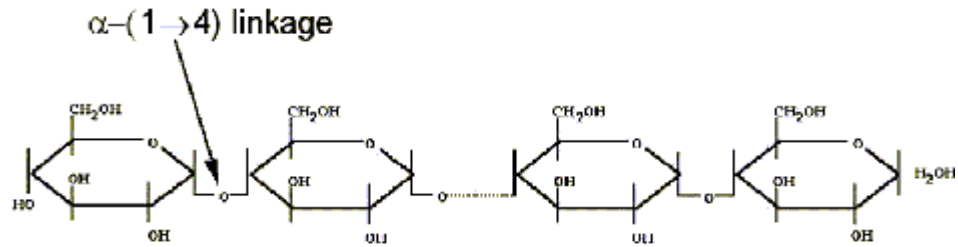
สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)

สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆอีก 2 สายหรือมากกว่า

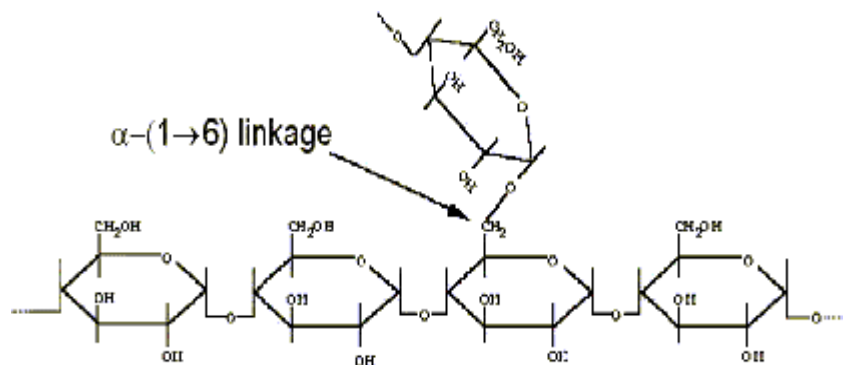
สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ โดยโมเลกุลอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorphous หรือ gel phase) ดังภาพที่ 2.4 ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (Jacobs and Delcour, 1998)

เมื่อแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ (ภาพที่ 2.5) ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากเกิดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืช)

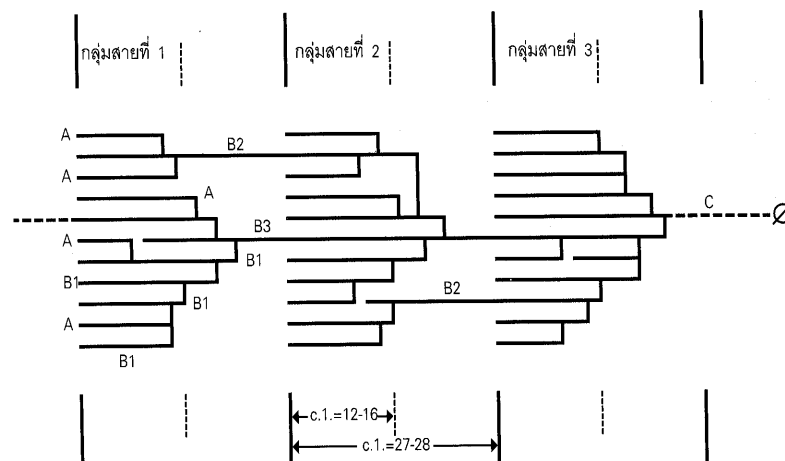


(a)

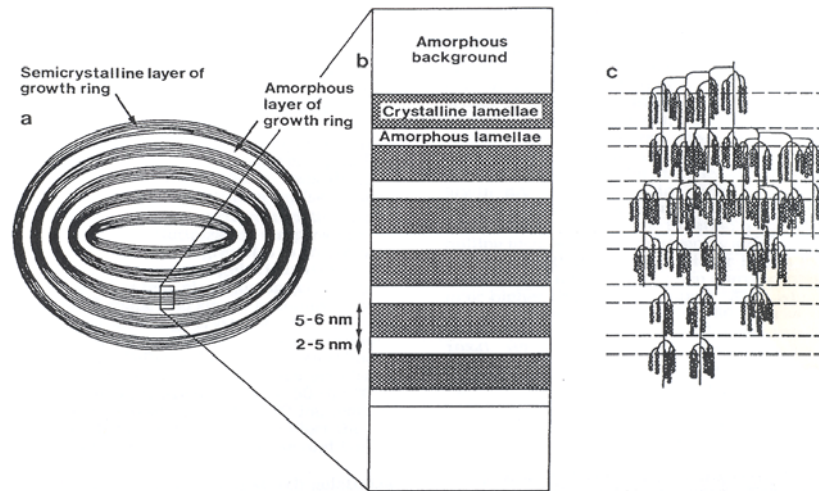


(b)

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะมิโลส และ (b) อะมิโลเพกติน แหล่งที่มา: Ophardt (2003)

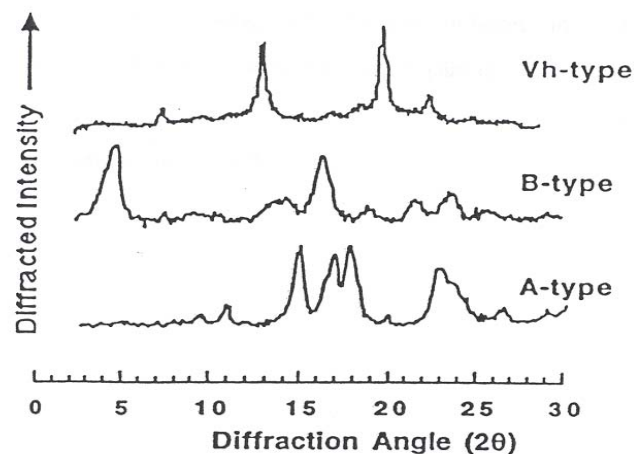


ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C
แหล่งที่มา: Hizukuri (1986)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง
แหล่งที่มา: Jacobs and Delcour (1998)

ต่างๆ) ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ เกิดผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) และอีกรูปแบบหนึ่งคือแบบที่พบในสตาร์ชที่มีอะมิโลสสูงบางชนิด แต่โดยทั่วไปเป็นสตาร์ชที่เกิดเจลาตินไนซ์ แล้วจับตัวกับไขมัน (Zobel, 1998)



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ AB และ V
แหล่งที่มา: Buleon et al. (1998)

2.3.2 โพรตีน

โพรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปมีปริมาณน้อยกว่าในธัญชาติอื่น โพรตีนที่มีในข้าวนี้เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกมีโพรตีนมากกว่าในใจกลางเมล็ด ซึ่งโพรตีนข้าวสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มได้โดยอาศัยพื้นฐานของการละลายของโพรตีน แต่ละชนิดในตัวทำละลายต่างกัน ดังนี้

อัลบูมิน โพรตีนชนิดนี้ละลายในน้ำ หรือละลายในน้ำที่มีกรดอยู่เพียงเล็กน้อย และตกตะกอนทันทีเมื่อได้รับความร้อน โพรตีนนี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอนไซม์

ไกลบูลิน ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในน้ำเกลือ (โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์)

กลูทีลิน โพรตีนชนิดนี้ไม่ละลายในน้ำ สารละลายเกลือและเอทานอลแต่ละละลายในน้ำซึ่งมีกรดหรือด่าง (กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์) โพรตีนชนิดนี้เป็นโพรตีนหลักที่พบอยู่เป็นจำนวนมากในข้าว และสามารถแยกออกมาได้โดยการใส่สารละลายด่าง ดังนั้นในกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวทั่วไป จึงใช้การล้างแป้งฟลาวร์ข้าวด้วยสารละลายด่าง

โพรลามิน โพรตีนชนิดนี้ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในเอทานอลเข้มข้น 70-80% (Matsuo et al., 1997)

2.3.2 ไขมัน

ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 3% คล้ายคลึงธัญพืชชนิดอื่น และมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าในใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัดสีข้าวให้ขาว ทำให้ข้าวสารเจ้ามีไขมันอยู่เพียง 0.3 – 0.5% (Hoseney, 1996) ซึ่งเป็นไขมันที่เกาะเกี่ยว (bound lipid) กับสารอื่นอยู่ประมาณ 0.3-0.4% ส่วนในข้าวเหนียวมีไขมันที่เกาะเกี่ยวนี้น้อยกว่า 0.03% โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ คือ ไขมันที่อยู่ชิดกันกับโพรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวเม็ดสตาร์ชภายนอกหรืออาจรวมอยู่กับโครงสร้างของแอมิโลเพกตินสายนอก ลักษณะที่สองคือไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และลักษณะที่สามคือไขมันที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ช แต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช

ประเภทของไขมันในข้าวส่วนใหญ่คือ ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมาคือ ฟอสโฟลิปิด (phospholipids), ไกลโคไลปิด (glycolipids), เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ทั้งไขมันภายนอก

และภายในเมล็ดสตาร์ชเป็นไขมันประเภทสารประกอบมอโนแอซิล (monoacyl) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.4 คุณภาพของข้าวขณะเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงของข้าวเกิดขึ้นตลอดเวลา ตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจนถึงผู้บริโภค โดยขึ้นอยู่กับสภาวะของการเก็บรักษา เช่น อุณหภูมิ เวลา และความชื้น ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพข้าว จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ, เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่าสภาวะอื่น ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดถึงเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกในข้าวใหม่ (เก็บเกี่ยวมาใหม่) จะได้ลักษณะข้าวหุงสุกที่นุ่มและ เกาะติดกัน มีของแข็งละลายในน้ำที่ใช้หุงมาก อุ่นน้ำได้น้อย ขยายปริมาตรไม่มาก แต่ข้าวเก่ามีลักษณะหุงสุกร่วนแข็ง ไม่เกาะติดกัน มีของแข็งละลายในน้ำที่ใช้หุงน้อย อุ่นน้ำมาก ขยายปริมาตรมาก (หุงขึ้นหม้อ) นอกจากนี้ข้าวเก่าที่เก็บไว้นานในอุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แต่ไม่เปลี่ยนแปลงมากถ้าเก็บที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับกลิ่นรส ตลอดจนรสชาติของข้าวเก่า เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารที่เป็นองค์ประกอบของข้าว โดยเฉพาะในกลุ่มสารระเหยที่ให้กลิ่นผิดปกติจากไขมัน กรดแอมิโน และวิตามิน เช่น กลุ่มแอลดีไฮด์ ทีโตน เช่น เมทิลเมอร์แคปแทน (methyl mercaptan) ไดเมทิลซัลไฟด์ (dimethylsulfide) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) โดยในระหว่างเก็บรักษาสารเหล่านี้จะเพิ่มหรือลดลงบ้าง แต่มีผลต่อกลิ่นที่ผิดปกติทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับ การเปลี่ยนแปลงของข้าวขณะเก็บรักษาจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่า ที่ทำให้คุณภาพการหุงต้ม และการรับประทานของข้าวเปลี่ยนแปลง สรุปว่าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของไขมัน, โปรตีน และสารอื่นที่มีผลจากการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ และผลจากปริมาณออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไปขณะเก็บรักษา Chrastil (1990) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของข้าวในการเก็บรักษามีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนและสตาร์ช ตลอดจนการทำปฏิกิริยาสัมพันธ์กันระหว่างโปรตีน และสตาร์ชในระดับโครงสร้างโมเลกุล โดยทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชเปลี่ยนแปลง และน้ำหนักโมเลกุลของออรินาซิน (oryzenin) ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดที่มีมากที่สุดในข้าวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เอนไซม์หลายชนิดที่พบในข้าวคงมีกิจกรรมอย่างต่อเนื่องแม้จะเก็บรักษาข้าวไว้เป็นเวลานาน รวมทั้งเอนไซม์ที่ช่วยในการสังเคราะห์สตาร์ชก็ยังคงทำงานอยู่จึงอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้าวจากข้าวใหม่เป็นเก่าได้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.5 ผลกระทบที่แปรรูปจากผลพลอยได้ของข้าว

กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการซื้อขายเพื่อบริโภคเป็นอาหารหลักของประชาชนกว่าครึ่งโลกนั้น มีผลพลอยได้จากการแปรรูป คือ ข้าวหัก, ปลายข้าว, รำข้าว และแกลบ

แป้งข้าวนับเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวหักในขั้นแปรรูปปฐมภูมิหรือขั้นแปรรูปขั้นต้น ยังไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ต้องนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร กึ่งอาหาร และไม่ใช่อาหารต่อไป โดยข้าวหักที่นิยมใช้คือข้าวหักใหญ่ชนิดเอวันเลิส ซึ่งเป็นข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 6.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 นำมาทำความสะอาดด้วยชุดเครื่องทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวข้าวหักให้สะอาด ต่อจากนั้นเป็นขั้นตอนการ โม่ให้เป็นแป้ง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.6 การโม่ข้าว

วิธีการ โม่แป้ง แบ่งได้ 3 วิธี (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) คือ

2.6.1 การโม่เปียกหรือการโม่น้ำ

ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหักซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ยังมีสิ่งเจือปนมากต้องทำความสะอาดในระบบแห้งแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด แช่วข้าวหักจนนุ่ม แล้วจึงนำข้าวหักพร้อมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมมาโม่ด้วยเครื่องโม่แบบจานหิน ซึ่งใช้ไฟฟ้าในการทำงาน จากนั้นนำน้ำแป้งเข้าเครื่องแยกน้ำออกจากแป้ง ก้อนแป้งแห้งที่ได้มีความชื้นประมาณ 40% ต้องทำการตีปนก้อนแป้งให้เป็นผงก่อนจึงผ่านเข้าเครื่องอบแป้งให้แห้ง นำมาผ่านเข้าเครื่องบด และร่อนให้ได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยทั่วไปประมาณ 180 ไมโครเมตร มีความชื้นไม่เกิน 13%

2.6.2 การโม่แบบผสม

มีขั้นตอนการ โม่คล้ายคลึงกับวิธีการ โม่เปียกในช่วงล้างข้าวหัก และแช่วข้าวหักจนนุ่ม ต่อจากนั้นนำข้าวหักขึ้นจากน้ำแช่ ให้สะเด็ดน้ำ แล้วผ่านไปยังเครื่องอบให้ข้าวแห้งระดับหนึ่ง ประมาณ 15-17% จึงนำข้าวหักเข้าบดหรือโม่แบบแห้ง ตามวิธีการ โม่แห้งจนได้แป้งผ่านเข้าเครื่องร่อนแป้งให้มีขนาดสม่ำเสมอ ประมาณ 180 ไมโครเมตร

2.6.3 การโม่แห้ง

เป็นการนำข้าวหักที่ผ่านระบบการทำความสะอาดแบบแห้งเข้าสู่เครื่อง โม่หรือบดแห้งเป็นแป้งผง ร่อนผ่านเครื่องร่อนให้มีขนาดสม่ำเสมอ ประมาณ 180 ไมโครเมตร

2.7 แป้งฟลาวาร์และแป้งสตาร์ช

แป้งฟลาวาร์ข้าว (rice flour) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากการนำข้าวหักที่ได้จากการขัดสีมาบดหรือโม่ ดังนั้นส่วนประกอบของแป้งฟลาวาร์จึงประกอบด้วยสารอาหารต่างๆ หลายชนิด ที่มีอยู่ในวัตถุดิบดั้งเดิม คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น ส่วนแป้งสตาร์ชข้าว (rice starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอาแป้งฟลาวาร์ข้าวมาผ่านกระบวนการที่ทำให้ได้แป้งสตาร์ชบริสุทธิ์ โดยกำจัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีอื่นที่อยู่รวมกับแป้งสตาร์ชออกไป ซึ่งจากองค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่ผ่านการขัดสี พบว่ามีแป้งสตาร์ชเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด มีอยู่สูงถึง 90.2% และพบโปรตีนมากเป็นลำดับรองลงมา 7.3-8.3% ดังนั้นในการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวจึงต้องมีการกำจัดโปรตีนออกไป (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์ มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546)

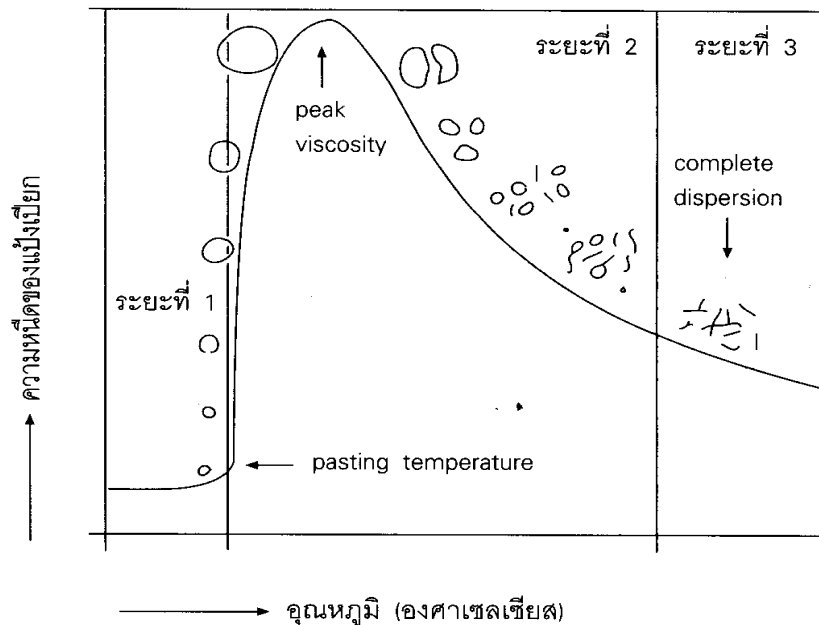
2.8 คุณสมบัติของแป้ง

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน การจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำ และพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายตัวลง เม็ดแป้งสามารถดูดน้ำและพองตัว ทำให้ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ดังภาพที่ 2.6

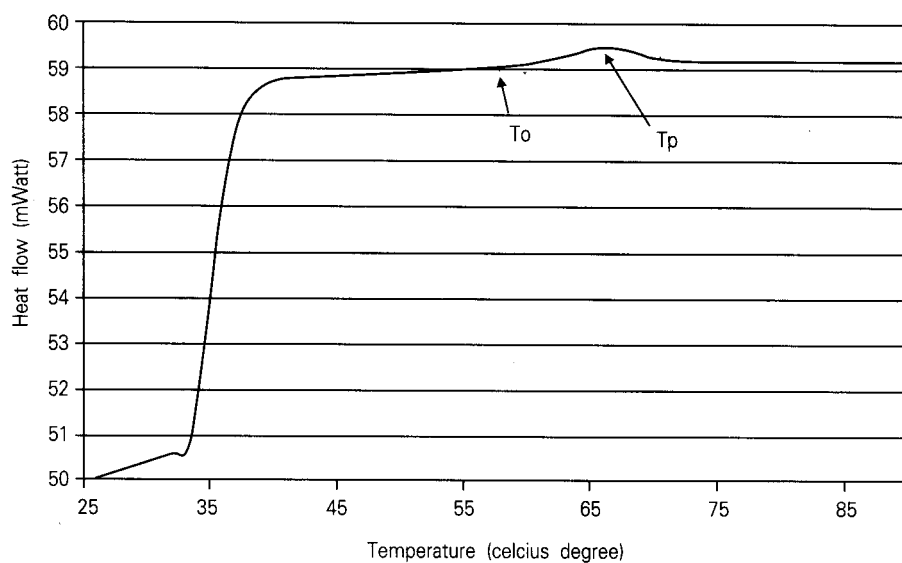
ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) (ภาพที่ 2.7) และให้ผลเป็นค่าพลังงานเรียกว่าค่าเอนทัลปี (ΔH) (Zobel, 1984) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของแป้งได้ แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมาก มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการพอง

การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายน้ำแป้งในขณะที่ได้รับความร้อนและเกิดเจลาตินในเซชัน สามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้วัดมีหลายชนิด เช่น การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) เครื่องบราเบนเดอร์อะมิโลก

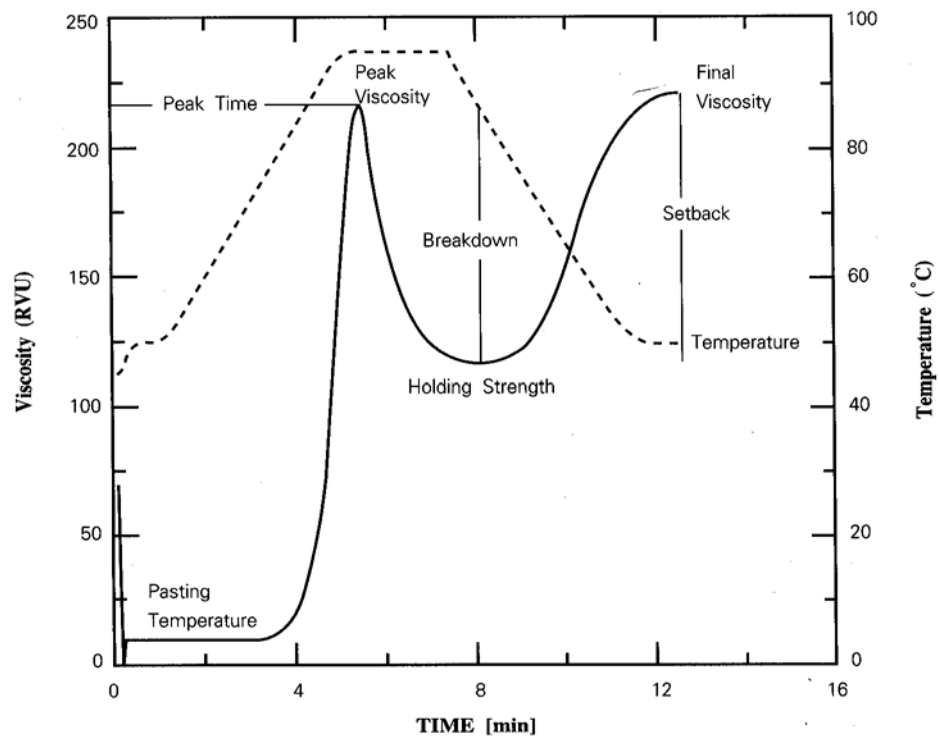
กราฟ (Brabender amylograph) และเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้น โดยเครื่องบราเบนเดอร์อะมิโลกราฟ (Brabender amylograph) และเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (ภาพที่ 2.8) นี้ สามารถติดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด



ภาพที่ 2.6 ระยะในการเกิดเจลตาดีในเซชันของเม็ดแป้ง
แหล่งที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำ (30 :70) (T_o = Onset temperature, T_p = Peak temperature) แหล่งที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer แหล่งที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

(pasting curve) ของสารละลายน้ำแป้งขณะทำให้อุ่นและเย็นได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

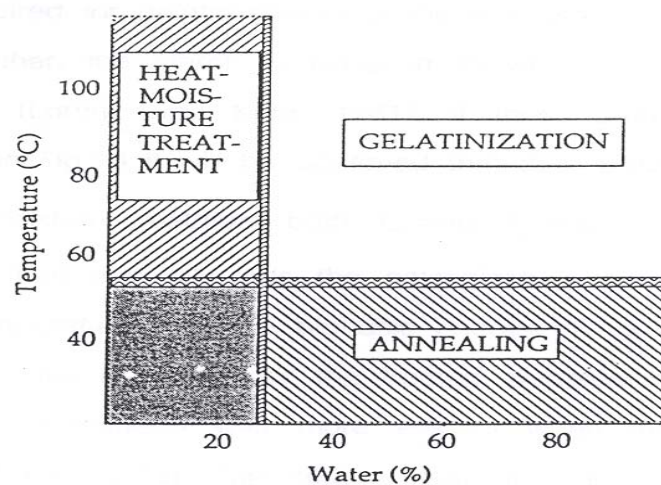
ค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ ในหน่วย % หรือ RVU ดังนี้

- (1) peak time: เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
- (2) pasting temperature: อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
- (3) peak temperature: อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
- (4) peak viscosity: ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (5) holding strength: ความหนืดที่ต่ำสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU

- (6) breakdown: ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (7) final viscosity: ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
- (8) setback from peak: ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU
- (9) setback from trough: ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

2.9 annealing

การ annealing เป็นการแช่แป้งสตาρχในน้ำปริมาณมาก คือมากกว่า 60% โดยน้ำหนัก หรือปานกลาง 40-50% โดยน้ำหนัก เป็นเวลาหนึ่ง ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า glass transition temperature (T_g) แต่ต่ำกว่า onset gelatinization temperature (T_o) (Jacob and Delcour, 1998)



ภาพที่ 2.9 ปัจจัยสัมพันธ์ของ annealing, gelatinization และ heat moisture treatment แหล่งที่มา: Eliasson และ Gudmundsson (1996)

หลังจากผ่านการ annealing แล้วโครงสร้างแป้งสตาρχจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วแป้งสตาρχมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบกิ่งผลึก โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน จัดเรียงตัวกันในเม็ดแป้ง เป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วน ออสัญฐาน ส่วน

สายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ ทำให้บางส่วนเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) นอกจากนี้การ annealing ยังทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ในปี ค.ศ. 1993 Seow และ Teo ได้ศึกษาผลของ annealing ต่ออุณหภูมิ T_g โดยทำ annealing แป้งสตาร์ชข้าวที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แปรระดับอัตราส่วนของแป้งสตาร์ชข้าวต่อปริมาณน้ำ 1:4, 1:2, 3:4, 1:1, 4:3, 5:3 ซึ่งทำการ annealing ในถ้วย DSC (Differential scanning calorimetry pan) เมื่อครบตามกำหนดเวลาก็ทำการวัดค่า T_g พบว่าทุกระดับอัตราส่วนของแป้งต่อน้ำของการทำ annealing มีผลทำให้ T_g เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วน 5:3 ให้ความค่า T_g เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Tester และคณะ (2000) ที่รายงานว่าหลังการทำ annealing ชั้นอสัณฐานมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายอะมิโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสถานะ glassy ภายในชั้นอสัณฐานมากขึ้น จึงทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การ annealing มีผลทำให้ค่า T_0 , T_p (peak gelatinization temperature) และ T_c (conclusion gelatinization temperature) ของแป้งสตาร์ชที่ผ่านการทำ annealing เปลี่ยนแปลง โดยพบว่าค่า T_0 และ T_p สูงขึ้น โดยที่ค่า T_c อาจไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสตาร์ชที่ไม่ผ่านการทำ annealing ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำ annealing มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นผลึก โดย Yost และ Hosney (1986) ได้ทำการ annealing แป้งสตาร์ชข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 42 และ 47°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ปริมาณน้ำ 50% พบว่าค่า T_0 และ T_p ของแป้งสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการทำ annealing สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำ annealing มีผลทำให้ชั้นผลึกจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ และเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krueger, Knutson, Inglett และ Walker (1987) ที่พบว่าค่า T_0 และ T_p ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียว พันธุ์ธรรมดา และพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% และในปี ค.ศ. 1994 Hoover และ Vasanthan พบว่าแป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการทำ annealing ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% มีผลให้ค่า T_0 และ T_p สูงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jacobs, Eerlingen, Rouseu, Colonna และ Delcour (1998) ที่พบว่าค่า T_0 และ T_p ของแป้งสตาร์ชมันฝรั่งสูงขึ้นหลังจากทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำ 66.7%

จากหลายงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการทำ annealing มีผลทำให้ค่า T_0 และ T_p สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำ annealing มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นผลึก ภายในชั้นผลึก

อาจมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ขึ้น ซึ่งแปลผลมาจากค่า ΔH ที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Yost and Hosney, 1986; Stute, 1992; Eerlingen, Jacobs, Van Win and Delcour, 1996, Jacobs et al., 1998) หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ ซึ่งตีความมาจากค่า ΔH ที่เพิ่มขึ้น (Krueger et al., 1987, Hoover and Vasanthan 1994; Eerlingen et al., 1996, Jacobs et al., 1998; Tester, Debon and Sommerville, 2000; Nakazawa and Wang, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่า การ annealing ยังมีผลให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c-T_0) แคบลง (Eerlingen et al., 1996, Jacobs et al., 1998; Tester et al., 2000; Chung, Moon, and Chun, 2000; Nakazawa and Wang, 2003)

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการทำ annealing มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในชั้นออสซิลันและชั้นผลึก ซึ่งโครงสร้างแป้งสตาร์ชโดยทั่วไปแล้วพบว่าอะมิโลสมีการกระจายตัวอยู่มากในชั้นออสซิลัน และอาจกระจายตัวอยู่ในส่วนของชั้นผลึกบ้าง ส่วนโครงสร้างชั้นผลึก เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินที่เกิดการพันเกลียวคู่ และอาจพบปลายสายของอะมิโลเพกตินที่ไม่ได้พันเกลียวคู่อยู่ในชั้นออสซิลันด้วย (French, 1984) ดังนั้นการทำ annealing จึงมีผลต่อทั้งอะมิโลสและอะมิโลเพกติน Tester และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลของ annealing ต่อแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีอะมิโลส 0% ส่วนพันธุ์ธรรมดามีอะมิโลส 33.2% โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 96% พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว แป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ มีค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเปรียบเทียบค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่ผ่านการ annealing แล้ว พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีระดับการเพิ่มขึ้นของ T_0 (ΔT_0) และ ΔT_p มากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่ ΔT_c เพิ่มขึ้นน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ มีช่วง T_c-T_0 แคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยช่วง T_c-T_0 ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าแป้งพันธุ์ธรรมดา และพบว่าค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมดา โดยที่ค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์นี้มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Krueger และคณะ (1987) ที่ทำการ annealing แป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียว พันธุ์ธรรมดา และพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง ที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้วค่า T_0 และ T_p ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง เพิ่มขึ้นสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว และพันธุ์ธรรมดา แม้ว่าการ annealing จะมีผลในการเปลี่ยนแปลงทั้งในชั้นออสซิลันและชั้นผลึก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของโครงสร้างผลึก ซึ่งเมื่อ

ตรวจสอบโดยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าชนิดของโครงสร้างผลึกยังคงเป็นแบบเดิมเหมือนกับที่ไม่ผ่านการ annealing (Stute, 1992)

Kruge และ Kitamura (1985) ได้ทำการศึกษาผลของการ annealing ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ viscoamylograph ของแป้งสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% พบว่าการ annealing มีผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) สูงขึ้น โดยที่ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ต่ำลง และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ไม่เปลี่ยนแปลง และในปี ค.ศ. 1994 Hoover และ Vasanthan พบว่าแป้งสตาร์ชถั่ว lentil ที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ viscoamylograph พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดสูงขึ้น โดยที่ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายต่ำลง ในปี 1996 Eerlingen และคณะ ได้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA (Rapid visco analyzer) ของแป้งสตาร์ชมันฝรั่ง เมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 52 และ 54°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำ 40-มากกว่า 60% พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสต์สูงขึ้น แต่ค่าความหนืดสูงสุดต่ำลง และค่าความหนืดสุดท้ายสูงขึ้น นอกจากนี้ Jacobs, Eerlingen, Clauwaert และ Delcour (1995) ได้ศึกษาผลของการทำ annealing ที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในสถานะที่ใช้ปริมาณน้ำ 66.7% ในแป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชถั่วลันเตา และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าเมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิดที่ผ่านการ annealing แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเม็ดแป้งของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด และยังพบว่าเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดต่างกันอาจมีผลให้ค่าการวิเคราะห์ต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในทุกแป้งสตาร์ชเมื่อผ่านการทำ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงกว่าแป้งสตาร์ชที่ไม่ผ่านการ annealing เนื่องจากภายในเนื้อเจลนอกจากจะประกอบด้วยอะมิโลสที่เกิดการละลายออกมาแล้ว ยังมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวและเกิดการเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์ (ghosts remnant) แทรกอยู่ในเนื้อเจล นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้ว ความสามารถในการพองตัว และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งลดลง (Kruge and Kitamura, 1985; Hoover and Vasanthan 1994; Jacobs et al., 1998)

Hoover และ Vasanthan (1994) พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชถั่ว lentil ที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% แล้วนำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 โมล ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 วัน มีปริมาณการย่อยด้วยกรดลดลง 5% แต่ทั้งนี้พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโอ๊ต ที่ผ่านการ

annealing ที่สภาวะเดียวกัน และนำมาชั่งด้วยกรดที่สภาวะดังกล่าว มีปริมาณการย่อยด้วยกรดเพิ่มขึ้น 14% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jacobs และคณะ (1998) ที่ทำการ annealing แป้งสาลีข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในสภาวะที่ใช้ปริมาณน้ำ 66.7% แล้วนำมาชั่งด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 โมล ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 วัน พบว่าปริมาณการย่อยด้วยกรดลดลง 5% เช่นเดียวกัน แต่ทั้งนี้พบว่าแป้งสาลีข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing ที่สภาวะเดียวกัน และนำมาชั่งด้วยกรดที่สภาวะดังกล่าว มีปริมาณการย่อยด้วยไม่ต่างจากแป้งสาลีข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการ annealing

จากรายงานข้างต้นที่กล่าวมาแล้วว่าหลังการ annealing ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยในช่วง T_c-T_0 แคบลง และ ΔH อาจเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลของการ annealing จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Larsson และ Eliasson (1991) พบว่าการ annealing แป้งสาลีข้าวโพดและแป้งสาลีมันฝรั่งเป็นเวลา 2-6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C มีผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น และในปี 1994 Hoover และ Vasanthan รายงานว่าเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 50°C มีผลให้ค่า ΔH ของแป้งสาลีข้าว lentil, แป้งสาลีมันฝรั่ง, แป้งสาลีข้าวโอ๊ต, แป้งสาลีข้าวสาลี เพิ่มขึ้น เมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 1, 2, 6 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ และ Stute (1992) ได้ทำการศึกษาถึงผลของระยะเวลา โดยใช้ระยะเวลานาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C ต่อผลของ annealing ในแป้งสาลีมันฝรั่ง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำ annealing ที่นานขึ้น ทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ต่อการเกิด annealing ด้วย โดย Wang และ Nakazawa (2003) ได้แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing จาก 40, 45, 50, 55, 60 และ 65°C โดยใช้ปริมาณน้ำ 75% เป็นเวลา 44 ชั่วโมง ในสาลีข้าวโพด, สาลีข้าวโพดข้าวเหนียว, สาลีข้าวสาลี, สาลีข้าวสาลี, สาลีข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Hylon V) และสาลีข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูงมาก (Hylon VII) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับผลของการศึกษาของ Tester, Debon และ Karkalas (1998) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา อุณหภูมิ และปริมาณน้ำ ในสาลีข้าวสาลี ต่อการเกิด annealing ซึ่งใช้ระยะเวลา 1-6 วัน ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C (ต่ำกว่า T_0 25, 15 และ 5°C ตามลำดับ) โดยใช้ปริมาณน้ำตั้งแต่ 12-90% พบว่าที่ระยะเวลานาน 3 วัน ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด และไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำ annealing ให้นานขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing มากขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำ 60% ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้นไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก นอก

จากนี้ Hoover และ Vasanthan (1994) รายงานว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชถั่ว lentil, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชข้าวโอ๊ต, แป้งสตาร์ชข้าวสาลี เพิ่มขึ้นเมื่อทำการ annealing โดยใช้ปริมาณน้ำ 80%

2.10 รายการอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลา นุวัฒน์, รุ่งทิภา วันสุขศรี และบุญทิภา นิลจันทร์. (2546). การศึกษาคุณสมบัติของ แป้งข้าวพันธ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธิ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์ มูลค่าเพิ่ม. ใน รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กองนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2. อุตสาหกรรมแปรรูปข้าว 2544. แหล่งที่มา : [http://www.oie.go.th/ Industrystatys 2/rice.3.doc](http://www.oie.go.th/Industrystatys2/rice.3.doc).

Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules : structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85-112.

Chrastil, J. (1990). Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperature. **J. Cereal Sci.** 11: 71-85.

Chung, K. M., Moon, T. W., and Chun, J. K. (2000). Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chem.** 77: 567-571.

Eerlingen, R.C., Jacobs, H., Van Win, H., and Delcour, J. A. (1996). Effect of hydrothermal treatment on the gelatinisation properties of potato starch as measured by differential scanning calorimetry. **J. Therm. Anal.** 47: 1229-1246.

