



รายงานการวิจัย

การดัดแปรทางกายภาพแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลัง
(Physical Modification of Rice Flour/Starch and Tapioca Starch)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้ร่วมวิจัย

ดร. เทวี ทองแดง

รองศาสตราจารย์ ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548-2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2548-2549 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าว อุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าว และบริษัทสงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง เพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัยเหล่านี้ คือ นางสาวเบญจลักษณ์ ศิริบุรณ นางสาวสุรีย์พร บุญนา นางสาวนราพร ดาลัย นางสาวรววิภัลยา เกียรติพงษ์ลาภ และ นางสาวแสงเดือน ศรีแก้ว จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษากการดัดแปรแป้งทางกายภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ คือ ฟรีเจเลติไนซ์ การใช้ความร้อนขึ้น (HMT) และ การ annealing เพื่อเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพและเชิงหน้าที่ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ โดยการดัดแปรแป้งฟลาวร์ข้าวฟจีเจดด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณของแข็ง (10-30%) มีผลในการลดลักษณะความหนืดที่ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลูกกลิ้ง (100-130°C) ค่าอุณหภูมิของการเกิดเพสท์ (PT) และความหนืดสูงสุด (PV) เพิ่มขึ้น ซึ่งความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของแป้งฟจีเจดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับการเจลาติไนซ์ ส่วนการผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า เมื่อเพิ่มความชื้น (20, 30, และ 70%) ทำให้ลักษณะความหนืดเพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ และระดับการเจลาติไนซ์ลดลง การเพิ่มอุณหภูมิบารเล (100-170°C) มีผลในการลด PT และความหนืดสุดท้าย (FV) แต่เพิ่มการละลายน้ำของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดด

การทำ HMT ของข้าวสารพันธุ์ที่มีอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข6 ที่อุณหภูมิ 100°C ความชื้นร้อยละ 12 และ 30 เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชและฟลาวร์ของข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT มีค่า PT มากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ ส่วน PV และเซตแบค (SB) ของฟลาวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการ HMT มีค่ามากกว่าของฟลาวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ แต่การละลายและการปลดปล่อยอะมิโลสมีค่าน้อยกว่า สมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของฟลาวร์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่าฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT ทั้งสามพันธุ์ มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่า แต่ค่า ΔH ต่ำกว่าฟลาวร์จากข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ ความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction ของฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 สูงกว่าฟลาวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ

การ annealing ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ โดยแช่ข้าวห้กในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาติไนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_g) 7°C ($T_a < T_g$, 7°C) เป็นเวลา 0.5-3 วัน พบว่าแป้งฟลาวร์ของข้าวที่ผ่านการ annealing มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันที่วัดโดย DSC สูงขึ้น ค่า PT สูงขึ้น แต่ลักษณะความหนืดต่ำลง ส่วนกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ และข้าวเจ้าใหม่ลดลง สำหรับแป้งสตาร์ชของข้าวใหม่ทั้งสองพันธุ์ที่ผ่านการ annealing นั้น พบว่ามีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวสูงขึ้นและเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดทั้งในชั้นออสัญฐานและชั้นผลึกของแป้งสตาร์ชก็สูงกว่า

การดัดแปรทางกายภาพแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี annealing และ HMT มีผลในการเพิ่มค่า PT และลดค่า BD ขณะที่การดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังสามารถละลายได้ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีลักษณะความหนืดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Abstract

The physical modifications of starch with pregelatinization, heat-moisture treatment (HMT) and annealing in order to improve the physical and functional properties for application were studied. The pregelatinized rice flour was modified using drum dryer with various conditions. An increase in solid content (10-30%) resulted in the reduction of viscosity profile monitored by Rapid Visco Analyzer. An increase in drum temperature (100-130°C) increased pasting temperature (PT) and peak viscosity (PV). The water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) showed positive correlation with degree of gelatinization (DG). For production of pregelatinized rice flour by extrusion, the higher feed moisture content (20, 30 and 70%) increased the viscosity profile, but decreased the WAI, WSI and DG. An increase in barrel temperature (100-170°C) demonstrated the lower of PT and final viscosity (FV) and a higher of WSI of extrudated rice flour.

The HMT of rice with different amylose contents of Suphanburi 90, Khaodokmali 105 and RD6 was conducted at 100°C with the moisture content of 12 and 30% for 0.5 and 1 h. The PT of rice flour and starch from all rice varieties was increased when compared with the non-HMT. The PV and SB of HMT rice flour from all varieties were higher than those of non-HMT. However, the solubility and amylose leaching were lower. The gelatinization properties measured using a Differential Scanning Calorimeter (DSC) showed that the gelatinization temperature of HMT rice flour shifted to a higher temperature but the lower ΔH was founded. The HMT rice flour from Suphanburi 90 and Khaodokmali 105 showed that the relative crystallinity which analyzed using a X-ray diffraction was higher than the non-HMT.

The broken waxy rice (RD 6) and regular rice (RD 23) with and without aging was annealed by soaking in water at 7 and 30°C below onset gelatinization temperature (T_0) for 0.50-3 days. After annealing, the gelatinization temperature, which was measured using DSC, and PT of rice flour was higher but the viscosity profile was lower. The swelling power, solubility and amylose leaching of annealed aged and unaged waxy rice flour and annealed unaged regular rice flour were decreased. After annealing of rice starch from two varieties, the gelatinization temperature and acid hydrolysis in the amorphous and crystalline region were also higher.

The physical modification of tapioca starch using annealing and HMT resulted in a higher PT and a lower BD. The modification using drum dryer and extrusion showed that the modified tapioca starch was able to solubilize at 25°C. The modified tapioca starch using drum dryer illustrated higher viscosity profile than that of extrusion.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
2. วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	3
3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	10
1. การผลิตแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจล.....	10
1.1 วัตถุดิบ.....	10
1.2 การเตรียมแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจลลาติไนซ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	10
1.3 การเตรียมแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจลลาติไนซ์ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	10
1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	11
1.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	13
2. การดัดแปรแป้งข้าว โดยการให้ความร้อนขึ้น.....	13
2.1 การทำ HMT ข้าว.....	13
2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	14
2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	16
3. การดัดแปรแป้งข้าว โดยวิธี annealing.....	17
3.1 วัตถุดิบ.....	17
3.2 กระบวนการ annealing.....	17
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าว 2 ชนิด.....	19
3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของแป้งข้าว 2 ชนิด.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. การตัดแปรทางกายภาพแป้งมันสำปะหลัง.....	23
4.1 วัตถุประสงค์.....	23
4.2 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการ annealing.....	23
4.3 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการ heat moisture treatment.....	23
4.4 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการเอกซ์ทรูชัน.....	23
4.5 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	24
4.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	24
4.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	24
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	25
1. ผลของสภาวะและวิธีการผลิตต่อคุณภาพของแป้งข้าวพรีเจล.....	25
1.1 ผลของสภาวะการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ต่อคุณภาพของแป้งพรีเจล.....	25
1.2 ผลของสภาวะการตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ต่อคุณภาพของแป้งพรีเจล.....	28
1.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแป้งข้าวพรีเจลจากการตัดแปร ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	34
2. ผลของการให้ความร้อนขึ้นต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว.....	35
2.1 ผลของการทำ HMT ข้าวสาร.....	35
3. ผลของการ annealing ต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว.....	42
3.1 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าว.....	42
3.2 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าว.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจาก เม็ดแป้งฟลาวร์ข้าว.....	57
3.4 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิด เจลาติโนเซชันของแป้งสตาร์ชข้าว.....	67
3.5 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชข้าว.....	79
3.6 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการย่อยด้วยกรด ของแป้งสตาร์ชข้าว.....	79
3.7 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการ เปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าว.....	83
3.8 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง ของแป้งสตาร์ชข้าว.....	86
4. ผลของวิธีการตัดแปรทางกายภาพแป้งมันสำปะหลังต่อลักษณะความหนืด.....	89
บทที่ 4 บทสรุป.....	91
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก.....	98
ประวัติผู้วิจัย.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ลักษณะความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ผลิตโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	26
2 ความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ผลิตโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	27
3 ความสามารถในการละลาย การดูดซับน้ำและระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ผลิตโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	28
4 ลักษณะความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	30
5 ความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายของแป้งข้าวตัดแปรทางกายภาพโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	33
6 ลักษณะความหนืด ระดับการเจลาติไนซ์ และความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของแป้งข้าวพรีเจลที่ได้จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่และกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	34
7 ลักษณะความหนืดของสตาร์ชข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการHMT.....	36
8 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT.....	37
9 ลักษณะความหนืดของฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT.....	38
10 กำลังการพองตัว (SP) การละลาย (WSI) และปลดปล่อยอะมิโลส (AML) ของฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT.....	39
11 ค่า T_p , ΔT และ ΔH ของฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT.....	41
12 ปริมาณ relative crystallinity.....	41
13 ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส.....	42
14 T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....	44

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
15	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่า พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....46
16	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่ พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....48
17	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่ พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....50
18	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า และข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....54
19	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่า และข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....55
20	ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....58
21	ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....60
22	ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....62
23	ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....64
24	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียว พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....77
25	T_0, T_p, T_c, T_c-T_0 และ ΔH ของเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า พันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing.....78
26	ลักษณะความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....84
27	ลักษณะความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่าน และไม่ผ่านการ annealing.....85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
28	ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังหลังจากการตัดแปรทางกายภาพ ด้วยวิธีการต่างๆ.....	90

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ผลของตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเจลาติไนซ์ของแป้ง ฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเคต.....	32
2 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%.....	68
3 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%.....	69
4 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%.....	70
5 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%.....	71
6 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%.....	72
7 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%.....	73
8 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%.....	74
9 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%.....	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
10 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C.....	80
11 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C.....	81
12 การย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ก) และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 (ข) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 1 และ 3 วัน.....	82
13 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C.....	87
14 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C.....	88

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2544 ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้ 25 ล้านตัน โดยมีการส่งออกทั้งในรูปข้าวเปลือกและข้าวแปรรูป แต่ในอนาคตคาดว่า การค้าข้าวจะมีการแข่งขันกันสูง และประเทศผู้นำเข้าข้าวจากไทยจะผลิตข้าวได้เองมากขึ้น ทำให้ความต้องการจากไทยลดลง (ข่าวธุรกิจในประเทศ, 2542) ดังนั้นการแปรรูปอาหารจากข้าวเพื่อส่งขายภายในและต่างประเทศจึงเป็นทางออกอีกทางหนึ่งและเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ข้าวให้สูงขึ้น ซึ่งในปี 2544 กลุ่มของข้าวแปรรูปมีการส่งออกมีมูลค่า 5,766.7 ล้านบาท โดยแบ่งข้าวเจ้าและแบ่งข้าวเหนียวมีการส่งออกที่มีมูลค่าสูงในกลุ่มอันดับต้นๆ คือ 1,729.4 ล้านบาท (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2546)

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งมันสำปะหลังที่ผลิตได้ มีการนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ใช้บริโภคเป็นอาหารโดยตรง ใช้ในอุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด และอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ประเทศไทยมีกำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลังปีละ 2.5-3.0 ล้านตัน เป็นประเทศที่ผลิตแป้งมันสำปะหลังและส่งออกมากที่สุดในโลก ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังของไทยยังมีการลงทุนและขยายกำลังผลิตอย่างต่อเนื่อง (เสรี, 2545) ในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังนี้มีการนำแป้งมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์หลายด้านทั้งในอุตสาหกรรมที่เป็นอาหารและไม่ใช่อาหาร เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, แป้งตัดแปร, ใช้ทำผงชูรสและไลซีน, เป็นสารให้ความหวานเป็นต้น (กล้าณรงค์ และคณะ, 2542) ปัจจุบันอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรในประเทศไทยทั้งหมดเป็นแป้งมันสำปะหลังตัดแปรทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีการที่สังคมปัจจุบันมองในเรื่องของความปลอดภัยเมื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่อย่างไรก็ตามความจำเป็นของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรทางเคมีก็ยังคงมีอยู่มาก เนื่องจากสมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์บางชนิด

การตัดแปรแป้งทางกายภาพเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่เกิดความเชื่อมั่นได้ในด้านของความปลอดภัยที่ปราศจากสารเคมี เป็นวิธีการทางเลือกหนึ่งที่อุตสาหกรรมแป้ง โดยเฉพาะแป้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกำลังให้ความสนใจ ซึ่งหากวิธีการนี้สามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนวิธีการทางเคมีก็จะได้แป้งตัดแปรที่ปราศจากสารเคมีและมีสมบัติตามที่ต้องการเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็น

ส่วนผสมอาหาร (food ingredients) และอีกทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายจากสารเคมีอีกด้วย โดยทั่วไปการใช้ประโยชน์จากแป้งธรรมชาติและแป้งดัดแปรทางเคมีเป็นส่วนผสมอาหาร ก็เพื่อให้ทำหน้าที่ให้ความชื้นหนืด ให้ความแข็งแรงของเจล ให้ความคงตัว ให้จับน้ำไว้ในโครงสร้างอาหาร ให้เนื้อสัมผัสเป็นต้น โดยมีการใช้อย่างหลากหลายในอาหารพวกซूप ซอส ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์เนื้อ ผลิตภัณฑ์นม น้ำสลัด เครื่องดื่ม ไอศกรีม เป็นต้น (Lillford and Morrison, 1997) การดัดแปรทางกายภาพมีหลายวิธีการ เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch), แป้งละลายน้ำเย็น (granular starch), การให้ความร้อนชื้น (heat moisture treatment) และการ Annealing เป็นต้น การทำแป้งพรีเจลาสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (drum dryer) และการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2543) รายงานเกี่ยวกับการผลิตแป้งพรีเจลาด้วยการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ยังมีน้อยมาก ซึ่งการผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้ มีข้อได้เปรียบกว่าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ คือ ใช้พลังงานน้อยกว่า ให้ผลผลิตมากกว่าและประสิทธิภาพในการผลิตดีกว่า ปัจจุบันการผลิตแป้งพรีเจลาในประเทศไทยทั้งหมดใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ยังไม่มีการผลิตจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เลย หากจะมีการใช้เครื่องจักรประเภทนี้เพื่อการผลิตแป้งพรีเจลา ควรมีการศึกษาถึงผลสภาวะการแปรรูปต่อคุณสมบัติของแป้งพรีเจลาที่ได้ เนื่องจากหลักการในการแปรรูปนั้นมีส่วนที่แตกต่างกัน จึงอาจมีผลให้คุณสมบัติของแป้งพรีเจลาที่ได้แตกต่างกัน นอกจากนี้การผลิตแป้งพรีเจลาจากเอกซ์ทรูเดอร์อาจทำให้ได้ลักษณะแป้งดัดแปรทางกายภาพที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ได้

การให้ความร้อนชื้นเป็นการให้ความร้อนสูงในสภาพที่มีน้ำน้อย ซึ่งมีรายงานว่าทำให้อุณหภูมิการหลอมละลาย (melting temperature, T_m) เปลี่ยนแปลงไป โดยทำให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้นจากเดิม และมีผลในการเปลี่ยนประเภทผลึกของแป้ง การให้ความร้อนชื้นแก่แป้งเป็นแนวทางหนึ่งในการดัดแปรทางแป้งให้แป้งมีคุณสมบัติแตกต่างจากเดิม เพื่อการใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์บางประเภท โดยกลุ่มนักวิจัยของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ทำการวิจัยเรื่องนี้ในแป้งมันปะหลัง และได้ผลแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการที่จะพัฒนาขึ้นในระดับอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มแนวทางการพัฒนาคุณภาพแป้งมันสำปะหลัง และลดการใช้สารเคมี (สุนีย์ และคณะ, 2546) ดังนั้นการแปรรูปด้วยการให้ความร้อนชื้นจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการดัดแปรทางกายภาพแป้งข้าวอีกด้วย เพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืด ให้สามารถใช้เป็นส่วนผสมอาหาร (food ingredients) เพื่อทดแทนแป้งข้าวโพดดัดแปรทางเคมีบางประเภท เพื่อช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศและเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ภายในประเทศอีกด้วย