- Eliasson, A., and Gudmundsson. (1996). Starch: Physicochemical and functional aspects. Pp 431-503. In A. Eliasson (ed.). **Carbohydrate in food**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- French, D. (1984). Organization of starch granules. In R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E. F. Paschall (2 nd eds.), **Starch Chemistry and technology**. pp. 183-212. Academic press, Orlando, FL.
- Gallant, D. J., Buleon, B. and Perez, S. (1992). Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzyme degradation. **Eur. J. Clin. Nutri.** 46: s3-s16.
- Hizukuri, S. (1996). Starch: analytical aspects. In A.-C. Eliasson (ed.). **Carbohydrates in Food**. pp. 347-429. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Hoover, R., and Vasanthan, T. (1994). The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. **J. Food Biochem.** 17: 305-325.
- Hoseney, R. C., and Lineback. (1996). Method of synthesis and characterization. In R. C. Hoseney (ed.). **AACC Short course on "Starch: Structure, Properties, and Food uses"**. August 27-29, 1996. Bangkok, Thailand.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure:A Review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat Starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacob, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J. A. (1995). Influence of Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources. **Cereal Chem.** 72: 480-487.

- Jacob, H., Eerlingen, R. C., Rouseu, N., Colonna, P., and Delcour, J. A. (1998). Acid hydrolysis of native and annealed wheat, potato and pea starches. **Carbohydr. Res.** 305: 193-207.
- Jane, J. L., Xu, A., Radosavljevic, M., and Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. (1993). A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. **Starch/Starke.** 45: 417-420.
- Juliano, B. O. (1984). Rice starch: Production, properties and uses. In R. L. Whistler, J. N. Bemiller and E.F. Paschall (2 nd eds.), **Starch Chemistry I and technology.** pp. 507-529. Academic press, Orlando, FL.
- Kruger, B. R., Knutson, C. A., Inglett, G. E., Walker, C. E. (1987). A differential scanning calorimetry study on the effect of annealing on gelatinization behavior of corn starch. **J. of Food Sci.** 52: 715-718.
- Kuge, T., Kitamura, S. (1985). Annealing of starch granules—warm water treatment and heat—moisture treatment. **J. Jpn. Soc. Starch Sci.** 32: 65-83
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A.C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water Content. **Starch/Starck.** 43: 227-231.
- Matsuo, T., Futsuhara, Y., Kikuchi, F., and Yamaguchi, H. (1997). **Science of the Rice Plant**, Vol III. pp. 469. Nisan Gyoson Banka Kyokai (Nobunkyo), Tokyo.

- Nakasawa, Y. and Wang, Y. J. (2003). Acid hydrolysis of native and anneal starches and branch-structure of their Naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.
- Ophardt, C. (2003). Amylose and amylopectin structure. <http://www.google.com>.
- Seow, C. C. and Teo, C. H. (1993). Annealing of granular rice starches interpretation of the effect on phase transitions associated with gelatinization. **Starch/Starke.** 10: 345-351.
- Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches: The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.
- Tester, R. F. and Debon, S. J. (2000). Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.
- Tester, R.F., Debon, S.J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Tester, R. F., Debon, S. J. and Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.
- Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V. P. (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.
- Tester, R.F. and Morrison, W.R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.
- Yost, D. A., Hosney, R. C. (1986). Annealing and glass transition of starch. **Starch/Starke.** 38: 289-292.

Zobel, H. F. (1988). Molecules to granules: A comprehensive review.

Starch/Starke. 40: 1-7.

บทที่ 3

ผลของการ annealing ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของ ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่เป็นข้าวเก่าและข้าวใหม่

EFFECT OF ANNEALING ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF WAXY AND NORMAL RICE WITH AND WITHOUT AGING

3.1 บทคัดย่อ

การ annealing ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ โดยการแช่ข้าวหักในน้ำ 65 และ 75% ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลละตินในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) 7 และ 30 องศาเซลเซียส ($T_a < T_o$ 7 และ 30°C) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน พบว่าการ annealing มีผลทำให้ค่า T_o , T_p (peak gelatinization temperature) และ T_c (conclusion gelatinization temperature) ของแป้งฟลาวร์ข้าวสูงขึ้น ($P < 0.05$) ซึ่งเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 7°C โดยค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30°C เป็นเวลา 1 วัน ค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 7°C เป็นเวลา 1 วัน ส่วนค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30°C เป็นเวลา 3 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 7°C นาน 3 วัน ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ใกล้เคียงกับข้าวเก่า

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดที่ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่า พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น แต่ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าเบรกดาวน์ ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบคต่ำลง ($P < 0.05$) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 7°C ส่วนความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่ที่มีการผ่าน annealing มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ annealing

หลังการ annealing กำล้างการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และข้าวเจ้าใหม่ลดลง แต่แป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าที่มีการผ่านการ annealing แล้ว มีกำล้างการพองตัว และการละลายสูงขึ้น และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งก็ลดลง เมื่อทำการ annealing $T_a < T_o$ 7°C ซึ่งกำล้างการพองตัว การละลาย และ

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งที่ผ่านการ annealing อาจมากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับสภาวะการ annealing พันธุ์ข้าว และความเก่า-ใหม่ของข้าว

3.2 บทนำ

ข้าวคือเมล็ดของธัญพืช ใช้เป็นอาหารหลักของประชากรมากกว่าครึ่งโลก มี 2 ชนิดใหญ่ คือ ข้าวเหนียว และข้าวเจ้า โดยข้าวเหนียวมีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช (starch) ที่ประกอบด้วยอะมิโลเพกติน (amylopectin) เกือบทั้งหมด (99-100%) ส่วนข้าวเจ้ามีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดข้าวส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช ที่ประกอบด้วยอะมิโลเพกตินและอะมิโลส (amylose) ในเปอร์เซ็นต์แตกต่างกัน ซึ่งคุณภาพของข้าวสารอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาวะและระยะเวลาในการเก็บรักษา (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

นอกจากการบริโภคข้าวในรูปข้าวหุงสุกแล้ว ยังมีการบริโภคในลักษณะข้าวที่ผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ลักษณะอื่น เช่น แป้ง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ช โดยแป้งฟลาวัวร์ (flour) ได้จากการนำเมล็ดข้าวหรือปลายข้าวมาโม่เป็นแป้ง ส่วนแป้งสตาร์ช (starch) เป็นแป้งที่มีการสกัดเอา โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่นๆ ออกไป จนเหลือแต่แป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

การ annealing เป็นการแช่แป้งในน้ำโดยใช้น้ำในปริมาณมาก (มากกว่า 60% โดยน้ำหนัก) หรือใช้น้ำปานกลาง (40-50% โดยน้ำหนัก) ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition (T_g) แต่ต่ำกว่า T_0 ในระยะเวลาหนึ่ง (Jacob and Delcour, 1998) หลังจากผ่านการ annealing แล้ว ขึ้นสู่สภาวะ amorphous) ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ที่เหมาะสมมากขึ้น หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้น ร่วมกับการจัดเรียงตัวใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, Debon and Sommerville, 2000; Stute, 1992) ในปี ค.ศ. 2000 Tester และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของการ annealing ต่อแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลส 0% และแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดา มีปริมาณอะมิโลส 33.2% โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในน้ำมากกว่า 96% พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเปรียบเทียบค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียว และพันธุ์ธรรมดาที่ผ่านการ annealing แล้ว พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีค่า T_0 และ T_p สูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่พบว่า T_c ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ภาย

ในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งในแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมชาติมีปริมาณอะมิโลสภายในชั้นอสัณฐานมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ค่า T_0 , T_p แป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมชาติสูงขึ้นไปมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c-T_0) แคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยพบว่าช่วง T_c-T_0 ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าพันธุ์ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียว double helices (ΔH เพิ่มขึ้น) พบว่าค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing และยังพบอีกว่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมชาติ นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1992 Stute ได้ทำการศึกษาถึงผลของการ annealing แป้งสตาร์ชมันฝรั่งนาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C พบว่าค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจมีความสมบูรณ์มากขึ้น

Jacob และคณะ (1995) ได้ศึกษาผลของการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดโดยทำการ annealing ในสภาวะที่ใช้ น้ำ 66.7% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 3-4% องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชถั่วลิสง และ แป้งสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว ความหนืดของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวในชั้นผลึก ความสามารถในการพองตัว (swelling) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด แต่พบว่าในทุกแป้งสตาร์ชเมื่อผ่านการ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น

จากรายงานข้างต้นที่กล่าวมาแล้วว่าการ annealing ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยที่ช่วง T_c-T_0 แคบลง และ ΔH อาจเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลของการ annealing จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Stute (1992) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา โดยใช้ระยะเวลานาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C ต่อผลของ annealing ในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำ annealing ที่นานขึ้นทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างการ annealing อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นอสัณฐาน และชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวเพื่อลดความไม่เป็นระเบียบลงตลอดระยะเวลาในการ annealing จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุดและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ต่อการเกิด annealing ด้วย โดย Nakazawa และ Wang (2003) ได้แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing คือ 40, 45, 50, 55, 60 และ 65°C โดยใช้ปริมาณน้ำ 75% เป็นเวลา 44 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวโพด, แป้งสตาร์ช

ข้าวโพดข้าวเหนียว, แป้งสตาρχข้าวสาลี, แป้งสตาρχสาธู, แป้งสตาρχข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Hylon V) และแป้งสตาρχข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูงมาก (Hylon VII) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับผลของการศึกษาของ Tester และคณะ (1998) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา อุณหภูมิ และปริมาณน้ำ ต่อผลของการ annealing ในแป้งสตาρχข้าวสาลี ซึ่งใช้ระยะเวลา 1 ถึง 6 วัน ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C (ต่ำกว่า T_0 25, 15 และ 5°C ตามลำดับ) โดยใช้ปริมาณน้ำตั้งแต่ 12-90% พบว่าที่ระยะเวลานาน 3 วัน ทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด และไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำ annealing ให้นานกว่า 3 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำ 60% ในการทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำให้มากกว่า 60% พบว่าผลของ annealing ไม่ต่างจากการใช้ปริมาณน้ำ 60% ในการทำ annealing

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ annealing มีความสำคัญ จึงทำให้การศึกษครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการ annealing คือ อุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ และเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการไม่เปียกข้าวได้

3.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.3.1 วัตถุดิบและการเตรียม

ข้าวเหนียวเก่าและใหม่พันธุ์ กข 6 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงเก่าและใหม่พันธุ์ กข 23 ซึ่งจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี ข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่ใช้ในการทดลองนี้ทำการเก็บเกี่ยวต่างปีกัน โดยข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่า ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2548 และเก็บในกระสอบป่าน ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) เป็นเวลา 1 ปี 1 เดือนก่อนนำมาทำการทดลอง annealing ส่วนข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่ ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จก็นำมาทำการทดลอง annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน

3.3.2 กระบวนการ annealing

นำตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหกลงในขวดโหลที่มี

ฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนัก เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยใช้ปริมาณน้ำ 2 ระดับ คือ 65 และ 75% แล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 ต่างกัน 2 ระดับ คือที่ต่ำกว่า T_0 7°C (คือที่อุณหภูมิ 55, 52.6, 65.5 และ 64.5°C ในข้าวเหนียวเก่าและใหม่และข้าวเจ้าเก่าและใหม่ตามลำดับ) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และที่ต่ำกว่า T_0 30°C (คือที่อุณหภูมิ 36, 29.6, 42.5 และ 41.5°C ในข้าวเหนียวเก่าและใหม่และข้าวเจ้าเก่าและใหม่ตามลำดับ) เป็นเวลา 1 และ 3 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง สำหรับข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าและใหม่ ที่ไม่ทำการ annealing นั้นนำมาขัดสีและลดขนาดให้มีขนาดเล็กเท่ากับข้าวที่นำไป annealing จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วแช่ข้าวในน้ำ โดยใช้อัตราส่วนข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 2 ส่วน แช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) แล้วจึงนำข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ไปโม่ด้วยโม่หิน (Aerosia Interpac, ประเทศไทย) โดยใช้อัตราส่วน ข้าว 1 ส่วน ต่อ น้ำ 3 ส่วน จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) แล้วจึงนำแป้งฟลาวร์ที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นนำไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด (Retsch, Germany) ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ แล้วนำแป้งฟลาวร์ที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งฟลาวร์ข้าว

ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าและใหม่มีโปรตีน 5.67, 4.32, 6.82 และ 5.34% ตามลำดับ ปริมาณไขมันวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าและใหม่มีไขมัน 0.43, 0.69, 0.25 และ 0.56% ตามลำดับ

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ใช้วิธีการวัดสี (colorimetric assay) ตามวิธีการของ Juliano (1971) ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectro uv, Biochrom, Libra S22, England) โดยใช้อะมิโลสบริสุทธิ์เป็นแป้งสตาร์ชมันฝรั่งบริสุทธิ์ ประเภท 3 (type III) ในการสร้างกราฟมาตรฐาน พบว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าและใหม่มีปริมาณอะมิโลส 5.95, 4.11, 27.07 และ 22.26% ตามลำดับ

3.3.5 สมบัติการเกิดเจลลาตินในแซน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งฟลาวร์ข้าว 10 มิลลิกรัม ลงในภาชนะ

อะลูมิเนียม (aluminium pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันด้วย DSC โดยใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที จาก 10 ถึง 95°C โดยใช้ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p), อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_c-T_o) และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

3.3.6 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA -4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งฟลาวร์ข้าว 3 กรัม ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อนาที แล้วลดลงเป็น 160 ต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 1-4.45 และรักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50°C ในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 7.50-11 รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 50°C เป็นเวลา 2 นาที ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกควานน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

3.3.7 การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยชั่งตัวอย่างแป้งฟลาวร์ 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอด ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C พร้อมๆกับการเขย่าในระดับคงที่ ในอัตราที่ไม่เร็วมากเพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดแป้งแตก เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นคูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งฟลาวร์ส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งฟลาวัวร์ที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งฟลาวัวร์ที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

3.3.8 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้งฟลาวัวร์ 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

3.3.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 3 ปัจจัย โดยปัจจัยแรกคือปริมาณน้ำแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ 65 และ 75% ปัจจัยที่สองคืออุณหภูมิ โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7 และ 30°C และปัจจัยที่สามคือระยะเวลา ซึ่งการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7°C มี 3 ระดับ คือ 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 30°C มี 2 ระดับ คือ 1 และ 3 วันของข้าวนั้นๆ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) ส่วนการศึกษาสมบัติของแป้งฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ที่สภาวะต่างๆ ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

3.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

3.4.1 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีใน เซชัน

จากตารางที่ 3.1-3.4 เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ พบว่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น โดยค่าดังกล่าวของการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่าสูงกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกได้มาก ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อปรับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างเกลียวของอะมิโลสและของอะมิโลเพกติน ให้มีความเป็นระเบียบ เหมาะสม และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสูงขึ้น (Jacobs and Delcour, 1998; Tester, Debon and Karkalas, 1998) แต่ทั้งนี้พบว่าข้าวเหนียวเก่าที่ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C (ตารางที่ 3.1) มีผลให้ค่า T_0 และ T_p ต่ำลงแต่ค่า T_c สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปทั้งในชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกในระหว่างการ annealing ทำให้ทั้งชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกเกิดการพองตัว จึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างชั้นผลึกลดต่ำลง ส่งผลให้ค่า T_0 และ T_p ต่ำลง

เมื่อเวลาในการ annealing ข้าวนานถึง 3 วัน มีผลให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินปรับตัวใหม่ให้เกิดความสมบูรณ์ของทั้งชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) ส่งผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C นาน 3 วัน ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ annealing นานขึ้นเป็น 7 วัน พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ไม่ต่างจากเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งผลที่พบนี้เหมือนกับการทดลองของ Genkina Wasserman และ Yuryev (2004) ที่พบว่า การ annealing แป้งข้าวสาลีเป็นเวลา 7 และ 10 วัน ที่ $T_a < T_0$ 55°C มีค่า T_0 , T_p และ T_c ไม่ต่างกัน และในปี ค.ศ.1998 Tester และคณะ พบว่าการ annealing ในระยะเวลาหนึ่งระดับหนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงใกล้กับ T_0 โดยใช้ปริมาณมากกว่า 60% ถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing ที่มีผลทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้ง จัดเรียงตัวให้เกิดความเป็นระเบียบ ส่งผลให้ ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น

ระดับน้ำที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ระดับ คือ 65 และ 75% ไม่มีผลทำให้ค่า T_0 , T_p , และ T_c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ เป็นปริมาณน้ำที่

ตารางที่ 3.1 T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์
กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ตารางที่ 3.2 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ตารางที่ 3.3 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ตารางที่ 3.4 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

มาก (Jacob and Delcour, 1998) ทั้ง 2 ระดับ ดังนั้นระดับการแทรกซึมของน้ำเข้าไปสู่ชั้นผลึก และชั้นออสถินฐานของเม็ดแป้ง ในระหว่างการ annealing จึงไม่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าผลของการ annealing เกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำมากกว่า 60% แต่ทั้งนี้ พบว่าผลของการ annealing เกิดขึ้นได้อย่างจำกัดเมื่อน้ำ 20%

ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาติโนเซชัน (ΔH) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและใหม่ มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ดังตารางที่ 3.1-3.4 เนื่องจากระยะเวลาในการ annealing ชั้นออสถินฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้ความหนาของชั้นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genkina, Lyubov, Wasserman และ Yuryev (2004) ที่พบว่าในช่วงแรกของการ annealing ชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น จึงมีการปรับตัวเพื่อให้พลังงานที่มีอยู่ภายในชั้นผลึกเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกลดลง ส่งผลให้ค่า ΔH ลดลง

หลังการ annealing พบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติโนเซชัน ($T_c - T_0$) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า (ตารางที่ 3.1) และแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าและใหม่ (ตารางที่ 3.2 และ 3.4 ตามลำดับ) ไม่เปลี่ยนแปลง โดยช่วง $T_c - T_0$ ของข้าวดังกล่าวที่ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C ไม่ต่างจากที่ $T_a < T_0$, 7°C โดยเฉพาะเมื่อ annealing นานถึง 3 วัน และไม่ต่างจากข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) แต่พบว่าข้าวเหนียวใหม่ที่ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C นาน 3 วัน มีช่วง $T_c - T_0$ แคบลง แต่เมื่อ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C นาน 3 วัน พบว่าช่วง $T_c - T_0$ ไม่ต่างจากข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3.3) ซึ่งช่วง $T_c - T_0$ ที่แคบลงนี้ แสดงถึงเม็ดแป้งมีความ homogeneous มากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yuryev (2004)

การ annealing มีผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ (ตารางที่ 3.3 และ 3.4) เพิ่มขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและข้าวเจ้าเก่า (ตารางที่ 3.1 และ 3.2) ตามลำดับ ($p < 0.05$) โดยค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ในวันแรก ที่ $T_a < T_0$, 30°C ส่วนค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C ในวันที่ 3 แต่ของข้าวเหนียวเก่าไม่เปลี่ยนแปลงที่สภาวะนี้ แต่สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ใน 12 ชั่วโมงแรก ที่ $T_a < T_0$, 7°C ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษา อาจเกิดการระเหยของความชื้นในข้าวสาร (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ทำให้อะมิโลสและปลายสายอะมิโลเพกตินที่อยู่ในชั้นออสถินฐานเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น และอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกพันเกี่ยวกันแน่นมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการ annealing น้ำจึงแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสถินฐาน

ตารางที่ 3.5 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งข้าวเหนียวเก่าและข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.6 T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวเจ้าเก่าและข้าวเจ้าใหม่
พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

และชั้นผลึกของข้าวเก่าได้ยากกว่าในข้าวใหม่ ทำให้การเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อให้เกิดความเป็นระเบียบได้ยากกว่าในข้าวใหม่ จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูง ในระยะเวลาที่นาน เพื่อให้โครงสร้างภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกของข้าวเก่าเป็นระเบียบมากขึ้น

หลังจากการ annealing แล้ว ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่า (ตารางที่ 3.2) สูงขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า (ตารางที่ 3.1) ($p < 0.05$) โดยค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C นาน 3 วัน แต่ที่สภาวะนี้ไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวในข้าวเหนียวเก่า แต่พบที่ $T_a < T_0$, 7°C ใน 12 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้จากการที่ข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมากกว่าข้าวเหนียว (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้านรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546) ดังนั้นเมื่อผ่านการ annealing แล้ว มีผลให้อะมิโลสในชั้นอสัณฐานเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ให้มีความเป็นระเบียบ และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ชั้นอสัณฐานอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Genkina and Wasserman, 2004; Tester et al., 1998) ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในชั้นอสัณฐานของข้าวเจ้าได้ยากกว่าในข้าวเหนียว จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อให้เม็ดแป้งเกิดการละลายในเซชัน ดังนั้นค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าจึงสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียวเก่า อันเนื่องมาจากผลเสริมของการที่มีอะมิโลสมากกว่าข้าวเหนียว

การ annealing เป็นระยะเวลานาน โดยใช้อุณหภูมิสูง ($T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน) มีผลให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าไม่ต่างจากข้าวเหนียวใหม่ ($p > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 3.5 แต่พบว่าค่าดังกล่าวของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าสูงกว่าของข้าวเจ้าใหม่เล็กน้อย ($p < 0.05$) ในตารางที่ 3.6 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของข้าวเหนียวประกอบด้วยอะมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ และมีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานน้อย ซึ่งต่างจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมาก ดังนั้นน้ำจึงสามารถแทรกผ่านชั้นอสัณฐานของข้าวเหนียวเข้าไปสู่ชั้นผลึกได้ง่าย ทำให้อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกของข้าวเหนียวสามารถจัดเรียงตัวเพื่อให้เกิดความเป็นระเบียบได้ง่ายกว่าข้าวเจ้า ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้การ annealing ลดความแตกต่างของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ ให้มีค่าใกล้เคียงกันได้

3.4.2 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า ข้าวเหนียวใหม่ ข้าวเจ้าเก่า และข้าวเจ้าใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่สภาวะต่างๆ พบว่ามีลักษณะแตกต่างกันทั้ง 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าหลังการ annealing

ทุกสภาวะมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) แต่พบว่าค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าเบรกดาวน์ (breakdown) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อน ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าเซตแบค (setback) ซึ่งเป็นความหนืดระหว่างช่วงที่เย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่าหลังการ annealing ทุกสภาวะมีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) นอกจากนี้ก็พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C สูงกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ซึ่งเป็นการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวนำไปห่ออะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และแข็งแรงขึ้นได้มากกว่า (Stute, 1992; Jacob et al., 1995; Tester et al., 2000) จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าเพื่อให้เม็ดแป้งพองตัว และยังพบอีกว่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุดเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่าสูงกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวนำไปห่ออะมิโลเพกตินภายในโครงสร้างของชั้นผลึกที่พันเกลียวกันแน่นขณะเก็บรักษาเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้ชั้นผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีช่องว่างมากขึ้น (Chung, Moon and Chun, 2000; Nakazawa and Wang., 2003) ชั้นผลึกจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เม็ดแป้งจึงสามารถพองตัวได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าสูงกว่า และเมื่อเม็ดแป้งแตกออกจึงทำให้ค่าความหนืดต่ำสุดสูงกว่าด้วย ส่งผลให้ค่าเบรกดาวน์ของข้าวเหนียวเก่าที่ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว จึงมีปริมาณเด็กซ์ทรินสายสั้นและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งมากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถรวมตัว (aggregate) กันได้ดีกว่า จึงทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการคืนตัวเมื่อทำการที่ annealing ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงไม่ต่างกัน เมื่อสังเกตจากค่าเซตแบคของการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C ที่ไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามระยะเวลาการ annealing เนื่องจากในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing มีการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึก ระหว่างอะมิโลสในชั้นอสัณฐาน และระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน จนมีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง (Genkina et al., 2004; Tester et al., 1998)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่า แสดงในตารางที่ 3.8 พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าที่ผ่านการ annealing แล้ว สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่มีค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิ

ตารางที่ 3.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว

เก้าอี้ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ที่สูง เหนียวนำไปห่ออะมิโลสและอะมิโลเพกตินได้ทั้งในชั้นอสังฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก ทำให้อุณหภูมิจุดเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น และความหนืดขณะร้อนมีค่าต่ำลง หลังจากผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว มีอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย อะมิโลสเหล่านี้จึงรวมตัวกันได้ง่าย ส่งผลให้ความหนืดขณะเย็นมีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามระยะเวลาการ annealing เช่นเดียวกันกับในข้าวเหนียวเก่า

ข้าวเหนียวใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C (ตารางที่ 3.9) มีค่าอุณหภูมิจุดเริ่มเกิดเพสท์ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($P > 0.05$) แต่ค่าดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ($P < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึก มีความเป็นระเบียบมากขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิจุดเริ่มเพสท์สูงขึ้น เพื่อให้เม็ดแป้งพองตัว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้ว ความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด เบรกคาวน์ ความหนืดสุดท้าย และเซตแบค มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ($P < 0.05$) และยังพบอีกว่าข้าวเหนียวใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่าความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุดมีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($P < 0.05$) ส่งผลให้ค่าเบรกคาวน์ของข้าวเหนียวใหม่ที่ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C น้อยกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าข้าวเหนียวใหม่ที่ทำกร annealing ที่อุณหภูมิต่ำสามารถทนต่อความร้อนและแรงเฉือนได้มากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้หลังจากการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น ถูกทำลายด้วยความร้อนได้ยาก ดังนั้นเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว จึงอาจมีเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวและเกิดการเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์ (ghosts remnant) เหลืออยู่และแทรกอยู่ภายในเจล (Miller, Derby and Trimbo, 1973) ทำให้เจลที่เกิดขึ้นในระหว่างทำให้เย็นมีความหนืดสูงกว่าเจลที่เกิดจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการ annealing นาน 3 วัน อุณหภูมิจุดเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น ส่วนค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าเบรกคาวน์ ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบคต่ำลง เนื่องจากเมื่อเวลาที่ทำการ annealing นานขึ้น ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Nakazawa and Wang., 2003; Tester, et al., 1998)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่ แสดงในตารางที่ 3.10 พบว่าอุณหภูมิจุดเริ่มเกิดเพสท์ของข้าวเจ้าใหม่ที่ทำกร annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำทำให้เกิดช่องว่างในชั้นผลึกขึ้น (Jacob et al., 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, et al., 1998) ส่งผลให้น้ำแทรกเข้าไปในชั้นอสังฐานและชั้นผลึกได้ง่าย ทำให้เม็ดแป้งพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าข้าวเจ้าใหม่ที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด เบรกคาวน์ ความหนืด

ตารางที่ 3.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งฟลาวัวร์
ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

ตารางที่ 3.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่
พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

ตารางที่ 3.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งฟลาวร์
ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

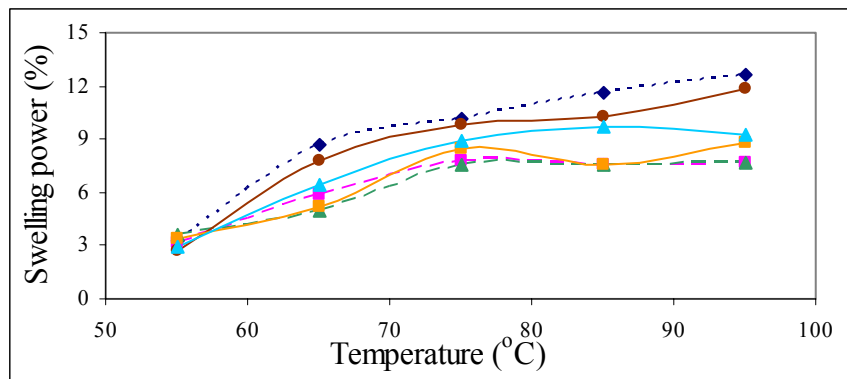
สุดท้าย และเซตแบค ของข้าวเจ้าใหม่ที่ผ่านมาการ annealing แล้ว อาจมีค่าสูงมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ซึ่งเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ค่าดังกล่าวสูงกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C เนื่องจากผลจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เม็ดแป้งมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้พองตัวมากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนืดขณะเย็นสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว อาจมี ghosts remnant แทรกตัวอยู่ในเจล (Miller et al, 1973) ทำให้ค่าความหนืดขณะเย็นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาการ annealing ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่อะมิโลสและอะมิโลเพกตินเกิดการปรับตัว ในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing

ระดับน้ำที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ระดับ คือ 65 และ 75% ไม่มีผลทำให้สมบัติทางด้านความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

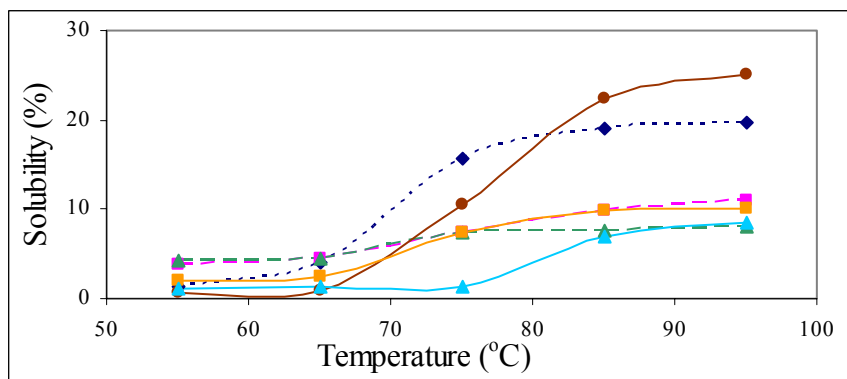
3.4.3 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่า ข้าวเจ้าเก่า ข้าวเหนียวใหม่ และข้าวเจ้าใหม่ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 3.1-3.8 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและใหม่ ที่ผ่านการ annealing สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C ($p < 0.05$) โดยพบว่าหลังจากการ annealing แล้ว กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่ามีค่า ลดลง ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทั้งในน้ำ 65 และ 75% มีค่าการละลายสูงขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 3.1-3.2) แต่เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวเก่าเป็นเวลา 3 วัน ในทั้ง 2 ระดับอุณหภูมิพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งมีค่าลดลง ($p < 0.05$) (ภาพที่ 3.1 และ 3.2) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น โครงสร้างของอะมิโลเพกตินและอะมิโลสมีการปรับตัวให้เป็นระเบียบและแข็งแรงมากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C นั้นทำให้กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งลดลงมากกว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ

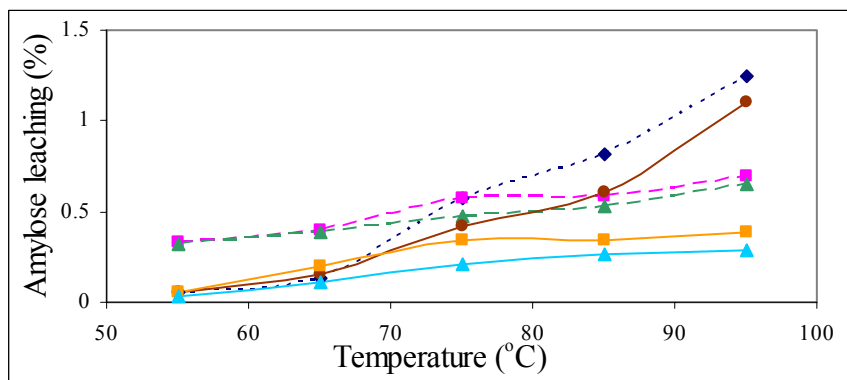
การ annealing ข้าวเจ้าเก่าที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C ทั้งในน้ำ 65 และ 75% แสดงดังภาพที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วันต่ำกว่าการ annealing เป็นเวลา 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้



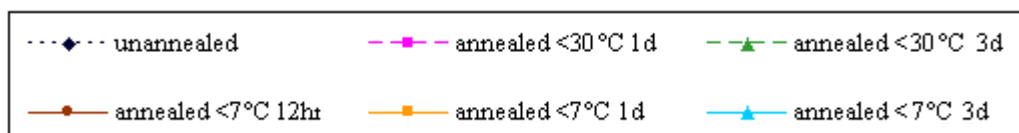
(ก)



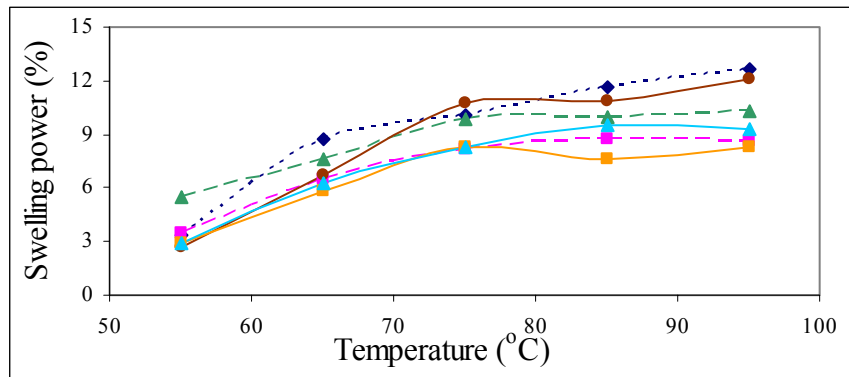
(ข)



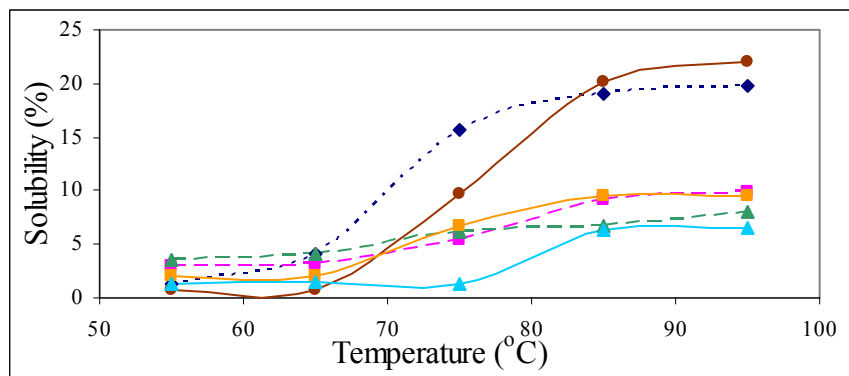
(ค)



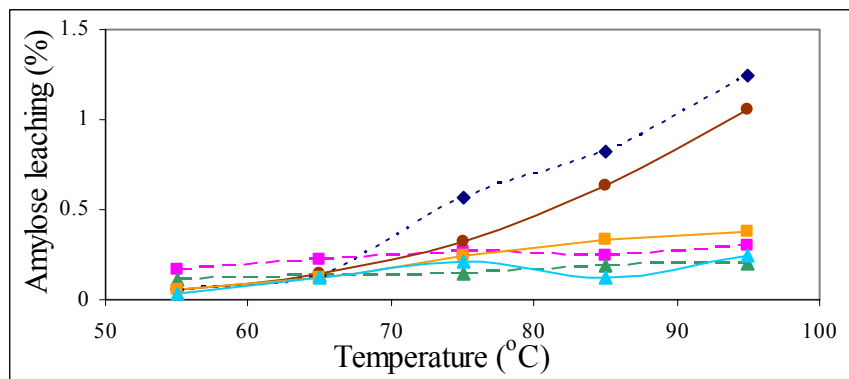
ภาพที่ 3.1 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



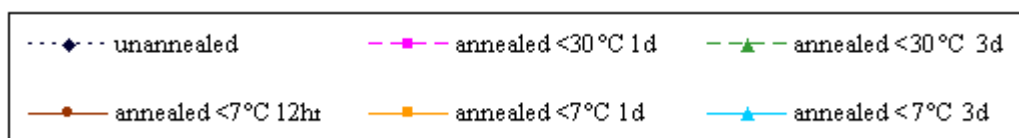
(ก)



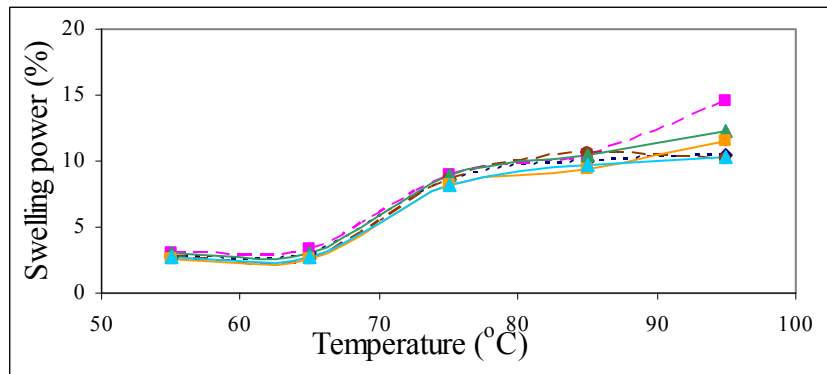
(ข)



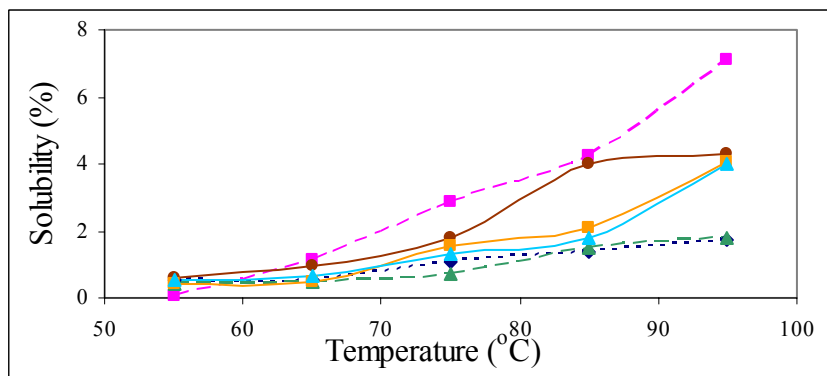
(ค)



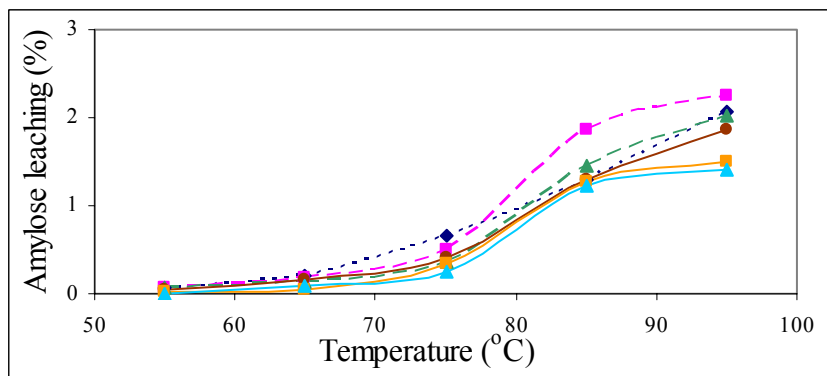
ภาพที่ 3.2 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%



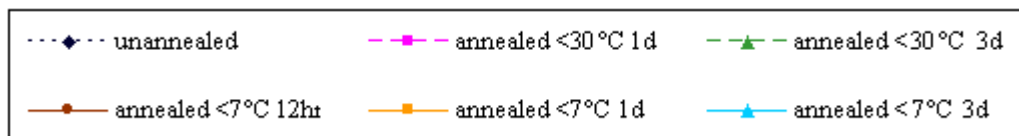
(ก)



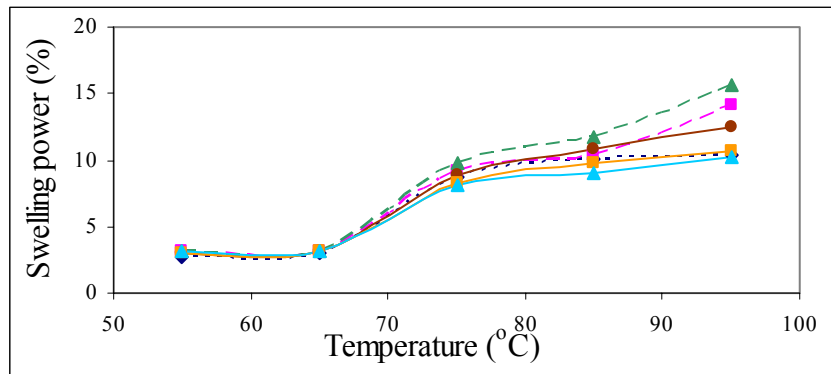
(ข)



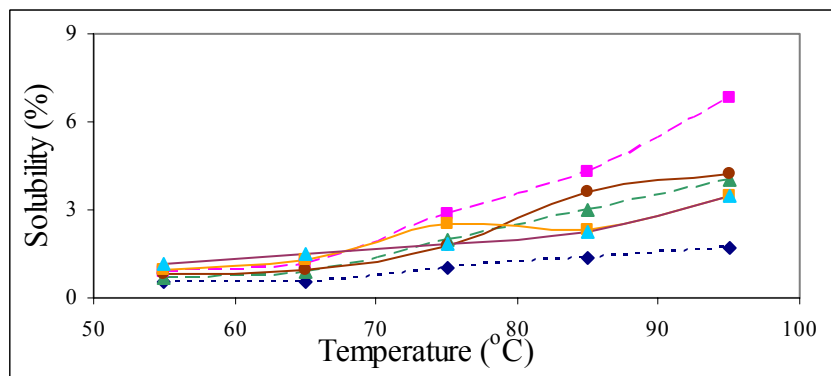
(ค)



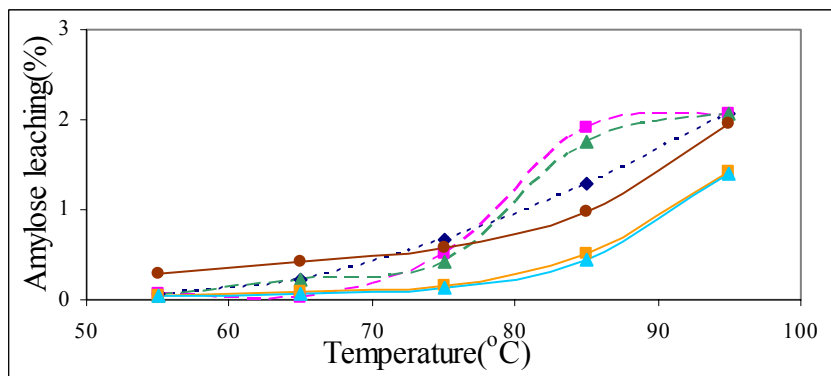
ภาพที่ 3.3 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวรีข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



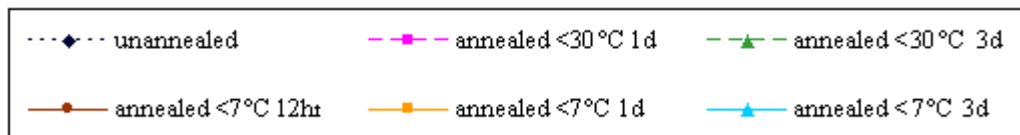
(ก)



(ข)



(ค)

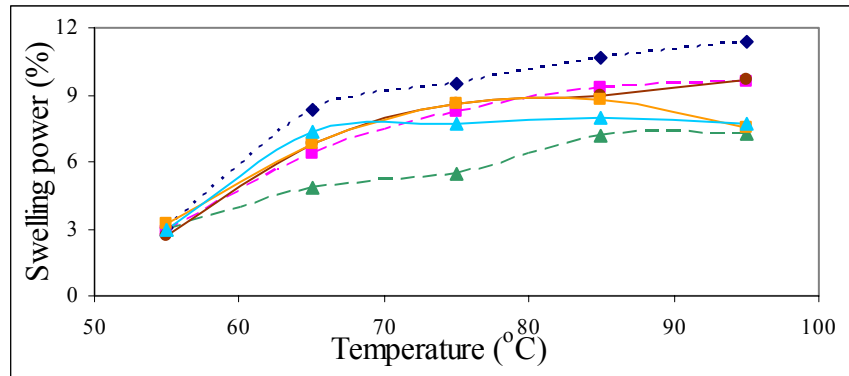


ภาพที่ 3.4 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%

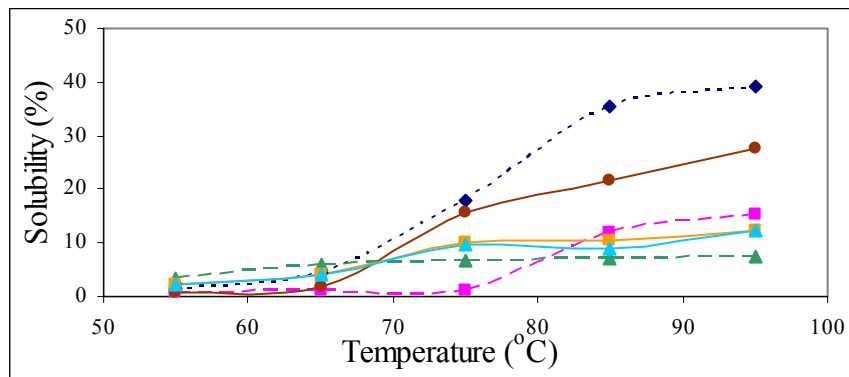
เนื่องจากเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้โครงสร้างชั้นอสังฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลให้อะมิโลสจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และแข็งแรงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของข้าวเจ้าเก่าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ต่ำกว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C แต่พบว่ากำลังการพองตัว และการละลาย ของข้าวเจ้าเก่าที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C มีค่าสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing น้ำสามารถแทรกเข้าไปในชั้นอสังฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง ทำให้โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นอสังฐานและชั้นผลึกยืดหยุ่นมากขึ้น เม็ดแป้งจึงพองตัวได้มากขึ้น และมีอะมิโลสที่ละลายออกมาจากเม็ดแป้งมากกว่าข้าวเจ้าเก่าที่ไม่ผ่านการ annealing

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C ทั้งในน้ำ 65 และ 75% แสดงดังภาพที่ 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ จากภาพพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วันต่ำกว่าการ annealing เป็นเวลา 1 วัน ซึ่งพบทั้ง 2 ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการ annealing ทั้งนี้เกิดเนื่องมาจากเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวกันสมบูรณ์ขึ้น ดังที่ได้อภิปรายในข้างต้น จึงส่งผลทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งข้าวเหนียวที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C มีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$ 7°C ซึ่งอาจเนื่องมาจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เม็ดแป้งยืดหยุ่นน้อย จึงเกิดพองตัวได้ยาก ทำให้เด็กซ์ทรินสายสั้นและอะมิโลสละลายออกมาจากเม็ดแป้งมีปริมาณน้อย แต่พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่าต่ำกว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนี่ยวนำสายอะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับให้ออกมาอยู่ในชั้นอสังฐาน จากผลของการพันเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกให้ระเบียบมากขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) จึงเป็นผลให้กำลังการพองตัวของข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C

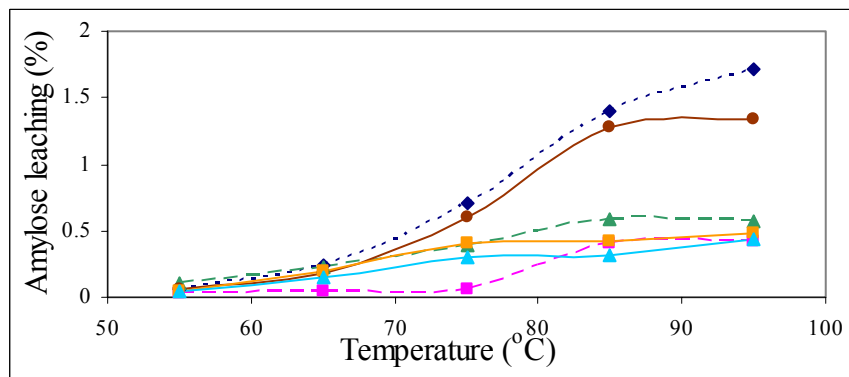
ระดับน้ำที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ระดับ ไม่มีผลทำให้กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวทั้ง 4 ตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



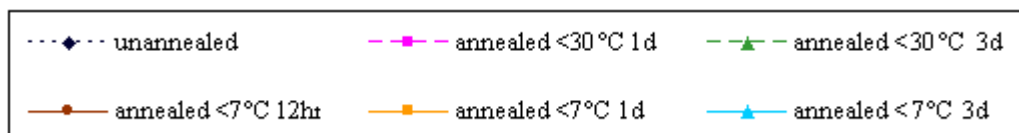
(ก)



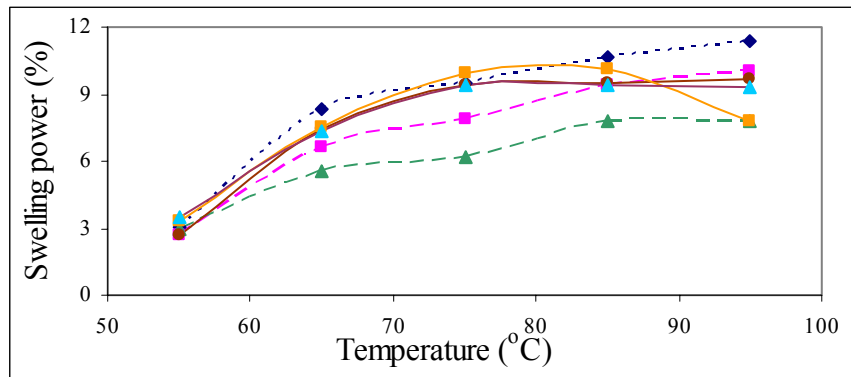
(ข)



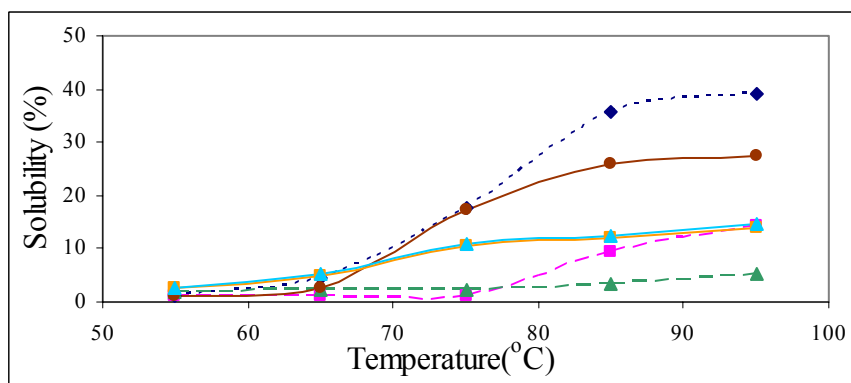
(ค)



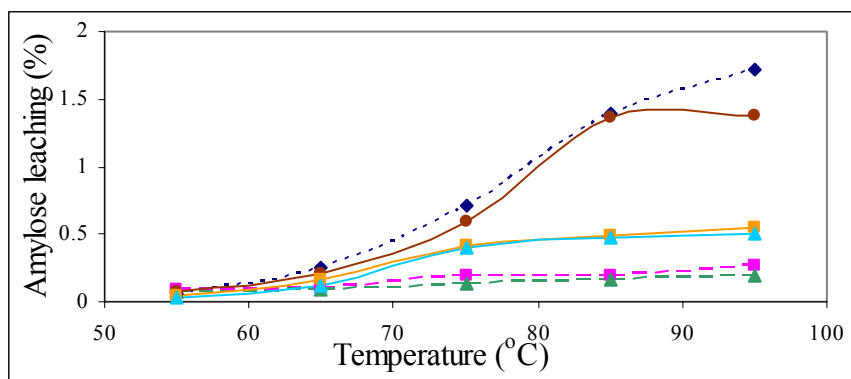
ภาพที่ 3.5 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



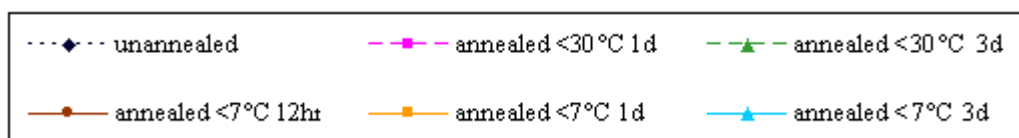
(ก)



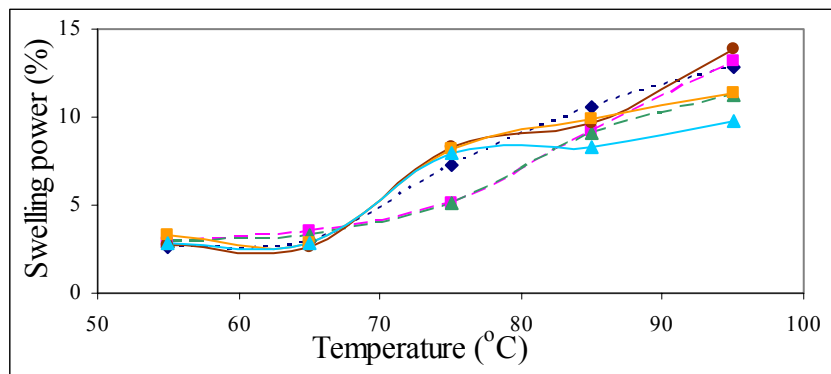
(ข)



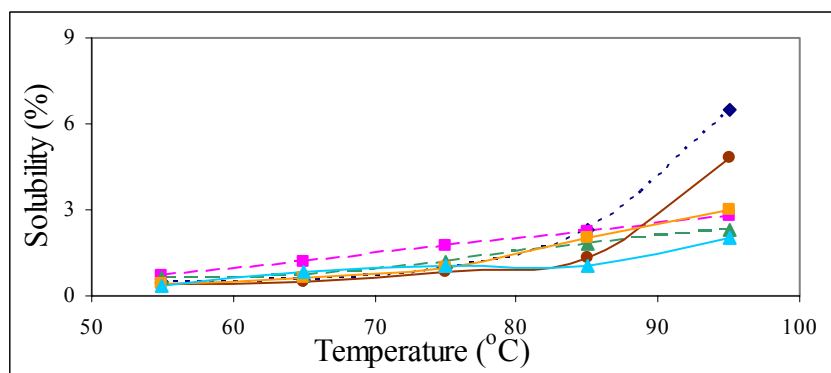
(ค)



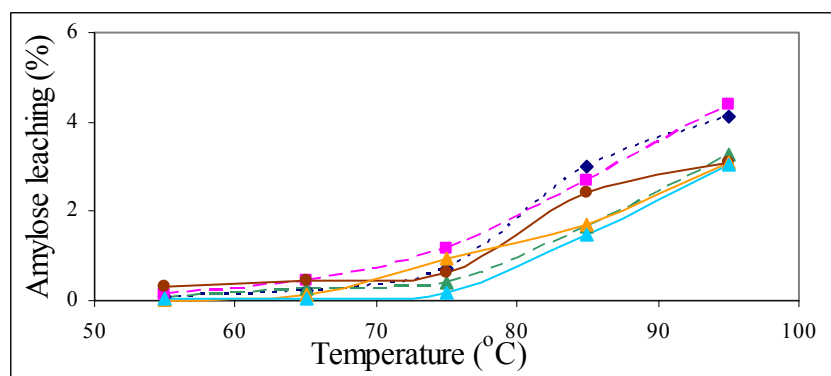
ภาพที่ 3.6 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%



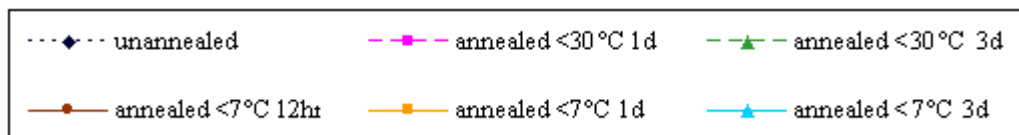
(ก)



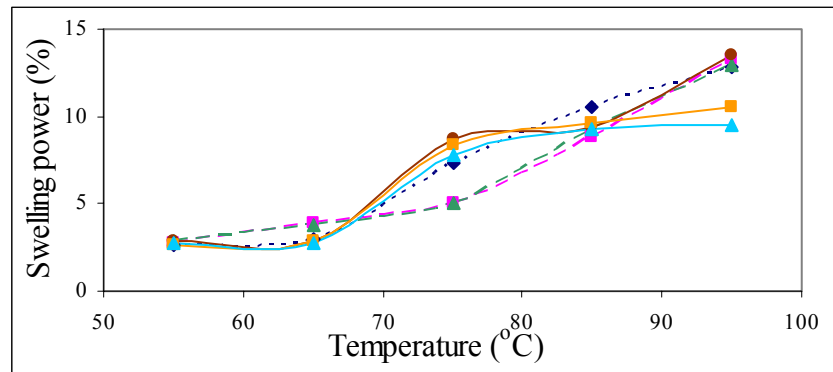
(ข)



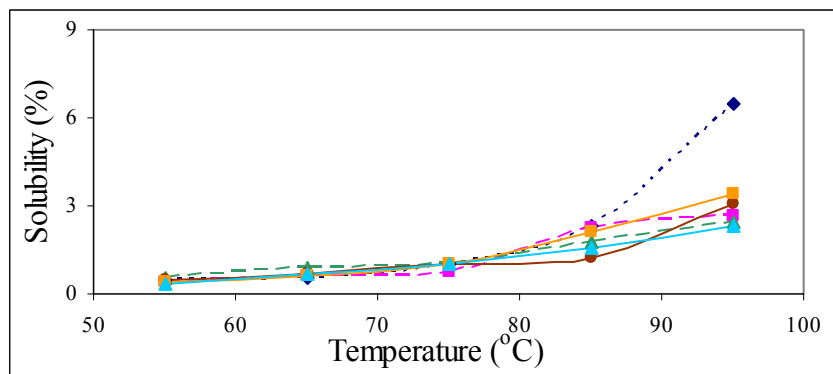
(ค)



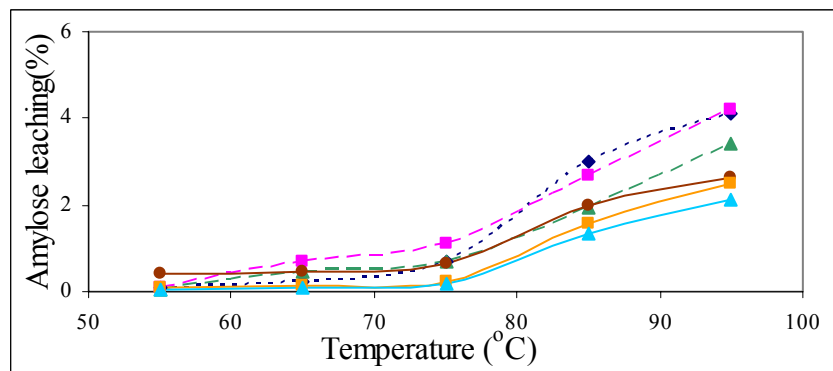
ภาพที่ 3.7 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



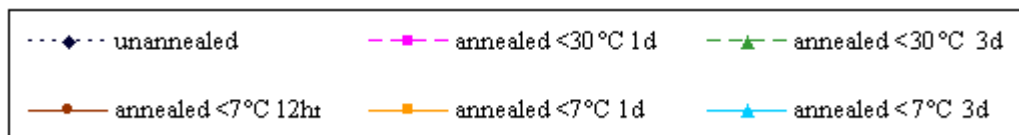
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 3.8 กำจัดการฟองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%

3.5 สรุปผลการทดลอง

การ annealing ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลตาในเซชัน (T_0) โดยใช้ น้ำปริมาณมาก ในระยะเวลาหนึ่ง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่จะทำให้มีการปรับเปลี่ยนและจัดเรียงตัวของอะมิโลสในชั้นออสซิลานให้อยู่ในสถานะ glassy มากขึ้น ในขณะที่อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ โดยการพันเกลียวคู่กันที่เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวัวร์สูงขึ้น โดยพบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่สูงขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าตามลำดับ ซึ่งค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่สูงขึ้นเมื่อ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C เป็นเวลา 1 วัน ในขณะที่ค่าดังกล่าวของข้าวเหนียวเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 1 วัน ส่วนของข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C เป็นเวลา 3 วัน แต่ทั้งนี้พบว่า การ annealing สามารถทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเหนียวใหม่ใกล้เคียงกับข้าวเหนียวเก่า

การ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30 และ 7°C ทำให้แป้งฟลาวัวร์ที่ได้มีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวแตกต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อผ่านการ annealing แล้ว เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C นาน 3 วัน จึงส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น แต่ความเหนียวขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่ามีค่าลดลงในทุกสถานะที่ทำการ annealing แต่เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวใหม่ที่ $T_a < T_0$, 7°C นั้นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์มีค่าสูงขึ้น แต่ของข้าวเจ้าใหม่ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่าความเหนียวขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ทำการ annealing

เมื่อผ่านการ annealing แล้ว กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และข้าวเจ้าใหม่ มีค่าลดลง โดยค่าดังกล่าวของข้าวเหนียวเก่า และข้าวเจ้าใหม่ที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C มีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$, 30°C โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing นาน 3 วัน แต่กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งข้าวเหนียวใหม่ที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C มีค่าสูงกว่าที่ $T_a < T_0$, 30°C ส่วนแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่ามีกำลังการพองตัว และการละลายเพิ่มสูงขึ้น แต่มีปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งลดลงหลังการ annealing ที่อุณหภูมิสูง

3.6 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. (2546). การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. ใน รายงานการวิจัยฉบับ สมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85-112.
- Chung, K. M., Moon, T. W., and Chun, J. K. (2000). Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chem.** 77: 567-571.
- Doublier, J. L. (1981). Rheological studies on starch—Flow behavior of wheat starch pastes. **Starch/Starke.**33: 415-420.
- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K., and Delcour, J. A. (1997). Effects of Hydrothermal treatments on the rheological properties of potato starch. **Carbohydr. Res.** 297: 347-356.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Noda, T., Tester, R. F. and Yuryev, V. P. (2004). Effect of annealing on the polymorphic structure of starches from sweet Potatoes (Ayamurasaki and Sunnyred cultivars) grown at various soil temperatures. **Carbohydr. Res.** 339: 1093-1098.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., and Yuryev, V. P. (2004). Annealing of starches from tubers grown at different environmental temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.

- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure : A Review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat Starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J. A. (1995). Influence of Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources. **Cereal Chem.** 72: 480-487.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Rouseu, N., Colonna, P. and Delcour, J. A. (1998). Acid hydrolysis of native and annealed wheat, potato and pea starches-DSC melting features and chain length distributions of lintnerised starches. **Carbohydr. Res.** 308: 359-371.
- Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H. J., Eerlingen, R. C., Delcour, J. A. and Reynaers, H. (1998). Evaluation of the impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches : A differential scanning calorimetry and small angle X-ray scattering study. **Carbohydr. Res.** 306: 1-10.
- Jane, J. L., Xu, A., Radosavljevic, M., and Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. (1993). A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. **Starch/Starke.** 45: 417-420.
- Juliano, B. O. (1984). **Rice starch** : Production, properties and uses. pp. 507-529. In *Starch Chemistry and technology*, 2nd ed. Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall, E.F. Academic press, Orlando, FL.

- Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Tester, R. F., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev V. P. (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.
- Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Fornal, J., Blaszczyk, W., Jelinski, T. and Yuryev, V. P. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water content. **Strarch/Starck.** 43: 227-231.
- Miller, B. S., Derby, R. I. and Trimbo, H. B (1973). A pictorial explanation for the Increase in viscosity of a heated wheat starch water suspension. **Cereal Chem.** 50: 271-280.
- NaKazawa, Y. and Wang, Y. J. (2003). Acid hydrolysis of native and anneal starches and branch-structure of their Naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.
- Schoch, T. J. and Maywald, E. C. (1968). Preparation and properties of various legume starches. **Cereal Chem.** 45: 564-573.
- Seow, C. C and Teo, C. H. (1993). Annealing of Granular Rice Starches Interpretation of the Effect on Phase Transitions Associated with Gelatinization. **Strarch/Starck.** 45:345-351.
- Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.

- Tester, R. F. and Debon, S. J. (2000). Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.
- Tester, R. F., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Tester, R. F., Debon, S. J. and Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.
- Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V.P, (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.
- Tester, R. F. and Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.
- Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J. and Delcour. (2003). Rice starches. II. Structure aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38: 53-59.
- Yuryev, V. P., Genkina, N. K. and Wasserman, L. A. (2004). Annealing of starches from potato tubers grown at different environment temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Yuryev, V. P., Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Founal, J., Blaszcak, W. and Jelinski, T. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. (1988). Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. **Cereal Chem.** 65:443-446.

ตารางที่ 3.1 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	61.98±1.54cd	69.13±2.27b	74.63± 1.06d	12.65±2.20cd	4.08±0.54e
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30 °C ในน้ำ 65%					
1 วัน	58.69±0.06f	67.05±0.12c	77.77±0.88abc	19.09±0.81a	6.69±0.27cd
3 วัน	59.57±0.73ef	67.06±1.88c	76.36±3.57abcd	16.78±3.45ab	4.97±1.10de
$T_a < T_o$ 30 °C ในน้ำ 75%					
1 วัน	60.32±0.88e	69.20± 0.23b	79.25±1.42a	18.93± 2.30a	7.46±0.34bc
3 วัน	60.90±1.39de	68.52±1.58bc	75.25±3.80cd	14.36±5.39bc	3.56±1.66e

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	62.53±0.01c	68.32±0.01bc	75.82±0.54bcd	13.29±0.59cd	12.35±0.70a
1 วัน	66.89±0.02a	71.59±0.70a	77.59±1.58abc	10.06 ±0.91d	6.29±0.07cd
3 วัน	66.52± 0.02a	71.49±0.23a	78.78±0.40ab	12.23± 0.41cd	8.80±1.07 b
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 75%					
12 ชั่วโมง	62.73±0.02c	68.32±0.23bc	75.82±0.37bcd	13.12± 0.41cd	11.83±0.94a
1 วัน	64.71± 0.39b	69.63±0.40b	76.43±0.31abcd	11.72±0.59cd	8.55±1.06b
3 วัน	66.56±0.10a	71.19±0.21a	77.85± 0.93abc	11.29±0.99cd	8.54±0.29b

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.2 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	72.49±1.29fg	76.33±0.72g	79.93±0.77f	7.44±0.52bcd	6.71±0.67c
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 65%					
1 วัน	71.55 ±0.62g	77.33±0.09f	83.46±0.80cd	11.91±1.42a	7.23±0.03abc
3 วัน	74.94±0.01d	78.60±0.01e	82.58±0.01de	7.64±0.01bc	7.23±0.01abc
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 75%					
1 วัน	73.28±0.53ef	77.23±0.40f	81.70±0.50e	8.41±0.03b	8.28±0.71abc
3 วัน	73.97±0.96de	77.36±0.64f	81.63±0.82e	7.66±1.04bc	6.99±0.01bc

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	77.70±0.16c	80.40±0.34d	84.04±0.12c	6.34±0.04d	8.35±0.75abc
1 วัน	77.72±0.47c	80.39±0.35d	84.25±0.38bc	6.53±0.08cd	6.91±0.65bc
3 วัน	78.90±0.60ab	81.87±0.49ab	85.73±0.42a	6.83±0.19cd	9.04±0.34a
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 75%					
12 ชั่วโมง	77.84±0.14bc	80.71±0.14cd	84.45±0.29bc	6.62±0.15cd	8.81±0.01ab
1 วัน	78.72±0.11abc	81.42±0.12bc	85.16±0.04ab	6.45±0.14d	8.21±1.40abc
3 วัน	79.40±0.15a	82.53±0.12a	86.00±0.32a	6.60±0.43cd	6.93±0.54bc

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.3 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวหอมพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	59.61±0.16 g	66.15±0.06d	73.39±0.35e	13.78±0.50b	8.28±1.05b
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 65%					
1 วัน	60.68±1.21f	67.94±0.65c	77.07±0.18bc	16.39±2.11a	7.07±0.48b
3 วัน	61.91±0.19e	68.19±0.13c	78.02±0.23ab	16.12± 0.42a	8.22±0.61b
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 75%					
1 วัน	61.00±0.12ef	68.12±0.40c	77.08±0.91bc	16.08±0.86a	7.15±0.43b
3 วัน	61.73±0.06e	68.29±1.22c	75.38±1.60d	13.65±0.22b	6.59±1.83b

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ตัวอย่าง	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	63.38±0.34d	68.96±0.40c	75.18±2.11d	11.80±1.84bc	11.80±0.80a
1 วัน	66.65±0.56b	71.35±0.01b	77.89±0.67abc	11.24±0.13cd	7.55±0.55b
3 วัน	67.67±0.08a	72.70±0.37a	79.55±0.44a	11.88±0.33bc	8.17±0.33b
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 75%					
12 ชั่วโมง	65.02±0.10c	70.69±0.11 b	78.41±0.01ab	13.40±0.08b	10.51±0.06a
1 วัน	66.15±0.10b	71.45±0.11b	78.54±0.01ab	12.39±0.08bc	11.34±0.06a
3 วัน	66.76±1.53ab	70.78±1.43b	76.33±0.25cd	9.57±0.10d	6.70±1.36b

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.4 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	71.53±0.36f	75.11±0.37d	79.63±0.51d	8.10±0.58abc	10.39±0.81b
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 65%					
1 วัน	73.76±0.16e	77.33±0.23c	81.81±0.05bc	8.0533±0.15abc	7.56±0.33d
3 วัน	73.03±0.49e	77.08±0.23c	81.51±1.19cd	8.48±1.68ab	8.39±0.55c
$T_a < T_o$ 30°C ในน้ำ 75%					
1 วัน	73.76±0.01e	77.26±0.02c	80.96±0.13cd	7.20±0.14bc	5.83±0.29e
3 วัน	75.66±2.28d	79.27±2.37b	84.16±3.61a	8.50±1.33a	7.65±0.24cd

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

ตัวอย่าง	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	76.82±0.16abcd	80.31±0.13b	83.87±0.34a	7.06±0.32c	10.11±0.67b
1 วัน	76.97±0.25abc	80.44± 0.24ab	84.07±0.14a	7.11±0.11c	12.80±0.26a
3 วัน	77.74±0.05a	81.66±0.15a	88.43±0.26a	7.69± 0.23abc	9.85±0.11b
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 75%					
12 ชั่วโมง	76.29±0.11cd	80.02±0.10b	83.57±0.10ab	7.29±0.01abc	9.78±0.34b
1 วัน	76.45±0.08bcd	80.48±0.13ab	84.17±0.02a	7.72±0.10abc	12.67±0.59a
3 วัน	77.67±0.16ab	81.70±0.10a	85.43±0.13a	7.77±0.04abc	9.79±0.13b

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.5 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing					
ข้าวเหนียวเก่า	61.98±1.54b	69.13±2.27b	74.63±1.06d	12.65±2.20ab	4.08±0.54c
ข้าวเหนียวใหม่	59.61±0.16c	66.15±0.06c	73.39±0.35d	13.78±0.50a	8.28±1.05ab
$T_a < T_o$ 7°C นาน 3 วัน ในน้ำ 65%					
ข้าวเหนียวเก่า	66.52± 0.02a	71.49±0.23a	78.78±0.40ab	12.23± 0.41ab	8.80±1.07a
ข้าวเหนียวใหม่	67.67±0.08a	72.70±0.37a	79.55±0.44a	11.88±0.33ab	8.17±0.33ab
$T_a < T_o$ 7°C นาน 3 วัน ในน้ำ 75%					
ข้าวเหนียวเก่า	66.56±0.10a	71.19±0.21a	77.85± 0.93b	11.29±0.99bc	8.54±0.29ab
ข้าวเหนียวใหม่	66.76±1.53a	70.78±1.43ab	76.33±0.25c	9.57±0.10c	6.70±1.36b

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3.6 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลาคีโนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าและข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing					
ข้าวเจ้าเก่า	72.49±1.29c	76.33±0.72c	79.93±0.77b	7.44±0.52ab	6.71±0.67c
ข้าวเจ้าใหม่	71.53±0.36d	75.11±0.37d	79.63±0.51b	8.10±0.58a	10.39±0.81a
$T_a < T_o$ 7°C นาน 3 วัน ในน้ำ 65%					
ข้าวเจ้าเก่า	78.90±0.60a	81.87±0.49b	85.73±0.42a	6.83±0.19bc	9.04±0.34b
ข้าวเจ้าใหม่	77.74±0.05b	81.66±0.15b	88.43±0.26a	7.69± 0.23a	9.85±0.11ab
$T_a < T_o$ 7°C นาน 3 วัน ในน้ำ 75%					
ข้าวเจ้าเก่า	79.40±0.15a	82.53±0.12a	86.00±0.32a	6.60±0.43c	6.93±0.54c
ข้าวเจ้าใหม่	77.67±0.16b	81.70±0.10b	85.43±0.13a	7.77±0.04a	9.79±0.13ab

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	304.92±4.12a	151.125±3.12a	153.79±1.06a	187.09±2.00a	35.96±1.12a	70.33±0.03e
สถานะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	157.72±3.33g	115.97±2.10f	41.75±2.06g	137.00±3.08f	21.03±1.76d	74.55±0.59b
3 วัน	121.833±2.64h	99.00±1.44 g	22.83±2.08h	120.39±1.23g	21.39±1.63cd	73.17±0.52c
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 75%						
1 วัน	93.17 ±0.01i	91.75±0.35h	1.92±1.06i	112.84±0.23h	21.59±0.83cd	71.45±0.57d
3 วัน	195.80±5.48e	119.46±3.59e	76.34±1.89d	145.55±1.94e	26.09±1.65b	67.40±0.57f