การ Annealing เป็นการใช้ความร้อนกับเม็ดแป้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชันเป็นเวลานาน วิธีนี้ทำให้ค่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น และมีผลต่อสมบัติทางความเหนียว (pasting property) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543) โดยหลักการของ Annealing เป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น และอาจมีผลทำให้ความเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้งที่ผ่านการ Annealing มีค่าสูงขึ้น และช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันแคบลง นอกจากนี้ก็มีผลทำให้ค่าการพองตัวและการละลายของเม็คนั้นลดลง แป้งที่ผ่านการ Annealing อาจพบได้ในกระบวนการแปรรูปแป้งทั่วไป เช่น การไม่เปียกแป้งข้าวโพด (Eliasson and Gudmundsson, 1996) นอกจากนี้กระบวนการไม่เปียกแป้งข้าวเจ้าก็อาจเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากต้องมีการแช่ข้าวเป็นระยะเวลาหนึ่ง ปรากฏการณ์นี้อาจไม่เกิดหรือเกิดในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ในกระบวนการแปรรูปแป้งข้าวเจ้าที่มีสถานะในการแปรรูปต่าง ๆ กัน งานวิจัยเรื่องนี้ในแป้งข้าวเจ้ายังมีน้อยมาก ทำให้ประเทศไทยไม่มีความรู้พื้นฐานเพื่อช่วยในการพัฒนาอุตสาหกรรมแปรรูปแป้งข้าวเจ้าให้มีคุณภาพดีขึ้นและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งปัญหาใหญ่ของอุตสาหกรรมแปรรูปแป้งข้าวเจ้าคือเรื่องคุณภาพ แม้ว่าอุตสาหกรรมแป้งข้าวในประเทศไทยส่วนใหญ่คือ ฟลาวร์ข้าว (rice flour) ปัจจุบันภาครัฐจึงเริ่มให้ความสนใจในการผลิตสตาร์ชข้าว (rice starch) แล้ว เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่สามารถขยายตัวทั้งในอุตสาหกรรมส่วนผสมอาหาร และอุตสาหกรรมที่มีใช้อาหารอีกด้วย เนื่องจากสตาร์ชข้าวมีความเฉพาะตัวและแตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลัง ดังนั้นการศึกษาถึงการคัดแปรทางกายภาพแป้งข้าว จึงควรคำนึงถึงวัตถุดิบที่เป็นฟลาวร์ (flour) และสตาร์ช (starch) ที่อาจให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน

จากที่ได้กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าการแปรรูปแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยด้วยวิธีการคัดแปรทางกายภาพนั้น เป็นทางเลือกของกระบวนการแปรรูปที่น่าสนใจ ให้ภาพพจน์เด่นชัดในเรื่องความปลอดภัย และอาจเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใหม่ในกลุ่มส่วนผสมอาหาร (food ingredients) ที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงหน้าที่ที่ดีขึ้น (functionality) นอกจากนี้ความรู้ความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่อาจเกิดขึ้นในอุตสาหกรรมเหล่านี้ อาจช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของอุตสาหกรรมแป้งในประเทศไทยให้ดียิ่งขึ้นและสามารถที่จะแข่งขันกับผลิตภัณฑ์ส่วนผสมอาหารของต่างประเทศได้

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาสถานะการคัดแปรแป้งข้าวเจ้าแบบพรีเจลาติไนซ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์แป้งคัดแปร

- 2.2 เพื่อศึกษาสภาวะการตัดแปรแบบการใช้ความร้อนขึ้นต่อข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งตัดแปร
- 2.3 เพื่อศึกษาสภาวะการตัดแปรแบบ annealing ต่อข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งตัดแปร
- 2.4 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังแบบพรีเจลาติไนซ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเอกซ์ทรูชัน แบบการให้ความร้อนขึ้น และการ annealing

3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

แป้งพรีเจลเป็นแป้งที่ผ่านการตัดแปรทางกายภาพ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถเตรียมได้จากการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งเพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชัน จากนั้นจึงนำไปทำแห้ง ซึ่งคุณสมบัติที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งธรรมชาติ โดยจะมีความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้สามารถละลายในน้ำเย็นได้ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิต โครงสร้างของเม็ดแป้งจะถูกทำลายและเป็นสาเหตุให้เม็ดแป้งเกิดการแตกหักและสูญเสียคุณสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) (Doublier et al, 1986) การผลิตแป้งพรีเจลส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryer) และกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion) ซึ่งกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อาหารธัญชาติรูปแบบใหม่ ๆ และเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและแรงทางกล (Camire et al., 1990) ซึ่งจะทำให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์บางส่วนหรือจะทำให้โครงสร้างส่วนผลึกของแป้งถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ รวมถึงการเสียดสภาพของโปรตีนและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้งกับไขมันหรือโปรตีนกับไขมัน เป็นต้น (Mercier et al., 1980) แต่อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชันในการผลิตแป้งพรีเจลยังไม่มีแพร่หลายนัก เพราะโดยส่วนมากจะมีการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดตมากกว่า ดังเช่นการศึกษาของ ILo, Liu, and Berghofer (1999) ที่ศึกษาการเอกซ์ทรูชันแป้งฟลาวร์ข้าวผสมกับ amanranth ที่ปริมาณต่างๆ ต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความหนืด อัตราการขยายตัว ความหนาแน่น และการเปลี่ยนแปลงของสี เป็นต้น นอกจากนี้ Kodan, Bryant, and Pepperman (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบจาก 70 เป็น 120°C จะส่งผลให้แป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตมีความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำได้มากขึ้น แต่จะมีผลไปลด PV, BD, FV และ SB ขณะที่ Hagenimana, Ding, and Fang (2006) ได้ทำการตัดแปรแป้งฟลาวร์ข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบสกรูที่ระดับ 200-300 รอบต่อนาที อุณหภูมิอบที่ระดับ 100-160°C และปริมาณความชื้นที่ระดับ 16-22% ซึ่งพบว่าสภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อ

ความสามารถในการดูดซับน้ำของเอกซ์ทรูเดต นอกจากนี้ยังทำให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์ไปบางส่วน เนื่องจากแสดงพฤติกรรมความหนืดที่ต่างออกไปจากแป้งฟลาวัวร์ข้าว สำหรับการคัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นวิธีที่แพร่หลายมากในการผลิตแป้งฟรีเจล เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถที่จะละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและพร้อมที่จะรับประทาน (Vlachos and Karapantsios, 2000) โดยจากการศึกษาของ Kalogia, Xynogalos, Karapantsios, and Kostoglou (2002) ซึ่งทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ของการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต่อการผลิตแป้งข้าวโพดฟรีเจล และพบว่าปริมาณของแข็งที่ระดับ 7, 10 และ 13% เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องและคุณสมบัติของแป้งฟรีเจลที่ได้ ขณะที่ตัวแปรอื่นๆ เช่น stem pressure, pool level และความเร็วของลูกกลิ้งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไปตามปริมาณของแข็ง ในปี ค.ศ. 1984 Collonna, Doublier, Melcion, Monredon, and Mercier ได้ศึกษาการคัดแปรแป้งสตาร์ช สาลีโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันศึกษาที่ อุณหภูมิ바เรล 90-180°C และปริมาณความชื้นในช่วง 19-44% ส่วนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งศึกษาที่ ปริมาณของแข็ง 45%, อุณหภูมิลูกกลิ้ง 180°C และความเร็วรอบลูกกลิ้งที่ 10 รอบต่อนาที ซึ่งพบว่า กระบวนการทั้ง 2 วิธีมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะทำลายโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินแบบสุ่ม และเมื่อเปรียบเทียบการละลายน้ำ พบว่าส่วนที่ละลายได้ของเอกซ์ทรูเดตประกอบด้วยส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่ถูก depolymerization ไปบางส่วน ซึ่งพบในอัตราส่วนเดียวกับแป้งสตาร์ชธรรมชาติ ส่วนแป้งที่ได้จากการทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีอัตราส่วนที่แตกต่างออกไป เนื่องจากในระหว่างการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ส่วนของอะมิโลสพร้อมที่จะละลายได้โดยการถูกปลดปล่อยออกมาจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง Perez-Sira, Gonzalez-Parada, and Caracas (1997) ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านการคัดแปรทางกายภาพ โดยวิธีเอกซ์ทรูชันและการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ซึ่งวิธีเอกซ์ทรูชัน ศึกษาที่ปริมาณความชื้น 10, 21 และ 25% และอุณหภูมิ바เรล 100 และ 150°C สำหรับการทำแห้ง แบบลูกกลิ้งคู่ศึกษาที่ปริมาณแป้งค่อน้ำในอัตราส่วน 1:2.5 ที่อุณหภูมิ 125°C ซึ่งพบว่าการเพิ่ม อุณหภูมิ바เรลส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังเอกซ์ทรูเดตมีความสามารถในการดูดซับและการละลายน้ำ รวมถึงค่ากำลังการพองตัวลดลง และการคัดแปรโดยการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ส่งผลให้แป้งฟรีเจลที่ได้ มีความสามารถในการดูดซับและการละลายน้ำรวมถึงค่ากำลังการพองตัวสูงกว่าการคัดแปรวิธี เอกซ์ทรูชัน

การให้ความร้อนชื้น (heat moisture treatment, HMT) กับสตาร์ช เป็นการทำให้อะมิโลส และอะมิโลเพกตินในโครงสร้างอสัณฐานอ่อนตัวไปสู่ของเหลวเหนียวหนืด และเมื่อเย็นตัวลง อะมิโลสและอะมิโลเพกตินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้ง ซึ่งไขมันและ โปรตีนที่แทรกตัวอยู่

ระหว่างเม็ดแป้งเกิดรวมกับอะมิโลสและอะมิโลเพกตินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทำให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จากการตรวจสอบมาตรฐานภายนอกของสตาร์ชที่ผ่าน HMT จากข้าวโพด ข้าวสาลี มันเทศ และมันฝรั่ง ด้วยกล้องอิเล็กตรอนไม่พบการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Kulp and Lorenz, 1981; Stute, 1992; Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996) การจัดเรียงตัวกันใหม่หลังจาก HMT ทำให้เกิดผลึกรูปแบบใหม่หรือไม่ก็ได้ขึ้นกับโครงสร้างเริ่มต้นของสตาร์ช การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffraction พบว่าสตาร์ชที่ผ่าน HMT จากพืชหัว เช่น มันฝรั่งและมันเทศ โครงสร้างจะเปลี่ยนจาก B-type เป็นแบบ A-type ส่วนสตาร์ชที่ผ่าน HMT จากธัญชาติมีโครงสร้างเป็นแบบ A-type ตามเดิมหรือเปลี่ยนเป็น C-type (Donovan et al., 1983; Stute, 1992; Hoover and Vasanthan, 1994; Kawabata et al., 1994) แต่ความเข้ม (Intensity) เพิ่มขึ้นแสดงว่ามีผลึกชนิดเดิมเพิ่มขึ้น (Donovan et al., 1983; Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีการอัดตัวกันแน่นขึ้นหรือเป็นการเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพกตินทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งแข็งแกร่งขึ้น โดยไม่มีผลให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นแต่มีผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นในส่วนของออสันฐาน เกิดจากผลึกของอะมิโลสหรือการเกาะเกี่ยวกันของอะมิโลสและไขมัน ทำให้ผลึกโตขึ้นหรือสมบูรณ์ขึ้น (Hoover and Manuel, 1996) และเมื่อตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลลาติในเซชันด้วย DSC ซึ่งในแป้งหรือสตาร์ชจะมีพีคของการเปลี่ยนแปลงของการหลอมเหลวของโครงสร้างเพียงพีคเดียวแต่เมื่อสตาร์ชธัญชาติที่ผ่านกระบวนการ HMT จะเกิดพีคเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งพีคที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งพีคดังกล่าวคือ พีคของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (Amylose-Lipid Complexes) แต่บางงานวิจัยเช่น Donovan et al. (1983) กลับไม่พบการเปลี่ยนแปลงนี้ในในสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่าน HMT แต่พบว่าปริมาณอะมิโลสลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกาะเกี่ยวกันของอะมิโลสและไขมันในระหว่างการทำ HMT จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น แต่ความกว้างที่ฐานของพีค ($T_c - T_0$) อาจกว้างหรือไม่เปลี่ยนแปลง (Eerlingen et al., 1996; Hoover and Manuel, 1996) เช่น สตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่ง และข้าวไรย์ที่ผ่านความร้อนสูง-ความชื้นต่ำ (Donovan et al., 1983) แต่เอนทาลปีลดลง (Donovan et al., 1983; Stute, 1992; Hoover et al., 1994; Eerlingen et al., 1996) หรือไม่เปลี่ยนแปลง (Hoover and Vasanthan, 1994c; Eerlingen et al., 1996; Hoover and Manuel, 1996)

ลักษณะทางความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA พบว่า อุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลสูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน HMT แต่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ต่ำกว่า ส่วนความหนืดสุดท้าย (final viscosity) อาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าขึ้นกับสถานะในการให้ความร้อนสูง-ความชื้นต่ำ เช่น แป้งสตาร์ชมันสำปะหลัง (Lorenz and Kulp, 1982; Abraham, 1993), ข้าวโพด (Schierbaum and Kettlitz, 1994; Franco et al., 1995; Hoover and Manuel, 1996), ข้าวสาลี (Kulp and Lorenz, 1981),

ข้าวไรย์ (Schierbaum and Kettlitz, 1994) และมันเทศ (Hoover and Vasanthan, 1994) ซึ่งกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชลดลงด้วย แสดงให้เห็นว่าความแกร่งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความร้อนสูง-ความชื้นต่ำแก่สตาร์ช จึงทำให้การย่อยด้วยกรดลดลง

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 แล้วชั้นอสัณฐาน (amorphous) ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น และอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น 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 ต่อแป้งสตาร์ชข้าวโพด พันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ธรรมดาที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน 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 ภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งในแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดามีปริมาณอะมิโลสภายในชั้นอสัณฐานมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว จึงส่งผลให้ค่า T_0 และ T_p แป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ธรรมดาสูงขึ้นมากกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน ($T_c - T_0$) แคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing โดยพบว่าช่วง $T_c - T_0$ ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบกว่าพันธุ์ธรรมดา เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียว double helices (ΔH เพิ่มขึ้น) พบว่าค่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดทั้ง 2 พันธุ์ที่ผ่านการ annealing แล้ว มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing และยังพบอีกว่า ΔH ของแป้งสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ธรรมดา นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1992 Stute ได้ทำการศึกษาถึงผลของการ annealing แป้งสตาร์ชมันฝรั่งนาน 14 และ 95 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 52°C พบว่าค่า ΔH ไม่เปลี่ยนแปลง

หลังจากการ annealing อธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชั้นผลึกอาจมีความสมบูรณ์มากขึ้น ในปี ค.ศ. 2003 Nakazawa and Wang พบว่าการ annealing อาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปย่อยชั้นผลึกได้ง่ายและมากขึ้น แม้ว่าการทำ annealing จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของผลึก ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง XRD พบว่าชนิดของผลึกยังคงเป็นแบบเดิมเหมือนกับแป้งสตาร์ชที่ไม่ผ่านการ annealing (Stute, 1992)

Jacob et al. (1995) ได้ศึกษาผลของการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดโดยทำการ annealing ในสถานะที่ใช้ น้ำ 66.7% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 3-4% องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชมันฝรั่ง, แป้งสตาร์ชถั่วลิสง และแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าเมื่อผ่านการทำ annealing แล้ว ความหนืดของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวในชั้นผลึก ความสามารถในการพองตัว (swelling) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (amylose leaching) ของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด แต่พบว่าในทุกแป้งสตาร์ชเมื่อผ่านการ annealing แล้วมีความหนืดสุดท้ายเมื่อปล่อยให้เย็นลงสูงขึ้น

จากรายงานข้างต้นที่กล่าวมาแล้วว่าหลังการ 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 ต่อผลของการ annealing ในแป้งสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำ annealing ที่นานขึ้น ทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างการ annealing อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นอสัณฐาน และชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวเพื่อลดความไม่เป็นระเบียบตลอดระยะเวลาในการ annealing จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุดและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ ต่อการเกิด annealing ด้วย Nakazawa and Wang (2003) ได้แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing คือ 40, 45, 50, 55, 60 และ 65°C โดยใช้ปริมาณน้ำ 75% เป็นเวลา 44 ชั่วโมง ในแป้งสตาร์ชข้าวโพด, แป้งสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว, แป้งสตาร์ชข้าวสาลี, แป้งสตาร์ชสาคู, แป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Hylon V) และแป้งสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูงมาก (Hylon VII) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลของการศึกษาของ Tester et al. (1998) ที่ศึกษาถึงผลของระยะเวลา อุณหภูมิ และปริมาณน้ำ ต่อผลของการ annealing ในแป้งสตาร์ชข้าวสาลี ซึ่งใช้ระยะเวลา 1 ถึง 6 วัน ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C (ต่ำกว่า T_0 25, 15 และ 5°C

ตามลำดับ) โดยใช้ปริมาณน้ำตั้งแต่ 12-90% พบว่าที่ระยะเวลา 3 วัน ทำให้เกิดผลของการ annealing เพิ่มขึ้นมากที่สุด และไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำ annealing ให้นานกว่า 3 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำ annealing สูงขึ้น ทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำ 60% ในการทำให้เกิดผลของ annealing เพิ่มขึ้นมากที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำให้มากกว่า 60% พบว่าผลของ annealing ไม่ต่างจากการใช้ปริมาณน้ำ 60% ในการทำ annealing

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจล

1.1 วัตถุดิบ

แป้งฟลาวัวร์ข้าวทางการค้าจากบริษัทปทุมไรชมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีปริมาณอะมิโลส 27%

1.2 การเตรียมแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลลาติไนซ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณของแข็ง 2 ระดับ ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 2 ระดับ และอุณหภูมิของลูกกลิ้ง 2 ระดับ ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำแป้งฟลาวัวร์ข้าวที่ปริมาณของแข็ง 10 และ 30% (wb) จากนั้นนำมาป้อนเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer 6 x 8, New Way Manufacturing Co, Ltd. Thailand) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ 1.5 มิลลิเมตร และปรับความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 2 ระดับ คือ 0.54 รอบต่อนาที (70 Hz.) และ 0.97 รอบต่อนาที (120 Hz.) โดยตั้งค่าอุณหภูมิของลูกกลิ้งไว้ที่ 100 และ 130°C จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) แล้วนำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) เก็บตัวอย่างแป้งพรีเจลที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