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	254.00±1.17c	122.00±0.58de	132.00±4.37c	148.00±1.47e	26.00±1.52b	71.60±0.55d
1 วัน	95.17±0.12i	92.25± 0.71h	2.92±0.59i	108.21±1.36i	15.96±2.06e	75.05±0.01b
3 วัน	206.72±4.34d	138.05±4.10b	68.67±2.72e	162.19±1.98b	24.14±2.19bc	76.08±0.52a
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 75%						
12 ชั่วโมง	269.81±3.21b	125.06±1.14d	144.75±4.27b	150.78±0.87d	25.72±1.15b	72.45±0.60cd
1 วัน	186.66±1.39f	131.19±0.76c	55.22±0.90f	155.17±1.46c	23.97±2.21bc	74.57±1.26b
3 วัน	205.42±1.50d	132.22±0.86c	72.19±0.66e	159.81±1.44b	26.58±1.38b	75.58±0.54ab

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	221.09±0.59a	166.00±0.11a	55.09±0.47b	293.83±1.41a	127.84±1.29a	88.05±0.07d
สภาวะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	145.46±1.82e	120.80±1.24efg	24.67±0.59d	229.50±2.59de	108.71±1.36b	90.53±0.03c
3 วัน	188.46±1.82c	140.71±3.59bc	47.75±1.77c	236.34±3.06cd	95.63±0.53e	87.28±0.03d
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 75%						
1 วัน	160.72±3.62d	134.83±0.48cd	25.89±3.59d	242.66±3.35c	107.83±2.87bc	90.23±0.58c
3 วัน	206.09±4.47b	147.21±1.89b	58.88±4.42a	258.50±3.66b	112.30±1.24b	87.23±0.03d

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	139.69±3.43e	124.58±1.12ef	15.11±2.38ef	228.58±3.48e	104.00±3.50cd	90.22±0.61c
1 วัน	145.33±4.02e	129.89± 4.13de	15.44±0.45ef	224.39±2.61ef	94.50±1.54e	90.53±0.39c
3 วัน	125.78±4.02f	115.25±0.16fgh	10.53±2.59g	209.28±2.47g	94.03±4.63e	92.10±0.07a
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 75%						
12 ชั่วโมง	139.75±2.42e	122.31±1.58efg	17.45±1.48e	220.67±3.59f	102.50±2.09d	90.43±0.04c
1 วัน	120.33±2.68f	107.97±1.66h	12.36±1.78fg	201.15±3.22h	93.17±2.91e	91.82±1.48ab
3 วัน	124.50±0.11f	114.38±0.53gh	10.13±0.42g	201.50±1.17h	87.13±0.64f	90.88±0.53bc

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	182.12±0.88c	85.38±0.88f	96.75±0.01a	106.84±0.94g	21.46±0.05bc	70.28±0.03e
สภาวะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	168.92±1.32d	104.25±2.14b	64.67±1.57d	126.83±1.19c	22.59±1.80ab	70.25±0.22e
3 วัน	121.81±2.46g	65.03±1.07g	56.78±1.65e	76.28±0.86h	11.25±0.39f	70.50±0.64e
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 75%						
1 วัน	187.75±1.17b	105.67±1.53b	82.08±0.35b	129.09±2.35b	23.42±0.83a	70.70±0.49e
3 วัน	167.01±3.38d	96.89±0.30d	70.11±3.33c	112.39±1.80f	15.50±1.78e	71.05±0.01e

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	200.38±3.95a	101.17±0.94c	99.21±3.00a	121.75±1.30d	20.58± 0.35c	73.08±0.60cd
1 วัน	156.97±3.59e	105.58±0.58b	51.39±3.08f	126.33±0.77c	20.75±1.26c	75.08±1.05ab
3 วัน	145.17±0.23f	99.34±0.47c	45.84±0.23g	118.13±0.53e	18.79±0.06d	75.45±0.49a
สภาวะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 75%						
12 ชั่วโมง	199.17±1.88a	99.25±0.35c	99.92±1.53a	121.00±0.35d	21.75±0.71abc	72.23±0.53d
1 วัน	185.83±0.36bc	118.00±0.82a	67.84±1.18cd	136.50±0.82a	18.50±0.01d	73.93±0.53bc
3 วัน	143.67±2.26f	90.83±1.54e	52.84±3.38f	108.5±1.54g	17.75±0.90d	74.53±1.34ab

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 3.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	199.09±1.65cd	147.46±1.94c	51.63±3.65bc	241.92±3.43bc	94.46±1.36b	84.40±3.46d
สถานะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	155.33±3.84g	120.00±2.55de	35.33±4.92de	210.29±3.07e	91.64±4.50bc	88.33±1.21b
3 วัน	185.00±0.59e	130.83±2.82d	54.17±3.41b	237.46±2.53c	105.13±2.41a	87.20±1.20bc
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 75%						
1 วัน	115.89±4.14h	105.8±4.11f	10.08±3.35f	204.53±1.89e	98.72±2.23ab	91.30±1.94a
3 วัน	148.63±0.29g	112.13±2.89ef	36.50±3.18d	203.38±1.23e	91.25± 4.13bc	88.03±1.17b

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	196.13±3.83d	151.96±3.23bc	44.17±2.59c	243.04±2.95bc	91.09±2.87bc	82.75±0.49d
1 วัน	157.34±0.83g	128.75± 4.59d	28.59±3.77e	211.50±2.36e	82.75±2.23cd	84.38±0.53d
3 วัน	208.88±0.77bc	160.25±2.01ab	48.63±2.76bc	253.00± 0.46b	92.75±2.47b	84.03±0.03d
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 75%						
12 ชั่วโมง	233.13±3.48a	170.42±3.95a	62.71±0.53a	264.96±7.83a	94.54±1.12b	84.18±0.03d
1 วัน	172.08±3.75f	143.25±4.67c	28.83±3.72e	223.80± 4.62d	80.55±1.32d	84.55±1.28d
3 วัน	211.53±2.86b	165.42±3.51a	46.11±2.47c	267.04±3.81a	97.97±2.59ab	84.78±0.52cd

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

บทที่ 4

ผลของการ annealing ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ของแป้งสารถั่วข้าวเหนียวและข้าวเจ้า

EFFECT OF ANNEALING ON STRUCTURAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF WAXY AND NORMAL RICE STARCH

4.1 บทคัดย่อ

การ annealing ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 โดยการแช่ข้าวหักในน้ำ 65% ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_0) 7 และ 30 องศาเซลเซียส ($T_a < T_0$ 7 และ 30°C) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกเมื่อตรวจสอบโดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer (XRD) ของแป้งสารถั่วที่ผ่านการ annealing แล้วยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบ A เหมือนกับแป้งสารถั่วที่ไม่ผ่านการ annealing เมื่อตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลลาติไนเซชัน ด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC) พบว่าการ annealing มีผลทำให้ค่า T_0 , T_p (peak gelatinization temperature) และ T_c (conclusion gelatinization temperature) ของแป้งสารถั่วสูงขึ้น โดยพบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสารถั่วข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C เป็นเวลา 1 วัน ส่วนแป้งสารถั่วข้าวเหนียว ค่า T_0 และ T_p สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 3 วัน แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า T_c นอกจากนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดทั้งในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของแป้งสารถั่วที่ผ่านการ annealing แล้วยสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งสารถั่ว ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งสารถั่วทั้ง 2 พันธุ์ มีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ($p < 0.05$) โดยที่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อนและเย็นมีความแตกต่างกันตามสถานะในการ annealing และพันธุ์ข้าว

กำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งสารถั่วข้าวเหนียว และข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) แต่เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลานาน 3 วัน คุณสมบัติดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า

ที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยสังเกตได้ชัดเจนเมื่อทำการทดสอบสมบัติดังกล่าวที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C

4.2 บทนำ

แป้งสตาร์ช (starch) เป็นแป้งที่มีการสกัดเอาโปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่น ๆ ออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสสายยาวที่มีขนาดใหญ่ 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งอัตราส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจะแตกต่างกันตามพันธุ์ของข้าว ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชด้วย โดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของข้าว ทำให้จุดประสงค์ในการนำมาใช้ประโยชน์ต่างกัน (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณาวัดน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546)

การ annealing เป็นการแช่แป้งในน้ำโดยใช้น้ำในปริมาณมาก (มากกว่า 60% โดยน้ำหนัก) หรือใช้น้ำปานกลาง (40-50% โดยน้ำหนัก) ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition (T_g) แต่ต่ำกว่า T_0 ในระยะเวลาหนึ่ง (Jacob and Delcour., 1998) หลังจากผ่านการ annealing แล้ว ชั้นอสัณฐาน (amorphous) ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้น ร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, Debon and Sommerville, 2000; Stute, 1992) ในปี ค.ศ. 2000 Tester และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของ annealing ต่อแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลส 0% และแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดา มีปริมาณ อะมิโลส 33.2% โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้น้ำมากกว่า 96% พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อผ่านการทำ annealing แล้วสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเปรียบเทียบค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวกับพันธุ์ธรรมดาที่ผ่านการ annealing แล้ว พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีค่า T_0 และ T_p สูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่พบว่า T_c ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้สายอะมิโลสและสายอะมิโลเพกตินภายในชั้น อสัณฐานและชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งในแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีปริมาณอะมิโลส ภายในชั้น อสัณฐานมากกว่าในพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ค่า T_0 , T_p ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์

ธรรมดาสูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_c-T_0) แคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยพบว่าช่วง T_c-T_0 ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าพันธุ์ธรรมดา เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียว double helices (ΔH เพิ่มขึ้น) พบว่าค่า ΔH ของแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing และยังพบอีกว่า ΔH ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมดา นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1992 Stute ได้ทำการศึกษาถึงผลของการ annealing แป้งสตรัซมันฝรั่งนาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C พบว่าค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจมีความสมบูรณ์มากขึ้น ในปี ค.ศ. 2003 Nakazawa และ Wang พบว่าการ annealing อาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกติน เพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปย่อยชั้นผลึกได้ง่ายและมากขึ้น แม้ว่าการทำ annealing จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในชั้นออสถูฐานและชั้นผลึก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของผลึก ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง XRD พบว่าชนิดของผลึกยังคงเป็นแบบเดิมเหมือนกับ แป้งสตรัซที่ไม่ผ่านการ annealing (Stute, 1992)

Jacob และคณะ (1995) ได้ศึกษาผลของการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดโดยทำการ annealing ในสถานะที่ใช้น้ำ 66.7% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 3-4% องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแป้งสตรัซข้าวสาลี, แป้งสตรัซมันฝรั่ง, แป้งสตรัซถั่วลันเตา และแป้งสตรัซข้าวเจ้า พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว ความหนืดของแป้งสตรัซแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวในชั้นผลึก ความสามารถในการพองตัว (swelling) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ของแป้งสตรัซแต่ละชนิด แต่พบว่าในทุกแป้งสตรัซเมื่อผ่านการ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น เนื่องจากภายในเนื้อเจลาตินนอกจากจะประกอบด้วยอะมิโลสที่เกิดการละลายออกมาแล้ว ยังมีชิ้นส่วนของอะมิโลเพกตินที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการเจลาติไนซ์ กระจายแทรกอยู่ในเนื้อเจลา (ghosts remnant) ทำให้ความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น

จากรายงานข้างต้นที่กล่าวมาแล้วว่าหลังการ annealing ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยที่ช่วง T_c-T_0 แคบลง และ ΔH อาจเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลของการ annealing จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Stute (1992) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา โดยใช้ระยะเวลา 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C ต่อผลของ annealing ในสตรัซมันฝรั่ง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำ annealing ที่นานขึ้นทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างการ annealing อะมิโลสและอะมิโล

เพกตินภายในชั้นออสันฐานและชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัว เพื่อลดความไม่เป็นระเบียบตลอดระยะเวลาในการ annealing จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุดและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกเมื่อระยะเวลาในการ annealing นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ต่อการเกิด annealing ด้วย โดย Nakazawa และ Wang (2003) ได้แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing เป็น 40, 45, 50, 55, 60 และ 65°C โดยใช้ปริมาณน้ำ 75% เป็นเวลา 44 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวโพด, แป้งสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว, แป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชสาเก, แป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Hylon V) และแป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูงมาก (Hylon VII) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงสามารถเหนี่ยวนำให้อะมิโลสในชั้นออสันฐานจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น และการพันเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกมีลักษณะที่เหมาะสม

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการศึกษาคัดแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ annealing มีความสำคัญ จึงทำให้การศึกษาคัดแปรครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคัดแปรที่เกี่ยวข้องกับการ annealing คือ อุณหภูมิ และระยะเวลา ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้า และเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำการ annealing ไปใช้ประโยชน์เพื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพแป้งสตาร์ชข้าวต่อไป

4.3 วัตถุประสงค์และวิธีการ

4.3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียม

ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ซื่อจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี โดยทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จก็นำมาทำการทดลอง annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน

4.3.2 กระบวนการ annealing

นำตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหกลงในขวดโหล ที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนัก เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยใช้ น้ำ 65% แล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 ต่างกัน 2 ระดับ คือที่ต่ำกว่า T_0 7°C (คือที่อุณหภูมิ 52.6 และ 64.5°C ในข้าวเหนียวและข้าวเจ้าตามลำดับ) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และที่ต่ำกว่า T_0 30°C (คือที่อุณหภูมิ 29.6 และ 41.5°C ใน

ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าตามลำดับ) เป็นเวลา 1 และ 3 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง สำหรับข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าและใหม่ ที่ไม่ทำการ annealing นั้นนำมาขัดสีและลดขนาดให้มีขนาดเล็กเท่ากับข้าวที่นำไป annealing จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วแช่ข้าวในน้ำ โดยใช้อัตราส่วนข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 2 ส่วน แช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) แล้วจึงนำข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ไปโม่ด้วยโม่หิน (Aerosia Interpac, ประเทศไทย) โดยใช้อัตราส่วน ข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 3 ส่วน จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด (Retsch, Germany) ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.3.3 การสกัดแป้งสตาร์ช

การสกัดสตาร์ชทำตามวิธีของ Puchongkavarin, Varavinit และ Bergthaller โดยนำตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ที่ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 มาทำการ annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน แล้วโม่เป็นแป้งฟลาวร์ แล้วเก็บไว้ในถุงสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) นาน 6 เดือน ก่อนทำการสกัดแป้งสตาร์ช เมื่อทำการสกัดแป้งสตาร์ชเติมน้ำกลั่นลงไปแป้งฟลาวร์ในอัตราส่วนแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 2 ส่วน แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบส (pH) เป็น 5.0 แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ cellulose ที่มี activity 700 $\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง แล้วกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8% โดยน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติมน้ำกลั่นลงไปอัตราส่วนน้ำกลั่น 2 ส่วน ต่อแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ papain ที่มี activity 0.64 $\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง จากนั้นกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแป้งที่ได้ไปสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนแป้ง 1 ส่วน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 10 ครั้ง แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด

ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งสตาร์ชข้าว

ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว และข้าวเจ้ามีโปรตีน 0.10% และ 0.45% ตามลำดับ

4.3.5 สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชัน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งสตาร์ชข้าว 10 มิลลิกรัม ลงในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminium pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในสัดส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที จาก 10 ถึง 95°C โดยใช้ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p), อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (T_c-T_o) และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

4.3.6 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2 θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998)

4.3.7 การย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis)

ทดสอบการย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ช ตามวิธีการของ Nakazawa และ Wang (2003) โดยนำแป้งสตาร์ชที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing 5 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 15.3% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงไปใน

ขวดปรับปริมาตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 20 และ 30 วัน และเขย่าด้วยมือเบาๆ ทุกวัน แล้วนำส่วนโสมาวิเคราะห์หา total carbohydrate ตามวิธี phenol-sulfuric acid ตามวิธีการของ Dubois, Gilles, Hamilton, Rrebers และ Smith (1956)

4.3.8 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA -4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งสตาร์ชข้าว 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อนาที แล้วลดลงเป็น 160 รอบต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลาระหว่าง 1-4.45 นาที และรักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้น ลดอุณหภูมิลงมาที่ 50°C ในช่วงเวลาระหว่าง 7.50-11 นาที รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 50°C เป็นเวลา 2 นาที ทำการวัดอุณหภูมิ เริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกดาวน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

4.3.9 การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ของแป้งใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยใช้ตัวอย่างแป้งสตาร์ช 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C พร้อมๆกับการเขย่าในระดับคงที่ ในอัตราที่ไม่เร็วมากเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแป้งแตก เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งสตาร์ชส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

4.3.10 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้งสตาร์ช 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

4.3.11 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ปัจจัย โดยปัจจัยแรกเป็นอุณหภูมิ ซึ่งทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7 และ 30°C ปัจจัยที่สองเป็นระยะเวลา ซึ่งการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7°C มี 3 ระดับ คือ 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 30°C มี 2 ระดับ คือ 1 และ 3 วันของข้างต้นๆ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) ส่วนการศึกษาสมบัติของแป้งสตาร์ชข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ที่สภาวะต่างๆ ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

4.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.4.1 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน

การ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C แสดงดังตารางที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสซิลันและชั้นผลึกได้มาก ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อปรับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างเกลียวของอะมิโลสและของอะมิโลเพกติน ให้มีความเป็น

ระเบียบ เหมาะสม และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้ อุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสูงขึ้น (Jacobs and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester, Debon and Karkalas, 1998; Stute, 1992)

เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้นเป็น 3 วัน ส่งผลให้ค่า T_o , T_p และ T_c เพิ่มขึ้นกว่าในวันแรก ($p < 0.05$) เนื่องจากระหว่างช่วงเวลาในการ annealing อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึก เกิดการจัดเรียงตัวเพื่อลดความไม่เป็นระเบียบลงตามระยะเวลาในการ annealing ที่นานขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด เป็นผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีค่าสูง (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากที่สุด แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นก็ไม่ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นเป็น 7 วัน ก็พบว่าค่า T_o , T_p และ T_c ไม่ต่างจากเมื่อทำการ annealing เป็น 3 วัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Yuryev, Genkina, และ Wasserman, (2004) ที่พบว่า annealing แป้งข้าวสาลีที่ $T_a < T_o$, 55°C ไม่ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c ของการ annealing เป็นเวลา 7 วัน ต่างจากการ annealing เป็นเวลา 10 วัน

จากผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับงานของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าการ annealing ในระยะเวลาในระดับหนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับ T_o โดยใช้น้ำปริมาณมากกว่า 60% ถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing ที่มีผลทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้ง จัดเรียงตัวให้เกิดความเป็นระเบียบ ส่งผลให้ ค่า T_o , T_p และ T_c สูงขึ้น

ค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งสตรัสข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียว โดยค่าดังกล่าวของข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$, 30°C เป็นเวลา 1 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งสตรัสข้าวเหนียว ซึ่งค่า T_o และ T_p ของข้าวเหนียว สูงขึ้นเมื่อการทำ annealing ที่ $T_a < T_o$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน ($P < 0.05$) โดยที่ค่า T_c ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ($P > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากในข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสในชั้นออสติฐานมากกว่าในข้าวเหนียว (Juliano, 1984) ซึ่งอะมิโลสอาจเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกในระหว่างที่ข้าวเจ้าเจริญเติบโต และเมื่อผ่านการ annealing แล้วอะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับออกมาอยู่ในชั้นออสติฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ให้ความเป็นระเบียบและมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ชั้นออสติฐานของข้าวเจ้าอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 2000) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อการทำเม็ดแป้งของแป้งสตรัสข้าวเจ้าเกิดการเจลาติไนเซชัน จึงทำให้ค่า T_o ของข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าของข้าวเหนียว

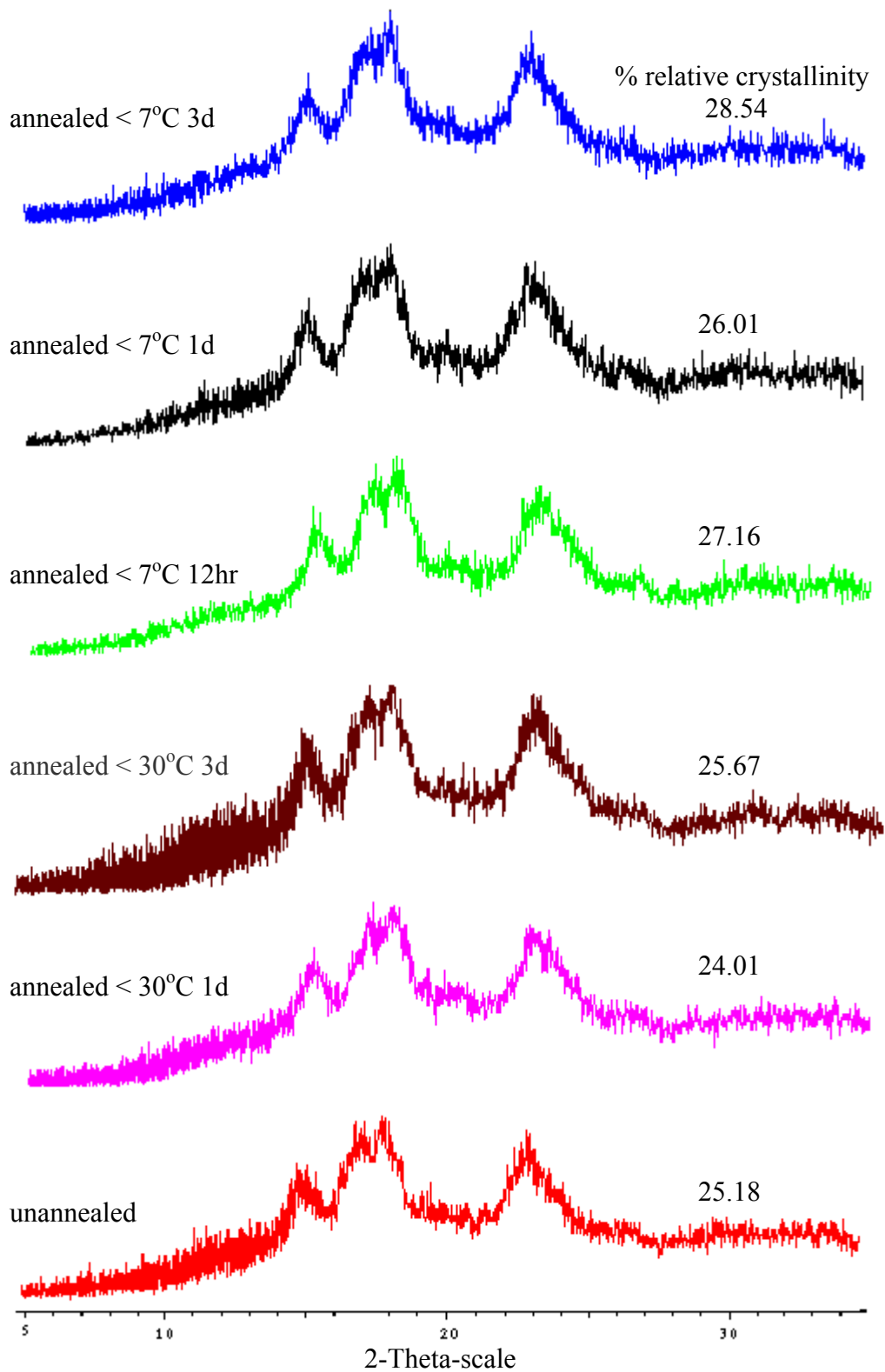
ตารางที่ 4.1 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าว
เหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 4.2 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดผลึกในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

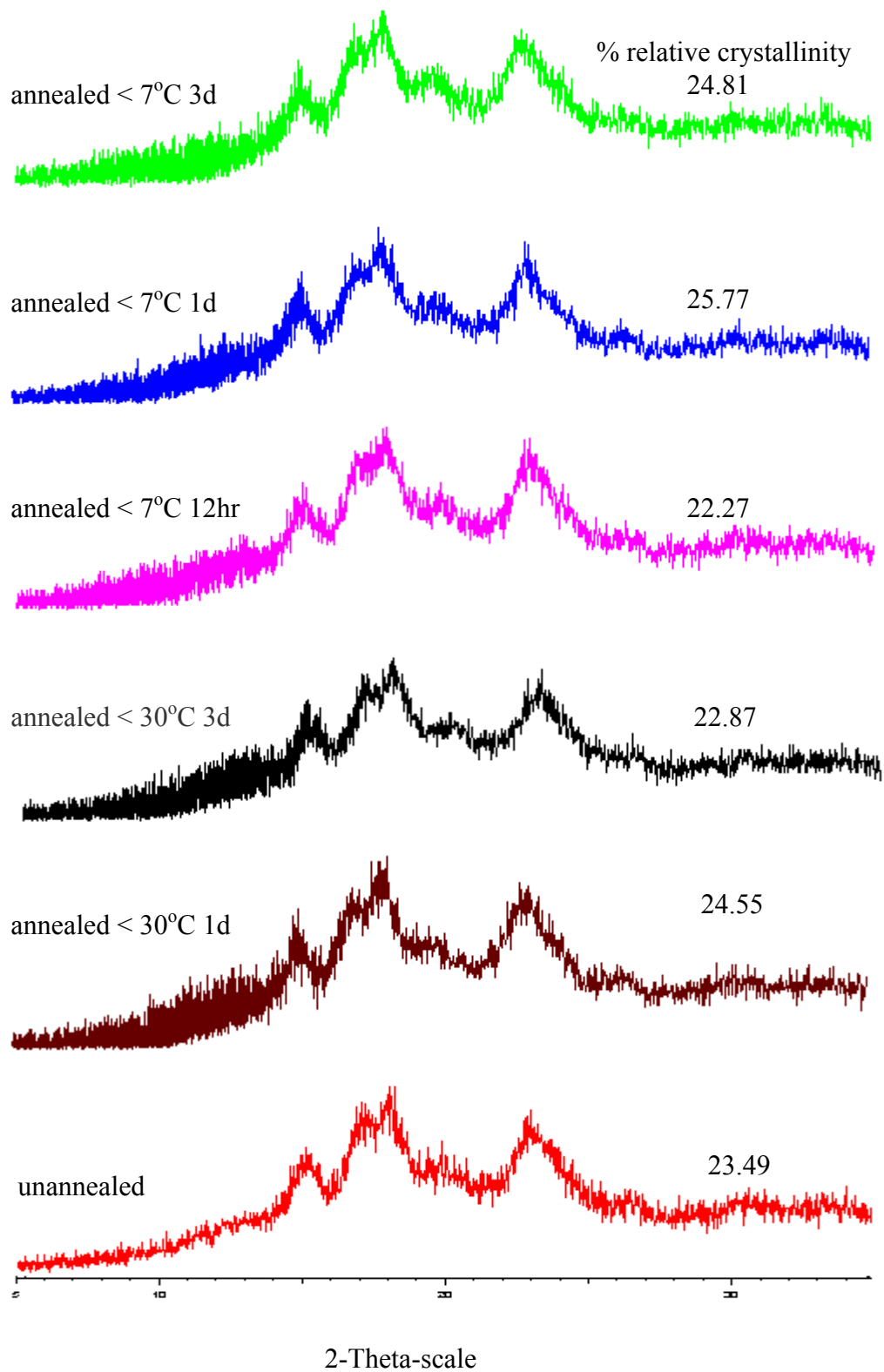
ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เนื่องจากระหว่างระยะเวลาในการ annealing ชั้นนอกสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้ความหนาของชั้นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genkina, Lyubov, Wasserman และ Yuryev (2004) ที่พบว่าในช่วงแรกของการ annealing ชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งมีความหนามากขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น จึงมีการปรับตัวเพื่อให้พลังงานที่มีอยู่ภายในชั้นผลึกเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกลดลง ส่งผลให้ค่า ΔH ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน ($T_c - T_0$) ของข้าวเหนียวแคบลง เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0 + 7^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่พบความเปลี่ยนแปลงของช่วง $T_c - T_0$ ในแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ annealing โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะมิโลเพกตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในข้าวเหนียวจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้เม็ดแป้งมีความ homogeneous เพิ่มมากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yuryev (2004)

4.4.2 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

แป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการ annealing ในทุกสภาวะ พบพืดปรากฏที่มุม 15° , 17° , 18° และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A (Buleon, Colonna, Planchot and Ball, 1998) และพบว่าพืดที่ปรากฏนี้ ไม่ต่างจากพืดที่ปรากฏในแป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการ annealing แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ annealing ไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Stute (1992) ที่ทำการ annealing แป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 52°C เป็นเวลา 14 และ 95 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้วโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชมันฝรั่งยังคงเป็นแบบ B เหมือนกับที่พบในแป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ relative crystallinity แปรผันตรงกับค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH) โดยเมื่อปริมาณ relative crystallinity เพิ่มขึ้นค่า ΔH ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อปริมาณ relative crystallinity ลดลงค่า ΔH ก็ลดลง ตามสภาวะที่ทำการ annealing แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด



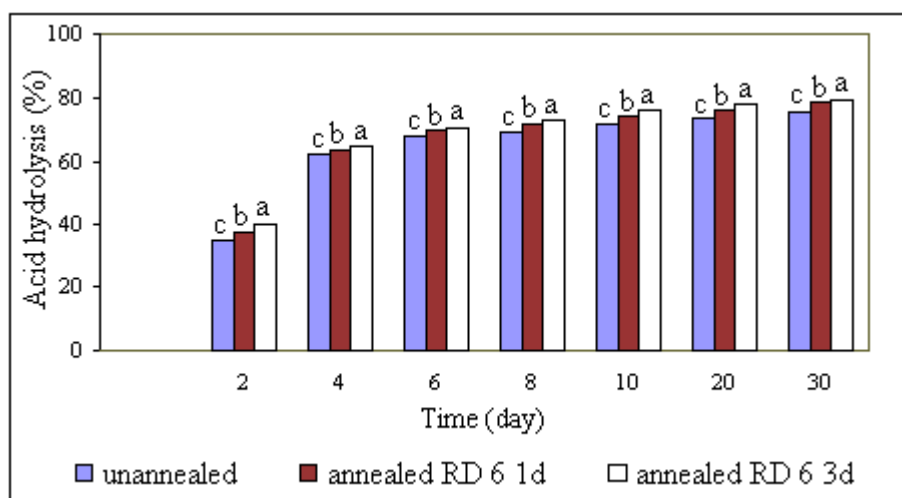
ภาพที่ 4.1 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C



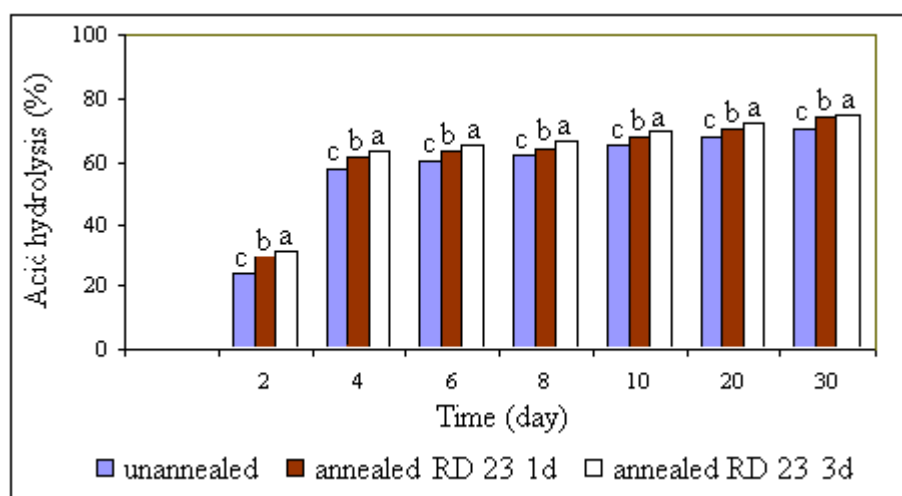
ภาพที่ 4.2 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C

4.4.3 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด

การย่อยด้วยกรดของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 1 และ 3 วัน แสดงดังภาพที่ 4.3 ก และ ข ตามลำดับ ซึ่งสภาวะดังกล่าวเกิดผลของการ annealing ที่มากและค่อนข้างคงที่แล้ว การศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้งด้วยการย่อยด้วยกรดแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 8 วันแรกเป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นอัสฐาน และในช่วงที่ 2 เป็นการย่อยในชั้นเปลือกซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 10-30 ของการย่อยด้วยกรด (Nakazawa and Wang, 2003) จากผลการทดลองพบว่าในช่วง 8 วันแรกแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing แล้วมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าการ annealing เพียง 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและเด็คซ์ทรินสายสั้นที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นเปลือกถูกขับให้ออก มาอยู่ในชั้นอัสฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้ชั้นอัสฐานอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 1998; Genkina, Wasserman, Noda, Tester and Yuryev, 2004; Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Propov and Yuryev, 2004; Kiseleva, Krivandin, Fornal; Blaszcak, Jelinski and Yuryev, 2005) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอัสฐานของแป้งสตราซ์ที่ผ่านการ annealing เป็นระยะเวลานานมีค่าสูงกว่าที่ผ่านการ annealing ในระยะเวลาสั้นและที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าแป้งสตราซ์ข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing แล้วทำให้ชั้นอัสฐานมีระเบียบมากขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอัสฐานของแป้งสตราซ์ข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่หลังจาก 8 วันแล้ว เป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นเปลือก โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดของแป้งสตราซ์ข้าวทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการ annealing แล้วมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลานานทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในชั้นเปลือกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นเปลือก ซึ่งจะทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นเปลือกได้ง่ายและเกิดการย่อยได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Nakazawa และ Wang (2003) ที่รายงานว่า การ annealing ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นเปลือกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นเปลือกได้ง่ายและย่อยได้มากขึ้น



(ก)



(ข)

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 4.3 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ก) และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 (ข) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0 + 7^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 และ 3 วัน

4.4.4 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ RVA (Rapid visco analyzer) ของแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) แต่อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวนาให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ เพื่อลดความไม่ระเบียบภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกได้มากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ (Tester et al., 1998; Tester et al., 2000). จึงทำให้เม็ดแป้งสตราซ์ของข้าวที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูงมีความแข็งแรงมากกว่าเม็ดแป้งที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดการพองตัว เป็นผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีค่าสูงกว่าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ

ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน มีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าต่ำลง หลังจากผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว อาจมีเด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย เด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสเหล่านี้จึงรวมตัวกันได้ง่าย (aggregate) ส่งผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าเบรกดาวน์ (breakdown) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อน ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค (setback) ซึ่งเป็นความหนืดระหว่างช่วงที่เย็นของแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าสูงขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาการ annealing เนื่องจากในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing มีการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึก ระหว่างอะมิโลสในชั้นอสัณฐาน และระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน จนมีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง (Genkina, Lyubov, Wasserman and Yuryev, 2004; Tester et al., 1998) จึงทำให้ความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแตกต่างกันตามระยะเวลาในการ annealing

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็น ของแป้งสาลี
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็น ของแป้งสตาร์ช
ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

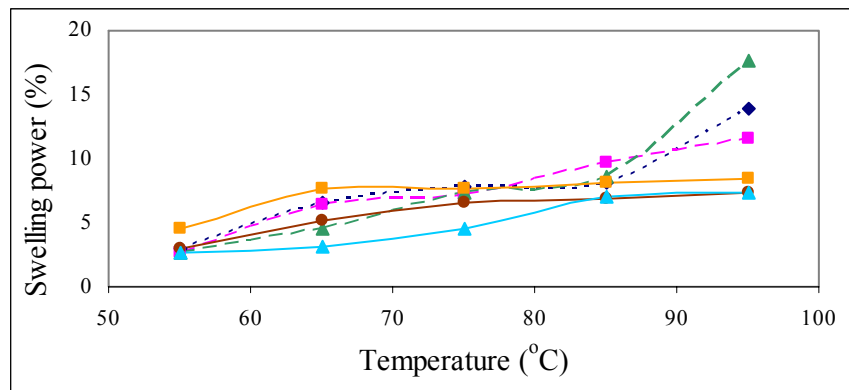
4.4.5 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งสสารข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing แสดงดังภาพที่ 4.4-4.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวของแป้งสสารข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการ annealing สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C ($p < 0.05$) เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ $T_a < T_0$, 30°C ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยพบว่าการ annealing ข้าวเหนียวเป็นเวลา 1 วันมีค่าการละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งสูงกว่า 3 วัน ($p < 0.05$) แต่กำลังการพองตัวเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีค่าสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) ส่วนกำลังการพองตัว การละลายของข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 1 วัน มีค่าสูงกว่า 3 วัน ($p < 0.05$) แต่ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีค่าสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้เม็ดแป้งมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

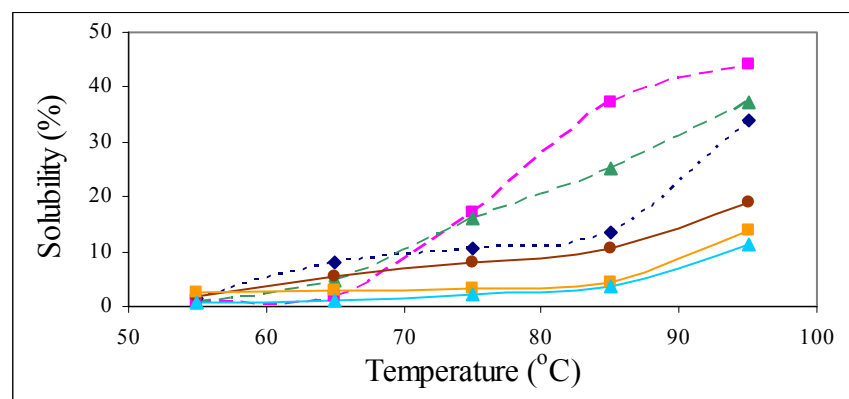
เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C จะทำให้ค่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าลดลง (ภาพที่ 4.4 และ 4.5) เมื่อเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเวลาที่ใช้ในการ annealing นานขึ้น เป็น 3 วัน พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งต่ำลงกว่าใน 12 ชั่วโมงแรกของการ annealing ($p < 0.05$) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และสมบูรณ์มากขึ้นภายในเม็ดแป้ง ส่งผลให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ทนความร้อนได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดแป้งได้ยาก ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ยาก มีปริมาณการละลายและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งต่ำลง (Tester et al., 1998; Chung, Moon and Chun, 2000) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ และการลดลงของความหนืดขณะร้อนและเย็น เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C

4.5 สรุปผลการทดลอง

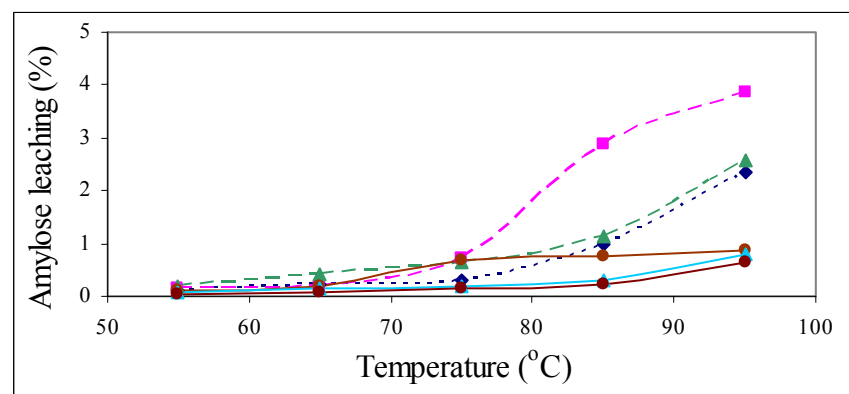
การ annealing ที่อุณหภูมิสูงจนเกือบถึงอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_0) ในระยะเวลาอันยาวนานระดับหนึ่ง โดยใช้น้ำปริมาณมาก เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing เพื่อให้มีการปรับเปลี่ยนและจัดเรียงตัวของอะมิโลสในชั้นออสซิลลูมให้อยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น และอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกเกิดการพันเกลียวคู่กันที่เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้น ส่งผล



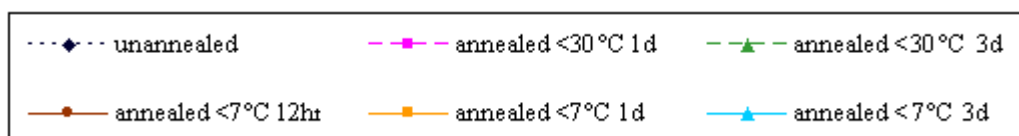
(ก)



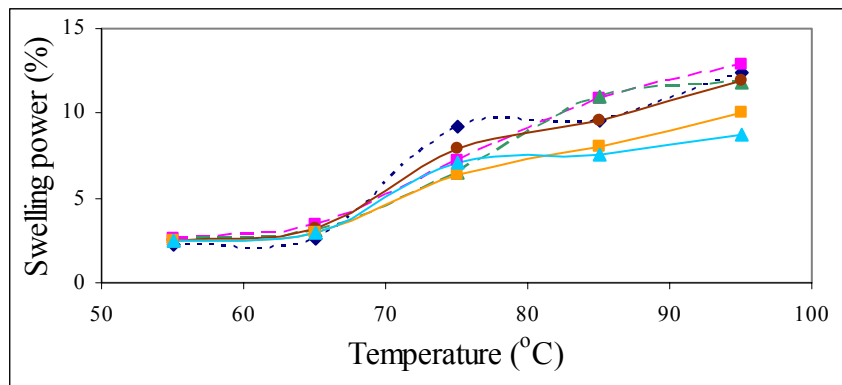
(ข)



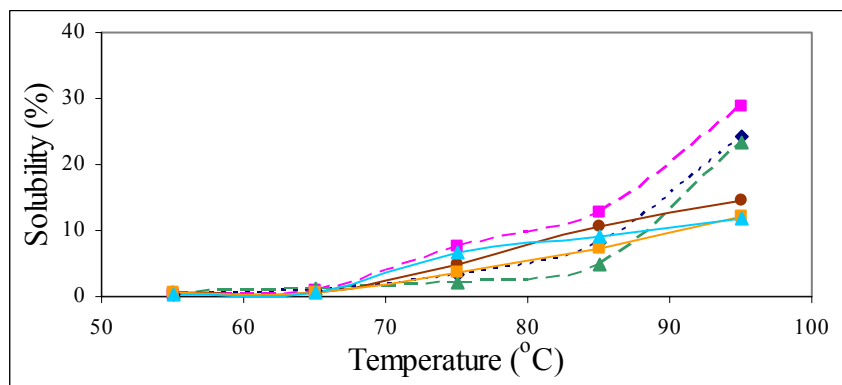
(ค)



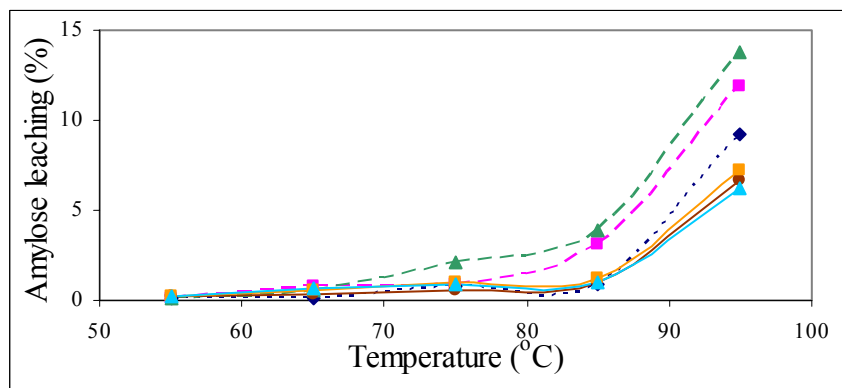
ภาพที่ 4.4 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C



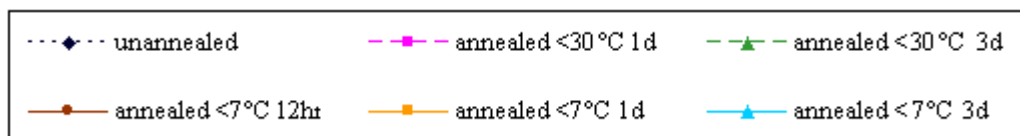
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 4.5 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง(ค) ของแป้งสตาร์ชที่ไม่จากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C

ให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติการเกิดเจลในเซชันสูงขึ้น แป้งสตาร์ชข้าวเจ้ามีคุณสมบัติการเกิดเจลในเซชันสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียว โดยค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อการทำ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C เป็นเวลา 1 วัน ส่วนข้าวเหนียว ค่า T_0 และ T_p สูงขึ้น แต่ค่า T_c ไม่เปลี่ยนแปลง และการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 3 วัน ยังทำให้ค่าคุณสมบัติเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น แต่ความหนืดขณะร้อนและเย็น ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าต่ำลง และยังพบว่า การ annealing ที่สภาวะดังกล่าว ทำให้กำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าต่ำลง

การ annealing แป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าในทุกสภาวะ ยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบ A เหมือนกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยมีปริมาณ relative crystallinity แปรผันตรงกับค่า ΔH ตามสภาวะที่ทำการ annealing โดยที่เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดทั้งในชั้นอนุสัณฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าหลังการ annealing มีค่าสูงขึ้น

4.6 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. (2546). **การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม**. ใน รายงานการวิจัยฉบับ สมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85-112.
- 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. **Carbohydr. Polym.** 36: 277-284.
- Chung, K. M., Moon, T. W., and Chun, J. K. (2000). Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chem.** 77: 567-571.

- Doublier, J. L. (1981). Rheological studies on starch—Flow behavior of wheat starch pastes. **Starch/Starke**.33: 415-420.
- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K., and Delcour, J. A. (1997). Effects of Hydrothermal treatments on the reological properties of potato starch. **Carbohydr. Res.** 297: 347-356.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Noda, T., Tester, R. F. and Yuryev, V. P. (2004). Effect of annealing on the polymorphic structure of starches from sweet Potatoes (Ayamurasaki and Sunnyred cultivars) grown at various soil temperatyres. **Carbohydr. Res.** 339: 1093-1098.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., and Yuryev, V. P. (2004). Annealing of starches from tubers grown at different environmenta temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure : A Review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat Starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J. A. (1995). Influence of Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources. **Cereal Chem.** 72: 480-487.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Rouseu, N., Colonna, P. and Delcour, J. A. (1998). Acid hydrolysis of native and annealed wheat, potato and pea starches-DSC melting features and chain length distributions of lintnerised sarches. **Carbohydr. Res.** 308: 359-371.
- Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H. J., Eerlingen, R. C., Delcour, J. A. and Reynaers,

- H. (1998). Evaluation of the impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches : A differential scanning calorimetry and small angle X-ray scattering study. **Carbohydr. Res.** 306: 1-10.
- Jane, J. L., Xu, A., Radosavljevic, M., and Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. (1993). A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. **Starch/Starke.** 45: 417-420.
- Juliano, B. O. (1984). **Rice starch** : Production, properties and uses. pp. 507-529. In *Starch Chemistry and technology*, 2 nd ed. Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall, E.F. Academic press, Orlando, FL.
- Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Tester, R. F., Wasserman, L. A., Popov. A. A. and Yuryev V. P. (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.
- Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Fornal, J., Blaszcak, W., Jelinski, T. and Yuryev, V. P. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water content. **Starch/Starck.** 43: 227-231.
- Miller, B. S., Derby, R. I. and Trimbo, H. B (1973). A pictorial explanation for the Increase in viscosity of a heated wheat starch water suspension. **Cereal Chem.**

50: 271-280.

NaKazawa, Y. and Wang, Y. J. (2003). Acid hydrolysis of native and anneal starches and branch-structure of their Naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.

Puchongkavarin, H., Varavinit, S. and Bergthaller, W. (2005). Comparative Study of Pilot Scale Rice Starch Production by Alkaline and Enzymatic Process. **Starch/Starke.** 57: 134-144.

Schoch, T. J. and Maywald, E. C. (1968). Preparation and properties of various legume starches. **Cereal Chem.** 45: 564-573.

Seow, C. C and Teo, C. H. (1993). Annealing of Granular Rice Starches Interpretation of the Effect on Phase Transitions Associated with Gelatinization. **Starch/Starck.** 45:345-351.

Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.

Tester, R. F. and Debon, S. J. (2000). Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.

Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V.P, (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.

Tester, R. F. and Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal

- starches. II. Waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.
- Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J. and Delcour. (2003). Rice starches. II. Structure aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38: 53-59.
- Yuryev, V. P., Genkina, N. K. and Wasserman, L. A. (2004). Annealing of starches from potato tubers grown at different environment temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Yuryev, V. P., Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Founal, J., Blaszcak, W. and Jelinski, T. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. (1988). Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. **Cereal Chem.** 65:443-446.

ที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยสังเกตได้ชัดเจนเมื่อทำการทดสอบสมบัติดังกล่าวที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C

4.2 บทนำ

แป้งสตาร์ช (starch) เป็นแป้งที่มีการสกัดเอาโปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่น ๆ ออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสสายยาวที่มีขนาดใหญ่ 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งอัตราส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจะแตกต่างกันตามพันธุ์ของข้าว ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชด้วย โดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของข้าว ทำให้จุดประสงค์ในการนำมาใช้ประโยชน์ต่างกัน (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณาวัดน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546)

การ annealing เป็นการแช่แป้งในน้ำโดยใช้น้ำในปริมาณมาก (มากกว่า 60% โดยน้ำหนัก) หรือใช้น้ำปานกลาง (40-50% โดยน้ำหนัก) ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition (T_g) แต่ต่ำกว่า T_0 ในระยะเวลาหนึ่ง (Jacob and Delcour., 1998) หลังจากผ่านการ annealing แล้ว ชั้นอสัณฐาน (amorphous) ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้น ร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, Debon and Sommerville, 2000; Stute, 1992) ในปี ค.ศ. 2000 Tester และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของ annealing ต่อแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลส 0% และแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดา มีปริมาณ อะมิโลส 33.2% โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้น้ำมากกว่า 96% พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อผ่านการทำ annealing แล้วสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเปรียบเทียบค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวกับพันธุ์ธรรมดาที่ผ่านการ annealing แล้ว พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีค่า T_0 และ T_p สูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่พบว่า T_c ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้สายอะมิโลสและสายอะมิโลเพกตินภายในชั้น อสัณฐานและชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งในแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีปริมาณอะมิโลส ภายในชั้น อสัณฐานมากกว่าในพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ค่า T_0 , T_p ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์

ธรรมดาสูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_c-T_0) แคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยพบว่าช่วง T_c-T_0 ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าพันธุ์ธรรมดา เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียว double helices (ΔH เพิ่มขึ้น) พบว่าค่า ΔH ของแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing และยังพบอีกว่า ΔH ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมดา นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1992 Stute ได้ทำการศึกษาถึงผลของการ annealing แป้งสตรัซมันฝรั่งนาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C พบว่าค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจมีความสมบูรณ์มากขึ้น ในปี ค.ศ. 2003 Nakazawa และ Wang พบว่าการ annealing อาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกติน เพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปย่อยชั้นผลึกได้ง่ายและมากขึ้น แม้ว่าการทำ annealing จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของผลึก ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง XRD พบว่าชนิดของผลึกยังคงเป็นแบบเดิมเหมือนกับ แป้งสตรัซที่ไม่ผ่านการ annealing (Stute, 1992)

Jacob และคณะ (1995) ได้ศึกษาผลของการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดโดยทำการ annealing ในสถานะที่ใช้น้ำ 66.7% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 3-4% องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแป้งสตรัซข้าวสาลี, แป้งสตรัซมันฝรั่ง, แป้งสตรัซถั่วลันเตา และแป้งสตรัซข้าวเจ้า พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว ความหนืดของแป้งสตรัซแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวในชั้นผลึก ความสามารถในการพองตัว (swelling) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ของแป้งสตรัซแต่ละชนิด แต่พบว่าในทุกแป้งสตรัซเมื่อผ่านการ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น เนื่องจากภายในเนื้อเจลนอกจากจะประกอบด้วยอะมิโลสที่เกิดการละลายออกมาแล้ว ยังมีชิ้นส่วนของอะมิโลเพกตินที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการเจลาติไนซ์ กระจายแทรกอยู่ในเนื้อเจล (ghosts remnant) ทำให้ความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น

จากรายงานข้างต้นที่กล่าวมาแล้วว่าหลังการ annealing ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยที่ช่วง T_c-T_0 แคบลง และ ΔH อาจเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลของการ annealing จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือปริมาณน้ำ ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Stute (1992) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา โดยใช้ระยะเวลา 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C ต่อผลของ annealing ในสตรัซมันฝรั่ง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำ annealing ที่นานขึ้นทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างการ annealing อะมิโลสและอะมิโล

เพกตินภายในชั้นออสันฐานและชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัว เพื่อลดความไม่เป็นระเบียบตลอดระยะเวลาในการ annealing จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุดและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกเมื่อระยะเวลาในการ annealing นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ต่อการเกิด annealing ด้วย โดย Nakazawa และ Wang (2003) ได้แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing เป็น 40, 45, 50, 55, 60 และ 65°C โดยใช้ปริมาณน้ำ 75% เป็นเวลา 44 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวโพด, แป้งสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว, แป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชสาเก, แป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Hylon V) และแป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูงมาก (Hylon VII) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงสามารถเหนี่ยวนำให้อะมิโลสในชั้นออสันฐานจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น และการพันเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกมีลักษณะที่เหมาะสม

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการศึกษาคัดแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ annealing มีความสำคัญ จึงทำให้การศึกษาคัดแปรครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคัดแปรที่เกี่ยวข้องกับการ annealing คือ อุณหภูมิ และระยะเวลา ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้า และเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำการ annealing ไปใช้ประโยชน์เพื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพแป้งสตาร์ชข้าวต่อไป

4.3 วัตถุประสงค์และวิธีการ

4.3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียม

ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ซื่อจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี โดยทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จก็นำมาทำการทดลอง annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน

4.3.2 กระบวนการ annealing

นำตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหกลงในขวดโหล ที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนัก เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยใช้ น้ำ 65% แล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 ต่างกัน 2 ระดับ คือที่ต่ำกว่า T_0 7°C (คือที่อุณหภูมิ 52.6 และ 64.5°C ในข้าวเหนียวและข้าวเจ้าตามลำดับ) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และที่ต่ำกว่า T_0 30°C (คือที่อุณหภูมิ 29.6 และ 41.5°C ใน

ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าตามลำดับ) เป็นเวลา 1 และ 3 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง สำหรับข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าและใหม่ ที่ไม่ทำการ annealing นั้นนำมาขัดสีและลดขนาดให้มีขนาดเล็กเท่ากับข้าวที่นำไป annealing จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วแช่ข้าวในน้ำ โดยใช้อัตราส่วนข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 2 ส่วน แช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) แล้วจึงนำข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ไปโม่ด้วยโม่หิน (Aerosia Interpac, ประเทศไทย) โดยใช้อัตราส่วน ข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 3 ส่วน จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด (Retsch, Germany) ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.3.3 การสกัดแป้งสตาร์ช

การสกัดสตาร์ชทำตามวิธีของ Puchongkavarin, Varavinit และ Bergthaller โดยนำตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ที่ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 มาทำการ annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน แล้วโม่เป็นแป้งฟลาวร์ แล้วเก็บไว้ในถุงสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) นาน 6 เดือน ก่อนทำการสกัดแป้งสตาร์ช เมื่อทำการสกัดแป้งสตาร์ชเติมน้ำกลั่นลงไปแป้งฟลาวร์ในอัตราส่วนแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 2 ส่วน แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบส (pH) เป็น 5.0 แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ cellulose ที่มี activity 700 $\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง แล้วกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8% โดยน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติมน้ำกลั่นลงไปอัตราส่วนน้ำกลั่น 2 ส่วน ต่อแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ papain ที่มี activity 0.64 $\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง จากนั้นกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแป้งที่ได้ไปสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนแป้ง 1 ส่วน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 10 ครั้ง แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด

ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

4.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งสตาร์ชข้าว

ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว และข้าวเจ้ามีโปรตีน 0.10% และ 0.45% ตามลำดับ

4.3.5 สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชัน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งสตาร์ชข้าว 10 มิลลิกรัม ลงในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminium pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในสัดส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที จาก 10 ถึง 95°C โดยใช้ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p), อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (T_c-T_o) และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

4.3.6 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2 θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998)

4.3.7 การย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis)

ทดสอบการย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ช ตามวิธีการของ Nakazawa และ Wang (2003) โดยนำแป้งสตาร์ชที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing 5 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 15.3% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงไปใน

ขวดปรับปริมาตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 20 และ 30 วัน และเขย่าด้วยมือเบาๆ ทุกวัน แล้วนำส่วนโสมาวิเคราะห์หา total carbohydrate ตามวิธี phenol-sulfuric acid ตามวิธีการของ Dubois, Gilles, Hamilton, Rrebers และ Smith (1956)

4.3.8 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA -4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งสตาร์ชข้าว 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อนาที แล้วลดลงเป็น 160 รอบต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลาระหว่าง 1-4.45 นาที และรักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้น ลดอุณหภูมิลงมาที่ 50°C ในช่วงเวลาระหว่าง 7.50-11 นาที รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 50°C เป็นเวลา 2 นาที ทำการวัดอุณหภูมิ เริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกคาวน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

4.3.9 การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ของแป้งใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยใช้ตัวอย่างแป้งสตาร์ช 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C พร้อมๆกับการเขย่าในระดับคงที่ ในอัตราที่ไม่เร็วมากเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแป้งแตก เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งสตาร์ชส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

4.3.10 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้งสตาร์ช 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

4.3.11 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ปัจจัย โดยปัจจัยแรกเป็นอุณหภูมิ ซึ่งทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7 และ 30°C ปัจจัยที่สองเป็นระยะเวลา ซึ่งการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7°C มี 3 ระดับ คือ 12 ชั่วโมง 1 และ 3 วัน และการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 30°C มี 2 ระดับ คือ 1 และ 3 วันของข้าวนั้นๆ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) ส่วนการศึกษาสมบัติของแป้งสตาร์ชข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ที่สภาวะต่างๆ ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

4.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.4.1 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน

การ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C แสดงดังตารางที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสซิลลูมและชั้นผลึกได้มาก ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อปรับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างเกลียวของอะมิโลสและของอะมิโลเพกติน ให้มีความเป็น

ระเบียบ เหมาะสม และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้ อุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสูงขึ้น (Jacobs and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester, Debon and Karkalas, 1998; Stute, 1992)

เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้นเป็น 3 วัน ส่งผลให้ค่า T_o , T_p และ T_c เพิ่มขึ้นกว่าในวันแรก ($p < 0.05$) เนื่องจากระหว่างช่วงเวลาในการ annealing อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึก เกิดการจัดเรียงตัวเพื่อลดความไม่เป็นระเบียบลงตามระยะเวลาในการ annealing ที่นานขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด เป็นผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีค่าสูง (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากที่สุด แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นก็ไม่ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นเป็น 7 วัน ก็พบว่าค่า T_o , T_p และ T_c ไม่ต่างจากเมื่อทำการ annealing เป็น 3 วัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Yuryev, Genkina, และ Wasserman, (2004) ที่พบว่า annealing แป้งข้าวสาลีที่ $T_a < T_o$, 55°C ไม่ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c ของการ annealing เป็นเวลา 7 วัน ต่างจากการ annealing เป็นเวลา 10 วัน

จากผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับงานของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าการ annealing ในระยะเวลาในระดับหนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับ T_o โดยใช้ปริมาณมากกว่า 60% ถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing ที่มีผลทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้ง จัดเรียงตัวให้เกิดความเป็นระเบียบ ส่งผลให้ ค่า T_o , T_p และ T_c สูงขึ้น

ค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งสตรัสข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียว โดยค่าดังกล่าวของข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$, 30°C เป็นเวลา 1 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งสตรัสข้าวเหนียว ซึ่งค่า T_o และ T_p ของข้าวเหนียว สูงขึ้นเมื่อการทำ annealing ที่ $T_a < T_o$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน ($P < 0.05$) โดยที่ค่า T_c ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ($P > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากในข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสในชั้นออสติฐานมากกว่าในข้าวเหนียว (Juliano, 1984) ซึ่งอะมิโลสอาจเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกในระหว่างที่ข้าวเจ้าเจริญเติบโต และเมื่อผ่านการ annealing แล้วอะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับออกมาอยู่ในชั้นออสติฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ให้ความเป็นระเบียบและมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ชั้นออสติฐานของข้าวเจ้าอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 2000) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อการทำเม็ดแป้งของแป้งสตรัสข้าวเจ้าเกิดการเจลาติไนเซชัน จึงทำให้ค่า T_o ของข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าของข้าวเหนียว

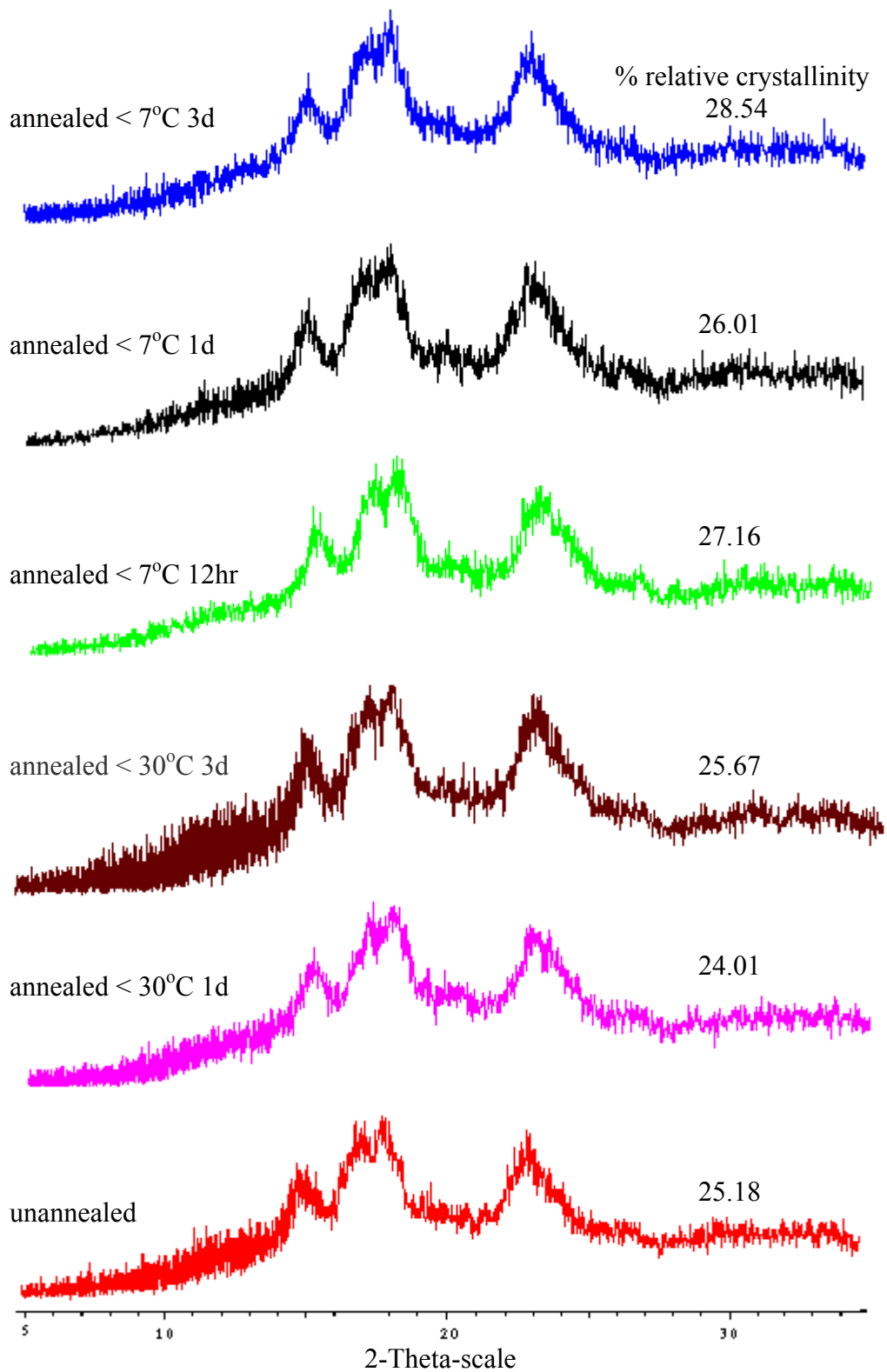
ตารางที่ 4.1 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าว
เหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 4.2 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดผลึกไนเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

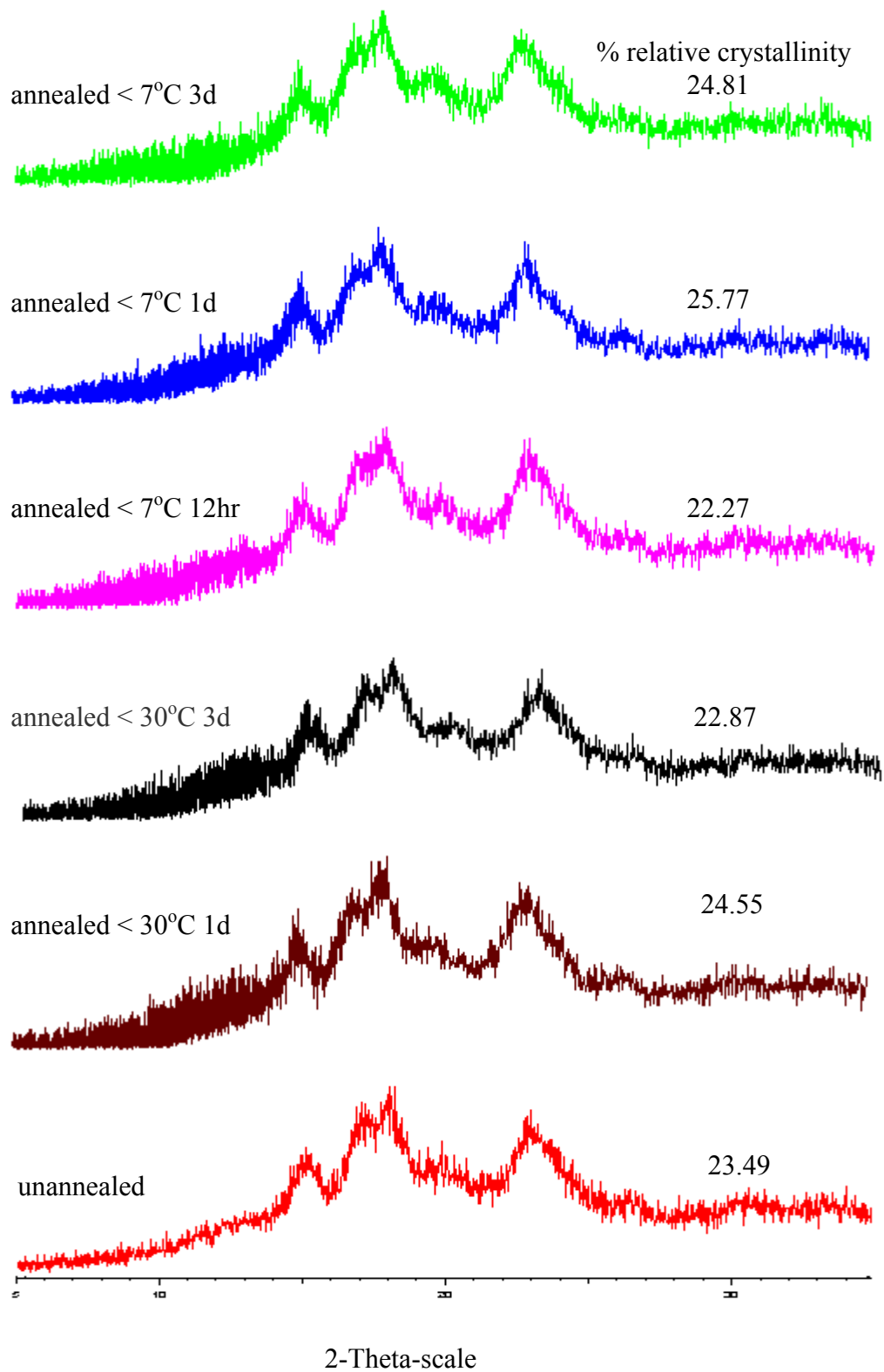
ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เนื่องจากระหว่างระยะเวลาในการ annealing ชั้นนอกสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้ความหนาของชั้นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genkina, Lyubov, Wasserman และ Yuryev (2004) ที่พบว่าในช่วงแรกของการ annealing ชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น จึงมีการปรับตัวเพื่อให้พลังงานที่มีอยู่ภายในชั้นผลึกเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกลดลง ส่งผลให้ค่า ΔH ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน ($T_c - T_0$) ของข้าวเหนียวแคบลง เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 3 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่พบความเปลี่ยนแปลงของช่วง $T_c - T_0$ ในแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ annealing โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะมิโลเพกตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในข้าวเหนียวจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้เม็ดแป้งมีความ homogeneous เพิ่มมากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yuryev (2004)

4.4.2 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

แป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการ annealing ในทุกสภาวะ พบพืดปรากฏที่มุม 15°, 17°, 18° และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A (Buleon, Colonna, Planchot and Ball, 1998) และพบว่าพืดที่ปรากฏนี้ ไม่ต่างจากพืดที่ปรากฏในแป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการ annealing แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ annealing ไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Stute (1992) ที่ทำการ annealing แป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 52°C เป็นเวลา 14 และ 95 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้วโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชมันฝรั่งยังคงเป็นแบบ B เหมือนกับที่พบในแป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ relative crystallinity แปรผันตรงกับค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH) โดยเมื่อปริมาณ relative crystallinity เพิ่มขึ้นค่า ΔH ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อปริมาณ relative crystallinity ลดลงค่า ΔH ก็ลดลง ตามสภาวะที่ทำการ annealing แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด



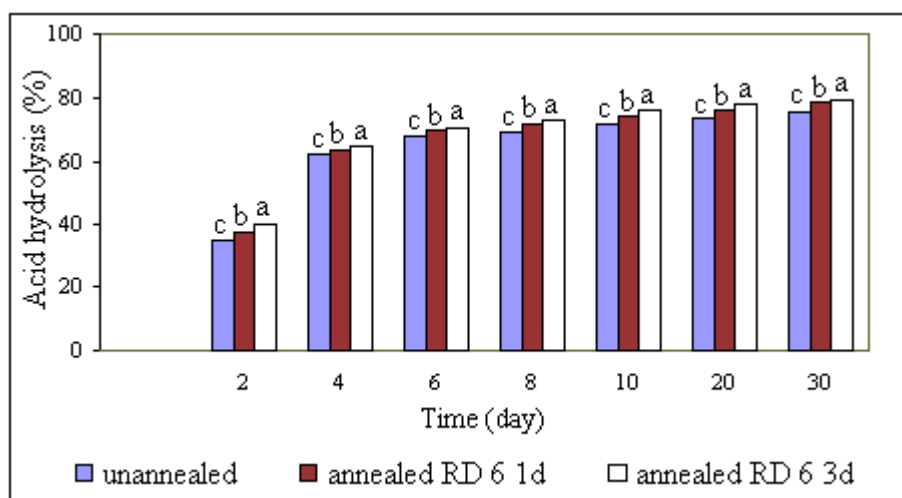
ภาพที่ 4.1 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C



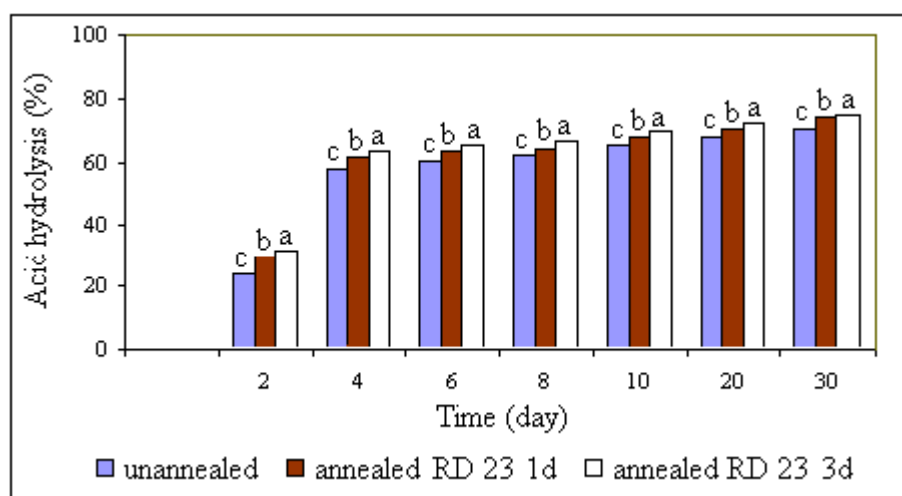
ภาพที่ 4.2 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C