1.3 การเตรียมแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลลาติไนซ์ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณความชื้น 3 ระดับ ความเร็วรอบสกรู 2 ระดับ และอุณหภูมิของบารเรล 2 ระดับ การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการปรับความชื้นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวให้ได้ประมาณ 15% จากนั้นนำมาใส่ในถังป้อนวัตถุดิบ (K-Tron International, Piman, NJ, USA) ที่ป้อนด้วยอัตราค่าที่ผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (MPF19:25 APV Beaker company, UK) โดยทำการเรียงสกรูแบบ half product ใช้ความเร็วรอบสกรู 150 และ 300 รอบต่อนาที, ควบคุมอุณหภูมิบารเรล 2 ระดับ ดังนี้ แบบอุณหภูมิบารเรลต่ำ ประกอบด้วย zone 1: 50°C, zone 2: 70°C, zone 3: 90°C และ zone 4: 100°C และแบบอุณหภูมิบารเรลสูง ประกอบด้วย zone 1: 90°C, zone 2: 110°C, zone 3: 140°C และ zone 4: 170°C และปรับความชื้นของกระบวนการเอกซ์ทรูชันให้ได้ 20, 30 และ

70% โดยควบคุม moisture feed rate ที่ใช้ peristaltic pump จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านออกจากหัวแบบ (die plate) ไปอบที่ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50°C จนกระทั่งมีค่าความชื้นคงที่ประมาณ 8% นำตัวอย่างแป้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) นำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) และเก็บตัวอย่างแป้งที่มีขนาดอนุภาค ตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

1.4.1 ลักษณะความหนืด (viscosity profile)

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA-4, Newport Science, Australia) โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร และทำการเขย่า paddle ขึ้นลงเพื่อให้ตัวอย่างเปียก จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม profile extrusion 1, no alcohol ซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 25-95°C และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของการเกิดเพสท์ (pasting temperature, PT) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity, PV) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity, TV) เบรกคาวน์ (break down, BD) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity, FV) และเซตแบค (setback, SB)

1.4.2 ความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ brookfield

การวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง brookfield ของแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจลที่เตรียมโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ใช้วิธีการของ Singh, Kaur, Singh, and Sekhon (1999) โดยทำการผสมตัวอย่างแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจล 8 กรัม กับน้ำ DI 80 กรัม จากนั้นนำไปกวนผสมที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 90 นาที และนำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ค่า apparent dispersion viscosity (η) ด้วยเครื่อง Brookfield viscometer (DV-III Ultra, Brookfield Engineering Laboratories Inc., USA) ที่ความเร็ว 2 และ 20 รอบต่อนาที โดยใช้เข็มหมายเลข 21 (spindle special No. 21) และทำการคำนวณค่า shear-thinning index (STI) จากอัตราส่วนของ apparent dispersion viscosity ที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาทีต่อความเร็ว 20 รอบต่อนาที และวิเคราะห์ค่า apparent dispersion viscosity ที่ 80°C (η_{80}) โดยนำสารละลายแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจลมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 90 นาที ที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที โดยใช้เข็มหมายเลข 21

1.4.3 การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน

ระดับการเกิดเจลาตินในเซชันวิเคราะห์ตามวิธีการของ Chiang and Jhonson (1997) โดยหลอดที่หนึ่งเตรียมตัวอย่างแบ่งที่ถูกเจลาตินในเซชันทั้งหมด โดยเตรียมตัวอย่างแบ่งให้มีความเข้มข้น 2% และนำไปเข้าหม้อนิ่งความดันไอที่ 120°C ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมกับเมทานอลปริมาตร 3 เท่า ปั่นด้วยความเร็วสูง แล้วล้างด้วยเมทานอลอีก 2 ครั้ง นำไปกรองและทำให้แห้ง แล้วบดตัวอย่างที่ได้ผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช และชั่งตัวอย่างแบ่งที่ได้ 20 มิลลิกรัม ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที แล้วจึงเติมสารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และหลอดที่สองทำการเตรียมตัวอย่างที่เกิดเจลาตินในเซชันบางส่วน โดยชั่งแบ่ง 20 มิลลิกรัม ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์กิลูโคอะมิเลส ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงไปในแต่ละหลอด และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 และ 60 นาที เมื่อครบเวลาเติมสารละลาย Trichloroacetic acid (TCA) ความเข้มข้น 25% ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เพื่อยับยั้งและตกตะกอนเอนไซม์ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 12,000 xg เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสที่ได้ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย O-toluidine ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที ทำให้เย็นทันทีและเติมกรดอะซิติกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณระดับการเจลาตินในเซชันจากสูตร

$$Y = 100(B-k) / (A-k)$$

โดย $k = A(C-B) / A - 2B + C$

เมื่อ $Y =$ ระดับการเจลาตินในเซชัน (%)

$A =$ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเจลาตินในเซชันทั้งหมด

$B =$ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเจลาตินในเซชันบางส่วน หลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 30 นาที

$C =$ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เจลาตินในเซชันบางส่วน หลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 60 นาที

$k =$ ค่าคงที่การดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างหลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 30 นาที

1.4.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับและการละลายน้ำ

ความสามารถในการดูดซับและการละลายน้ำวิเคราะห์โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Anderson et al. (1969) โดยทำการชั่งตัวอย่างแป้งหนัก 0.5 กรัม ใส่ลงในหลอดเหวี่ยง จากนั้นเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที (ที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อครบเวลาดำเนินเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วแยกเอาส่วนน้ำใส (supernatant) ใส่ลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักและชั่งน้ำหนักส่วนใสก่อนทำการระเหยจนแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักที่เหลือหลังอบเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาส่วนที่สามารถละลายได้ และชั่งน้ำหนักส่วนตะกอนแป้งในหลอดเหวี่ยง เพื่อนำมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งจากสูตร

$$\text{Water solubility index (WSI, \%)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (dry basis)}} \times 100$$

$$\text{Water absorption index (WAI, g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนแป้งหลังปั่นเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (dry basis)}}$$

1.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

2. การดัดแปรแป้งข้าวโดยการให้ความร้อนชื้น (heat-moisture treatment, HMT)

2.1 การทำ HMT ข้าว

ใช้ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน จำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวเหนียว กข 6 (มีปริมาณอะมิโลส 6%) ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (มีปริมาณอะมิโลส 18%) จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และข้าวเจ้าสุพรรณบุรี 90 (มีปริมาณอะมิโลส 30%) จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี

นำข้าวสารใส่ลงในขวดโหล จากนั้นเติมน้ำลงไป 70% แห้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำขึ้นสะเด็ดน้ำอบแห้งที่ 40°C จนมีความชื้นประมาณ 30% นำข้าวสารใส่โถแก้วที่มีฝาปิดสนิท แล้วเก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดสมดุลทางความชื้น นำไปบ่มในตู้อบ

ด้วยอุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 20 ชั่วโมง เทใส่ถาดนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C จนมีความชื้นไม่เกิน 13%

เตรียมแป้งฟลาวร์ข้าวโดยนำข้าวที่ผ่านและไม่ผ่าน HMT มาโม่แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (100 mesh) จากนั้นนำแป้งฟลาวร์มาสกัดสารตามวิธีของ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิมานิต (2546) โดยนำฟลาวร์ข้าว 100 กรัม มาแช่สารละลายต่าง NaOH 0.35% เป็นเวลา 15.5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 20°C แล้วจึงล้างด้วยน้ำ จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 แล้วอบแห้งตะกอนแป้งที่อุณหภูมิ 50°C เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการสกัด โดยให้มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 0.5%

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

2.2.1 สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชัน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้ง 7 มิลลิกรัม ลงในภาชนะสแตนเลส (stainless pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในสัดส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อชั่วโมง จาก 20 ถึง 150°C โดยใช้ภาชนะสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิง 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)

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก

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 รอบต่อชั่วโมง และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (%relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998)

2.2.3 การเปลี่ยนแปลงทางความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA-4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งสตาร์ชข้าว 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้โปรแกรม standard 1 ซึ่งจะตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อนาที แล้วลดลงเป็น 160 ต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลา ระหว่างนาทีที่ 1-4.45 และรักษาให้อุณหภูมิคงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 2.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงไปที่ 50°C ในช่วงเวลา ระหว่างนาทีที่ 7.50-11 รักษาให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50°C เป็นเวลา 2 นาที ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกดาวน (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

2.4.4 การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ของแป้งใช้วิธีการของ กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยใช้ตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 85°C เขย่าด้วยความเร็ว 75 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 30 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ดูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

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

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

2.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้งสตาร์ช 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเมล็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

2.2.6 ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อย ดัดแปลงจากวิธีการของ Goni (1996)

ชั่งตัวอย่าง 100 มิลลิกรัม น้ำหนักแห้ง ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีฝาปิด ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย HCl-KCl buffer พีเอช 1.5 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ สารละลาย pepsin 0.2 มิลลิลิตร นำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 40°C, 150 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 60 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็น แล้วเติมสารละลาย Tris-matate buffer 15 ml และสารละลาย α -amylose 1 มิลลิลิตร แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 37°C, 150 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 180 ชั่วโมง เทใส่หลอดปั่นเหวี่ยง และล้างขวดรูปชมพู่ด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงหลอดอีกครั้ง หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 3,000 x g เป็นเวลา 15 นาที แล้วปรับปริมาตร เป็น 100 มิลลิลิตร และปิเปต 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง นำมาหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อย (g/100g สตาร์ช)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์} \times 100}{\text{ปริมาณสตาร์ช}}$$

2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ใช้แผนการทดลองแบบ 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)

3. การดัดแปรแป้งข้าวโดยวิธี annealing

3.1 วัตถุประสงค์

ข้าวเหนียวเก่าและใหม่พันธุ์ กช 6 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงเก่าและใหม่พันธุ์ กช 23 ชื่อจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี

3.2 กระบวนการ annealing

3.2.1 กระบวนการ annealing ในแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า

นำตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้า (ข้าวเก่าและข้าวใหม่) ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหกลงในขวดโหลที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนักเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ 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 ต่อ น้ำ 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

3.2.2 กระบวนการ annealing ในแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้า

นำตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้า (ข้าวใหม่) ที่ผ่านการขัดสีแล้วมาลดขนาด ให้มีขนาดเล็กสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 แต่ไม่สามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 ได้ ใส่ข้าวหกลงในขวดโหล ที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นเติมน้ำที่มี sodium metabisulfide 0.02% โดยน้ำหนักเพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยใช้น้ำ 65% แล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่

อุณหภูมิต่ำกว่า 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 ในข้าวเหนียวและข้าวเจ้าตามลำดับ) เป็นเวลา 1 และ 3 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง สำหรับข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าและใหม่ ที่ไม่ทำการ annealing นั้นนำมาซัดสีและลดขนาดให้มีขนาดเล็กเท่ากับข้าวที่นำไป annealing จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วแช่ข้าวในน้ำ โดยใช้อัตราส่วนข้าว 1 ส่วน ต่อน้ำ 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 แล้วนำไปสกัดสตาร์ช

การสกัดสตาร์ชทำตามวิธีของ Puchongkavarin, Varavinit และ Bergthaller โดยนำตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสสูงพันธุ์ กข 23 ที่ทำการเก็บเกี่ยวในเดือนมกราคม พ.ศ. 2549 มาทำการ annealing ภายในระยะเวลา 1 เดือน แล้วโม่เป็นแป้งฟลาวร์ แล้วเก็บไว้ในถุงสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง ($25-27^{\circ}\text{C}$) นาน 6 เดือน ก่อนทำการสกัดแป้งสตาร์ช เมื่อทำการสกัดแป้งสตาร์ชเติมน้ำกลั่นลงไป ในแป้งฟลาวร์ในอัตราส่วนแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 2 ส่วน แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร เพื่อปรับค่าพีเอชเป็น 5.0 แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ cellulase ที่มีกิจกรรม $700 \mu\text{U/g}$ 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 แล้วจึงเติมน้ำกลั่นลงไป ในอัตราส่วนน้ำกลั่น 2 ส่วน ต่อแป้งฟลาวร์ 1 ส่วน แล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 40°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเติมเอ็นไซม์ papain ที่มีกิจกรรม $0.64 \mu\text{U/g}$ 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 ($25-27^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 10 ครั้ง แล้วจึงนำแป้งที่ได้เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็น

เวลา 15 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดลดขนาดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าว 2 ชนิด

3.3.1 แป้งฟลาวร์ข้าว

1.) การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและไขมันของแป้งฟลาวร์ข้าว

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

2.) การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

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

3.) สมบัติการเกิดเจลลาตินในเซชัน

ศึกษาด้วยวิธี Differential Scanning Colorimetry (DSC, Pyris series-Diamond DSC, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งฟลาวร์ข้าว 10 มิลลิกรัม ลงในภาชนะอะลูมิเนียม (aluminium pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาตินในเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที จาก 10-95°C โดยใช้ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p), อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาตินในเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาตินในเซชัน (T_c-T_o) และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาตินในเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

4.) สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA -4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งฟลาวัวร์ข้าว 3 กรัม ใส่ลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้โปรแกรม standard 1 ซึ่งจะตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้น 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 ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกดาวน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

5.) การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ปริมาณการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) ใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยใช้ตัวอย่างแป้งฟลาวัวร์ 0.5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 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 จากนั้นดูดน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำแป้งฟลาวัวร์ส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

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

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

6.) ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching)

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้ง (amylose leaching) ใช้วิธีการของ Doublier (1981) โดยชั่งน้ำหนักแป้งฟลาวร์ 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 นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้ง ตามวิธีการของ Juliano (1971)

3.3.2 แป้งสตาร์ชข้าว

1.) การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและไขมันของแป้งสตาร์ชข้าว

ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1997) พบว่าแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีโปรตีน 0.10% และ 0.45% ตามลำดับ

2.) สมบัติการเกิดเจลลาตินในเซชัน

ตรวจสอบเช่นเดียวกับแป้งฟลาวร์ข้าว

3.) 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 2θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998)

4.) การย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis)

ทดสอบการย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ช ตามวิธีการของ Nakazawa และ Wang (2003) โดยนำแป้งสตาร์ชที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing 5 กรัม ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 15.3% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงไปในขวดปริมาตร 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, Rebers และ Smith (1956)

- 5.) สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด
ตรวจสอบเช่นเดียวกับแป้งฟลาวัวร์ข้าว
- 6.) การละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)
ตรวจสอบเช่นเดียวกับแป้งฟลาวัวร์ข้าว
- 7.) ปริมาณอะมิโลสที่ถูกระบายออกจากเม็ดแป้ง (amylose leaching)
ตรวจสอบเช่นเดียวกับแป้งฟลาวัวร์ข้าว

3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของแป้งข้าว 2 ชนิด

3.4.1 แป้งฟลาวัวร์ข้าว

การศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 3 ปัจจัย โดยปัจจัยแรกคือ ปริมาณน้ำ แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ 65 และ 75% ปัจจัยที่สองคืออุณหภูมิ โดยทำการ annealing ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 7 และ 30°C และปัจจัยที่สาม คือ ระยะเวลา 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)

3.4.2 แป้งสตาร์ชข้าว

การศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการ annealing ทั้ง 2 ปัจจัย โดยปัจจัยแรกเป็น อุณหภูมิ 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 ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า T_0 30°C มี 2 ระดับ คือ 1 และ 3 วันของข้าวนั้นๆ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (Factorial in CRD) ส่วนการศึกษาสมบัติของแป้ง สตาร์ชข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing ที่สภาวะต่างๆ ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วย

โปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

4. การตัดแปรทางกายภาพแป้งมันสำปะหลัง

4.1 วัตถุประสงค์

แป้งมันสำปะหลังทางการค้าจากบริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด

4.2 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการ Annealing

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% ของแข็ง ในขวดอาหารเลี้ยงเชื้อขนาด 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมเฮไซเตรตความเข้มข้น 0.01% และนำไปแช่ในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 57°C เป็นเวลา 6 วัน เมื่อครบเวลานำตัวอย่างที่ได้มากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ จากนั้นนำส่วนที่เหลือจากการกรองไปทำแห้งโดยการอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 40°C จนตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12% นำตัวอย่างแป้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) นำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) และเก็บตัวอย่างแป้งที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะความหนืด

4.3 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการ Heat moisture treatment (HMT)

ปรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังให้ได้ 20% (wb.) และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-5°C ชั่วคืน จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C โดยใช้ตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และนำไปทำแห้งโดยการอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50°C จนตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 12% นำตัวอย่างแป้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) นำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) และเก็บตัวอย่างแป้งที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะความหนืด

4.4 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการเอกซ์ทรูชัน

ปรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังให้ได้ 20% (wb.) และนำมาใส่ในถังป้อนวัตถุประสงค์ (K-Tron International, Piman, NJ, USA) ที่ป้อนด้วยอัตราคงที่ผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (MPF19:25 APV Beaker company, UK) โดยทำการเรียงสกรูแบบ half product ใช้

ความเร็วรอบสกรู 100 รอบต่อนาที, ควบคุมอุณหภูมิ바เรลดังนี้ zone 1: 50°C, zone 2: 70°C, zone 3: 85°C และ zone 4: 95°C ปรับความชื้นของกระบวนการเอกซ์ทรูชันให้ได้ 80% โดยควบคุม moisture feed rate ที่ใช้ peristatic pump ที่ 15% จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านออกจากหัวแบบ (die plate) แล้วไปอบที่ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 50°C จนกระทั่งมีค่าความชื้นคงที่ประมาณ 8% นำตัวอย่างแป้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) นำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) และเก็บตัวอย่างแป้งที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะความหนืด

4.5 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

เตรียมตัวอย่างสารละลายน้ำแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 30% ของแข็ง (wb) นำมาป้อนเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer 6 x 8, New Way Manufacturing Co, Ltd. Thailand) โดยสภาวะที่ใช้ คือ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 1.5 มิลลิเมตร อุณหภูมิของลูกกลิ้ง 120°C และความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.845 รอบต่อนาที (101.6 Hz.) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด super blender (ยี่ห้อ National รุ่น MX-T2GN, ใต้หวัน) แล้วนำไปร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อน (Vibration Sieve Shaker, Fritsch, USA) เก็บตัวอย่างแป้งที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 150-250 ไมครอน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะความหนืด

4.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

4.6.1 ลักษณะความหนืด

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA-4, Newport Science, Australia) โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร และทำการเขย่า paddle ขึ้นลงเพื่อให้ตัวอย่างเปียก จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม profile extrusion 1, no alcohol ซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 25-95°C และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) เบรกคาวน์ (break down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (setback)

4.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis Of Variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) version 6.12 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

1. ผลของสภาวะและวิธีการผลิตต่อคุณภาพของแป้งข้าวพรีเจล

1.1 ผลของสภาวะการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งต่อคุณภาพของแป้งพรีเจล

จากการดำเนินการตัดแปรแป้งฟลาวร์ข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer) จำนวน 8 สภาวะ โดยศึกษาที่ปริมาณของแข็ง 10 และ 30 % ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.54 และ 0.97 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของลูกกลิ้ง 100 และ 130°C เพื่อศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะความหนืด ระดับการเจลาติไนซ์ ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ แสดงผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 1 และ 2

แป้งฟลาวร์ข้าวตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่และแป้งฟลาวร์ข้าววัตถุดิบ มีลักษณะความหนืดแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแป้งพรีเจลที่ได้ยังคงแสดงลักษณะความหนืดคล้ายคลึงกับแป้งฟลาวร์ข้าววัตถุดิบ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าแป้งพรีเจลที่ผ่านกระบวนการตัดแปรทางกายภาพด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ยังมีการเจลาติไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์และอาจยังมีลักษณะของเม็ดแป้งหลงเหลืออยู่ เนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ใช้ความร้อนที่ไม่สูงมากนักและใช้ระยะเวลาสั้น และเนื่องจากแป้งฟลาวร์ข้าวมีองค์ประกอบทั้งโปรตีนและไขมันที่ส่งผลให้อุณหภูมิในการเจลาเกิดสูงกว่าแป้งสตรังซ์ข้าว ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ไม่รุนแรงพอที่จะสามารถทำลายเม็ดแป้งได้ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแป้งพรีเจลมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งฟลาวร์ข้าววัตถุดิบ

จากการศึกษาสภาวะของการตัดแปรต่อลักษณะความหนืดที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ดังตารางที่ 1 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะความหนืดของแป้งพรีเจล คือ ปริมาณของแข็งและอุณหภูมิของลูกกลิ้ง กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณของแข็งมีผลในการเพิ่มค่า PT ของแป้งพรีเจลอย่างมีนัยสำคัญเชิงทางสถิติ ($p < 0.01$) นอกจากนี้ยังมีผลในการลดค่า PV, BD, FV และ SB และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลูกกลิ้งจาก 100 เป็น 130°C ก็ส่งผลให้ค่า PT, PV และ BD เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเกิดจากเมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลให้โมเลกุลของแป้งสัมผัสกับผิวของลูกกลิ้งได้น้อยลง ดังนั้นจึงมีโอกาสถูกทำลายได้น้อยกว่า และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลูกกลิ้งก็อาจมีผลไปเพิ่มการถูกทำลายของโมเลกุลแป้ง นอกจากนี้ยังอาจจะไปลดขนาดโมเลกุลของแป้งด้วย จึงเป็นผลให้แป้งพรีเจลที่ได้มีค่าความหนืดสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ลักษณะความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งฟลาวัวร์ข้าว
พรีเจลที่ผลิตด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

Drum drying conditions			PT	PV	BD	FV	SB
Solid content (%)	Drum surface temp. (°C)	Drum speed (rpm)	(°C)	(RVU)	(RVU)	(RVU)	(RVU)
10	100	0.54	51.63	112.56	22.53	277.76	187.74
10	100	0.97	52.84	113.10	23.00	282.17	192.07
10	130	0.54	54.28	138.93	40.46	301.61	203.14
10	130	0.97	60.66	134.97	38.22	300.24	203.49
30	100	0.54	69.70	93.63	21.19	193.74	121.31
30	100	0.97	59.29	95.90	21.81	206.51	132.42
30	130	0.54	77.62	103.75	29.64	201.94	127.83
30	130	0.97	64.73	117.82	35.22	225.58	142.99
Rice flour			82.30	75.08	14.67	217.29	156.88

สำหรับความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่ศึกษาทั้ง 2 ระดับ ไม่มีผลต่อลักษณะความหนืดของแป้ง พรีเจล อาจเป็นเพราะไม่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลของแป้งฟลาวัวร์ข้าว

การวิเคราะห์ความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ brookfield แสดงผลดังตารางที่ 2 พบว่าการเปลี่ยนความเร็วของการหมุนจาก 2 เป็น 20 รอบ ส่งผลให้ตัวอย่างทุกตัวอย่างมีความหนืดลดลง ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ได้มีพฤติกรรมความหนืดแบบ shear-thinning และเมื่อตรวจวัดค่า shear-thinning index (STI) ซึ่งใช้เป็นตัวชี้ของของเหลวที่มีพฤติกรรมความหนืดแบบ shear-thinning พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบของลูกกลิ้งไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงค่า STI, apparent viscosity ก่อนและหลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C (η และ η_{80}) ขณะที่ปริมาณของแข็งและอุณหภูมิของลูกกลิ้งมีผลต่อค่า STI, η และ η_{80} อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งจาก 10 เป็น 30% จะมีผลในการลดค่า η จาก 722-1,039 เป็น 453-668 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง RVA และการรายงานของ Singh et al. (1999) นอกจากนี้ยังมีผลในการลดค่า STI และ η_{80} จาก 3.1-3.2 เป็น 2.2-2.9 และ 7,394-13,288 เป็น 4,855-11,487 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลูกกลิ้งจาก 100 เป็น 130°C ส่งผลในการเพิ่มค่า η แต่มีผลในการลดค่า STI และ η_{80} ตามลำดับ ซึ่งเมื่อ

ตารางที่ 2 ความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield ของแป้ง
ฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่ผลิตด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

Drum dry conditions					
Solid content (%)	Drum surface temperature (°C)	Drum speed (rpm)	η	STI	η_{80}
10	100	0.54	960.31	3.07	13,287.50
10	100	0.97	721.88	3.11	7,393.75
10	130	0.54	1,039.06	2.81	11,031.25
10	130	0.97	981.25	3.19	12,862.50
30	100	0.54	453.13	2.86	11,487.44
30	100	0.97	532.50	2.94	10,900.00
30	130	0.54	630.63	2.22	4,854.69
30	130	0.97	667.81	2.49	5,125.00

พิจารณาค่า η และ η_{80} พบว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่เตรียมได้จากทุกสภาวะมีค่า η_{80} สูงกว่า η แสดงให้เห็นว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวพรีเจลที่เตรียมได้เกิดการเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์ มีบางส่วนเป็นแป้งดิบ เมื่อให้ความร้อนจึงทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ แล้วส่งผลให้เกิดความหนืดมากขึ้น ดังผลที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว

ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และการละลาย (WSI) ของแป้งพรีเจลที่เตรียมจากสภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 11-13 g/g dry sample และ 5-8% ตามลำดับ ส่วนระดับการเจลาติไนซ์ (DG) ของแป้งพรีเจลมีค่าอยู่ในช่วง 35-55% ดังตารางที่ 3 แป้งพรีเจลที่ได้มีค่าความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าความสามารถในการละลายน้ำ เนื่องจากในระหว่างการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่เป็นการให้ความร้อนกับน้ำแป้ง จึงทำให้เม็ดแป้งพองตัวและเกิดการเจลาติไนซ์ ขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ ของแป้ง เช่น โปรตีน อาจถูกทำให้เสียสภาพแต่ยังคงอยู่ภายในเม็ดแป้ง ดังนั้นแป้งพรีเจลจึงยังคงดูดซับน้ำเข้าไปในโมเลกุลได้ดี แต่ในทางตรงข้ามมีความสามารถในการละลายได้ในน้ำเย็นต่ำ (Doublier et al., 1986) ซึ่งปริมาณของแข็งมีผลต่อทั้งความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ แป้งพรีเจลที่เตรียมจากปริมาณของแข็ง 30% จะมีความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำต่ำกว่าแป้งพรีเจลที่เตรียมจากปริมาณของแข็ง 10% ดังเหตุผลที่กล่าวมา

ตารางที่ 3 ความสามารถในการละลาย การดูดซับน้ำและระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งฟลาวัวร์ข้าว
พรีเจลที่ผลิตด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

Drum dry conditions			WAI (g/g dry sample)	WSI (%)	DG (%)
Solid content (%)	Drum surface temperature (°C)	Drum speed (rpm)			
10	100	0.54	12.93	6.81	53.95
10	100	0.97	12.90	8.15	54.98
10	130	0.54	12.30	6.44	48.15
10	130	0.97	12.24	6.53	46.05
30	100	0.54	10.61	5.97	37.22
30	100	0.97	11.04	7.03	43.19
30	130	0.54	10.55	5.29	38.73
30	130	0.97	11.20	5.07	34.77

ซึ่งสอดคล้องกับระดับการเจลาติไนซ์ โดยแป้งพรีเจลที่มีความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำสูงก็จะมีระดับการเจลาติไนซ์สูงด้วยแต่อย่างไรก็ตามระดับการเจลาติไนซ์จะมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า PT เนื่องจากเม็ดแป้งจะถูกทำลายได้มากที่ระดับการเกิดเจลาติไนซ์สูงดังนั้นจึงส่งผลให้มีค่า PT ต่ำ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลูกกลิ้งให้สูงขึ้นจาก 100 เป็น 130°C ก็มีผลให้ความสามารถในการละลายของแป้งพรีเจลลดลง ($p < 0.01$) แต่ไม่มีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเปลี่ยนแปลง ส่วนความเร็วของลูกกลิ้งไม่มีผลกระทบต่อทั้งความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของแป้งพรีเจล

1.2 ผลการศึกษาสภาวะการตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณภาพของแป้งพรีเจล

การตัดแปรทางกายภาพแป้งฟลาวัวร์ข้าวด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จำนวน 8 สภาวะ โดยศึกษาที่ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ 20, 30 และ 70% ความเร็วรอบสกรู 150 และ 300 รอบต่อนาที อุณหภูมิใบเรลแบบต่ำ (100°C) และอุณหภูมิใบเรลแบบสูง (170°C) เพื่อศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะความหนืด ระดับการเจลาติไนซ์ และความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ

จากลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และแป้งฟลาวัวร์ข้าววัตถุดิบดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต (extruded rice flour) มีค่า PT ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งฟลาวัวร์ข้าววัตถุดิบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนและแรงทางกลจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันจึงส่งผลให้โมเลกุลของเม็ดแป้งเกิดการแตกหักเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย จึงส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความหนืดลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษาพบว่าความเร็วรอบสกรูในการศึกษานี้ก็ไม่มีผลต่อลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต ขณะที่ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบิาเรลมีผลต่อลักษณะความหนืดอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยการเพิ่มปริมาณความชื้นจาก 20 เป็น 70% มีผลในการเพิ่ม PV, BD, FV และ SB ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต ซึ่งที่ความชื้น 20% แสดงค่า PV ในช่วง 6-9 RVU ขณะที่ที่ความชื้น 30% และ 70% แสดงค่า PV ในช่วง 6-28 และ 102-136 RVU ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4 ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นสูง เม็ดแป้งจะเกิดการเจลาติไนเซชันและถูกทำลายได้น้อยกว่าที่ปริมาณความชื้นต่ำ จึงเป็นผลให้ยังคงมีส่วนของเม็ดแป้งที่ยังไม่ถูกเจลาติไนซ์อยู่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าการที่ค่า PV ของเอกซ์ทรูเดตต่ำจะแสดงถึงว่ามีสัดส่วนของแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์มาก ขณะที่เมื่อค่า PV สูงจะเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของแป้งที่ไม่ถูกเจลาติไนซ์ ซึ่งปริมาณของทั้งสองส่วนนี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามระดับของการเกิดเจลาติไนซ์และ depolymerization ของโมเลกุล ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากสถานะต่างๆ ในระหว่างกระบวนการแปรรูป (Hagenimana et al, 2006) ผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับการศึกษาของ McPherson, Bailey, and Jane (2000) ซึ่งพบว่าการเพิ่มความชื้นของแป้งสตาร์ชข้าวโพดและระดับการ cross-linking มีผลในการเพิ่มค่าความหนืดของเอกซ์ทรูเดต สำหรับที่ความชื้นของวัตถุดิบ 30% ซึ่งมีปริมาณน้ำปานกลาง พบว่าค่า PV ที่ได้ยังมีค่าระหว่างที่ความชื้นของวัตถุดิบ 20 และ 70% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่เตรียมจากสถานะความชื้นของวัตถุดิบ 20 และ 30% มีค่าความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25°C (initial peak viscosity) ซึ่งได้จากจุดเริ่มต้นของการวัดสูงกว่าที่สถานะความชื้นของวัตถุดิบ 70% เนื่องจากที่สถานะดังกล่าวส่งผลเกิดการแตกหักของโมเลกุลของเม็ดแป้งมากกว่า ดังนั้นแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่ได้จึงสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ขณะที่สถานะความชื้นของวัตถุดิบ 70% มีลักษณะความหนืดใกล้เคียงกับแป้งฟลาวัวร์ข้าววัตถุดิบและไม่แสดง initial peak viscosity แสดงว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่สถานะความชื้นดังกล่าวไม่ละลายในน้ำเย็นเหมือนกับแป้งฟลาวัวร์ข้าววัตถุดิบและแป้งธรรมชาติทั่วไป เนื่องจากเป็นสถานะที่โมเลกุลของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่สถานะความชื้นของวัตถุดิบ 20 และ 30%

ตารางที่ 4 ลักษณะความหนืดจากการตรวจวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งฟลาวร์ข้าว
พรีเจลที่ผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

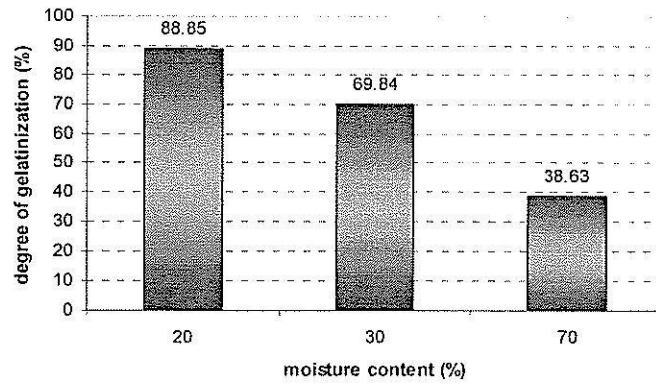
Extrusion conditions			PT	PV	BD	FV	SB
Moisture content (%)	Screw speed (rpm)	Barrel temp. (°C)	(°C)	(RVU)	(RVU)	(RVU)	(RVU)
20	150	170	69.35	7.65	5.78	4.06	2.18
20	150	100	59.83	8.68	6.51	-1.40	-3.57
20	300	170	61.88	6.42	6.35	0.99	0.92
20	300	100	65.77	8.49	6.29	-0.99	-3.18
30	150	170	58.78	26.78	27.17	10.74	11.13
30	150	100	30.82	9.44	10.10	4.08	4.74
30	300	170	62.67	23.61	26.54	2.15	5.08
30	300	100	28.73	5.68	7.25	1.94	3.51
70	150	170	54.42	135.53	91.13	196.07	151.67
70	150	100	60.84	115.46	57.33	239.33	181.21
70	300	170	55.70	102.42	65.78	182.57	145.93
70	300	100	56.62	119.06	67.50	221.53	169.97
Rice flour			82.30	75.08	14.67	217.29	156.88

อย่างไรก็ตาม Doublier et al (1986) กล่าวว่าเพสท์ของเอกซ์ทรูเดตมีพฤติกรรมทางความหนืดคล้ายกับของเหลว เนื่องจากการถูกทำลายของเม็ดแป้งโดยความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิบาร์เรล พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลจาก 100 เป็น 170°C มีผลในการลดค่าอุณหภูมิการเกิดเพสท์และค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังอาจจะไปทำลายปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของอะมิโลสและโปรตีน จึงทำให้โมเลกุลของโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของแป้งฟลาวร์ข้าวเสียสภาพ