4.4.3 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด

การย่อยด้วยกรดของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 1 และ 3 วัน แสดงดังภาพที่ 4.3 ก และ ข ตามลำดับ ซึ่งสภาวะดังกล่าวเกิดผลของการ annealing ที่มากและค่อนข้างคงที่แล้ว การศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้งด้วยการย่อยด้วยกรดแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 8 วันแรกเป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นอัสติฐาน และในช่วงที่ 2 เป็นการย่อยในชั้นเปลือกซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 10-30 ของการย่อยด้วยกรด (Nakazawa and Wang, 2003) จากผลการทดลองพบว่าในช่วง 8 วันแรกแป้งสตราซ์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing แล้วมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าการ annealing เพียง 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและเด็คซ์ตรินสายสั้นที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นเปลือกถูกขับให้ออก มาอยู่ในชั้นอัสติฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้ชั้นอัสติฐานอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 1998; Genkina, Wasserman, Noda, Tester and Yuryev, 2004; Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Propov and Yuryev, 2004; Kiseleva, Krivandin, Fornal; Blaszcak, Jelinski and Yuryev, 2005) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอัสติฐานของแป้งสตราซ์ที่ผ่านการ annealing เป็นระยะเวลานานมีค่าสูงกว่าที่ผ่านการ annealing ในระยะเวลาสั้นและที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าแป้งสตราซ์ข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing แล้วทำให้ชั้นอัสติฐานมีระเบียบมากขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอัสติฐานของแป้งสตราซ์ข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่หลังจาก 8 วันแล้ว เป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นเปลือก โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดของแป้งสตราซ์ข้าวทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการ annealing แล้วมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลานานทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในชั้นเปลือกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นเปลือก ซึ่งจะทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นเปลือกได้ง่ายและเกิดการย่อยได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Nakazawa และ Wang (2003) ที่รายงานว่า การ annealing ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นเปลือกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นเปลือกได้ง่ายและย่อยได้มากขึ้น



(ก)



(ข)

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 4.3 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ก) และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 (ข) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0 + 7^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 และ 3 วัน

4.4.4 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ RVA (Rapid visco analyzer) ของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) แต่อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวนาให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ เพื่อลดความไม่ระเบียบภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกได้มากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ (Tester et al., 1998; Tester et al., 2000). จึงทำให้เม็ดแป้งสาลีของข้าวที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูงมีความแข็งแรงมากกว่าเม็ดแป้งที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดการพองตัว เป็นผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีค่าสูงกว่าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ

ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน มีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าต่ำลง หลังจากผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว อาจมีเด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย เด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสเหล่านี้จึงรวมตัวกันได้ง่าย (aggregate) ส่งผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าเบรกดาวน์ (breakdown) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อน ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค (setback) ซึ่งเป็นความหนืดระหว่างช่วงที่เย็นของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าสูงขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาการ annealing เนื่องจากในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing มีการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึก ระหว่างอะมิโลสในชั้นอสัณฐาน และระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน จนมีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง (Genkina, Lyubov, Wasserman and Yuryev, 2004; Tester et al., 1998) จึงทำให้ความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแตกต่างกันตามระยะเวลาในการ annealing

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็น ของแป้งสาลี
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็น ของแป้งสตาร์ช
ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

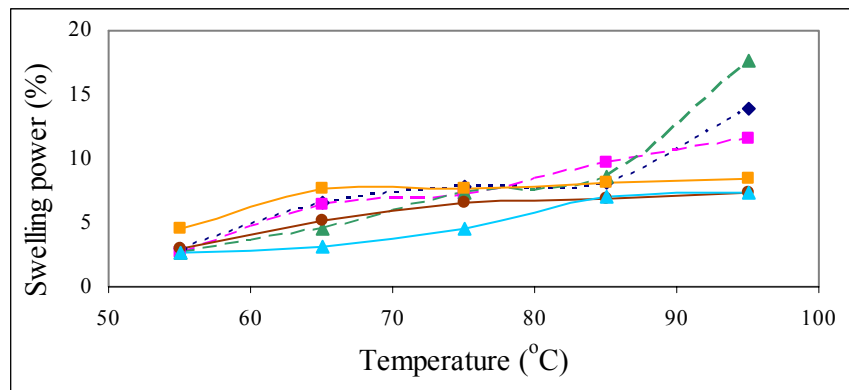
4.4.5 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งสสารข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing แสดงดังภาพที่ 4.4-4.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวของแป้งสสารข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการ annealing สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C ($p < 0.05$) เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ $T_a < T_0$, 30°C ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยพบว่าการ annealing ข้าวเหนียวเป็นเวลา 1 วันมีค่าการละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งสูงกว่า 3 วัน ($p < 0.05$) แต่กำลังการพองตัวเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีค่าสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) ส่วนกำลังการพองตัว การละลายของข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 1 วัน มีค่าสูงกว่า 3 วัน ($p < 0.05$) แต่ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีค่าสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้เม็ดแป้งมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

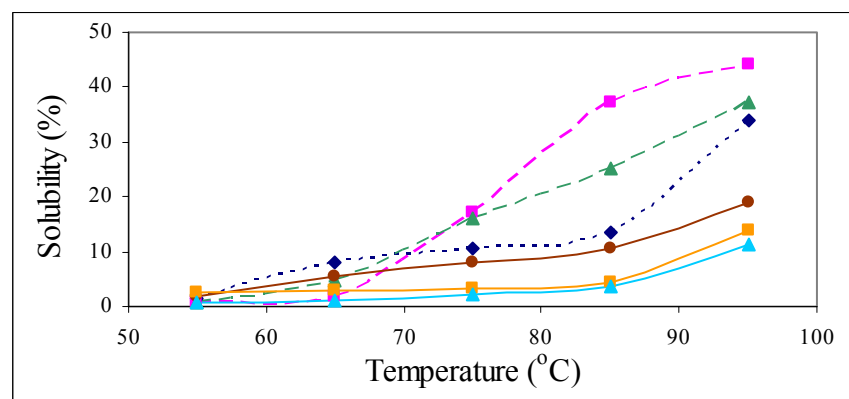
เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C จะทำให้ค่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าลดลง (ภาพที่ 4.4 และ 4.5) เมื่อเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเวลาที่ใช้ในการ annealing นานขึ้น เป็น 3 วัน พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งต่ำลงกว่าใน 12 ชั่วโมงแรกของการ annealing ($p < 0.05$) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และสมบูรณ์มากขึ้นภายในเม็ดแป้ง ส่งผลให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ทนความร้อนได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดแป้งได้ยาก ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ยาก มีปริมาณการละลายและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งต่ำลง (Tester et al., 1998; Chung, Moon and Chun, 2000) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ และการลดลงของความหนืดขณะร้อนและเย็น เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C

4.5 สรุปผลการทดลอง

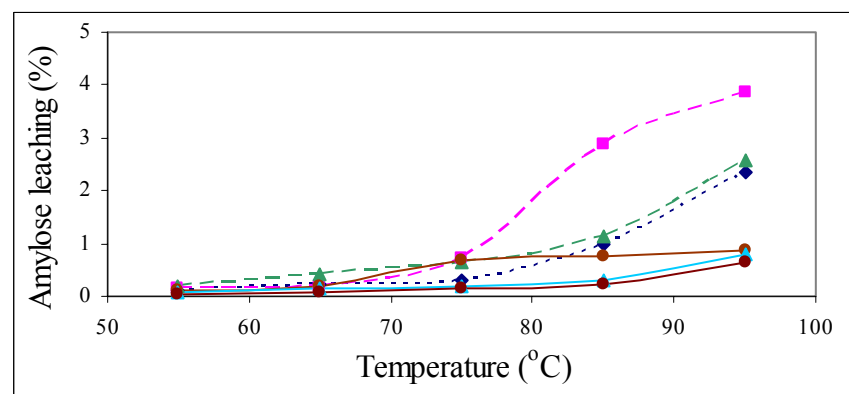
การ annealing ที่อุณหภูมิสูงจนเกือบถึงอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_0) ในระยะเวลาอันยาวนานระดับหนึ่ง โดยใช้น้ำปริมาณมาก เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing เพื่อให้มีการปรับเปลี่ยนและจัดเรียงตัวของอะมิโลสในชั้นออสซิลลูมให้อยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น และอะมิโลเพกตินในชั้นเปลือกเกิดการพันเกลียวคู่กันที่เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้น ส่งผล



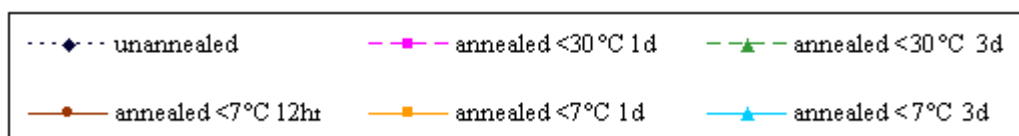
(ก)



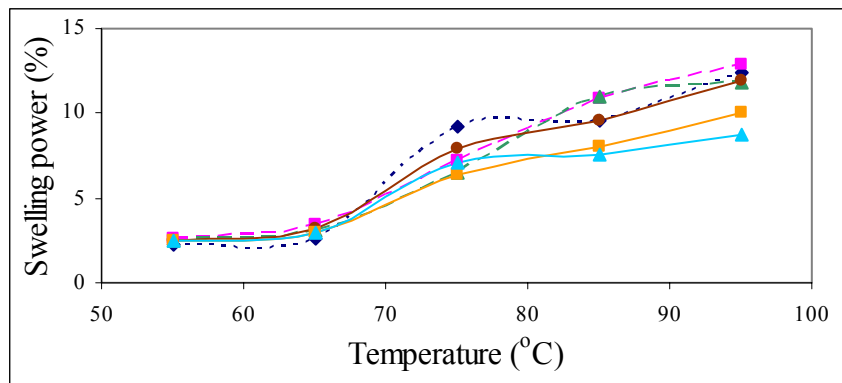
(ข)



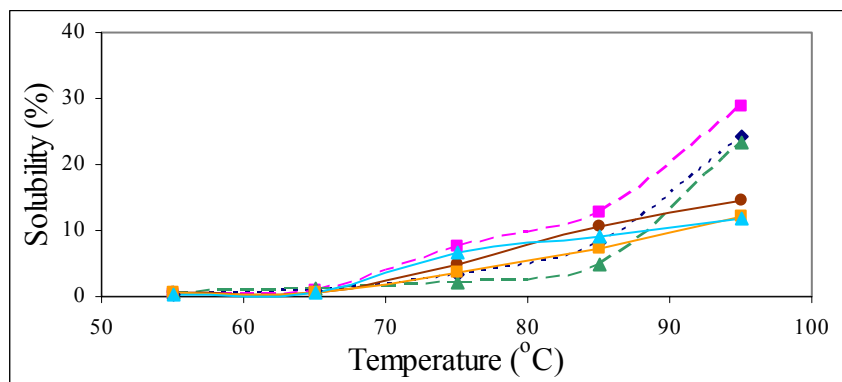
(ค)



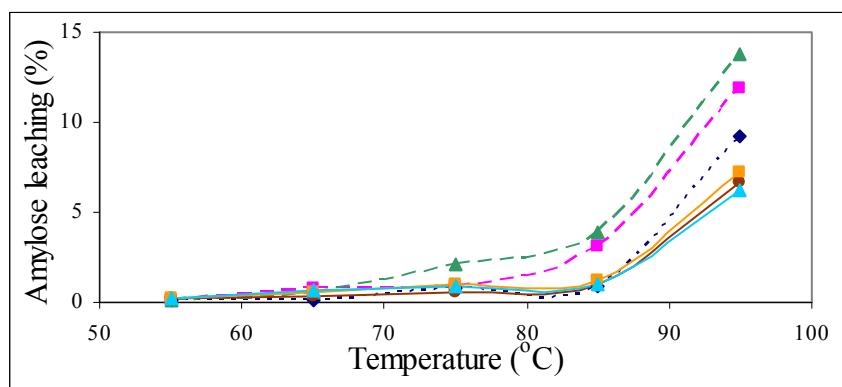
ภาพที่ 4.4 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C



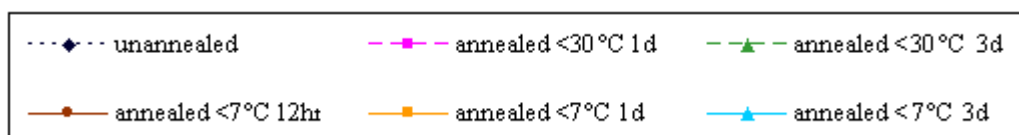
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 4.5 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง(ค) ของแป้งสตาร์ชที่ไม่จากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_o$ 30 และ 7°C

ให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้คุณสมบัติการเกิดเจลในเซชันสูงขึ้น แป้งสตาร์ชข้าวเจ้ามีคุณสมบัติการเกิดเจลในเซชันสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียว โดยค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อการทำ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C เป็นเวลา 1 วัน ส่วนข้าวเหนียว ค่า T_0 และ T_p สูงขึ้น แต่ค่า T_c ไม่เปลี่ยนแปลง และการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 3 วัน ยังทำให้ค่าคุณสมบัติเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น แต่ความหนืดขณะร้อนและเย็น ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าต่ำลง และยังพบว่า การ annealing ที่สภาวะดังกล่าว ทำให้กำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าต่ำลง

การ annealing แป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าในทุกสภาวะ ยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบ A เหมือนกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยมีปริมาณ relative crystallinity แปรผันตรงกับค่า ΔH ตามสภาวะที่ทำการ annealing โดยที่เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดทั้งในชั้นอนุสัณฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าหลังการ annealing มีค่าสูงขึ้น

4.6 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. (2546). **การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม**. ใน รายงานการวิจัยฉบับ สมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23: 85-112.
- 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. **Carbohydr. Polym.** 36: 277-284.
- Chung, K. M., Moon, T. W., and Chun, J. K. (2000). Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chem.** 77: 567-571.

- Doublier, J. L. (1981). Rheological studies on starch—Flow behavior of wheat starch pastes. **Starch/Starke**.33: 415-420.
- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K., and Delcour, J. A. (1997). Effects of Hydrothermal treatments on the reological properties of potato starch. **Carbohydr. Res.** 297: 347-356.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Noda, T., Tester, R. F. and Yuryev, V. P. (2004). Effect of annealing on the polymorphic structure of starches from sweet Potatoes (Ayamurasaki and Sunnyred cultivars) grown at various soil temperatyres. **Carbohydr. Res.** 339: 1093-1098.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., and Yuryev, V. P. (2004). Annealing of starches from tubers grown at different environmenta temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure : A Review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat Starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J. A. (1995). Influence of Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources. **Cereal Chem.** 72: 480-487.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Rouseu, N., Colonna, P. and Delcour, J. A. (1998). Acid hydrolysis of native and annealed wheat, potato and pea starches-DSC melting features and chain length distributions of lintnerised sarches. **Carbohydr. Res.** 308: 359-371.
- Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H. J., Eerlingen, R. C., Delcour, J. A. and Reynaers,

- H. (1998). Evaluation of the impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches : A differential scanning calorimetry and small angle X-ray scattering study. **Carbohydr. Res.** 306: 1-10.
- Jane, J. L., Xu, A., Radosavljevic, M., and Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. (1993). A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. **Starch/Starke.** 45: 417-420.
- Juliano, B. O. (1984). **Rice starch** : Production, properties and uses. pp. 507-529. In *Starch Chemistry and technology*, 2 nd ed. Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall, E.F. Academic press, Orlando, FL.
- Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Tester, R. F., Wasserman, L. A., Popov. A. A. and Yuryev V. P. (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.
- Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Fornal, J., Blaszcak, W., Jelinski, T. and Yuryev, V. P. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water content. **Starch/Starck.** 43: 227-231.
- Miller, B. S., Derby, R. I. and Trimbo, H. B (1973). A pictorial explanation for the Increase in viscosity of a heated wheat starch water suspension. **Cereal Chem.**

50: 271-280.

NaKazawa, Y. and Wang, Y. J. (2003). Acid hydrolysis of native and anneal starches and branch-structure of their Naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.

Puchongkavarin, H., Varavinit, S. and Bergthaller, W. (2005). Comparative Study of Pilot Scale Rice Starch Production by Alkaline and Enzymatic Process. **Starch/Starke.** 57: 134-144.

Schoch, T. J. and Maywald, E. C. (1968). Preparation and properties of various legume starches. **Cereal Chem.** 45: 564-573.

Seow, C. C and Teo, C. H. (1993). Annealing of Granular Rice Starches Interpretation of the Effect on Phase Transitions Associated with Gelatinization. **Starch/Starck.** 45:345-351.

Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.

Tester, R. F. and Debon, S. J. (2000). Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.

Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V.P, (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.

Tester, R. F. and Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal

- starches. II. Waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.
- Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J. and Delcour. (2003). Rice starches. II. Structure aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38: 53-59.
- Yuryev, V. P., Genkina, N. K. and Wasserman, L. A. (2004). Annealing of starches from potato tubers grown at different environment temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Yuryev, V. P., Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Founal, J., Blaszcak, W. and Jelinski, T. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. (1988). Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. **Cereal Chem.** 65:443-446.

ตารางที่ 4.1 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	63.52±1.54bc	70.18±2.27bc	77.79± 1.06a	14.27±2.20a	10.07±0.54b
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30 °C ในน้ำ 65%					
1 วัน	62.17±0.06c	67.78±0.12d	73.77±0.88d	11.60±0.81ab	8.23±0.27c
3 วัน	64.16±0.73b	69.27±1.88 c	75.02±3.57c	10.86±3.45ab	11.66±1.10a
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	64.86±0.01b	69.18±0.01c	75.12±0.54c	10.26±0.59ab	10.77±0.70ab
1 วัน	65.09±0.02b	70.34±0.70b	76.65±1.58b	11.56 ±0.91ab	10.64±0.07ab
3 วัน	67.33± 0.02a	71.64±0.23a	77.01±0.40ab	9.68± 0.41b	11.26±1.07a

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.2 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านแลไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ไม่ผ่านการ annealing	72.90±1.29e	76.83±0.72e	82.11±0.77b	9.20±0.52ab	9.98±0.67bcd
สภาวะที่ใช้ในการ annealing					
$T_a < T_o$ 30 °C ในน้ำ 65%					
1 วัน	73.61±0.62d	77.47±0.09d	84.11±0.80a	10.49±1.42a	10.33±0.03bc
3 วัน	74.56±0.01c	78.10±0.01c	83.18±0.01ab	8.61±0.01bc	9.82±0.01cd
$T_a < T_o$ 7°C ในน้ำ 65%					
12 ชั่วโมง	75.91±0.16b	79.46±0.34b	83.25±0.12ab	7.33±0.04c	8.79±0.75d
1 วัน	75.93±0.47b	79.86±0.35b	83.66±0.38a	7.73±0.08bc	12.22±0.65a
3 วัน	76.51±0.60a	80.11±0.49a	84.21±0.42a	7.70±0.19bc	11.32±0.34ab

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	210.46±4.12b	73.87±3.12b	136.58±1.06a	86.66±2.00c	12.79±1.12b	70.30±0.03c
สภาวะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	175.87±3.33d	110.91±2.10a	64.95±2.06d	125.95±3.08a	15.04±1.76a	71.10±0.59bc
3 วัน	235.66±2.64a	122.25±1.44a	113.43±2.08c	131.70±1.23a	9.48±1.63c	71.02±0.52c
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	167.75±1.17d	58.25±0.58cd	109.50±4.37c	68.87±1.47cd	10.62±1.52c	72.32±0.55ab
1 วัน	195.50±0.12bc	68.71± 0.71bc	126.79±0.59b	77.62±1.36bc	8.92±2.06c	72.67±0.01a
3 วัน	179.91±4.34cd	54.25±4.10d	125.66±2.72b	62.83±1.98d	10.08±2.19c	73.60±0.52a

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing	157.33±0.59ab	136.96±0.11b	20.37±0.47b	169.21±1.41ab	32.25±1.29bc	82.02±0.07b
สภาวะที่ใช้ในการ annealing						
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%						
1 วัน	156.21±1.82ab	146.58±1.24a	9.62±0.59c	166.62±2.59b	20.04±1.36d	82.00±0.03b
3 วัน	158.50±1.82ab	136.91±3.59b	21.58±1.77b	177.71±3.06a	40.79±0.53ab	82.00±0.03b
T _a <T _o 7°C ในน้ำ 65%						
12 ชั่วโมง	159.12±3.43a	112.96±1.12c	46.17±2.38a	151.75±3.48c	38.79±3.50ab	77.87±0.61c
1 วัน	149.12±4.02b	136.12± 4.13b	13.00±0.45c	161.79±2.61b	25.66±1.54cd	84.05±0.39a
3 วัน	134.00±4.02c	106.50±0.16c	27.50±2.59b	151.29±2.47c	44.79±4.63a	84.85±0.07a

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

บทที่ 5

การ annealing ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูง ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

ANNEALING OF WAXY, LOW AMYLOSE AND HIGH AMYLOSE RICE ON STRUCTURAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

5.1 บทคัดย่อ

การ annealing ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_0) 7 องศาเซลเซียส ($T_a < T_0$, 7°C) เป็นเวลา 3 วัน โดยแช่ข้าวหักในน้ำ 65% พบว่าแป้งสตาร์ชที่ผ่านการ annealing แล้วยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบ A เหมือนกับที่ไม่ผ่านการ annealing จากการตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลลาติไนเซชันด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC) พบว่าการ annealing มีผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น ($P < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เมื่อผ่านการ annealing แล้วมีการเพิ่มขึ้นของค่า T_0 (ΔT_0) สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดทั้งในชั้นนอกลูกฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์ หลังการ annealing มีค่าสูงขึ้น

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าการ annealing ทำให้แป้งฟลาวร์ข้าวเก่าและแป้งสตาร์ชของข้าวทุกพันธุ์มีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์สูงขึ้น แต่ค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นลดลง และพบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดจากผลการ annealing ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่แตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing ซึ่งค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของข้าวแต่ละพันธุ์มีระดับการเพิ่มขึ้นและลดลงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว

กำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า แป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ และแป้งสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์ ที่ผ่านการ annealing แล้วมีค่าต่ำลง แต่การละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 หลังการ annealing แล้วมีค่าสูงขึ้น โดยที่กำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของข้าวแต่ละพันธุ์มีระดับการลดลงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ความเก่า-ใหม่ของข้าว และผลการเตรียมแป้งสตาร์ช

5.2 บทนำ

การ annealing เป็นการแช่แข็งในน้ำโดยใช้ น้ำในปริมาณมาก (>60% โดยน้ำหนัก) หรือใช้น้ำปานกลาง (40-50% โดยน้ำหนัก) ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition (T_g) แต่ต่ำกว่า T_0 ในระยะเวลาหนึ่ง (Jacob and Delcour., 1998) หลังจากผ่านการ annealing แล้ว อะมิโลสในชั้นอสัณฐาน (amorphous) จัดเรียงตัวกันใหม่ให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินให้เหมาะสมมากขึ้น ซึ่งแปลผลมาจากค่า ΔH ที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวแบบคู่ ซึ่งตีความมาจากค่า ΔH ที่เพิ่มขึ้น (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, Debon and Sommerville, 2000; Stute, 1992) ในปี ค.ศ. 2000 Tester และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของ annealing ต่อแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลส 0% และแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ธรรมดา มีปริมาณอะมิโลส 33.2% โดยทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในน้ำมากกว่า 96% พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเปรียบเทียบค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่ผ่านการ annealing แล้ว พบว่าแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีค่า T_0 และ T_p สูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่ค่า T_c ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งในแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีปริมาณอะมิโลสภายในชั้นอสัณฐานมากกว่าในพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ T_0 , T_p แป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ธรรมดาสูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตรัซข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_0$) แคบลง โดยพบว่าช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าพันธุ์ธรรมดา เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียว double helices (ΔH เพิ่มขึ้น) พบว่า ΔH ของแป้งสตรัซข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมดาและที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1992 Stute ได้ทำการศึกษาถึงผลของการ annealing แป้งสตรัซมันฝรั่งนาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C พบว่าค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจมีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่ทั้งนี้ Nakazawa และ Wang (2003) พบว่าการ annealing อาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปย่อยชั้นผลึกได้ง่ายและมากขึ้น แม้ว่าการทำ annealing จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยน

แปลงทั้งในชั้นออสันฐานและชั้นผลึก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของผลึก ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าชนิดของผลึกยังคงเป็นแบบเดิมที่เหมือนกับ แป้งสตาร์ชที่ไม่ผ่านการ annealing (Stute, 1992)

Jacob และคณะ (1995) ได้ศึกษาผลของการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดโดยทำการ annealing ในสถานะที่ใช้ น้ำ 66.7% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 3-4% องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชถั่วลิสง และ แป้งสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว ความหนืดของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวในชั้นผลึก ความสามารถในการพองตัว (swelling) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด แต่พบว่าในทุกแป้งสตาร์ชเมื่อผ่านการ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น เนื่องจากภายในเนื้อเจลนอกจากจะประกอบด้วยอะมิโลสที่เกิดการละลายออกมาแล้ว ยังมีชิ้นส่วนของอะมิโลเพกตินที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการเจลาติไนซ์กระจายแทรกอยู่ภายในเนื้อเจล (ghosts remnant) ทำให้ความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการ annealing มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งฟลาวาร์และแป้งสตาร์ชของพืชแต่ละพันธุ์ต่างกัน จึงทำให้การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเข้าใจผลของการ annealing ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของแป้ง ฟลาวาร์ และแป้งสตาร์ชของข้าวต่างพันธุ์กัน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพแป้งข้าวต่อไป

5.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

5.3.1 วัตถุดิบวัตถุดิบและการเตรียม

ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 ซึ่งได้จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี ข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่ใช้ในการทดลองนี้ทำการเก็บเกี่ยวต่างปีกัน โดยข้าวเหนียวเก่าและข้าวเจ้าเก่า ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2548 และเก็บในกระสอบป่านที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) เป็นเวลา 1 ปี 1 เดือนก่อนนำมาทำการ annealing ส่วนข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จก็นำมาทำการ annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน

5.3.2 กระบวนการ annealing

นำตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหักลงในขวดโหล ที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนัก เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยใช้ปริมาณน้ำ 65% แล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่ต่ำกว่า $T_0 + 7^{\circ}\text{C}$ (คือที่อุณหภูมิ 55 และ 52.6°C ในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เก้าและใหม่ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 55.2 และ 54°C ในข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 เก้าและใหม่ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 54.5 และ 53.5°C ในข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90 เก้าและใหม่ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 65.5 และ 64.5°C ในข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เก้าและใหม่ตามลำดับ) เป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง สำหรับข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก้าและใหม่ที่ไม่ทำการ annealing นั้นนำมาขัดสีแล้วและลดขนาดให้มีขนาดเล็กเท่ากับข้าวที่นำไป annealing จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วแช่ข้าวในน้ำ โดยใช้อัตราส่วนข้าว 1 ส่วน ต่อ น้ำ 2 ส่วน แช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ($25-27^{\circ}\text{C}$) แล้วจึงนำข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ไปโม่ด้วยโม่หิน (Aerosia Interpac, ประเทศไทย) โดยใช้อัตราส่วน ข้าว 1 ส่วน ต่อ น้ำ 3 ส่วน จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาด (Retsch, Germany) ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

5.3.3 การสกัดแป้งสตาร์ช

นำตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 ที่ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 มาทำการ annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน แล้วโม่เป็นแป้งฟลาวร์ แล้วเก็บไว้ในถุงสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง ($25-27^{\circ}\text{C}$) นาน 6 เดือน ก่อนทำการสกัดแป้งสตาร์ช เมื่อทำการสกัดแป้งสตาร์ชเติมน้ำกลั่นลงไปแป้งฟลาวร์ในอัตราส่วนแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 2 ส่วน แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบส (pH) เป็น 5.0 แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ cellulase ที่มี activity $700\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง แล้วกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8% โดยน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนในสออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R,

Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติมน้ำกลั่นลงไปให้อัตราส่วน น้ำกลั่น 2 ส่วน ต่อแป้งฟลาวัวร์ 1 ส่วน แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ papain ที่มี activity 0.64 $\mu\text{U/g}$ ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งสตาร์ชแห้ง จากนั้นกวนตลอด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแป้งที่ได้ไปสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนแป้ง 1 ส่วน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ส่วนโดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง (25-27°C) เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 10 ครั้ง แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

5.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชข้าว

ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่เป็นข้าวเก่าและใหม่ มีโปรตีน 5.67 และ 4.32%ตามลำดับ แป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก่าและใหม่ มีโปรตีน 6.49 และ 4.83%ตามลำดับ แป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เก่าและใหม่ มีโปรตีน 7.27 และ 6.08%ตามลำดับ และแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เก่าและใหม่ มีโปรตีน 6.82 และ 5.34% ตามลำดับ แป้งสตาร์ชข้าวเหนียวข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีโปรตีน 0.10, 0.28, 0.32 และ 0.45%ตามลำดับ ส่วนปริมาณไขมัน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เก่าและใหม่ มีไขมัน 0.43 และ 0.69%ตามลำดับ แป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก่าและใหม่ มีไขมัน 0.15 และ 0.16%ตามลำดับ แป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เก่าและใหม่ มีไขมัน 0.15 และ 0.22%ตามลำดับ และแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เก่าและใหม่ มีไขมัน 0.25 และ 0.56%ตามลำดับ

5.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ปริมาณอะมิโลสใช้วิธีการวัดสี (colorimetric assay) ตามวิธีการของ Juliano (1971) ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectro uv, Biochrom, Libra S22, England) โดยใช้อะมิโลสบริสุทธิ์เป็นแป้งสตาร์ชมันฝรั่งบริสุทธิ์ ประเภท 3 (type III) ในการสร้างกราฟมาตรฐาน พบว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เก่าและใหม่มีอะมิ

โลส 5.95 และ 4.11%ตามลำดับ แป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก่า และใหม่ มีอะมิโลส 14.53 และ 9.68%ตามลำดับ แป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90 เก่าและใหม่ มีอะมิโลส 28.94 และ 24.41%ตามลำดับ และแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เก่าและใหม่ มีอะมิโลส 27.07 และ 22.26% ตามลำดับ

5.3.6 สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชัน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งข้าว 10 มิลลิกรัม ลงในภาชนะ อะลูมิเนียม (aluminium pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในสัดส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันด้วย DSC โดยใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที จาก 10 ถึง 95°C โดยใช้ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p), อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วง อุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_0$) และค่าพลังงานเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

5.3.7 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2 θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 ต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998)

5.3.8 การย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis)

ทดสอบการย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ช ตามวิธีการของ Nakazawa และ Wang (2003) โดยนำแป้งสตาร์ชที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing 5 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 15.3% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงไปในขวด ปรับปริมาตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 20 และ 30 วัน และเขย่าด้วยมือเบาๆ ทุกวัน แล้วนำส่วนใสมาวิเคราะห์หา total carbohydrate ตามวิธี phenol-sulfuric acid ตามวิธีการของ Dubois, Gilles, Hamilton, Rrebers และ Smith (1956)

5.3.9 สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA -4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งข้าว 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อนาที แล้วลดลงเป็น 160 ต่อนาที ตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลาระหว่าง 1-4.45 นาที และรักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้น ลดอุณหภูมิลงมาที่ 50°C ในช่วงเวลา ระหว่าง 7.50-11 นาที รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 50°C เป็นเวลา 2 นาที ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรคดาวน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

5.3.10 การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยใช้ตัวอย่าง แป้ง 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอด ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C พร้อมๆกับการเขย่าในระดับคงที่ ในอัตราที่ไม่เร็วมากเพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดแป้งแตก เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

5.3.11 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้ง 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

5.3.12 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการ annealing ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว ทั้ง 4 พันธุ์ ทำการทดลอง 2 ครั้ง โดยใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

5.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

5.4.1 ผลของ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน

การ annealing ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้า ที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ และแป้งสตาร์ชข้าวทั้ง 4 พันธุ์ดังกล่าว สูงขึ้น ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 5.1-5.3

เมื่อพิจารณาระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน หลังจากผ่านการ annealing (ΔT_0) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว ที่เป็นข้าวเก่า (ตารางที่ 5.1) ซึ่งข้าวทั้ง 3 พันธุ์นี้มีปริมาณกึ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 6-12 ในชั้นผลึกใกล้เคียงกัน โดยข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีปริมาณ 32.19% ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวมี 32.86% และ 31.60% ตามลำดับ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลา นูวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546) พบว่าค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่า ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ดังกล่าวมีปริมาณอะมิโลสต่างกัน โดยข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีปริมาณอะมิโลสสูงที่สุดคือ 28.94% ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอก

ตารางที่ 5.1 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าพันธุ์ต่างๆ
4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

มะลิ 105 และข้าวเหนียว มีปริมาณอะมิโลส 14.53% และ 5.95% ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อผ่านการ annealing แล้วทำให้อะมิโลสในชั้นออสถฐานของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีความเป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสถานะ glassy มากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อให้ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน ทำให้ค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ข้างต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tester และคณะ (2000) พบว่าการ annealing ทำให้แป้งสตราซ์ข้าวโพดพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลส 33.2% มีค่า ΔT_0 และ ΔT_p เพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะมิโลส 0% แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลสในชั้นออสถฐานของแป้งสตราซ์ข้าวโพดพันธุ์ธรรมดาอยู่ในสถานะ glassy มากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ ΔT_0 , ΔT_p แป้งสตราซ์ข้าวโพดพันธุ์ธรรมดาเพิ่มขึ้นสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว

แป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีค่า ΔT_0 ต่ำกว่าข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เล็กน้อย (ตารางที่ 5.1) ซึ่งข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้เป็นข้าวที่มีอะมิโลสสูงใกล้เคียงกัน โดยที่ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีอะมิโลส 27.07% ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มี 28.94% เมื่อผ่านการ annealing แล้วทำให้อะมิโลสในชั้นออสถฐานของข้าวเจ้าทั้ง 2 พันธุ์นี้อยู่ในสถานะ glassy ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่า ΔT_0 ของข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีค่าต่ำกว่าข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลต่างของค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชันที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing (ΔH) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียว ที่เป็นข้าวเก่า (ตารางที่ 5.1) พบว่าค่า ΔH ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ไม่เปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) เนื่องจากเมื่อผ่านการ annealing แล้ว อาจทำให้อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 พันเกลียวคู่ได้เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นผลึกไม่เปลี่ยนแปลง จึงทำให้ค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lasson และ Eliasson (1991) และ Stute (1992) ที่พบว่าค่า ΔH ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจสมบูรณ์มากขึ้น แต่พบว่าค่า ΔH แป้งฟลาวร์ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) โดยที่ระดับการเพิ่มขึ้นของค่า ΔH ของข้าวเหนียว สูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณอะมิโลสในชั้นออสถฐานไม่มาก อาจทำให้เสียน้ำออกจากเม็ดข้าวได้มากในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 1 ปี ทำให้อะมิโลเพกตินภายในโครงสร้างชั้นผลึกพันเกลียวกันแน่นมากขึ้น ความหนาของชั้นผลึกจึงลดลง ซึ่งข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จึงทำให้เสียน้ำออกจากเม็ดข้าวได้มากกว่า ทำให้อะมิโลเพกตินภายในโครงสร้างชั้นผลึกของข้าวเหนียวพันเกลียวกันแน่นมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทำให้ความหนาของชั้นผลึกของข้าวเหนียวลดลงมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ส่งผลให้ค่า ΔH ของข้าวเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อทำการ

annealing แล้ว ข้าวเหนียวจึงสามารถดูดน้ำกลับเข้าไปในชั้นผลึกทำให้เกิดยวู่ฟองตัวขึ้นและพันเกลียวคู่เหมาะสมมากขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับการเพิ่มขึ้นของ ΔH ของชั้นผลึกของข้าวเหนียวสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

หลังจากการ annealing ค่า ΔH ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 สูงขึ้น แต่ค่า ΔH ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ไม่เปลี่ยนแปลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 5.1) แม้ว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์เป็นกลุ่มที่มีอะมิโลสสูงเหมือนกัน แต่ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 13-24 ซึ่งเป็นอะมิโลเพกตินสายยาวในชั้นผลึกสูงถึง 60.06% ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มี 53.35% หลังการ annealing อาจทำให้อะมิโลเพกตินสายยาวของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 สามารถพันเกลียวคู่ได้เหมาะสมมากขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกเพิ่มขึ้น ค่า ΔH ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 จึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yurye (2004) ที่พบว่าหลังจากการ annealing แล้ว ทำให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการที่ชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ที่มีความเหมาะสมมากกว่าที่จะเกิดการพันเกลียวคู่ของสายอะมิโลเพกตินเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการ annealing ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติโนเซชันหลังจากผ่านการ annealing ($T_c - T_0$) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า ไม่เปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) (ตารางที่ 5.1) แต่ช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แคลลง ($p < 0.05$) โดยที่ช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 แคลลงมากกว่าข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากการ annealing แล้ว ทำให้อะมิโลสในชั้นอสัณฐานของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีความเป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ทำให้เม็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีความ homogeneous มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yuryev (2004) ที่พบว่า การ annealing ทำให้เม็ดแป้งมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และมีความ homogeneous มากขึ้น จึงทำให้ช่วง $T_c - T_0$ แคลลง ส่วนช่วง $T_c - T_0$ ของข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ไม่เปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) (ตารางที่ 5.1) แม้ว่ามีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานสูงใกล้เคียงกับข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 แต่ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินสายยาวในช่วง DP 13-24 มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ซึ่งอาจมีปลายสายอยู่ในชั้นอสัณฐาน ทำให้อะมิโลสในชั้นอสัณฐานกระจายตัวได้จำกัด ทำให้ความ homogeneous ไม่ต่างจากที่ผ่าน annealing แล้ว