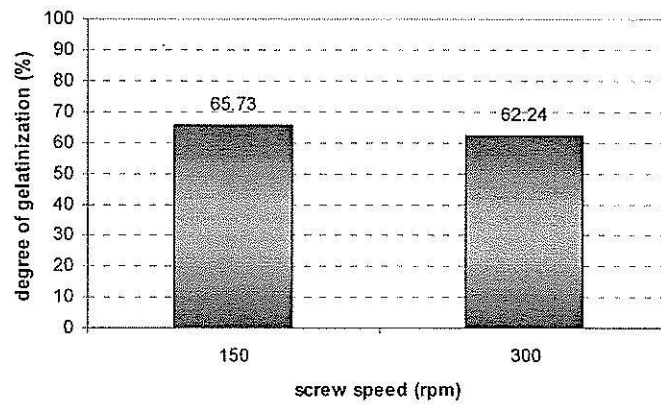
ผลของสภาวะต่างๆ ของการผลิตแป้งฟลาวร์ข้าวพรีเจลด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อค่าเฉลี่ยของระดับการเจลาติไนซ์ แสดงดังภาพที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าแป้งฟลาวร์ข้าว เอกซ์ทรูเดตมีระดับการเจลาติไนซ์ในช่วง 39-89% ความชื้นของวัตถุดิบมีผลอย่างมาก

ต่อระดับการเจลาติไนซ์ (ภาพ ที่ 1ก) ขณะที่ความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิบารเรลไม่มีผลต่อระดับการเจลาติไนซ์ (ภาพที่ 1ข และ 1ค) กล่าวคือ การเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบ 20 เป็น 70% ส่งผลให้ระดับการเจลาติไนซ์ลดลงจาก 88.85% เป็น 38.63% ซึ่งผลที่ได้นี้อธิบายได้ว่า การลดความชื้นในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลไปลดปริมาณน้ำที่ทำหน้าที่เป็น plasticizer ดังนั้นจึงส่งเสริมให้โครงสร้างเม็ดแป้งถูกทำลายโดยแรงทางกลจากการเสียดสีกับผนังบารเรลเพิ่มขึ้นและความร้อนที่ได้รับมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการเจลาติไนซ์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chiang and Johnson (1997) ซึ่งพวกเขาพบว่าความชื้นแป้งฟลาวร์สาลีมีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิบารเรล 95 และ 110°C ซึ่งค่าระดับการเจลาติไนซ์ที่ได้จากการศึกษานี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต โดยแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่มีระดับการเจลาติไนซ์สูงจะมีค่าความหนืดต่ำ เนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลายในระหว่างการเกิดเจลาติไนซ์ ดังนั้นความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่เตรียมจากความชื้นของวัตถุดิบ 70% จึงมีพฤติกรรมความหนืดคล้ายกับแป้งฟลาวร์ข้าววัตถุดิบ ในทางตรงกันข้ามที่ความชื้นของวัตถุดิบ 20 และ 30% แสดงค่าความหนืดต่ำ แต่แสดงระดับการเจลาติไนซ์สูงกว่าแป้งฟลาวร์ข้าววัตถุดิบ

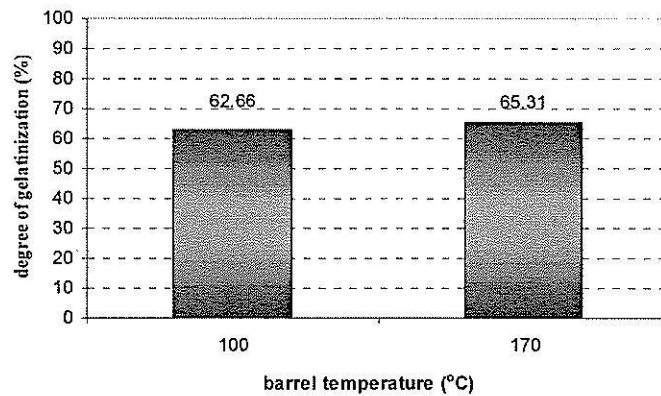
ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และการละลาย (WSI) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตแสดงดังตารางที่ 5 จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลาย ($p < 0.01$) กล่าวคือเมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบจาก 20% เป็น 70% มีผลในการลดความสามารถในการดูดซับน้ำประมาณ 10 เท่า เนื่องจากในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน น้ำจะทำหน้าที่เป็น plasticizer และมีผลให้โมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลายได้น้อยลง (Hagenimana et al, 2006) นอกจากนี้เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น น้ำจะลดแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้แป้งได้รับความร้อนน้อยลง จึงส่งผลให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์น้อยลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ สำหรับที่สภาวะความชื้นของวัตถุดิบต่ำจะเป็นเหตุให้เม็ดแป้งเกิดการแตกหักได้สูงกว่า เนื่องจากได้รับทั้งความร้อนและแรงเฉือน ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณเม็ดแป้งที่แตกหักมากกว่า จึงเพิ่มการละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตได้มากขึ้น (Hagenimana et al, 2006)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ผลของตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเจลาติไนซ์ของแป้ง
ฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเคต

ตารางที่ 5 ความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายของแป้งข้าวคัดแปรทางกายภาพด้วย
กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Extrusion conditions				
Moisture content (%)	Screw speed (rpm)	Barrel temperature profile (°C)	WAI (g/g dry sample)	WSI (%)
20	150	100	9.86	12.52
20	150	170	7.59	14.58
20	300	100	9.94	14.55
20	300	170	9.28	14.43
30	150	100	4.43	8.84
30	150	170	4.56	12.65
30	300	100	4.04	9.11
30	300	170	5.35	13.99
70	150	100	1.25	7.68
70	150	170	1.14	9.83
70	300	100	1.07	8.37
70	300	170	1.13	9.85

ซึ่งจากผลการทดลองตารางที่ 5 จะเห็นว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่เตรียมที่สภาวะความชื้นของวัตถุดิบ 20% มีความสามารถในการละลายสูงกว่าการเตรียมที่สภาวะความชื้นของวัตถุดิบ 70% สำหรับผลของอุณหภูมิบารเรล พบว่ามีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตเท่านั้น ($p < 0.01$) โดยแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดตที่เตรียม โดยใช้อุณหภูมิบารเรลแบบต่ำ มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าใช้อุณหภูมิบารเรลแบบสูง (10.18% สำหรับ 100°C และ 12.55% สำหรับ 170°C) ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าโมเลกุลของเม็ดแป้งเกิดความเสียหายมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิบารเรลสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kadan et al. (2003) ซึ่งกล่าวว่าความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการเอกซ์ทรูดที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 100°C สำหรับความเร็วรอบสกรูทั้ง 2 ระดับที่ศึกษานั้น ไม่มีผลต่อทั้งความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายของแป้งฟลาวร์ข้าวเอกซ์ทรูเดต

1.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแป้งข้าวพรีเจลจากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบ

ลูกกลิ้งและกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ลักษณะความหนืด ระดับการเจลาติไนซ์ และความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำของแป้งข้าวพรีเจลที่ได้จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการเอกซ์ทรูชันแสดงดังตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะความหนืด พบว่าแป้งพรีเจลที่ผ่านการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่มีค่า PT สูงกว่าการตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันขณะที่มีค่า PV, BD, FV และ SB ต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สถานะนี้เป็นสถานะที่มีน้ำมากและอุณหภูมิต่ำ และเนื่องจากมีความเร็วรอบของสกรูสูง ทำให้ระยะเวลาที่แป้งอยู่ในบาเรลน้อยมาก จึงทำให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์น้อยกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้มีความหนืดสูงกว่า ส่วนการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น เม็ดแป้งได้รับความร้อนจากผิวลูกกลิ้งโดยตรง ทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ที่มากกว่า จึงมีผลให้แป้งพรีเจลที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้แตกต่างกันด้วย แต่มีความสามารถในการละลายน้ำใกล้เคียงกัน โดยแป้งพรีเจลที่ได้

ตารางที่ 6 ลักษณะความหนืด ระดับการเจลาติไนซ์ และความสามารถในการดูดซับและ

ละลายน้ำของแป้งข้าวพรีเจลที่ได้จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่และกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Parameter	Drum dried	Drum dried	Extruded	Extruded
	Starch 1 ^a	Starch 2 ^b	Starch 1 ^c	Starch 2 ^d
Pasting temperature (°C)	69.70	59.29	60.84	56.62
Peak viscosity (RVU)	93.63	95.90	115.46	119.06
Breakdown (RVU)	21.19	21.81	57.33	67.50
Final viscosity (RVU)	193.74	206.51	239.33	221.53
Set back (RVU)	121.31	132.42	181.21	169.97
WAI (g/g dry sample)	10.61	11.04	1.25	1.07
WSI (%)	5.97	7.03	7.68	8.37
DG (%)	37.22	43.19	38.63	38.71

Drum dried starch1^a: ปริมาณความชื้น 70%, ความเร็วลูกกลิ้ง 0.54 rpm, อุณหภูมิลูกกลิ้ง 100°C

Drum dried starch2^b: ปริมาณความชื้น 70%, ความเร็วลูกกลิ้ง 0.97 rpm, อุณหภูมิลูกกลิ้ง 100°C

Extruded starch1^c: ปริมาณความชื้น 70%, ความเร็วรอบสกรู 150 rpm, อุณหภูมิบาเรล 100°C

Extruded starch2^d: ปริมาณความชื้น 70%, ความเร็วรอบสกรู 300 rpm, อุณหภูมิบาเรล 100°C

จากการตัดแปรรูปด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งพรีเจลที่ได้จากการตัดแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันถึง 10 เท่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการตัดแปรรูปด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น เม็ดแป้งได้รับความร้อนจากผิวลูกกลิ้งโดยตรง ทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ที่มากกว่า และลักษณะของแป้งพรีเจลจากการตัดแปรรูปด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้นมีลักษณะเบา หรือมีความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อุณหภูมิเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย ดังนั้นแป้งพรีเจลจึงมีค่าการดูดซับน้ำเข้าไปในโมเลกุลได้มาก ในขณะที่ลักษณะของแป้งพรีเจลจากการตัดแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีลักษณะแน่น แข็ง การดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างเกิดขึ้นได้ยาก และจากค่าระดับการเจลาติไนซ์ พบว่าแป้งพรีเจลที่ตัดแปรรูปทางกายภาพทั้ง 2 วิธี มีค่าระดับการเจลาติไนซ์ใกล้เคียงกันในช่วง 39-43% จึงจะเห็นได้ว่าลักษณะความหนาแน่นตัวอย่าง มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำอย่างมาก สำหรับความสามารถในการละลายน้ำนั้น จะเห็นว่าการตัดแปรรูปทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นผลจากสภาวะของกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ใช้ตัดแปรรูปนั้น ไม่รุนแรง จึงไม่ทำให้โครงสร้างของแป้งเกิดการแตกหัก

2. ผลของการให้ความร้อนขึ้นต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว

2.1 ผลของการทำ HMT ข้าวสาร

การศึกษาการทำ HMT ในรูปเมล็ดข้าวใช้อุณหภูมิ 100°C ความชื้น 12 และ 30% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง โดยได้เลือกใช้ข้าวที่มีปริมาณกึ่งก้านอะมิโลเพกตินในช่วง DP 6-12 ใกล้เคียงกัน (32%) แต่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ซึ่งมีปริมาณอะมิโลส 28.51, 16.42 และ 7.74% ตามลำดับ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาพันธุ์วัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์, 2546)

2.1.1 ผลของการทำ HMT ต่อลักษณะความหนืด กำลังการพองตัว การละลายและการปลดปล่อยอะมิโลส

เมื่อนำสตาร์ชและฟลาวัวร์ของข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT มาตรวจสอบลักษณะความหนืดด้วย RVA แสดงผลดังตารางที่ 7 และ 8 พบว่าค่า PT ของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 และขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านกระบวนการ HMT สูงกว่าไม่ผ่านกระบวนการ HMT ขณะที่ PT ของสตาร์ชจากข้าวเหนียวไม่แตกต่างจากที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ส่วนค่า PV ของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 และขาวดอกมะลิ 105 ที่ความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง มีค่าสูงขึ้น แต่ที่ความชื้น 30% เวลา 1 ชั่วโมงมีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผ่านการทำ แต่ PV ของสตาร์ชจากข้าวเหนียวไม่แตกต่าง ยกเว้นที่ความชื้น 30% เวลา 1 ชั่วโมงที่มีค่า PV ต่ำกว่าไม่ผ่านกระบวนการ HMT ค่า SB ที่ความชื้น 12%

เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง และความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวดอกมะลิ 105 ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ขณะที่สตาร์ชจากข้าวเหนียวมีค่า SB สูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการทำ HMT ค่า SB ที่ความชื้น 30% เป็นเวลา 1 ชั่วโมงของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวดอกมะลิ 105 มีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT แต่ค่า SB ของสตาร์ชจากข้าวเหนียวไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการทำ HMT

การเพิ่มขึ้นของค่า PT ที่พบเฉพาะในสตาร์ชจากข้าวเจ้า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT มีความแข็งแรงมากขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลส ใน กระบวนการ HMT ซึ่งปริมาณอะมิโลสมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า PT ด้วยอัตราที่แตกต่างกันคือ สตาร์ชข้าวสุพรรณบุรีที่ผ่านกระบวนการ HMT ทุกสภาวะ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85°C เป็น 88-89°C ขณะที่สตาร์ชข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการใช้แต่ละสภาวะเพิ่มขึ้นในอัตราที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะที่ความชื้น 12 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดจาก 71°C เป็น 78°C ในกรณีสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 ซึ่งมีอะมิโลสมากที่สุด อาจเป็นไปได้ว่าเมื่ออะมิโลสมีการจัดเรียงตัวใหม่บางส่วนแล้ว มีผลในการขัดขวางการจัดเรียงตัวของอะมิโลสสายอื่น (Zhou, 2003) ทำให้โครงสร้างถูกจัดเรียงให้แข็งแรงได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ขณะที่สตาร์ชจากข้าวดอกมะลิ 105 มีอะมิโลสน้อยกว่า จึงมีโอกาสเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลสกับอะมิโลส หรืออะมิโลสกับอะมิโลเพกติน ได้มากกว่า

ตารางที่ 7 ลักษณะความหนืดของสตาร์ชข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT

สภาวะที่ใช้		สุพรรณบุรี90			ข้าวดอกมะลิ105			เหนียว กข6		
MC (%)	เวลา (ชม.)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)
12	0.5	88 ^a	97 ^a	68 ^a	73 ^{bc}	168 ^a	86 ^b	72 ^a	141 ^a	13 ^a
12	1.0	88 ^a	84 ^b	53 ^b	78 ^a	159 ^{ab}	86 ^b	72 ^a	136 ^a	11 ^{ab}
30	0.5	88 ^a	81 ^b	40 ^c	75 ^b	158 ^b	101 ^a	72 ^a	135 ^a	13 ^a
30	1.0	89 ^a	74 ^c	37 ^c	75 ^b	149 ^c	70 ^c	72 ^a	121 ^b	10 ^b
ไม่ผ่าน HMT		85 ^b	86 ^b	63 ^{ab}	71 ^c	157 ^b	93 ^b	71 ^a	140 ^a	9 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 8 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และ
เหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT

สภาวะที่ใช้		สุพรรณบุรี90		ข้าวดอกมะลิ105		เหนียว กข6	
MC (%)	เวลา (ชม.)	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย
12	0.5	11.07 ^a	6.28 ^b	13.13 ^a	10.41 ^a	13.11 ^b	17.74 ^a
12	1.0	10.96 ^a	6.01 ^b	12.86 ^a	10.13 ^{ab}	13.69 ^{ab}	16.71 ^{ab}
30	0.5	10.78 ^{ab}	6.27 ^b	12.11 ^b	10.11 ^{ab}	13.48 ^{ab}	16.01 ^b
30	1.0	10.45 ^b	5.48 ^c	11.75 ^b	9.89 ^b	13.64 ^{ab}	15.02 ^c
ไม่ผ่าน HMT		11.05 ^a	7.90 ^a	12.89 ^a	11.27 ^a	14.30 ^a	17.02 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่า PV และ

SB ของสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT มีค่าแตกต่างกันไป คือ สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ การที่ค่า PV สูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT อาจจะเป็นเพราะ โครงสร้างมีการยับตัวแต่ไม่มีการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบกว่าเดิมจึงพองตัวได้มากกว่าเดิม กรณีข้าวเหนียวซึ่งมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอะมิโลเพกตินเมื่อเกิดการคลายพันธะไฮโดรเจนในระหว่างกระบวนการ HMT แล้ว ไม่มีการจัดเรียงตัวใหม่ เพราะลักษณะของอะมิโลเพกตินที่เป็นกิ่งก้านยากต่อการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบยิ่งขึ้นได้ สอดคล้องกับค่า SB ที่ให้ผลไม่แตกต่างหรือสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ส่วนการทำ HMT ที่ความชื้นร้อยละ 30 เวลา 1 ชั่วโมงที่มีผลให้ค่า PV ทั้ง 3 พันธุ์ ต่ำกว่าไม่ผ่านการทำ HMT เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนพันธะเป็นจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Lawal, 2005) ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อยลง นอกจากนี้ ค่า SB ที่ความชื้น 30% เวลา 1 ชั่วโมงของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และสตาร์ชจากข้าวเหนียวมีค่าต่ำกว่าและไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT แสดงว่าสตาร์ชของข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการ HMT นั้นสายของอะมิโลสได้ถูกจัดเรียงตัวใหม่ทำให้โครงสร้างสตาร์ชแข็งแรงขึ้นเมื่อนำไปผ่านเจลาติโนเซชันจึงมีอะมิโลสหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชน้อย ทำให้การรวมตัวใหม่หลังผ่านเจลาติโนเซชันน้อยลงด้วย

ค่า PV และ SB มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลาย กล่าวคือ เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนมีการพองตัวมากที่สุดจะปรากฏค่า PV และเมื่อเม็ดสตาร์ชแตกออกจะมีส่วนที่ละลายหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช เมื่อลดอุณหภูมิลงในการวิเคราะห์

ด้วย RVA ส่วนที่มีการละลายจะเกิดการรวมตัวกันหรือคอลลอยด์ (SB) สำหรับค่ากำลังการพองตัว และ ร้อยละการละลายของสตาร์ชที่อุณหภูมิ 80°C ในตารางที่ 8 พบว่า กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 90 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ซึ่งสอดคล้องกับค่า PV และ SB ในตารางที่ 7

ลักษณะความหนืด กำลังการพองตัว การละลาย และการปลดปล่อยอะมิโลสของ ฟลาวัวร์ที่ได้จากการทำ HMT ของข้าวสุพรรณบุรี 90 ข้าวดอกมะลิ 105 และ ข้าวเหนียว กข6 เปรียบเทียบกับฟลาวัวร์ของข้าวที่ไม่ได้ผ่านการทำ HMT แสดงดังตารางที่ 9 พบว่า PT ของฟลาวัวร์ สูงขึ้นทั้งสามพันธุ์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก PT ของสตาร์ชที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ PT ของฟลาวัวร์ กับสตาร์ช พบว่า ฟลาวัวร์ของข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการ HMT มีค่า PT สูงกว่าของสตาร์ชที่สภาวะ เดียวกัน ขณะที่ฟลาวัวร์ของข้าวเหนียวที่ผ่านกระบวนการ HMT มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชที่สภาวะ เดียวกัน แสดงว่าอาจเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับโปรตีนหรือโปรตีนกับอะมิโลสที่ผิวของ เม็ดสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวยาก

PV และ SB ของฟลาวัวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการ HMT มากกว่าฟลาวัวร์ที่ไม่ ผ่านกระบวนการ HMT เมื่อพิจารณาพร้อมกับกำลังการพองตัว การละลาย และการปลดปล่อย อะมิโลส (ตารางที่ 10) จะเห็นว่า กำลังการพองตัวของฟลาวัวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการ HMT มีมากกว่าฟลาวัวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT จึงทำให้ค่า PV สูงขึ้นด้วย ส่วนค่าการละลาย

ตารางที่ 9 ลักษณะความหนืดของฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี 90 ข้าวดอกมะลิ 105 และ เหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT

สภาวะที่ใช้		สุพรรณบุรี 90			ข้าวดอกมะลิ 105			เหนียว กข6		
MC (%)	เวลา (ชม.)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)	PT (°C)	PV (RVU)	SB (RVU)
12	0.5	89 ^b	67.7 ^c	81 ^b	76 ^{bc}	148 ^b	58 ^{bc}	70.3 ^{bc}	118 ^c	15 ^a
12	1.0	89 ^b	88.2 ^b	96 ^a	82 ^b	136 ^c	68 ^b	71.5 ^b	134 ^b	14 ^a
30	0.5	92 ^{ab}	96.6 ^a	74 ^{bc}	91 ^a	157 ^a	86 ^a	69.4 ^c	141 ^{ab}	8 ^b
30	1.0	87 ^c	87.8 ^b	54 ^d	88 ^{ab}	154 ^{ab}	61 ^{bc}	71.3 ^b	147 ^a	14 ^a
ไม่ผ่าน HMT		87 ^c	66 ^c	61 ^d	73 ^c	141 ^{bc}	53 ^c	66.4 ^d	114 ^c	7 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 10 กำลังการพองตัว (SP) การละลาย (WSI) และปลดปล่อยอะมิโลส (AML) ของฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT

สถานะที่ใช้		สุพรรณบุรี90			ข้าวดอกมะลิ105			เหนียว กข6		
MC (%)	เวลา (ชม.)	SP	WSI	AML	SP	WSI	AML	SP	WSI	AML
12	30	10.98 ^b	6.28 ^b	3.52 ^c	12.45 ^b	6.84 ^{ab}	2.21 ^{ab}	12.02 ^c	27.15 ^b	1.54 ^{bc}
12	60	10.87 ^b	6.01 ^{bc}	3.32 ^{cf}	11.06 ^c	6.40 ^{bc}	2.10 ^b	12.55 ^b	27.36 ^b	1.65 ^b
30	30	11.12 ^a	6.27 ^b	3.56 ^c	13.34 ^a	5.95 ^c	2.03 ^{bc}	12.44 ^b	21.27 ^c	1.45 ^c
30	60	11.03 ^a	5.48 ^c	3.15 ^f	13.12 ^a	5.89 ^c	1.89 ^c	12.58 ^b	21.09 ^c	1.51 ^{bc}
ไม่ผ่าน HMT		10.97 ^b	7.90 ^a	4.03 ^a	12.54 ^b	7.61 ^a	2.36 ^a	13.11 ^a	31.80 ^a	1.83 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

และการปลดปล่อยอะมิโลสมีค่าน้อยกว่าฟลาวัวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ซึ่งจากค่า SB ที่มากขึ้นในขณะที่การละลายและการปลดปล่อยอะมิโลสน้อยลงนั้น อาจเป็นไปได้ว่า ส่วนของการละลายถึงแม้จะมีน้อยแต่มีการเกาะเกี่ยวกันของสายอะมิโลสเนื่องจากการจัดเรียงตัวในกระบวนการ HMT และอาจมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสตาร์ชกับ โปรตีน เมื่อลดอุณหภูมิ จึงมีค่า SB มากขึ้นด้วย

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสตาร์ช

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชซึ่งได้จากความแข็งแรงของโครงสร้างต่อการทำลายด้วยความร้อนซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์อะไมเลส ตลอดจนการตรวจหาปริมาณผลึกและชนิดของผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนหรือการวิเคราะห์อุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชัน แสดงดังตารางที่ 11 พบว่า ฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT ทั้งสามพันธุ์ มี T_g และ ΔT สูงกว่า แต่ค่า ΔH ต่ำกว่าฟลาวัวร์จากข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ยกเว้นค่า ΔH ของฟลาวัวร์จากข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟลาวัวร์จากข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT

การที่สตาร์ชมี T_g เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ามีการแรงยึดเกาะกันแน่นขึ้น ทำให้ทนต่อความร้อนได้เพิ่มสูงขึ้น (Lawal, 2005) ค่า $T_g - T_0$ ที่กว้างขึ้น แสดงถึงภายในเม็ดสตาร์ชมีการเกิดความไม่สม่ำเสมอภายในส่วนของออสซิลลูชันและบริเวณผลึกเพิ่มมากขึ้น (Seow and Thevamalar,

1993) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ หลังจากโครงสร้างได้รับพลังงานจากกระบวนการ HMT ค่า ΔH บ่งบอกถึงพลังงานความร้อนที่ใช้ทำลายโครงสร้างด้วยการสลายพันธะไฮโดรเจนของสตาร์ช (Cooke and Gidley, 1992) จากการทดลองข้าวที่ผ่านกระบวนการ HMT โครงสร้างจะถูกทำลายง่ายขึ้น อาจเป็นเพราะการจัดเรียงตัวภายในชั้นผลึกชิดกันมากขึ้น ทำให้ชั้นผลึกบาง น้ำและความร้อนแทรกเข้าไปทำลายระหว่างชั้นผลึกได้ง่าย (Gunaratne and Hoover, 2002) แต่ในกรณีของข้าวเหนียวที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงที่มี ΔH สูง อาจเป็นเพราะอยู่ระหว่างการจัดเรียงตัวภายในชั้นผลึกใหม่ ทำให้ชั้นผลึกกว้างขึ้น ดังจะเห็นได้จาก ค่า $T_c - T_0$ ที่กว้างด้วย แสดงว่ามีความไม่สม่ำเสมอของลักษณะของผลึกอยู่มาก

อัตราการเพิ่มขึ้นของ T_p , $T_c - T_0$ และอัตราการลดลงของ ΔH ของข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการ HMT แตกต่างกันตามปริมาณอะมิโลส และ ปริมาณความชื้นกับเวลาในการให้ความร้อน กล่าวคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของ T_p , $T_c - T_0$ และอัตราการลดลงของ ΔH เมื่อเทียบกับฟลาวร์ของข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ในแต่ละสภาวะการทดลอง จะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลาวร์จากข้าวเจ้ามีมากกว่าของข้าวเหนียว ในสภาวะที่มีความรุนแรง คือ ความชื้น 30% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแปรผันตรงตามปริมาณอะมิโลส แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ HMT มีผลในการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลส

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการใช้ HMT ด้วยเครื่อง X-ray diffraction พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามีแบบแผนโครงสร้างผลึกแบบ A คือมีการเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 15° มีสองพีคเชื่อมติดกันที่ 17° และ 18° และมีอีกหนึ่งพีคที่ 23° ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกโดยทั่วไปที่พบในสตาร์ชจากธัญพืช และเมื่อนำไปคำนวณร้อยละความเป็นผลึกทั้งหมด พบว่า ร้อยละความเป็นผลึกของฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านกระบวนการ HMT สูงกว่าฟลาวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ ขณะที่ร้อยละความเป็นผลึกของฟลาวร์ข้าวเหนียว กข6 ไม่แตกต่างจากฟลาวร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT แสดงว่า ภายในสตาร์ชข้าวเจ้าซึ่งมีอะมิโลสเป็นส่วนประกอบในปริมาณที่สามารถเกิดการจัดเรียงผลึกใหม่ ที่สมบูรณ์ และมีขนาดใหญ่มากขึ้นได้ (Vermeulen, Goderis and Delcour, 2006)

ผลการย่อยสตาร์ชในฟลาวร์ด้วยเอนไซม์อะไมเลสดังตารางที่ 13 พบว่าฟลาวร์จากข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าฟลาวร์จากข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT หรือย่อยได้ง่ายขึ้น แต่ฟลาวร์จากข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง ย่อยได้ยากกว่าฟลาวร์จากข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ส่วนที่ย่อยง่ายขึ้นนั้น น่าจะเกิดจากการที่น้ำสามารถผ่านเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ง่าย เกิดการพองตัว จึงส่งผลทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสามารถเข้าไปย่อยได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการย่อยนั้น

เอนไซม์จะเข้าไปย่อยในส่วนที่เป็นอสัณฐานที่พองตัวได้ ส่วนการที่ ΔH_{gel} มีค่าลดลง แสดงว่าผลึกชิดแน่นและค่าร้อยละความเป็นผลึกก็สูง จึงทำให้มีส่วนที่ย่อยได้น้อย ส่วนข้าวเหนียวที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์น้อยกว่า ฟลาวร์ที่ไม่ผ่าน HMT หรือย่อยยาก แต่ข้าวเหนียวที่ผ่านกระบวนการ HMT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมงย่อยง่ายกว่ากว่าฟลาวร์ที่ไม่ผ่าน HMT อาจเป็นเพราะปริมาณความชื้นที่มากกว่า ทำให้โครงสร้างในส่วนผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ย่อยง่ายขึ้น

ตารางที่ 11 ค่า T_p , ΔT และ ΔH ของฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการ HMT

สถานะที่ใช้	เวลา	สุพรรณบุรี90			ขาวดอกมะลิ105			เหนียว กข6		
		T_p (°C)	T_c-T_o (°C)	ΔH (J/g)	T_p (°C)	T_c-T_o (°C)	ΔH (J/g)	T_p (°C)	T_c-T_o (°C)	ΔH (J/g)
12	0.5	67.98 ^c	12.63 ^c	7.12 ^a	69.94 ^b	11.25 ^c	6.48 ^b	67.03 ^c	17.62 ^a	8.78 ^a
12	1.0	69.19 ^b	14.32 ^{ab}	5.22 ^b	70.29 ^b	13.81 ^{ab}	5.51 ^c	68.58 ^{ab}	15.94 ^{ab}	6.01 ^b
30	0.5	74.14 ^a	13.58 ^b	4.26 ^c	71.83 ^{ab}	13.27 ^b	4.92 ^c	69.23 ^a	13.21 ^c	6.32 ^b
30	1.0	74.03 ^a	15.12 ^a	3.59 ^d	72.60 ^a	14.45 ^a	2.68 ^d	68.90 ^a	16.54 ^a	5.89 ^b
ไม่ผ่าน HMT		66.80 ^d	12.50 ^c	7.68 ^a	68.04 ^c	11.69 ^c	7.29 ^a	67.57 ^c	14.82 ^{bc}	6.30 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 12 ปริมาณ relative crystallinity

MC (%)	เวลา (ชม.)	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
		(%)	(%)	(%)
12	0.5	18.83 ^{ab}	23.20 ^b	24.15 ^a
12	1.0	18.69 ^b	24.90 ^a	24.15 ^a
30	0.5	19.46 ^a	23.90 ^{ab}	24.56 ^a
30	1.0	19.74 ^a	25.20 ^a	24.48 ^a
ไม่ผ่าน HMT		18.58 ^b	22.30 ^b	24.45 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 13 ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส

สภาวะที่ใช้		สุพรรณบุรี90	ข้าวหอมมะลิ105	เหนียว กข6
MC (%)	เวลา (ชม.)	(%)	(%)	(%)
12	0.5	53.11 ^{ab}	56.02 ^{ab}	65.71 ^b
12	1.0	55.25 ^a	57.12 ^a	58.60 ^c
30	0.5	50.03 ^c	53.21 ^c	74.39 ^a
30	1.0	51.01 ^c	52.36 ^c	71.32 ^{ab}
ไม่ผ่าน HMT		53.15 ^b	58.65 ^a	65.88 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ผลของการ annealing ต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว

3.1 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าว

จากตารางที่ 14-17 เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและข้าวใหม่ พบว่า T_a , 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 มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสัญฐานและชั้นผลึกได้มาก 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 มีผลให้ค่า T_0 และ T_p ต่ำลงแต่ค่า T_c สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปทั้งในชั้น ออสัญฐานและชั้นผลึกในระหว่างการ annealing ทำให้ทั้งชั้นออสัญฐานและชั้นผลึกเกิดการพองตัว จึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างชั้นผลึกลดต่ำลง ส่งผลให้ค่า T_0 และ T_p ต่ำลง

เมื่อใช้เวลาในการ annealing ข้าวนานถึง 3 วัน มีผลให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินปรับตัวใหม่ให้เกิดความสมบูรณ์ของทั้งชั้นออสัญฐานและชั้นผลึกเพิ่มขึ้น 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 ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่ม

ระยะเวลาในการ 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 ในระยะเวลาหนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับ T_0 โดยใช้ปริมาณมากกว่า 60% ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ annealing ที่มีผลทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นออสซิลลูมและชั้นผลึกของเม็ดแป้ง 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 เป็นปริมาณน้ำที่มาก (Jacob and Delcour, 1998) ทั้ง 2 ระดับ ดังนั้นระดับการแทรกซึมของน้ำเข้าไปสู่ชั้นผลึกและชั้นออสซิลลูมของเม็ดแป้งในระหว่างการ annealing จึงไม่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tester et al. (1998) ที่พบว่าผลของการ annealing เกิดขึ้นได้ดีเมื่อใช้น้ำมากกว่า 60% แต่ทั้งนี้พบว่าผลของการ annealing เกิดขึ้นได้อย่างจำกัดเมื่อใช้น้ำ 20%

ค่า ΔH ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและใหม่ มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ดังตารางที่ 14-17 เนื่องจากระยะเวลาในการ annealing ชั้นออสซิลลูมและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้ความหนาของชั้นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genkina, Lyubov, Wasserman and Yuryev (2004) ที่พบว่าในช่วงแรกของการ annealing ชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น จึงมีการปรับตัวเพื่อให้พลังงานที่มีอยู่ภายในชั้นผลึกเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกลดลง ส่งผลให้ค่า ΔH ลดลง หลังการ annealing พบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_0$) ของแป้ง ฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่า (ตารางที่ 17) และแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าและใหม่ (ตารางที่ 18 และ 20 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 19) ซึ่งช่วง $T_c - T_0$ ที่แคบลงนี้ แสดงถึงเม็ดแป้งมีความ homogeneous มากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov, and Yuryev, 2004)

ตารางที่ 14 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของเกิดผลึกดีโนเซนของแป้งปลาวัวข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กย 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 14 (ต่อ)

ตัวอย่าง	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_0$ (°C)	ΔH (J/g)
$T_a < T_0$ 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
$T_a < T_0$ 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 15 T_0 , T_p , T_c , T_c-T_0 และ ΔH ของการเกิดผลึกในเซชันของแป้งพลารซ์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและ ไม่ผ่านการ annealing