เมื่อพิจารณาค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ ในตารางที่ 5.2 พบว่าค่า ΔT_0 ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

และข้าวเหนียว ซึ่งในระหว่างการเจริญเติบโตของพืชอาจเกิดความไม่สมบูรณ์ขึ้นภายในเมล็ดแป้ง เนื่องจากการที่มีอะมิโลสเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึก ทำให้อะมิโลเพกตินพันเกลียวคู่ไม่สมบูรณ์ โดยที่ไม่ทำให้ความหนาของชั้นผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (Kiseleva et al., 2004; Protserov, Wasserman, Tester, Debon, Ezernitsksja and Yuryev, 2002; Protserov, Kozhevnikov, Wasserman, Popov and Yuryev, 2001) ดังนั้นเมล็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงเกิดความไม่สมบูรณ์มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว แต่เมื่อผ่านการ annealing แล้ว ทำให้อะมิโลสถูกขับออกมาให้อยู่ในชั้นอสัณฐาน และอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกสามารถพันเกลียวคู่ได้เป็นระเบียบและสมบูรณ์ขึ้น ทำให้ชั้นอสัณฐานภายในเมล็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 อยู่ในสภาวะ glassy มากกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ข้างต้น ทำให้ค่า ΔT_0 ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่า ΔT_0 สูงกว่าข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ($P < 0.05$) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลเพกตินสายสั้นในช่วง DP 6-12 ปริมาณ 32.19% ซึ่งมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่มีอยู่ 23.71% และอะมิโลเพกตินสายสั้นเหล่านี้อาจเกิดการพันเกลียวคู่ได้ไม่สมบูรณ์ แต่หลังการ annealing แล้วสามารถพันเกลียวคู่สมบูรณ์มากขึ้น จึงทำให้ค่า ΔT_0 ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ค่า ΔH หลังการ annealing ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ทั้ง 4 พันธุ์ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ช่วง $T_c - T_0$ ของแป้ง ฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ก็แคบลง ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ทำให้เมล็ดแป้งมีความ homogeneous เพิ่มมากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov และ Yuryev (2004) ส่วนช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ไม่เปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับที่พบในแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า

เมื่อเปรียบเทียบระดับการเพิ่มของค่า ΔT_0 ระหว่างแป้งฟลาวร์ข้าวเก่ากับข้าวใหม่ (ตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ) ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว พบว่าระดับการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ดังกล่าวต่ำกว่าข้าวใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดแป้งสามารถเกิดการ annealing ขึ้นได้อย่างช้าๆ (Zobel, Young and Rocca, 1988) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่ามีระดับการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ ส่วนค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีระดับการเพิ่มใกล้เคียงกับแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่

เมื่อพิจารณาค่า ΔT_0 ของแป้งสตาร์ชพบว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่า ΔT_0 สูงกว่าข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งผลที่ได้นี้คล้ายกับแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าและใหม่ ที่พบว่าค่า ΔT_0 ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูงกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีปริมาณอะมิโลสสูง จึงเกิดผลของการ

ตารางที่ 5.2 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ
4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ตารางที่ 5.3 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวพันธุต่างๆ
4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

annealing ในชั้นอุณหภูมิมากกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า ΔT_0 ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับที่พบในแป้งฟลาร์ข้าวใหม่

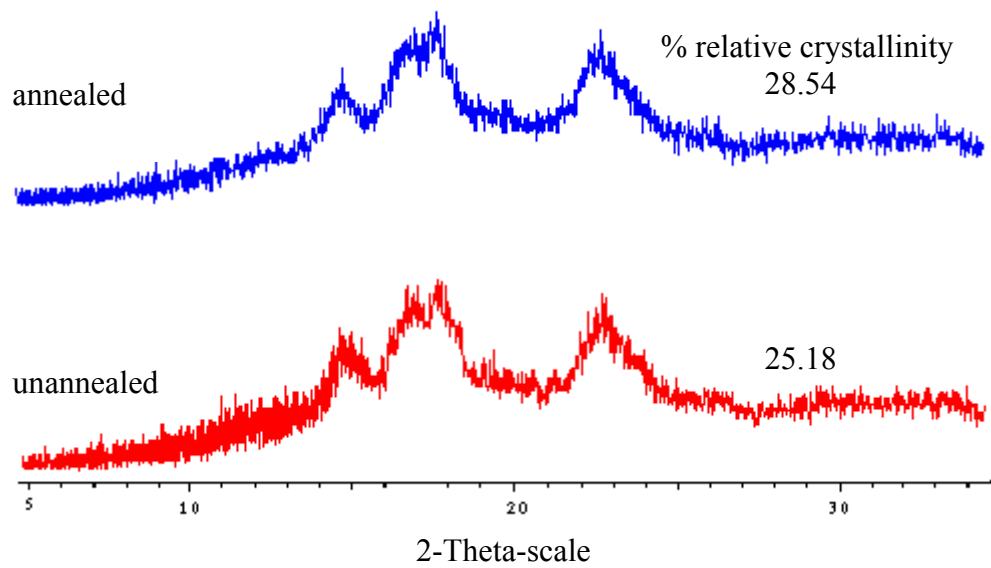
ค่า ΔH หลังการ annealing ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) แต่ค่า ΔH หลังการ annealing ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสสูงกว่าข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งอาจมีอะมิโลสเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึก ทำให้อะมิโลเพกตินพันเกี่ยวคู่ไม่สมบูรณ์ (Kiseleva et al., 2004; Protserov et al., 2002; Protserov et al., 2001) หลังการ annealing เกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินพันเกี่ยวคู่ได้อย่างสมบูรณ์ตลอดทั้งสาย ทำให้ชั้นผลึกหนาขึ้น ค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงสูงขึ้น ซึ่งพบว่าค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ซึ่งเป็นข้าวที่มีอะมิโลสสูงก็มีค่า ΔH สูงขึ้นเช่นเดียวกับข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ซึ่งสาเหตุการเพิ่มขึ้นของค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 อาจมาจากสาเหตุเดียวกับข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 นอกจากนี้ยังพบว่าช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งสตาร์ชข้าวทั้ง 4 พันธุ์แคบลง ($p < 0.05$) เนื่องจากเม็ดแป้งมีความ homogeneous มากขึ้น

5.4.2 ผลของ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

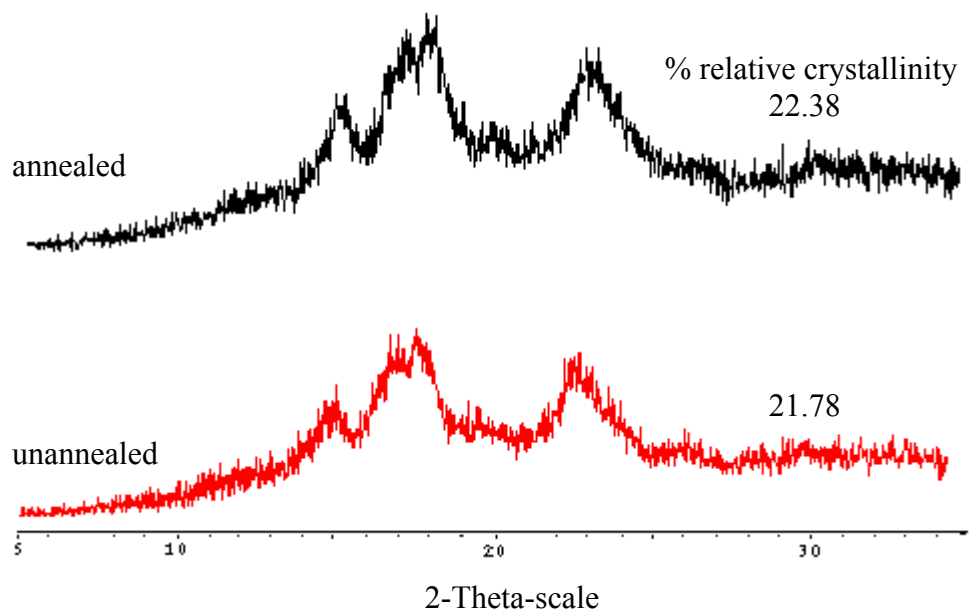
ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ กข 23 แสดงดังภาพที่ 5.1-5.4 หลังการ annealing ปรากฏฟิสิกที่มุม 15° 17° 18° และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A (Buleon, Colonna, Planchot and Ball, 1998) และพบว่าฟิสิกที่ปรากฏนี้ไม่ต่างจากฟิสิกที่ปรากฏในแป้งสตาร์ชของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Stute (1992) ที่พบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้วโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชมันฝรั่งยังคงเป็นแบบ B เหมือนกับที่พบในแป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากการ annealing แล้วทำให้ปริมาณ relative crystallinity สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Tester และ Debon (2002) ที่พบว่า การ annealing ทำให้อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกจัดเรียงตัวกันสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ relative crystallinity สูงขึ้น

5.4.3 ผลของ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด

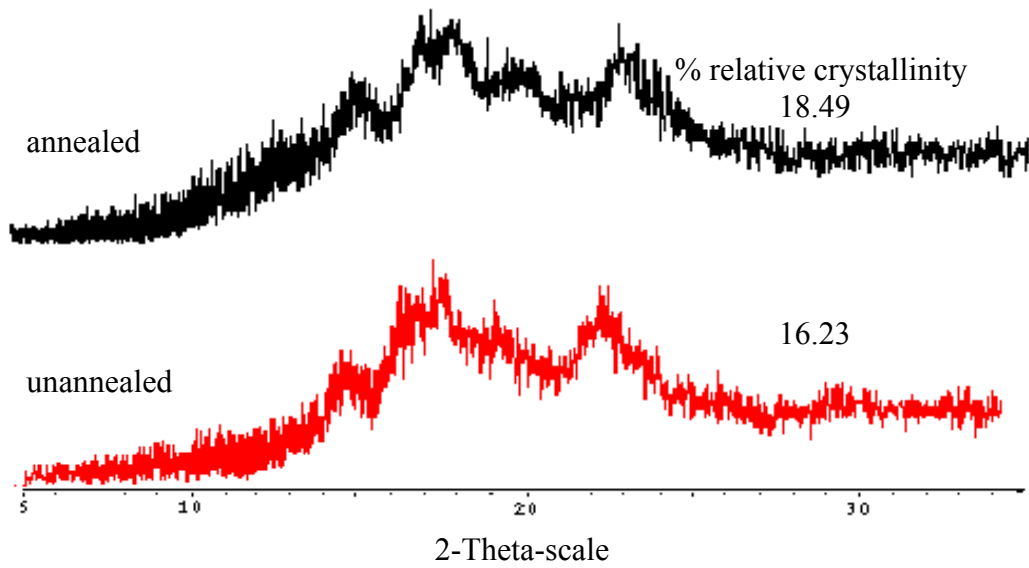
จากการรายงานของ Nakazawa and Wang (2003) พบว่าในช่วง 8 วันแรกของการย่อยด้วยกรดเกิดขึ้นภายในชั้นอุณหภูมิ ซึ่งแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการ annealing แล้วมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าแป้งสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing



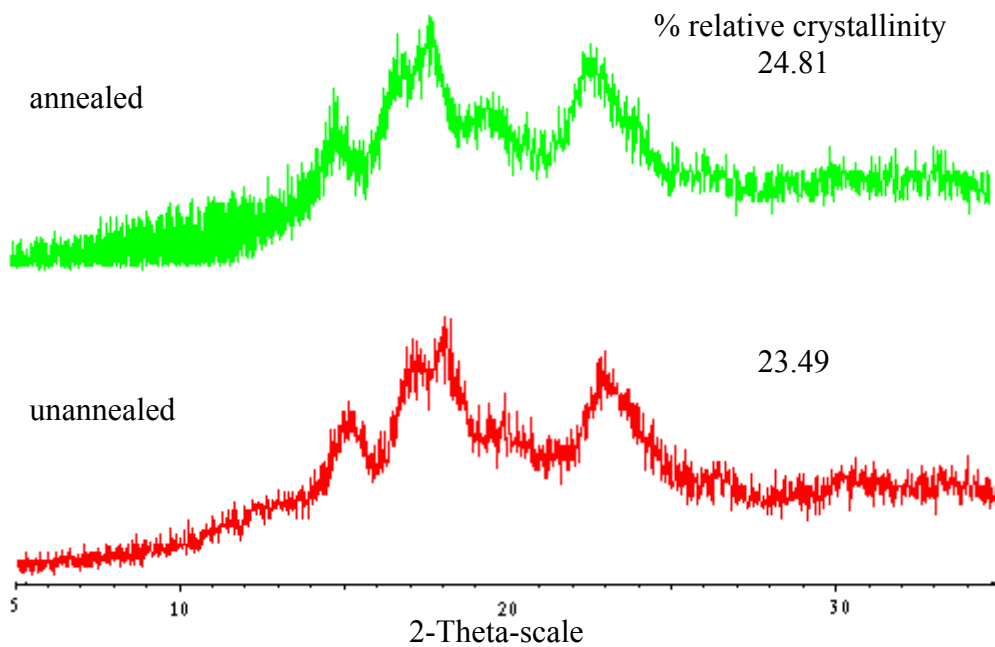
ภาพที่ 5.1 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กช 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



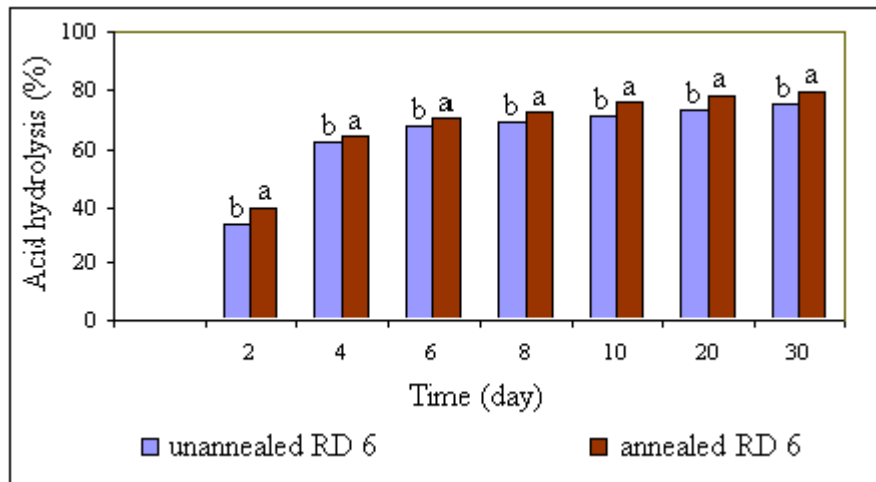
ภาพที่ 5.2 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



ภาพที่ 5.3 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูง
พันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

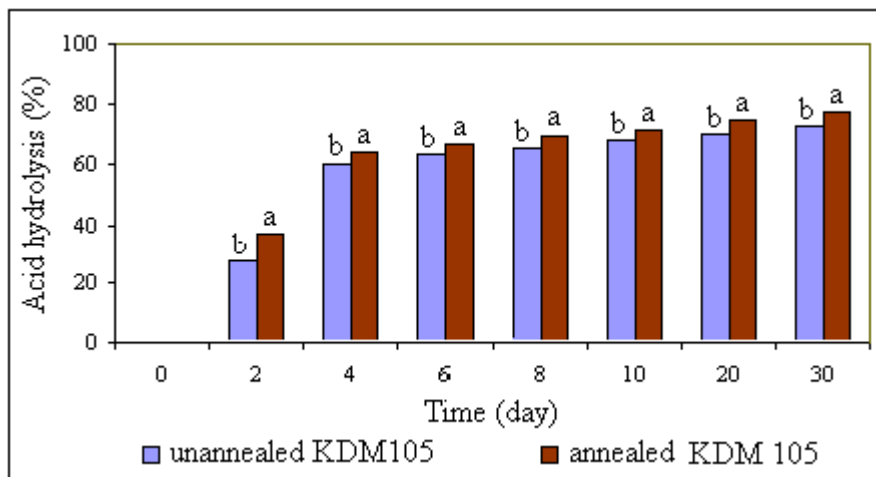


ภาพที่ 5.4 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูง
พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



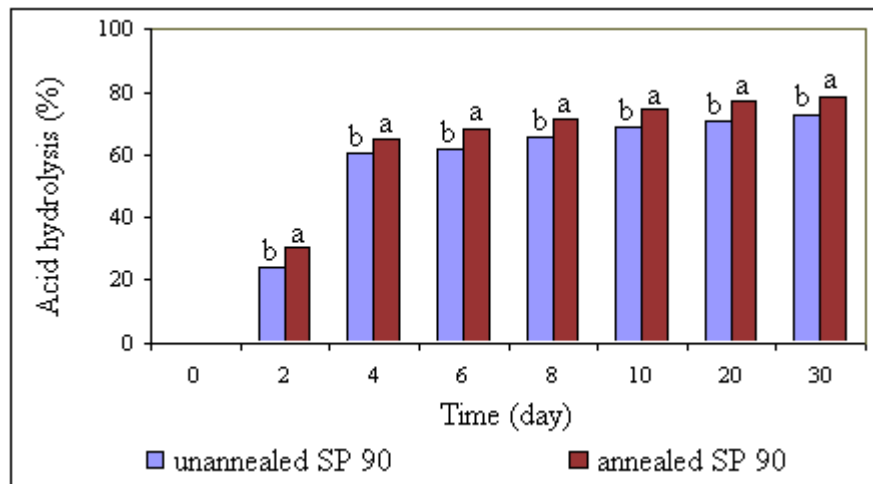
ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 5.5 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กช 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



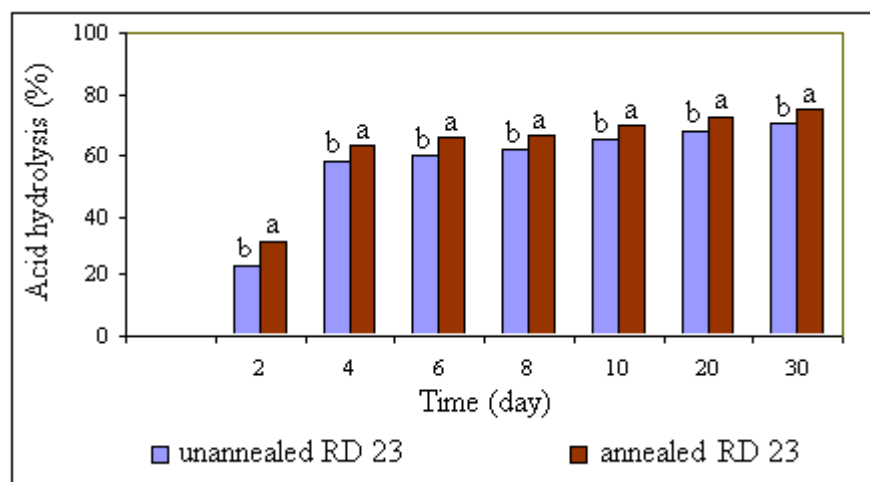
ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 5.6 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 5.7 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 5.8 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ทำให้อะมิโลสและเด็กซ์ทรินสายสั้นที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับให้ออกมาอยู่ในชั้นอสัณฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้ชั้นอสัณฐานอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 1998; Genkina, Wasserman, Noda, Tester and Yuryev, 2004; Kiseleva et al., 2004; Kiseleva, Krivandin, Fornal, Blaszczyk, Jelinski and Yuryev, 2005) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดชั้นอสัณฐานของแป้งสตาร์ชที่ผ่านการ annealing มีค่าสูงกว่ากว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tester และคณะ (1998) ที่พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing แล้วทำให้ชั้นอสัณฐานมีระเบียบมากขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอสัณฐานของแป้งสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing แล้ว สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่หลังจาก 8 วันแล้ว การย่อยจะเกิดขึ้นภายในชั้นผลึก (Nakazawa and Wang, 2003) จึงพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการ annealing แล้วมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นผลึก ซึ่งจะทำการสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นผลึกได้ง่ายและเกิดการย่อยได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Nakazawa และ Wang (2003) ที่รายงานว่า การ annealing ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำการสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นผลึกได้ง่ายและย่อยได้มากขึ้น

5.4.4 ผลของ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่เป็นข้าวเก่า พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวทั้ง 3 พันธุ์สูงขึ้น ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่ามีระดับอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์หลังจากผ่านการ annealing (ΔPT) เพิ่มขึ้นมากกว่า ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากข้าวเหนียวเก่ามีอะมิโลสน้อยที่สุด จึงอาจเกิดการสูญเสียความชื้นมากระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 1 ปี ด้วยเหตุนี้จึงสามารถดูดน้ำกลับเข้าไปได้มาก ทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการ annealing ต่ำ แต่เมื่อ annealing แล้ว ทำให้อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกเกิดการพันเกลียวคู่ให้เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้นน้ำจึงแทรกเข้าไปในชั้นผลึกได้ยาก ต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวที่ผ่านการ annealing มีค่าสูง ส่งผลให้ค่า ΔPT ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวสูงกว่าข้าวเจ้าอีก 2 พันธุ์ นอกจากนี้ยังพบว่า ΔPT ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าของข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสมากกว่า

ตารางที่ 5.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า
พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 หลังการ annealing ชั้นออสันฐานของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีความเป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จึงต้องใช้ อุณหภูมิสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เพื่อให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว

หลังจากการ annealing แล้วความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกคาวน์ (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และเซตแบค (setback) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์ดังกล่าวมีค่าต่ำลง ($p < 0.05$) โดยที่ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุดระหว่างที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing (ΔPV) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าทั้งพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีค่าลดลงมากกว่าข้าวเหนียวเก่า และข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ตามลำดับ เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีอะมิโลสมากกว่าข้าวเหนียว เมื่อผ่านการ annealing แล้ว ทำให้ชั้นออสันฐานมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และมากกว่าข้าวเหนียว น้ำจึงแทรกเข้าไปในชั้นออสันฐานเข้าไปในชั้นผลึกของข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้ยาก เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวได้ยากและมีความหนืดต่ำลงมากกว่าข้าวเหนียว ทำให้ค่า ΔPV ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ต่ำลงมากกว่าข้าวเหนียว ส่วนข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสมากกว่าข้าว 2 พันธุ์ที่กล่าวมา ซึ่งในระหว่างการเก็บรักษาเม็ดแป้งสามารถเกิดการ annealing ขึ้นได้อย่างช้าๆ (Zobel et al., 1988) ทำให้ชั้นออสันฐานมีความเป็นระเบียบระดับหนึ่ง ดังนั้นระหว่างการ annealing อะมิโลสในชั้นออสันฐานของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงอีกเพียงเล็กน้อย เพื่อจัดเรียงตัวให้เหมาะสมที่สุด จึงทำให้ค่า ΔPV ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 น้อยมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าระดับค่าความหนืดสุดท้ายหลังจากผ่านการ annealing (ΔFV) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ต่ำลงมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเหนียว ตามลำดับ (ตารางที่ 5.4) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีการลดลงของค่าความหนืดสูงสุด (ΔPV) มากกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ แสดงให้เห็นว่าหลังจากการ annealing เม็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แข็งแรงกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อผ่านการเจลาติไนเซชันจึงมีปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย และรวมตัว (aggregate) กันได้น้อย ทำให้การลดลงของค่าความหนืดสุดท้าย (ΔFV) มากกว่าข้าวทั้ง 2 พันธุ์

ค่า ΔPT ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีค่าต่ำกว่าข้าวเจ้าเก่าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เล็กน้อย ซึ่งถือได้ว่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 5.4) แต่พบว่าค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดหลังจากผ่านการ annealing (ΔPV และ ΔFV) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีการลดลงมากกว่าข้าวเจ้าสุดท้ายพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 13-24 ซึ่งเป็นอะมิโลเพกตินสายยาวมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ซึ่งอาจมีปลายสายอยู่ในชั้นออสันฐาน ทำให้สามารถดูดน้ำและพองตัวได้เร็วกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 หลังการ annealing อะมิโลเพกตินตลอดทั้งสายพันเกี่ยวกันเหมาะสม ทำให้น้ำแทรกเข้าไปได้ยาก จึงทำให้ผลต่างของ

ค่าความเหน็ดสูงสุดของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีมากกว่าของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 แสดงว่าเมล็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 หลังการ annealing แข็งแรงขึ้นมากกว่าก่อนการ annealing นอกจากนี้ก็ทำให้อะมิโลสที่ชะออกจากเมล็ดแป้งหลังการเจลาติไนเซชันมีน้อย จึงรวมตัวกันได้น้อย ทำให้การลดลงของค่าความเหน็ดสุดท้ายของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีมากกว่าของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ หลังการ annealing พบว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่า ΔPT น้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว ตามลำดับ (ตารางที่ 5.5) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ทำให้อะมิโลส ถูกขับออกมาอยู่ในชั้นออสันฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นผลึกมากขึ้น ดังนั้นข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่มีอะมิโลสมากที่สุด จึงเกิดรูพรุนมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ ข้าวเหนียว จึงทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในชั้นผลึกของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ได้ง่าย เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ง่าย ค่า ΔPT ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหน็ดขณะร้อนและเย็นหลังการ annealing ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่เป็นข้าวใหม่มีลักษณะแตกต่างกัน (ตารางที่ 5.5) โดยที่แป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวหลังการ annealing มีค่าความเหน็ดสูงสุดต่ำลง แต่มีค่าความเหน็ดสุดท้ายสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านการ annealing แล้วชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวได้ยาก ทำให้ค่าความเหน็ดสูงสุดต่ำลง และเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว ทำให้เม็ดแป้งที่เกิดการพองตัว และเกิดการเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์ มี ghosts remnant เหลืออยู่และแทรกอยู่ภายในเจล จึงทำให้ค่าความเหน็ดสุดท้ายมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miller, Derby และ Trimbo (1973) ที่พบว่าแป้งที่ผ่านการ annealing แล้ว และมีค่าความเหน็ดขณะเย็นสูงขึ้น เนื่องจากมี ghosts remnant ที่แทรกอยู่ภายในเจลเกิดขึ้น ส่วนค่าความเหน็ดสูงสุดและค่าความเหน็ดสุดท้ายหลังการ annealing ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าต่ำลง เนื่องจากหลังจากผ่านการ annealing แล้ว เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้นทำให้อะมิโลสที่ชะออกจากเมล็ดแป้งมีน้อย จึงรวมตัวกันได้ยาก ทำให้ค่าความเหน็ดสุดท้ายต่ำลง ส่วนแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 หลังการ annealing มีค่าความเหน็ดสูงสุดและค่าความเหน็ดสุดท้ายสูงขึ้น เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสสูง ซึ่งอะมิโลสเหล่านี้อาจเข้าไปแทรกทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ในชั้นผลึกได้มาก เมื่อผ่านการ annealing อะมิโลสถูกขับออกมาในชั้นออสันฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นผลึกของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เกิดขึ้นได้มาก เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวได้มาก ความเหน็ดสูงสุดจึงมีค่าสูงขึ้น และเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว ภายในเจลมี ghosts

ตารางที่ 5.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งฟลาวรีข้าว
ใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ตารางที่ 5.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวและเย็นของแป้งสตาร์ชข้าว
พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

remnant แทรกอยู่ ทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงขึ้นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 (ตารางที่ 5.5) พบว่าหลังการ annealing อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูงขึ้น แต่ค่า ΔPT ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีกึ่งก้านอะมิโลเพกตินสายยาวในช่วง DP 13-24 มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ซึ่งปลายสายอาจอยู่ในชั้นอสัณฐาน เมื่อผ่านการ annealing แล้วเม็ดแป้งจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นผลึก ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในกึ่งก้านอะมิโลเพกตินสายยาวของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ได้มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ไม่เปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 มีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 ดังที่ได้อธิบายในข้างต้น

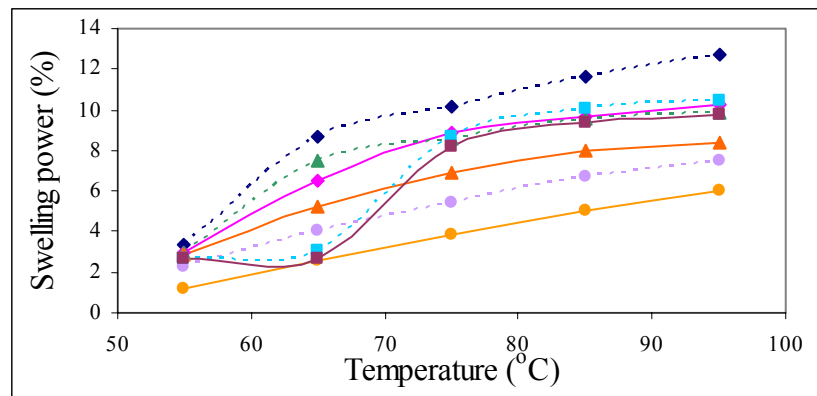
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์หลังจากผ่านการ annealing (ΔPT) ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเหนียว ตามลำดับ (ตารางที่ 5.6) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า ΔPV และ ค่า ΔFV ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวมีการลดลงมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ เนื่องจากแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวมีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานน้อยมาก น้ำจึงแทรกเข้าไปในชั้นผลึกได้ง่าย เกิดการพองตัวได้ง่าย จึงทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าสูง เมื่อผ่านการเจลาติไนซ์ อาจมีเด็กซ์ทรินสายสั้นหลุดออกมาจากเม็ดแป้งมาก และเกิดการรวมตัวกันได้ง่าย จึงทำให้ความหนืดสุดท้ายมีค่าสูง แต่หลังจากผ่านการ annealing แล้ว ชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายลดต่ำลง จึงทำให้ผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวมีมากกว่าข้าวเจ้าทั้ง 2 พันธุ์ดังกล่าวข้างต้น

อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 หลัง annealing มีค่าสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เล็กน้อย ซึ่งอาจถือได้ว่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 5.6) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าต่ำลงใกล้เคียงกัน เนื่องจากการ annealing ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยากขึ้น และเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์ ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งมีน้อยและเกิดการรวมตัวกันได้น้อย จึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดสุดท้ายหลังการ annealing ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าต่ำลง

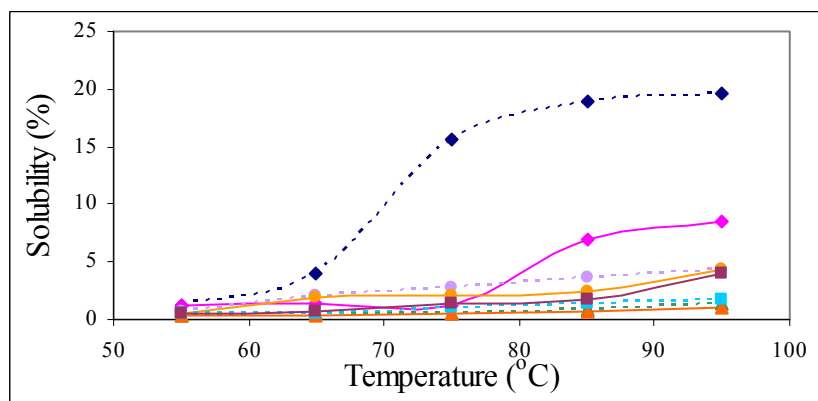
5.4.5 ผลของ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง

เมื่อพิจารณาผลต่างของกำลังการพองตัวระหว่างที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing (ΔSP) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่เป็นข้าวเก่า (ภาพที่ 5.9 ก) พบว่า ΔSP ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ตามลำดับ อาจเนื่องจากข้าวเหนียวเก่ามีอะมิโลสในชั้นนอกสัณฐานน้อย จึงอาจเกิดการสูญเสียน้ำออกจากเม็ดข้าวในระหว่างเก็บรักษาได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้ก่อนการ annealing ข้าวเหนียวจึงสามารถดูดน้ำและเกิดการพองตัวได้มากกว่าข้าวเจ้าทั้ง 2 พันธุ์ หลังจากการ annealing แล้วทำให้ชั้นนอกสัณฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น น้ำจึงแทรกเข้าไปในชั้นนอกสัณฐานและชั้นผลึกได้ยากมากขึ้น จึงทำให้ ΔSP ของข้าวเหนียวมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าผลต่างของการละลายระหว่างที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing (ΔS) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ (ภาพที่ 5.9 ข) อาจเนื่องจากก่อนการ annealing อาจมีเด็กซ์ทรินสายสั้นละลายหลุดออกมาจากเม็ดแป้งได้มาก เมื่อผ่านการ annealing แล้วเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้นเด็กซ์ทรินสายสั้นอาจละลายหลุดออกมาจากเม็ดแป้งได้น้อยลง การละลายจึงต่ำลง ทำให้ ΔS ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวมีค่ามาก ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสมากที่สุด ซึ่งอะมิโลสเหล่านี้ยังจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงสามารถละลายออกมาได้มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ดังภาพที่ 5.9 ข แต่เมื่อผ่านการ annealing แล้วทำให้อะมิโลสจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น การละลายจึงลดลงมากกว่า ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการ annealing อาจมีอะมิโลสละลายออกมาได้บ้างแต่ไม่มากนัก (ภาพที่ 5.9 ข) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีอะมิโลสปานกลาง แต่เมื่อผ่านการ annealing แล้วทำให้อะมิโลสจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น การละลายจึงลดลง ทำให้ค่า ΔS ของข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่ำที่สุด และยังพบอีกว่าผลต่างของปริมาณอะมิโลสหลังจากผ่านการ annealing (ΔAL) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว ตามลำดับ (ภาพที่ 5.9 ค) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลสที่มีในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีอะมิโลสมากที่สุด จึงมีปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีอะมิโลสปานกลาง และข้าวเหนียวซึ่งมีอะมิโลสน้อยที่สุด

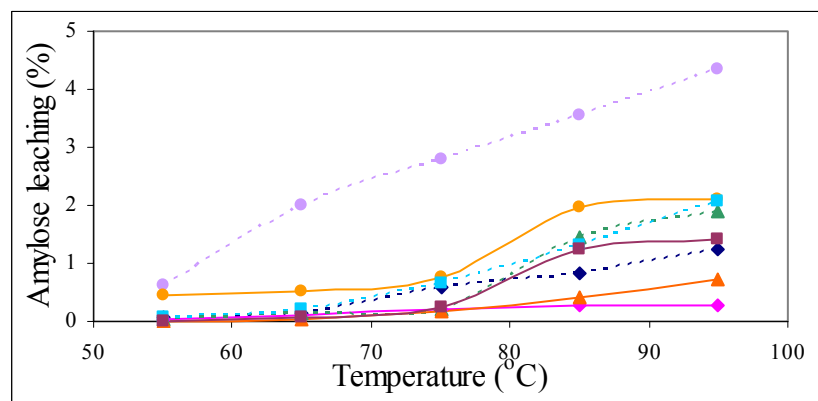
เมื่อพิจารณา ΔSP ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่เป็นข้าวเก่า (ภาพที่ 5.9 ก) ซึ่งข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้เป็นข้าวที่มีอะมิโลสสูง พบว่า ΔSP ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินสายยาวมากกว่า ซึ่งปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวนี้อาจอยู่ในส่วนของสัณฐาน อาจ



(ก)



(ข)



(ค)