ตัวอย่าง	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_0$ (°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					
$T_a < T_0$ 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
$T_a < T_0$ 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 15 (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 16 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดผลึกดีโนเซนของแป้งถาวรข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ 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
สถานะที่ใช้ในการ 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 16 (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 17 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดผลึกในชั้นของเม็่งฟลาวรีทแก้วเข้าใหม่พันธุ์ 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 17 (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)

การ annealing มีผลให้ค่า T_g , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ (ตารางที่ 16 และ 17) เพิ่มขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและข้าวเจ้าเก่า (ตารางที่ 14 และ 15) ตามลำดับ ($p < 0.05$) โดยค่า T_g , T_p และ T_c ของข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่ สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ในวันแรก ที่ $T_a < T_g$, 30°C ส่วนค่า T_g , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$, 30°C ในวันที่ 3 แต่ของข้าวเหนียวเก่าไม่เปลี่ยนแปลงที่สภาวะนี้ แต่สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ใน 12 ชั่วโมงแรก ที่ $T_a < T_g$, 7°C ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษา อาจเกิดการระเหยของความชื้นในข้าวสาร (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ทำให้อะมิโลสและปลายสายอะมิโลเพกตินที่อยู่ในชั้นอสัณฐานเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น และอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกพันเกี่ยวกันแน่นมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการ annealing น้ำจึงแทรกซึมเข้าไปในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกของข้าวเก่าได้ยากกว่าในข้าวใหม่ ทำให้การเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อให้เกิดความเป็นระเบียบได้ยากกว่าในข้าวใหม่ จึงทำให้ต้องใช้ อุณหภูมิที่สูง ในระยะเวลาที่นาน เพื่อให้โครงสร้างภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกของข้าวเก่าเป็นระเบียบมากขึ้น หลังจากการ annealing แล้ว ค่า T_g , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่า (ตารางที่ 15) สูงขึ้นเร็วกว่าแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า (ตารางที่ 14) ($p < 0.05$) โดยค่า T_g , T_p และ T_c ของข้าวเจ้าเก่าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$, 30°C นาน 3 วัน แต่ที่สภาวะนี้ไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวในข้าวเหนียวเก่า แต่พบที่ $T_a < T_g$, 7°C ใน 12 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้จากการที่ข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมากกว่าข้าวเหนียว (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลา นุวัฒน์, รุ่งทิภา วันสุขศรี และบุญทิภา นิลจันทร์, 2546) ดังนั้นเมื่อผ่านการ annealing แล้ว มีผลให้อะมิโลสในชั้นอสัณฐานเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ให้มีความเป็นระเบียบ และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ชั้นอสัณฐานอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Genkina and Wasserman, 2004; Tester et al., 1998) ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในชั้นอสัณฐานของข้าวเจ้าได้ยากกว่าในข้าวเหนียว จึงทำให้ต้องใช้ อุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนเซชัน ดังนั้นค่า T_g , T_p และ T_c ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าจึงสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียวเก่า อันเนื่องมาจากผลเสริมของการที่มีอะมิโลสมากกว่าข้าวเหนียว

การ annealing เป็นระยะเวลานาน โดยใช้ อุณหภูมิสูง ($T_a < T_g$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน) มีผลให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ ค่า T_g , T_p , T_c , $T_c - T_g$ และ ΔH ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าไม่ต่างจากข้าวเหนียวใหม่ ($p > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 14 แต่พบว่าค่าดังกล่าวของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าสูงกว่าของข้าวเจ้าใหม่เล็กน้อย ($p < 0.05$) ในตารางที่ 15 ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างของข้าวเหนียวประกอบด้วยอะมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ และมีอะมิโลสในชั้นอสัณฐานน้อย ซึ่งต่างจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสในชั้นอสัณฐานมาก ดังนั้นน้ำจึงสามารถแทรกผ่านชั้นอสัณฐานของข้าวเหนียวเข้าไปสู่ชั้นผลึกได้ง่าย ทำให้อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกของข้าวเหนียวสามารถจัดเรียงตัวเพื่อให้เกิดความเป็นระเบียบได้ง่ายกว่าข้าวเจ้า ด้วยเหตุนี้จึง

สามารถให้การ annealing ลดความแตกต่างของอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและใหม่ให้มีค่าใกล้เคียงกันได้

3.2 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าว

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่า ข้าวเหนียวใหม่ ข้าวเจ้าเก่า และข้าวเจ้าใหม่ที่ผ่านมาการ annealing ที่สภาวะต่างๆ พบว่ามีลักษณะแตกต่างกันทั้ง 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 18-21 ตามลำดับ โดยพบว่าค่า PT ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าหลังการ annealing ทุกสภาวะมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) แต่พบว่าค่า PV , BD , FV และ SB ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าหลังการ annealing ทุกสภาวะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) นอกจากนี้ก็พบว่าค่า PT เมื่อทำการ 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 สามารถเหนียวนำให้อะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และแข็งแรงขึ้นได้มากกว่า (Stute, 1992; Jacob et al., 1995; Tester et al., 2000) จึงต้องใช้อุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นมากกว่าเพื่อให้เม็ดแป้งพองตัว และยังพบอีกว่าค่า PV เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C มีค่าสูงกว่าที่ $T_a < T_0$, 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวนำให้อะมิโลเพกตินภายในโครงสร้างของชั้นผลึกที่พันเกลียวกันแน่นขณะเก็บรักษาเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้ชั้นผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีช่องว่างมากขึ้น (Chung, Moon and Chun, 2000; Nakazawa and Wang., 2003) ชั้นผลึกจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เม็ดแป้งจึงสามารถพองตัวได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าสูงกว่า และเมื่อเม็ดแป้งแตกออกจึงทำให้ค่าความหนืดต่ำสุดสูงกว่าด้วย ส่งผลให้ค่า BD ของข้าวเหนียวเก่าที่ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว จึงมีปริมาณเด็คซ์ทรินสายสั้นและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งมากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถรวมตัว (aggregate) กัน ได้ดีกว่า จึงทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการคืนตัวเมื่อทำการที่ annealing ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงไม่ต่างกัน เมื่อสังเกตจากค่า SB ของการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30 และ 7°C ที่ไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามระยะเวลาการ annealing เนื่องจากในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing มีการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกระหว่างอะมิโลสในชั้นอสัณฐานและระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลเพกตินจนมีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง (Genkina et al., 2004; Tester et al., 1998)

ตารางที่ 18 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดผลึกในเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าและข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ 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 19 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งพลาเวรข้าวเจ้าเก่าและข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ 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 ($p < 0.05$)

ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่า แสดงในตารางที่ 19 พบว่าค่า PT ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าเก่าที่ผ่านการ annealing แล้ว สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่มีค่า PV และ FV ต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยเฉพาะเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิที่สูง เห็นยวนำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินได้ทั้งในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก ทำให้ PT สูงขึ้น และ PV มีค่าต่ำลง หลังจากผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว มีอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย อะมิโลสเหล่านี้จึงรวมตัวกันได้ยาก ส่งผลให้ FV มีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามระยะเวลาการ annealing เช่นเดียวกันกับในข้าวเหนียวเก่า

ข้าวเหนียวใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C (ตารางที่ 22) มีค่า PT ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($P > 0.05$) แต่ค่าดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ($P < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงมีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึก มีความเป็นระเบียบมากขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อให้เม็ดแป้งพองตัว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้ว ค่า PV, BD, FV และ SB มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ($P < 0.05$) และยังพบอีกว่าข้าวเหนียวใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C มีค่า PV และ TV ต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($P < 0.05$) ส่งผลให้ค่า BD ของข้าวเหนียวใหม่ที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C น้อยกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าข้าวเหนียวใหม่ที่ทำการ annealing ที่อุณหภูมิสูงสามารถทนต่อความร้อนและแรงเฉือนได้มากกว่าการ 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 ค่า PT สูงขึ้น ส่วนค่า PV, TV, BD, FV และ SB ต่ำลง เนื่องจากเมื่อเวลาที่ทำการ annealing นานขึ้น ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Nakazawa and Wang., 2003; Tester, et al., 1998)

ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเจ้าใหม่ แสดงในตารางที่ 23 พบว่า PT ของข้าวเจ้าใหม่ที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดช่องว่างในชั้นผลึกขึ้น (Jacob et al., 1995; Nakazawa and Wang, 2003; Tester, et al., 1998) ส่งผลให้น้ำแทรกเข้าไปในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกได้ง่าย ทำให้เม็ดแป้งพองตัวที่อุณหภูมิไม่ต่างข้าวเจ้าใหม่ที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่า PV, TV, BD, FV และ SB ของข้าวเจ้าใหม่ที่ผ่านการ annealing แล้ว อาจมีค่าสูงมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ซึ่ง

เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ค่าดังกล่าวสูงกว่าที่ $T_a < T_0$ 30°C เนื่องจากผลจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เม็ดแป้งมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้พองตัวมากขึ้น จึงทำให้ค่า FV สูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว อาจมี ghosts remnant แทรกตัวอยู่ภายในเจล (Miller et al, 1973) ทำให้ค่า FV สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาการ annealing ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่อะมิโลสและอะมิโลเพกตินเกิดการปรับตัว ในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing

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

3.3 ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการ annealing ต่อค่าการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งฟลาวัวร์ข้าว

ค่าการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่า ข้าวเจ้าเก่า ข้าวเหนียวใหม่ และข้าวเจ้าใหม่ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 2-9 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งข้าวเก่าและใหม่ ที่ผ่านการ annealing สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C ($p < 0.05$) โดยพบว่าหลังจากการ annealing แล้ว ค่าการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวเก่ามีค่าลดลง ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทั้งในน้ำ 65 และ 75% มีค่าการละลายสูงขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 2-3) แต่เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวเก่าเป็นเวลา 3 วัน ในทั้ง 2 ระดับอุณหภูมิพบว่าค่าการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งมีค่าลดลง ($p < 0.05$) (ภาพที่ 2 และ 3) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น โครงสร้างของอะมิโลเพกตินและอะมิโลสมีการปรับตัวให้เป็นระเบียบและแข็งแรงมากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบว่าการ

ตารางที่ 20 ลักษณะความหนืดของแป้งพลาการ์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ 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
สภาวะที่ใช้ในการ 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 20 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
$T_a < T_o$ 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
$T_a < T_o$ 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 21 ลักษณะความหนืดของแป้งพลาวยั่วข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและ ไม่ผ่านการ 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 21 (ต่อ)

ตัวอย่าง	Viscosity Parameter (RVU)					
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
$T_a < T_0$, 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
$T_a < T_0$, 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 22 ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวรรีข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ 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
สถานะที่ใช้ในการ annealing						
$T_a < T_0$ 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
$T_a < T_0$ 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 22 (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 23 ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ 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 23 (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 ($p < 0.05$)

annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C นั้นทำให้กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งลดลงมากกว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงทำให้เมล็ดแป้งแข็งแรงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ การ annealing ข้าวเจ้าเก่าที่ $T_a < T_0$, 30 และ 7°C ทั้งในน้ำ 65 และ 75% แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วันต่ำกว่าการ annealing เป็นเวลา 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing นานขึ้น ทำให้โครงสร้างชั้นออสติฐานและชั้นผลึกของเมล็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C มีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$, 30°C ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลให้อะมิโลสจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และแข็งแรงกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งของข้าวเจ้าเก่าที่ทำการ 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 และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C มีค่าสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing น้ำสามารถแทรกเข้าไปในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกภายในเมล็ดแป้ง ทำให้โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้นออสติฐานและชั้นผลึกยืดหยุ่นมากขึ้น เม็ดแป้งจึงพองตัวได้มากขึ้น และมีอะมิโลสที่ละลายออกมาจากเมล็ดแป้งมากกว่าข้าวเจ้าเก่าที่ไม่ผ่านการ annealing

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30 และ 7°C ทั้งในน้ำ 65 และ 75% แสดงดังภาพที่ 6-9 จากภาพพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งเมื่อทำการ annealing เป็นเวลา 3 วันต่ำกว่าการ annealing เป็นเวลา 1 วัน ซึ่งพบทั้ง 2 ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการ annealing ทั้งนี้เกิดเนื่องจากการ annealing นานขึ้น ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวกันสมบูรณ์ขึ้น ดังที่ได้อภิปรายในข้างต้น จึงส่งผลทำให้เมล็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งของแป้งข้าวเหนียวที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C มีค่าต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$, 7°C ซึ่งอาจเนื่องมาจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เมล็ดแป้งยืดหยุ่นน้อย จึงเกิดพองตัวได้ยาก ทำให้เด็กซ์ทรินสายสั้นและอะมิโลสละลายออกจากเมล็ดแป้งมีปริมาณน้อย แต่พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเมล็ดแป้งของแป้งข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C มีค่าต่ำกว่าการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนี่ยวนำสายอะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับให้ออกมาอยู่ในชั้นออสติฐาน จากผลของการพันเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินในชั้นผลึกให้ระเบียบมาก

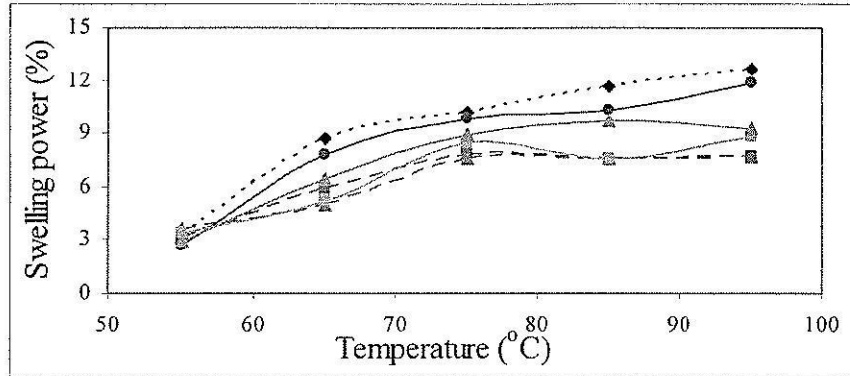
สูงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) จึงเป็นผลให้กำลังการพองตัวของ การ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C ต่ำกว่าที่ $T_a < T_0$, 30°C

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

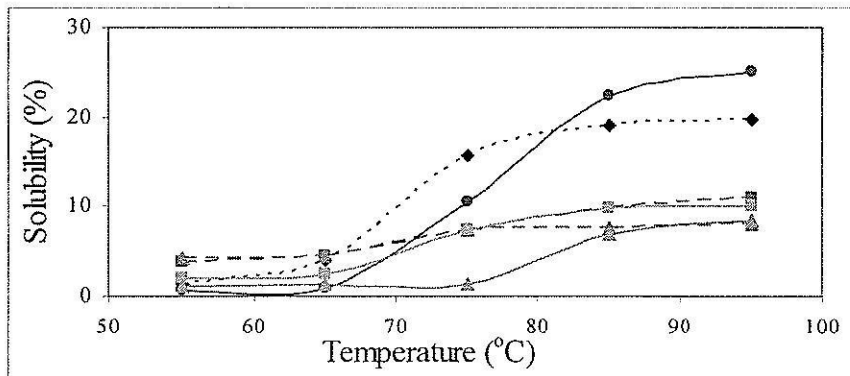
3.4 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งสตาร์ชข้าว

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 24-25 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นอสังฐานและชั้นเปลือกได้มาก ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน เพื่อปรับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างเกลียวของอะมิโลสและของอะมิโลเพกติน ให้มีความเป็นระเบียบเหมาะสม และมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เมล็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกของเมล็ดแป้งสูงขึ้น (Jacobs and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester, Debon and Karkalas, 1998; Stute, 1992)

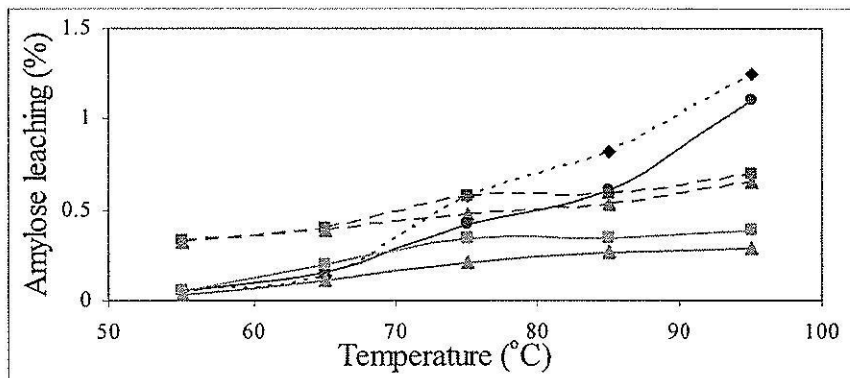
เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้นเป็น 3 วัน ส่งผลให้ค่า T_0 , T_p และ T_c เพิ่มสูงกว่าในวันแรก ($p < 0.05$) เนื่องจากระหว่างช่วงเวลาในการ annealing อะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในชั้น อสังฐานและชั้นเปลือก เกิดการจัดเรียงตัวเพื่อลดความไม่เป็นระเบียบลงตามระยะเวลาในการ annealing ที่นานขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด เป็นผลให้เมล็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของเมล็ดแป้งมีค่าสูง (Jacob and Delcour, 1998; Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อเมล็ดแป้งมีความแข็งแรงมากที่สุด แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นก็ไม่ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ annealing ให้นานขึ้นเป็น 7 วัน ก็พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c ไม่ต่างจากเมื่อทำการ annealing เป็น 3 วัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Yuryev, Genkina, และ Wasserman, (2004) ที่พบว่า annealing แป้งข้าวสาลีที่ $T_a < T_0$, 55°C ไม่ทำให้ค่า T_0 , T_p และ T_c ของการ annealing เป็นเวลา 7 วัน ต่างจากการ annealing เป็นเวลา 10 วัน จากผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับงานของ Tester et al. (1998) ที่พบว่า การ annealing ในระยะเวลานานระดับหนึ่ง ที่อุณหภูมิสูงใกล้กับ T_0 โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% ถือว่าเป็นสถานะที่เหมาะสมในการ annealing ที่มีผลทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ภายในชั้น อสังฐานและชั้นเปลือกของเมล็ดแป้ง จัดเรียงตัวให้เกิดความเป็นระเบียบ ส่งผลให้ ค่า T_0 , T_p และ T_c สูงขึ้น