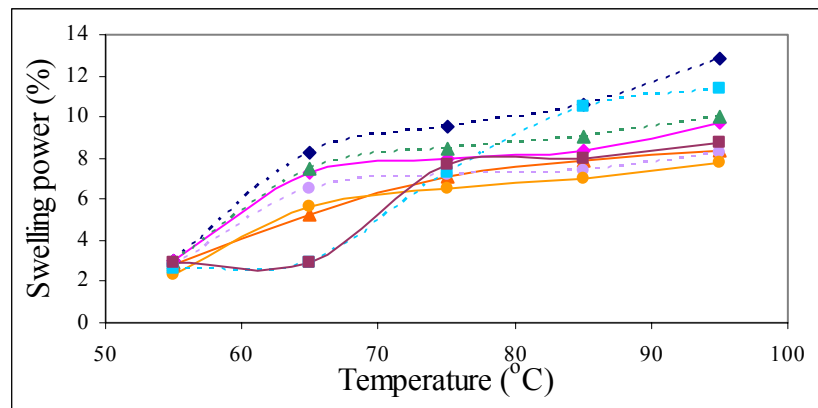


ภาพที่ 5.9 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

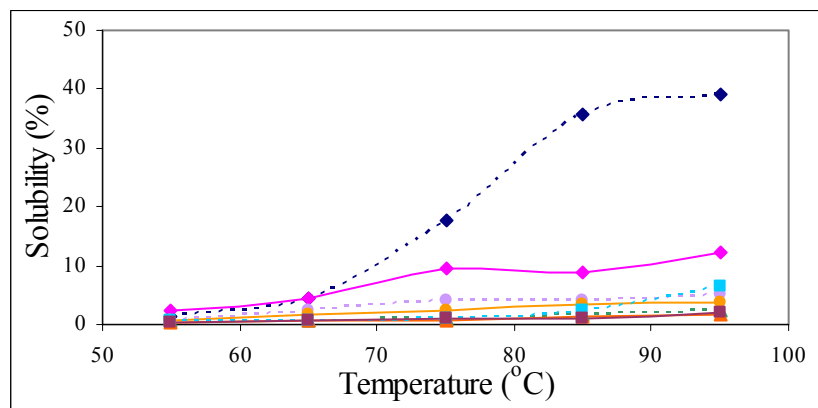
ทำให้น้ำสามารถแทรกผ่านเข้าไปในผลึกของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ได้ง่ายกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ดังนั้นข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 จึงพองตัวได้ง่ายและมากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 หลังการ annealing ทำให้อะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในปลายสายอะมิโลเพกตินของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ถูกขับออกมาให้อยู่ในชั้นออสติฐาน และจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ส่วนอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกก็พันกลียวคู่กันเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกมากขึ้น (Jacob et al., 1995; Jacob et al., 1998; Nakazawa and Wang., 2003) ทำให้โครงสร้างภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 หลังการ annealing พองตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในชั้นผลึกของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ได้ง่ายเหมือนเดิม จึงทำให้ ΔSP ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จากการที่เมื่อผ่านการ annealing แล้ว ทำให้อะมิโลสของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 พองตัวได้มากขึ้น จึงทำให้การละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 หลังการ annealing แล้ว มีค่าสูงขึ้นด้วย แต่ค่าการละลายของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าลดลง (ภาพที่ 5.9 ข) และยิ่งพบอีกว่า ΔAL ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 (ภาพที่ 5.9 ค) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้นออสติฐาน ซึ่งอาจไปขัดขวางไม่ให้ อะมิโลสถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งได้ง่าย ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้นออสติฐานน้อย ทำให้อะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งได้มากกว่า หลังการ annealing ทำให้ทั้งชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น จึงทำให้อะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของข้าวเจ้าทั้ง 2 พันธุ์ลดลง แต่เนื่องจากก่อนการ annealing ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าต่ำ จึงทำให้ ΔAL ต่ำกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90

จากภาพที่ 5.10 ก พบว่าค่า ΔSP ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่สูงกว่า ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ΔS ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่ สูงกว่าข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ (ภาพที่ 5.10 ข) และยิ่งพบอีกว่าค่า ΔAL ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวใหม่ ตามลำดับ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้เหมือนกับที่พบในแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าของข้าวทั้ง 3 พันธุ์

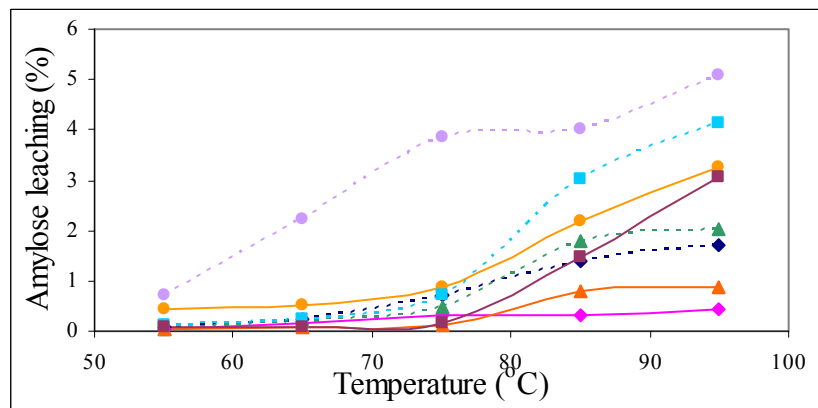
จากภาพที่ 5.10 ก และ ข พบว่า ΔSP และ ΔS ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 มีค่ามากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้นออสติฐาน ซึ่งน้ำสามารถแทรกผ่านเข้าไปและเกิดการพองตัวและละลายได้ง่ายกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 หลังการ annealing ทำให้ทั้งชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้งที่เป็นข้าวใหม่แข็งแรงขึ้น จึงเกิดการพองตัวได้ยาก จึงทำให้ ΔSP และ ΔS ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่า



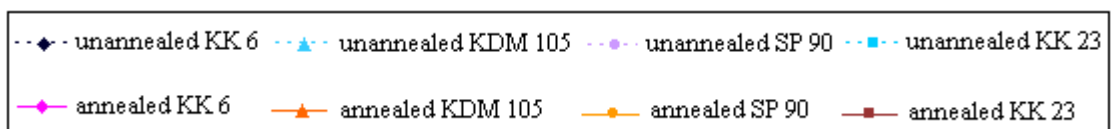
(ก)



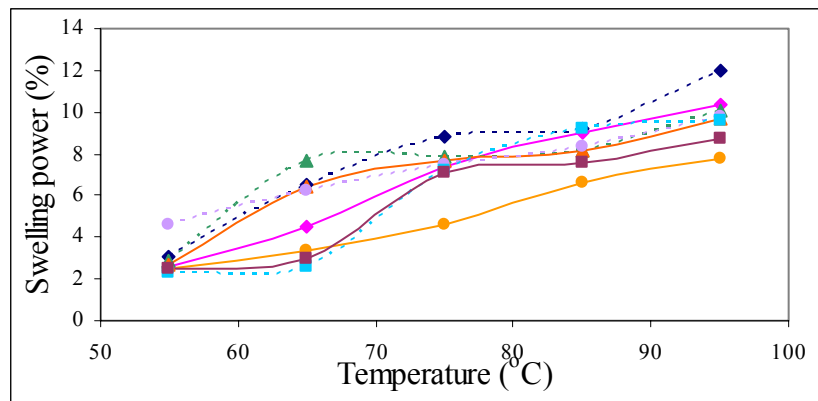
(ข)



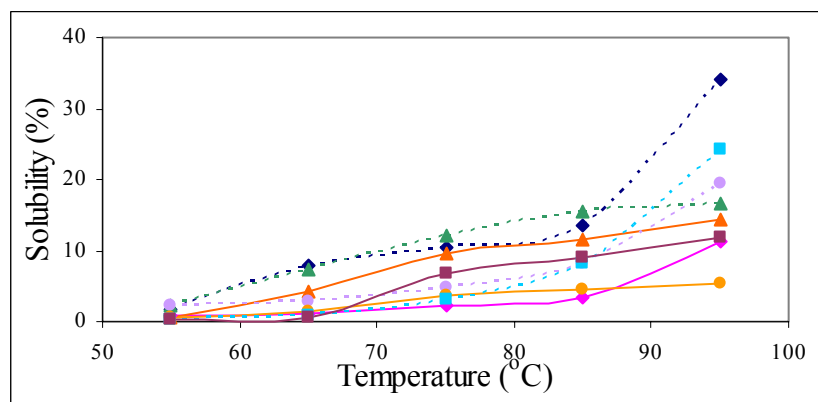
(ค)



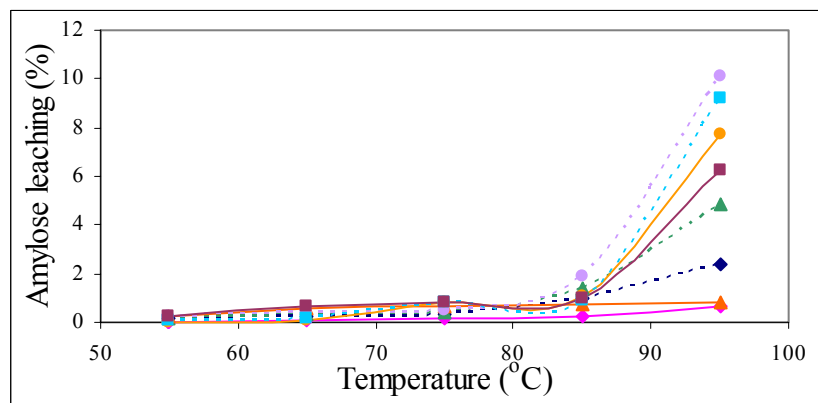
ภาพที่ 5.10 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing



(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 5.11 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 นอกจากนี้ยังพบว่า ΔAL ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าน้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 (ภาพที่ 5.10 ค) เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้นอัสฐาน ซึ่งอาจไปขัดขวางไม่ให้อะมิโลสถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งได้มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ที่มีของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้น อัสฐานน้อยกว่า จึงทำให้ ΔAL ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าน้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90

เมื่อพิจารณา ΔSP ของแป้งสตาρχข้าวเหนียว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ในภาพที่ 5.11 ก พบว่า ΔSP ของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่ามากกว่าข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากในขั้นตอนการสกัดโปรตีนออกจากแป้งฟลาวร์เพื่อให้เป็นแป้งสตาρχมีการล้างแป้งด้วยสารละลายต่าง และน้ำหลายครั้ง อาจทำให้อะมิโลสในชั้นอัสฐานของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 หลุดออกไปได้ ทำให้น้ำสามารถแทรกผ่านชั้นอัสฐานและชั้นผลึกเข้าไปได้ง่าย เม็ดแป้งของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 จึงพองตัวได้ง่าย หลังการ annealing ชั้นอัสฐานและชั้นผลึกแข็งแรงขึ้นเม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก จึงทำให้ผลต่างของกำลังการพองตัวก่อนและหลังการ annealing ของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีค่าสูง ส่วนข้าวเหนียวมีอะมิโลสในชั้นอัสฐานน้อย น้ำจึงสามารถแทรกผ่านเข้าสู่ชั้นอัสฐานและชั้นผลึกได้ง่าย จึงเกิดการพองตัวได้มาก และหลังการ annealing เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้นจึงพองตัวได้ยาก ส่วนข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในขั้นตอนการสกัดแป้งสตาρχอาจมีอะมิโลสในชั้นอัสฐานของหลุดออกไปได้เช่นเดียวกับแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 แต่เนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวที่มีอะมิโลสปานกลาง จึงทำให้ผลต่างของกำลังการพองตัวก่อนและหลังการ annealing ของข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ΔS ของแป้งสตาρχข้าวเหนียว มากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ (ภาพที่ 5.11 ข) และยังพบอีกว่า ΔAL ของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่ามากกว่าของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 และข้าวเหนียว ตามลำดับ (ภาพที่ 5.11 ค)

ΔSP และ ΔS ของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าน้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 (ภาพที่ 5.11 ก และ ข ตามลำดับ) อาจเนื่องจากข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีปลายสายของอะมิโลเพกตินสายยาวอยู่ในชั้นอัสฐาน ซึ่งอาจไปขัดขวางไม่ให้อะมิโลสหลุดออกมาจากเม็ดแป้งมากในขั้นตอนการสกัดแป้งสตาρχ น้ำจึงแทรกผ่านเข้าสู่ชั้นอัสฐานและชั้นผลึกของเม็ดแป้งได้ยาก การพองตัวและการละลายจึงต่ำ จึงทำให้ค่า ΔSP และค่า ΔS ของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 น้อยกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 นอกจากนี้ยังพบว่า ΔAL ของแป้งสตาρχข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่ามากกว่าข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 (ภาพที่ 5.11 ค)

5.5 สรุปผลการทดลอง

การ annealing ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า แป้งฟลาวร์ใหม่ และแป้งสตาร์ชสูงขึ้น โดยที่ค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่สูงกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า แต่ ΔT_0 ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่และเก่าของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 มีค่าใกล้เคียงกัน แป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูง และมีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 6-12 มาก เมื่อผ่านการ annealing แล้วทำให้ ΔT_0 สูงที่สุด การ annealing ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น ทำให้กำบังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า แป้งฟลาวร์ข้าวใหม่ และแป้งสตาร์ชมีค่าลดลง แต่การละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีค่าสูงขึ้น โดยที่ผลต่างของกำบังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด ระหว่างก่อนและหลังการ annealing ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าและแป้งสตาร์ชของข้าวแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และความเก่า-ใหม่ของข้าว รวมทั้งผลการเตรียมแป้งสตาร์ช จากการที่เมื่อผ่านการ annealing แล้วเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ลดการกระจายตัวของ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกมากขึ้น จึงมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชสูงขึ้น โดยที่โครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชหลังการ annealing ยังคงเป็นแบบ A เหมือนเดิม

5.6 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. (2546). การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. ใน รายงานการวิจัยฉบับ สมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *Int. J. Biol. Macromol.* 23: 85-112.
- 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. **Carbohydr. Polym.** 36: 277-284.
- Chung, K. M., Moon, T. W., and Chun, J. K. (2000). Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chem.** 77: 567-571.
- Doublier, J. L. (1981). Rheological studies on starch—Flow behavior of wheat starch pastes. **Starch/Starke.**33: 415-420.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F. (1956). Colorimetric method determination of sugars and related substances. **Anal. Chem.** 28: 350-356.
- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K., and Delcour, J. A. (1997). Effects of Hydrothermal treatments on the rheological properties of potato starch. **Carbohydr. Res.** 297: 347-356.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Noda, T., Tester, R. F. and Yuryev, V. P. (2004). Effect of annealing on the polymorphic structure of starches from sweet Potatoes (Ayamurasaki and Sunnyred cultivars) grown at various soil temperatures. **Carbohydr. Res.** 339: 1093-1098.
- Genkina, N. K., Wasserman, L. A., and Yuryev, V. P. (2004). Annealing of starches from tubers grown at different environmental temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure : A Review. **J. of Agric. Food Chem.** 46: 2895-2905.
- Jacobs, H., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat Starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W. and Delcour, J. A. (1995). Influence of

Annealing on the pasting properties of Starches from Varying Botanical Sources.

Cereal Chem. 72: 480-487.

Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Rouseu, N., Colonna, P. and Delcour, J. A. (1998). Acid hydrolysis of native and annealed wheat, potato and pea starches-DSC melting features and chain length distributions of lintnerised starches. **Carbohydr. Res.** 308: 359-371.

Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H. J., Eerlingen, R. C., Delcour, J. A. and Reynaers, H. (1998). Evaluation of the impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches : A differential scanning calorimetry and small angle X-ray scattering study. **Carbohydr. Res.** 306: 1-10.

Jane, J. L., Xu, A., Radosavljevic, M., and Seib, P. A. (1992). Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.

Jenkins, P. J., Cameron, R. E., and Donald, A. M. (1993). A universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. **Starch/Starke.** 45: 417-420.

Juliano, B. O. (1984). **Rice starch** : Production, properties and uses. pp. 507-529. In *Starch Chemistry and technology*, 2nd ed. Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall, E.F. Academic press, Orlando, FL.

Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Tester, R. F., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev V. P. (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.

Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Fornal, J., Blaszcak, W., Jelinski, T. and Yuryev, V. P. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC,

- and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **J. of Agric. Food Chem.** 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water content. **Starch/Starck.** 43: 227-231.
- Miller, B. S., Derby, R. I. and Trimbo, H. B. (1973). A pictorial explanation for the Increase in viscosity of a heated wheat starch water suspension. **Cereal Chem.** 50: 271-280.
- NaKazawa, Y. and Wang, Y. J. (2003). Acid hydrolysis of native and anneal starches and branch-structure of their Naegeli dextrans. **Carbohydr. Res.** 338: 2871-2882.
- Puchongkavarin, H., Varavinit, S. and Bergthaller, W. (2005). Comparative Study of Pilot Scale Rice Starch Production by Alkaline and Enzymatic Process. **Starch/Starke.** 57: 134-144.
- Protserov, V. A., Karpov, V. G., Kozhevnikov, G. O., Wassernan, L. A. and Yuryev, V. P. (2001). Changes of thermodynamic and structural properties of potato Starches (Udacha and Acrocil cultivars) during biosynthesis. **Starch/Starke.** 52: 461-466.
- Protserov, V. A., Wassernan, L. A., Tester, R. F., Debon, S. J. J., Ezernitskaja, M. G. and Yuryev, V. P. (2002). Thermodynamic and structural properties of starches extracted from potatoes grown at different environmental temperatures. **Carbohydr. Polym.** 49: 271-279.
- Schoch, T. J. and Maywald, E. C. (1968). Preparation and properties of various legume starches. **Cereal Chem.** 45: 564-573.
- Seow, C. C and Teo, C. H. (1993). Annealing of Granular Rice Starches Interpretation

of the Effect on Phase Transitions Associated with Gelatinization.

Starch/Starck. 45:345-351.

Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. **Starch/Starke.** 44: 205-214.

Tester, R. F. and Debon, S. J. (2000). Annealing of starch—a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Karkalas, J. (1998). Annealing of Wheat starch. **J. Cereal Sci.** 28: 259-272.

Tester, R. F., Debon, S. J. and Sommerville, M. D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.

Tester, R., Kiseleva, V. I., Genkina, N. K., Wasserman, L. A., Popov, A. A. and Yuryev, V.P, (2004). Annealing of normal, low and high amylose starches extracted from barley cultivars grown under different environmental conditions. **Carbohydr. Polym.** 56: 157-168.

Tester, R. F. and Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starch. **Cereal Chem.** 67: 558-563.

Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J. and Delcour. (2003). Rice starches. II. Structure aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38: 53-59.

Yuryev, V. P., Genkina, N. K. and Wasserman, L. A. (2004). Annealing of starches from potato tubers grown at different environment temperatures. Effect of heating duration. **Carbohydr. Polym.** 56: 367-370.

Yuryev, V. P., Kiseleva, V. I., Krivandin, A. V., Founal, J., Blaszcak, W. and

Jelinski, T. (2005). Annealing of normal and mutant wheat starches. LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydr. Res.** 340: 75-83.

Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. (1988). Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. **Cereal Chem.** 65:443-446.

ตารางที่ 5.1 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่าพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่า	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6					
ไม่ผ่านการ annealing	61.98±1.54b	69.13±2.27 b	74.63±1.06 b	12.65±2.20a	4.08±0.54b
ผ่านการ annealing	66.52± 0.02a	71.49±0.23a	78.78±0.40a	12.23± 0.41a	8.80±1.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	4.54	2.36	4.15	-0.42	4.72
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105					
ไม่ผ่านการ annealing	62.18±1.54b	67.84±2.27b	73.59±1.06b	11.41±2.20a	6.26±0.54b
ผ่านการ annealing	67.66± 0.02a	72.53±0.23a	77.52±0.40a	9.86± 0.41b	8.74±1.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	5.48	4.69	3.93	-1.55	2.48

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90					
ไม่ผ่านการ annealing	61.45±1.54b	68.49±2.27b	72.30±1.06b	10.85±2.20a	6.60±0.54a
ผ่านการ annealing	68.16± 0.02a	71.11±0.23a	74.04±0.40a	5.88± 0.41b	6.28±1.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	6.72	4.62	1.74	-4.97	-0.32
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23					
ไม่ผ่านการ annealing	72.49±1.29b	76.33±0.72b	79.93±0.77b	7.44±0.52ab	6.71±0.67b
ผ่านการ annealing	78.90±0.60a	81.87±0.49a	85.73±0.42a	6.83±0.19b	9.04±0.34a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	6.41	5.54	5.80	-0.61	2.33

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 5.2 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6					
ไม่ผ่านการ annealing	59.61±0.16b	66.15±0.06b	73.39±0.35b	13.78±0.50a	8.28±1.05a
ผ่านการ annealing	67.67±0.08a	72.70±0.37a	79.55±0.44a	11.88±0.33b	8.17±0.33a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	8.06	6.55	6.16	-1.90	-0.11
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105					
ไม่ผ่านการ annealing	61.05±0.16b	65.74±0.06b	72.73±0.35b	11.68±0.50a	6.89±1.05a
ผ่านการ annealing	69.13±0.08a	73.85±0.37a	79.34±0.44a	10.22±0.33b	6.50±0.33a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	8.08	8.11	6.61	-1.46	-0.39

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งฟลาวร์ข้าวใหม่	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90					
ไม่ผ่านการ annealing	60.45±0.16b	65.11±0.06b	69.83±0.35b	9.38±0.50a	7.98±1.05a
ผ่านการ annealing	69.88±0.08a	72.71±0.37a	75.45±0.44a	5.60±0.33b	8.35±0.33a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	9.43	7.60	5.62	-3.78	0.37
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23					
ไม่ผ่านการ annealing	71.53±0.36b	75.11±0.37b	79.63±0.51b	8.10±0.58a	10.39±0.81a
ผ่านการ annealing	77.74±0.05a	81.66±0.15a	88.43±0.26a	7.69± 0.23a	9.85±0.11ab
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	6.21	6.55	8.80	-0.41	-0.54

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 5.3 T_o , T_p , T_c , T_c-T_o และ ΔH ของการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งสตาร์ช	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6					
ไม่ผ่านการ annealing	63.52±1.54b	70.18±2.27ab	77.79±1.06a	14.27±2.20a	10.07±0.54a
ผ่านการ annealing	67.33± 0.02a	71.64±0.23a	77.01±0.40b	9.68± 0.41b	11.26±1.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	3.81	1.46	-0.78	-4.59	1.19
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105					
ไม่ผ่านการ annealing	66.30±0.16 b	70.57±0.06b	75.55±0.35b	9.26±0.50a	9.35±1.05a
ผ่านการ annealing	69.57±0.08a	73.58±0.37a	77.71±0.44a	8.14±0.33b	10.04±0.33ab
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	3.27	3.01	2.16	-1.12	0.69

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งสตาร์ช	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c - T _o (°C)	ΔH (J/g)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ สุพรรณบุรี 90					
ไม่ผ่านการ annealing	61.36±0.16b	66.70±0.06b	72.41±0.35b	11.05±0.50a	8.29±1.05b
ผ่านการ annealing	68.47±0.08a	71.58±0.37a	74.74±0.44a	6.27±0.33b	9.72±0.33a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	7.11	4.88	2.33	-4.78	1.43
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23					
ไม่ผ่านการ annealing	72.90±1.29b	76.83±0.72b	82.11±0.77b	9.20±0.52a	9.98±0.67b
ผ่านการ annealing	76.51±0.60a	80.11±0.49a	84.21±0.42a	7.70±0.19b	11.32±0.34a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	3.61	3.28	2.10	-1.50	1.34

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 5.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้า	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเหนียว						
ไม่ผ่านการ annealing	304.92±4.12a	151.12±3.12a	153.79±1.06a	187.09±2.00a	35.96±1.12a	70.33±0.03b
ผ่านการ annealing	206.72±4.34b	138.05±4.10b	68.67±2.72b	162.19±1.98b	24.14±2.19b	76.08±0.52a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-98.20	-13.08	-85.12	-24.90	-11.82	5.75
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105						
ไม่ผ่านการ annealing	296.37±4.12a	198.12±3.12a	98.25±1.06a	303.54±2.00a	105.42±1.12 a	88.07±0.03b
ผ่านการ annealing	165.45±4.34b	123.11±4.10b	42.33±2.72b	201.08±1.98b	77.97±2.19b	91.05±0.52a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-130.92	-75.01	-55.92	-102.46	-27.45	2.98

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่า	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90						
ไม่ผ่านการ annealing	86.08±4.12a	75.50±3.12a	10.59±1.06a	132.63±2.00a	57.13±1.12a	90.88±0.03b
ผ่านการ annealing	36.97±4.34b	33.03±4.10b	3.94±2.72b	64.53±1.98b	31.50±2.19b	95.45±0.52a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-49.11	-42.47	-6.65	-68.10	-25.63	4.57
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23						
ไม่ผ่านการ annealing	221.09±0.59a	166.00±0.11a	55.09±0.47a	293.83±1.41a	127.84±1.29a	88.05±0.07b
ผ่านการ annealing	125.78±4.02b	115.25±0.16b	10.53±2.59b	209.28±2.47b	94.03±4.63b	92.10±0.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-95.31	-50.75	-44.56	-89.55	-33.81	4.05

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 5.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งพลารัวข้าวใหม่พันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งพลารัวข้าวใหม่	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเหนียว						
ไม่ผ่านการ annealing	182.12±0.88a	85.38±0.88b	96.75±0.01a	106.84±0.94b	21.46±0.05a	70.28±0.03b
ผ่านการ annealing	145.17±0.23b	99.34±0.47a	45.84±0.23b	118.13±0.53a	18.79±0.06b	75.45±0.49a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-36.95	13.96	-50.91	11.29	-2.49	5.17
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105						
ไม่ผ่านการ annealing	235.79±0.88a	162.05±0.88a	73.75±0.01a	228.04±0.94a	66.00±0.05a	86.40±0.03b
ผ่านการ annealing	172.28±0.23b	121.70±0.47b	50.59±0.23b	184.28±0.53b	62.58±0.06b	90.47±0.49a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-63.51	-40.35	-23.16	-43.76	-3.42	4.07

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90						
ไม่ผ่านการ annealing	101.38±0.88b	86.75±0.88b	14.63±0.01a	137.00±0.94b	50.25±0.05a	90.90±0.03b
ผ่านการ annealing	105.33±0.23a	94.00±0.47a	11.34±0.23b	144.84±0.53a	50.83±0.06a	92.50±0.49a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	3.95	7.25	-3.29	7.84	0.58	1.60
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23						
ไม่ผ่านการ annealing	199.09±1.65b	147.46±1.94b	51.63±3.65a	241.92±3.43b	94.46±1.36ab	84.40±3.46a
ผ่านการ annealing	208.88±0.77a	160.25±2.01a	48.63±2.76b	253.00± 0.46a	92.75±2.47b	84.03±0.03a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	9.79	12.79	-3.00	11.08	-1.71	-0.37

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 5.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่างๆ 4 พันธุ์ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

พันธุ์ของแป้งสตาร์ชข้าว	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเหนียว						
ไม่ผ่านการ annealing	210.46±4.12a	73.87±3.12a	136.58±1.06a	86.66±2.00a	12.79±1.12b	70.30±0.03b
ผ่านการ annealing	179.91±4.34b	54.25±4.10b	125.66±2.72b	62.83±1.98b	10.08±2.19a	73.60±0.52a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-30.55	-19.62	-10.92	-23.83	-2.71	3.30
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105						
ไม่ผ่านการ annealing	161.92±0.88a	140.50±0.88b	21.42±0.01a	176.84±0.94a	36.34±0.05a	74.25±0.03b
ผ่านการ annealing	153.55±0.23b	139.75±0.47a	13.80±0.23b	167.00±0.53b	27.25±0.06b	83.20±0.49a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-8.37	-0.75	-7.62	-9.84	-9.09	8.95

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

พันธุ์ของแป้งสาลีข้าว	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์สุพรรณบุรี 90						
ไม่ผ่านการ annealing	126.78±0.88a	110.92±0.88a	15.86±0.01a	123.75±0.94a	12.83±0.05a	87.80±0.03b
ผ่านการ annealing	105.00±0.23b	91.88±0.47b	13.13±0.23b	106.08±0.53b	14.21±0.06a	91.70 ±0.49a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-21.78	-19.04	-2.73	-17.67	1.38	3.90
ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23						
ไม่ผ่านการ annealing	157.33±0.59a	136.96±0.11a	20.37±0.47b	169.21±1.41a	32.25±1.29b	82.02±0.07b
ผ่านการ annealing	134.00±4.02b	106.50±0.16b	27.50±2.59a	151.29±2.47b	44.79±4.63a	84.85±0.07a
(ผ่าน-ไม่ผ่านการ annealing) (Δ)	-23.33	-30.46	7.13	-17.92	12.54	2.83
ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)						

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

การ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7°C นาน 3 วัน ทั้งในน้ำ 65 และ 75% โดยน้ำหนัก เป็นสถานะที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนและจัดเรียงตัวของอะมิโลสในชั้นอสัณฐานให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกเกิดการพันเกลียวคู่กันที่เป็นระเบียบ และเหมาะสมมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงและมีความ homogeneous มากขึ้น ดังสังเกตจากค่า T_0 , T_p และ T_c ที่สูงขึ้น ซึ่งค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เพิ่มขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียวเก่า และพบปรากฏการณ์เดียวกันนี้ในแป้งสตาร์ชของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ แต่ไม่พบในแป้งฟลาวัวร์ของข้าวใหม่ทั้ง 2 พันธุ์ ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่ และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เพิ่มขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่าทั้ง 2 พันธุ์ดังกล่าว ซึ่งหลังจากการ annealing แล้วทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของข้าวเหนียวเก่าและใหม่ไม่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้การ annealing จึงสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพแป้งข้าวเหนียวได้ สำหรับคุณสมบัติด้านความหนืดนั้น ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่เป็นข้าวเก่า แป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 หลังการ annealing มีค่าสูงขึ้น แต่ความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด เบรกดาวน์ ความหนืดสุดท้าย และเซตแบค มีค่าต่ำลง โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7°C ในน้ำทั้ง 65 และ 75% โดยคุณสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่ที่มีการผ่าน annealing มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ annealing ดังนั้นจึงสามารถคัดแปรแป้งข้าวเก่าและใหม่ให้มีคุณสมบัติทางด้านความหนืดตามที่ต้องการได้ โดยการแปรระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่วนกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการ annealing ความเก่า-ใหม่ของข้าว และพันธุ์ข้าว

การ annealing ที่สถานะที่เหมาะสมทำให้ค่า ΔT_0 ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่าและใหม่ และแป้งสตาร์ชของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 สูงกว่าข้าวในกลุ่มที่มีกิ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 6-12 ใกล้เคียงกันคือข้าวเหนียว และข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และยิ่งสูงกว่าข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ซึ่งเป็นข้าวในกลุ่มที่มีอะมิโลสสูงเหมือนกัน หลังการ annealing ที่สถานะที่เหมาะสมพบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่าและแป้งสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น แต่คุณสมบัติทางด้านความหนืดขณะร้อนและเย็นต่ำลง ส่วนคุณสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่ที่มีการผ่าน annealing มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเก่าและใหม่ และแป้งสตาร์ชของข้าวแต่ละพันธุ์มีค่าแตกต่างกันตามพันธุ์ข้าว ส่วนกำลังการพองตัว การละลาย และ

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าและใหม่ และแป้งสตาร์ชหลังการ annealing ที่สภาวะที่เหมาะสมมีค่าลดลง เนื่องจากการ annealing ที่สภาวะที่เหมาะสมทำให้เม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น เม็ดแป้งจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่การละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 มีค่าสูงขึ้น ซึ่งระดับการลดลงของกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวและใหม่ และแป้งสตาร์ชขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และความเก่า-ใหม่ของข้าว รวมทั้งผลการเตรียมแป้งสตาร์ช และจากการที่เมื่อผ่านการ annealing แล้วเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ลดการกระจายตัวของอะมิโลส และอะมิโลเพกติน ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชสูงขึ้น โดยที่โครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชหลังการ annealing ยังคงเป็นแบบ A เหมือนเดิม

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ออบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (°C) นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความ รอนจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว
3. ออบตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิ 105°C นาน 5-6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอนจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้นที่แน่นอน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

2. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มีดซิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสม คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380°C จนได้สารละลายใสปล่อยให้เย็น
5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิตซ์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น

6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด เรียบร้อยแล้ว ไปรับรองของเหลวที่กั่นโดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควมแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้
7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนัก และทำการกั่นที่ประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควมแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
8. ไตเตรตสารละลายที่กั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. ทำ blank และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง
10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{(A-B)N \times 1.4 \times F}{W}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตกับ blank (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)
 - F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 5.25
 - W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบด้วยแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบไฟฟ้าทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อให้มิดชิดและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอกเลต
4. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในขวดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควมแน่น และเปิดสวิทช์ให้ความร้อน ใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง

6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว
7. คำนวณปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักไขมันก่อนอบ}}$$

4. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ทำตามวิธี Colorimetric ของ Juliano (1971) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วย เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้อะมิโลสบริสุทธิ์ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

วิธีการ

1. ชั่งแป้งมา 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรตาม 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 95% ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าเบาๆ
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
4. ปั่นกวนตัวอย่างด้วยเครื่องแท่งแม่เหล็ก นาน 10 นาที ให้เป็นแป้ง แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
5. เตรียมขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร ชุดใหม่ เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร กรดเกลือเชียลอะซิติกปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร (ไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร)
6. ดูดน้ำแป้ง ตาม 4 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 100 นาที
7. วัดความเข้มของสีของสารละลายตาม 6 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตร แล้วปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (ศูนย์)
8. ทำ blank โดยเติม กรดเกลือเชียลอะซิติก ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
9. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ ไปใช้ในการหาปริมาณอะมิโลส โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้

การเขียนกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท แล้วดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่างตามวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง 3-4 ได้เป็นสารละลายมาตรฐาน

2. เตรียมขวดปรับปริมาตรขนาดความจุ 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด เติมน้ำกลั่นขวดละ 70 มิลลิลิตร เติมกรดเกลือเชียวอะซิติก ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ในขวดที่ 1 ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตรในขวดที่ 2 ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร ในขวดที่ 3 ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ในขวดที่ 4 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ในขวดที่ 5 ตามลำดับ แล้วเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. คูดสารละลายมาตรฐานจาก 1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรซึ่งเทียบเท่าปริมาณอะมิโลส 8% 16% 24% 32% และ 40% ตามลำดับ ใส่ในขวดที่เตรียมไว้ในข้อ 2 เติมน้ำกลั่น เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร โดยปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (ศูนย์)
4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับปริมาณอะมิโลสในสารละลายมาตรฐานจากข้อ 3 มาเขียนเป็นเส้นกราฟมาตรฐาน
5. นำเส้นกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 4 มาใช้แปลงค่าการดูดกลืนแสงให้เป็น%(โดยน้ำหนัก) ของอะมิโลสในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติของแป้งตาร์ชข้าว

1. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งตาร์ช

วิธีการ

1. ใส่แป้งลงในอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ จากนั้นเกลี่ยผิวหน้าแป้งตาร์ชให้เรียบ
2. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray power diffractometer เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 ต่อนาที
3. บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้ และคำนวณค่าความเป็นผลึกโดยเปรียบเทียบ relative crystallinity โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Cheetam and Tao (1998) ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ relative crystallinity} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคปรากฏที่มุม } 15^\circ, 17^\circ, 18^\circ \text{ และ } 23^\circ \text{ (A)} \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมด (B)}}$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณมอลโทสของแป้งตาร์ชที่ผ่านการย่อยด้วยกรด

ทำตามวิธี Colorimetric ของ Dubois et al. (1956) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้อะไมโลสบริสุทธิในการสร้างกราฟมาตรฐาน

วิธีการ

1. ชั่งแป้งตาร์ช 5.0 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรตาม 500 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 15.3% ปริมาตร 100 ลิตร เขย่าเบาๆ
3. แล้วนำไปแช่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 20 และ 30 วัน และเขย่าด้วยมือเบาๆ ทุกวัน
4. ดูดส่วนใสปริมาตรให้เป็น 0.6 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองฝาเกลียวขนาด 13x100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายฟีนอลลงไป 0.3 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอด แล้วนำไปปั่นให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 วินาที

5. ค่อยๆเติมกรดกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 93.8% ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ลงไป ปิดฝาหลอด แล้วนำไปปั่นให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 วินาที
6. ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
7. วัดความเข้มข้นของสีของสารละลายตามข้อ 6 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 490 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank แล้วปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (ศูนย์)
8. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ ไปใช้ในการหาปริมาณมอลโทส โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้

การทำกราฟมาตรฐานของสารละลายมอลโทส

1. บีบเปิดสารละลายมอลโทสมาตรฐาน ความเข้มข้น 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ทุกหลอด
2. เติมสารละลาย DNS 2 มิลลิลิตร
3. ต้มในน้ำเดือด 5 นาที แล้วแช่น้ำให้เย็นทันที
4. เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ปั่นให้เข้ากัน
5. ทำ blank ใช้ น้ำกลั่น แทนสารละลายมอลโทส
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร โดยปรับค่า blank เป็น 0
7. เขียนกราฟมาตรฐาน ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสารละลายมอลโทส (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

ประวัติผู้เขียน

เบญจลักษณ์ ศิริบุรณ เกิดเมื่อวันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดนครพนม เข้ารับการ
ศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสันตยานันท์ และจบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรง
เรียนปิยะมหาราชาลัย ในปี พ.ศ. 2540 ได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอาหารและโภชนศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในปี พ.ศ. 2544 ภายหลังได้
เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีอาหาร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี
พ.ศ. 2547