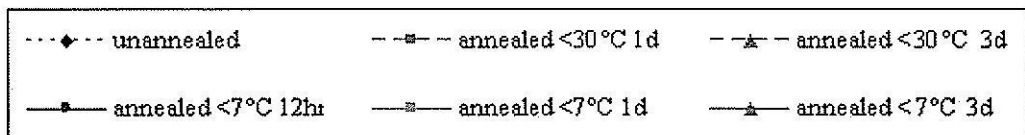
(ก)



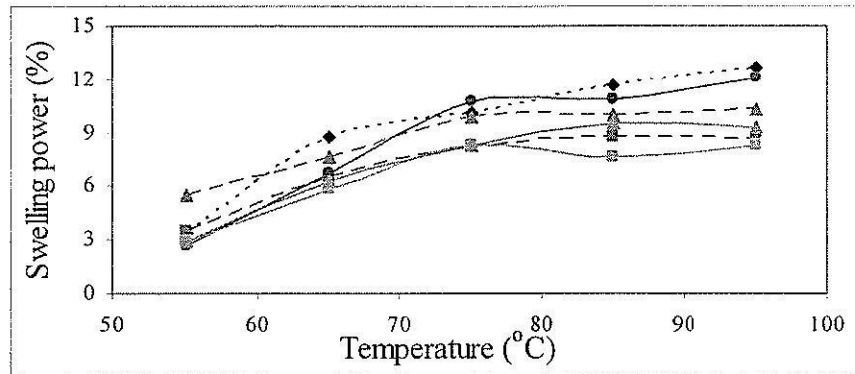
(ข)



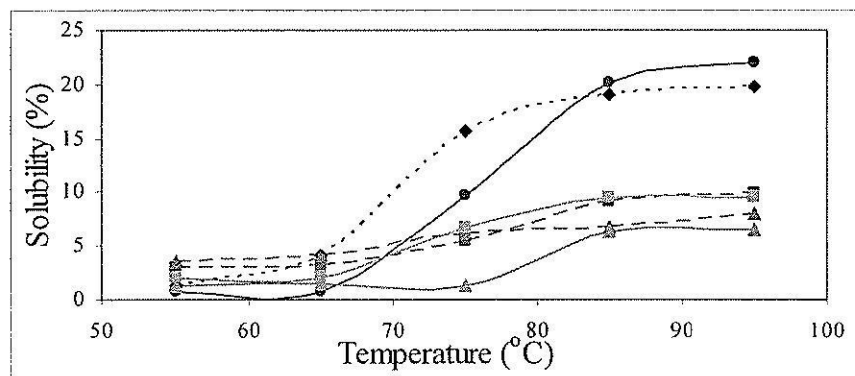
(ค)



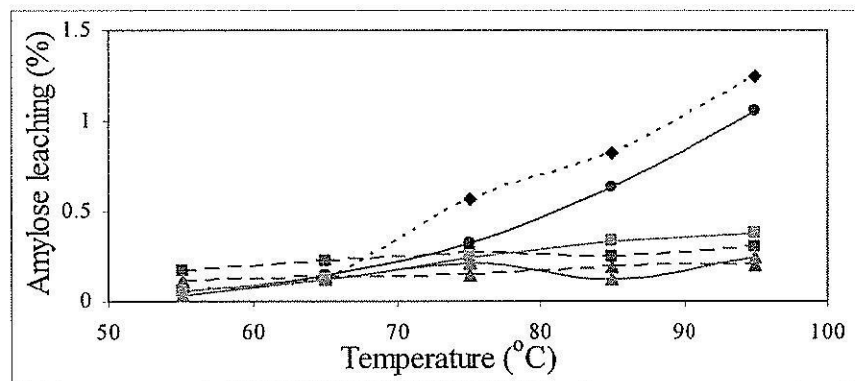
ภาพที่ 2 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



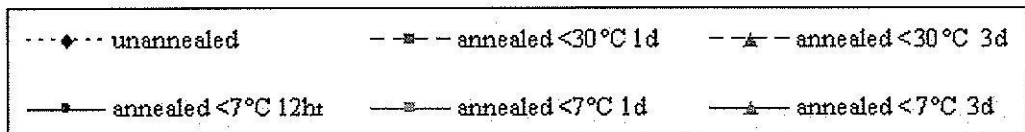
(ก)



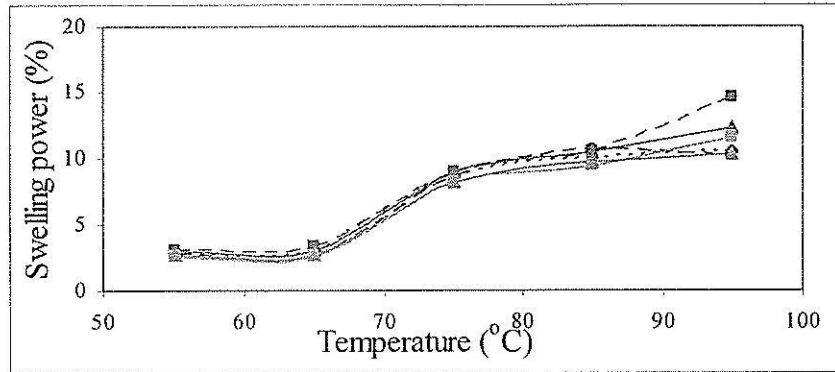
(ข)



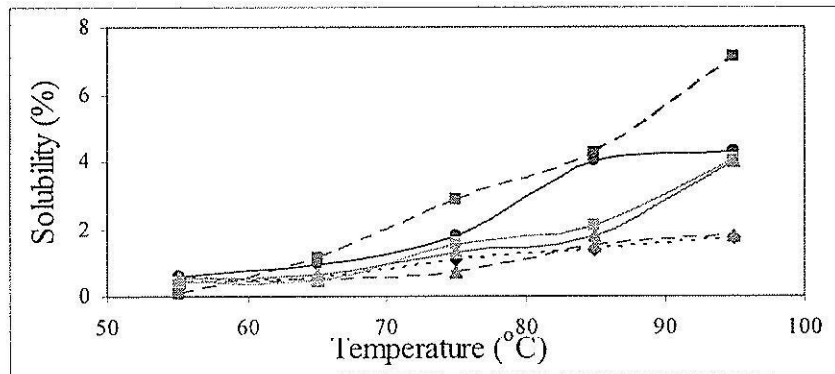
(ค)



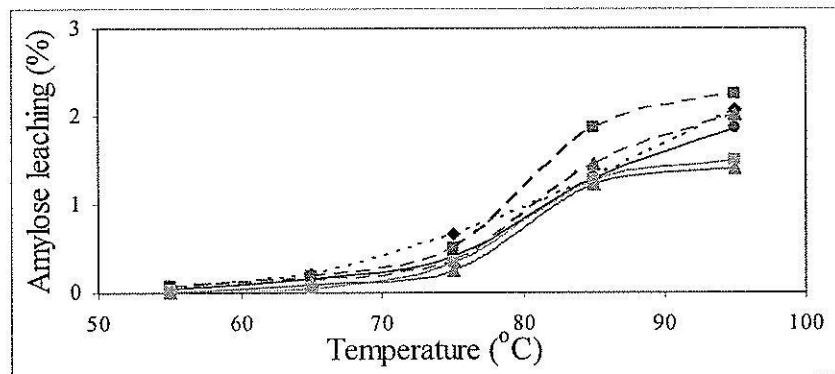
ภาพที่ 3 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวรีข้าวเหนียวเก่าพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%



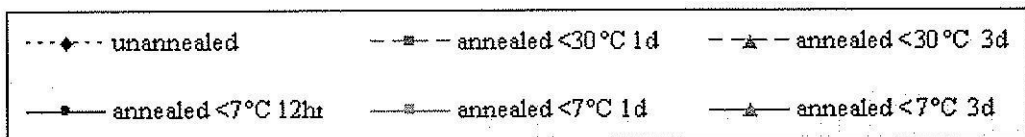
(ก)



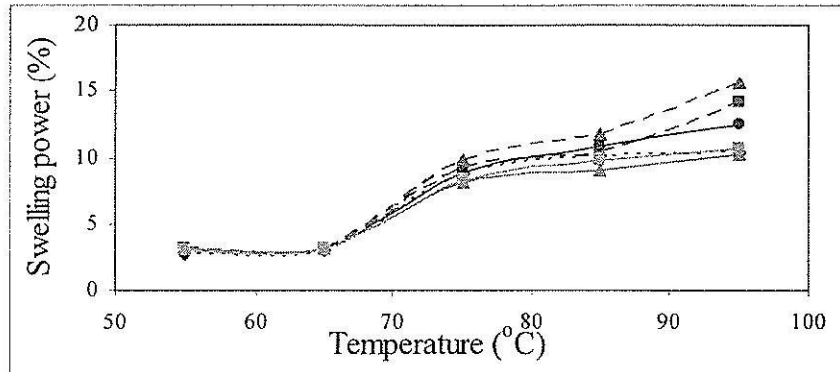
(ข)



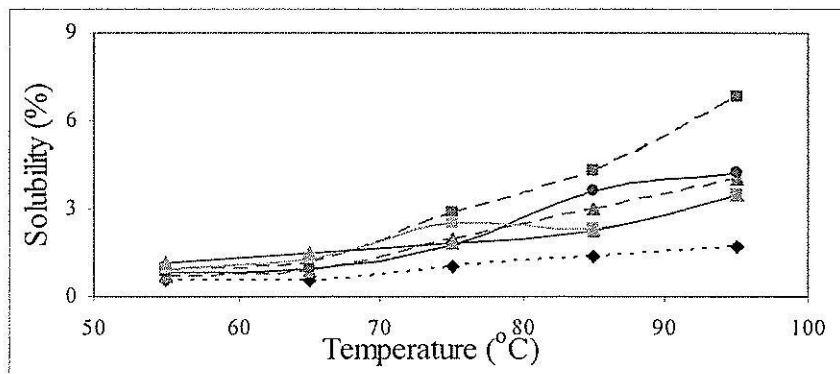
(ค)



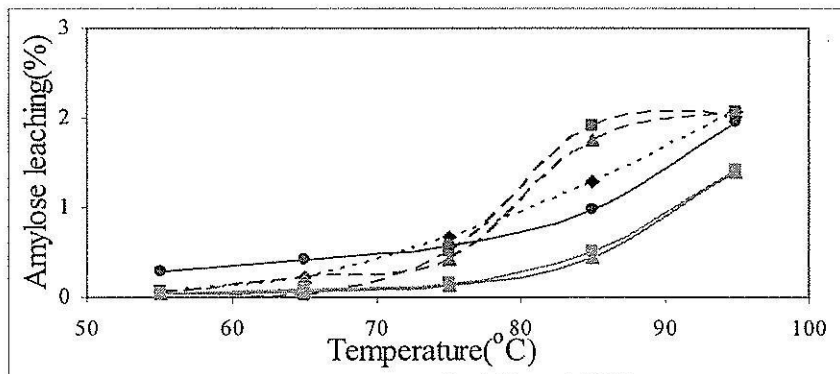
ภาพที่ 4 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งพลารี่ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



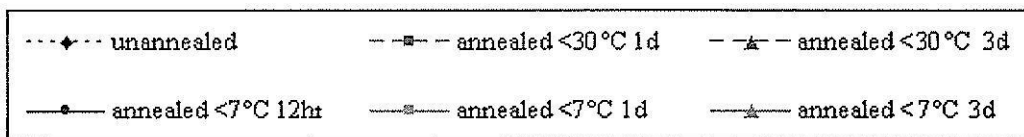
(ก)



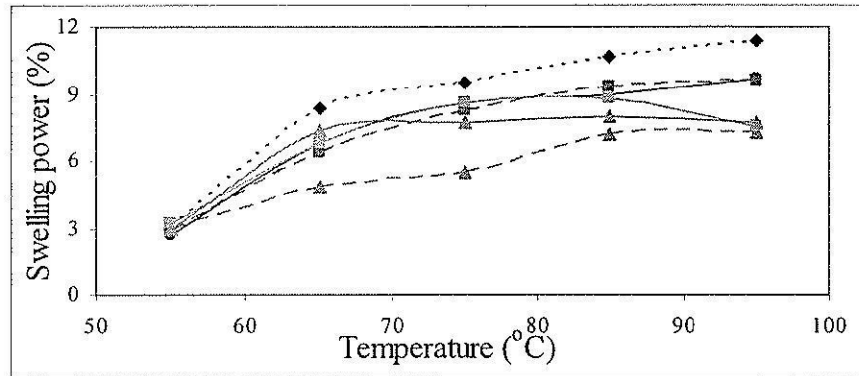
(ข)



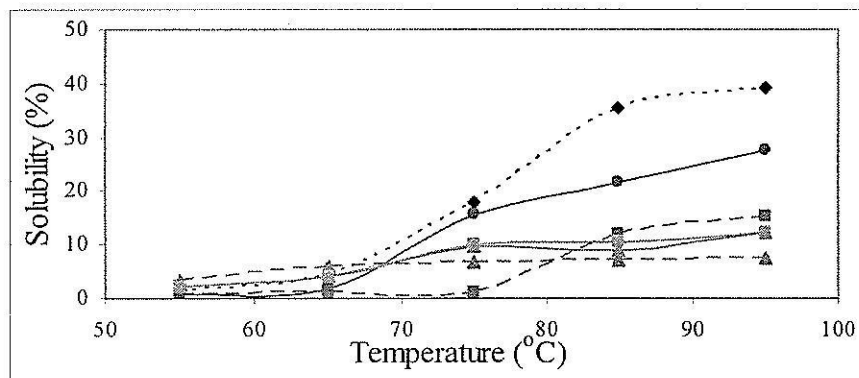
(ค)



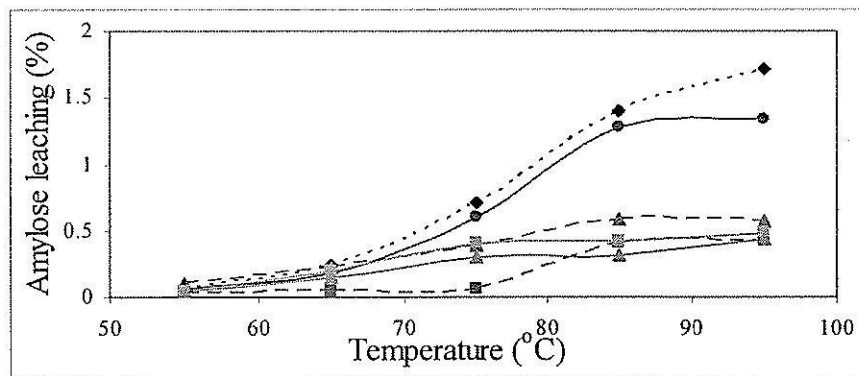
ภาพที่ 5 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าเก่าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%



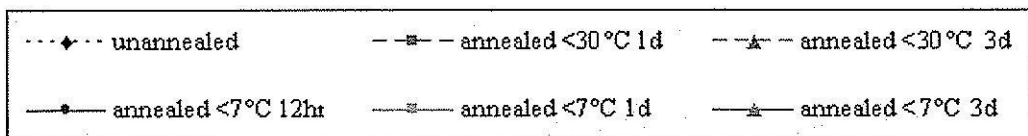
(ก)



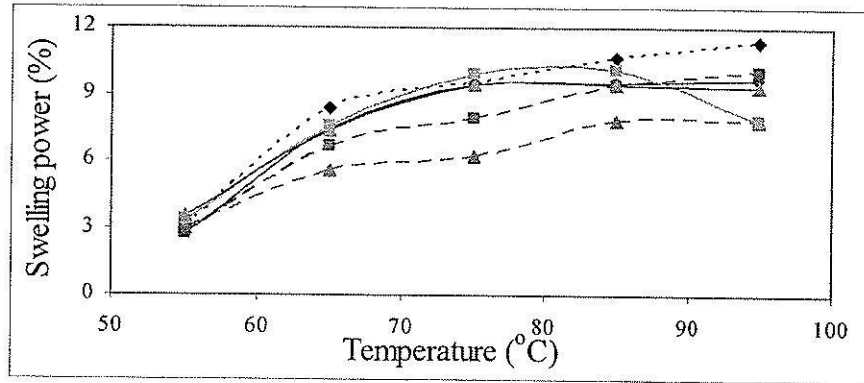
(ข)



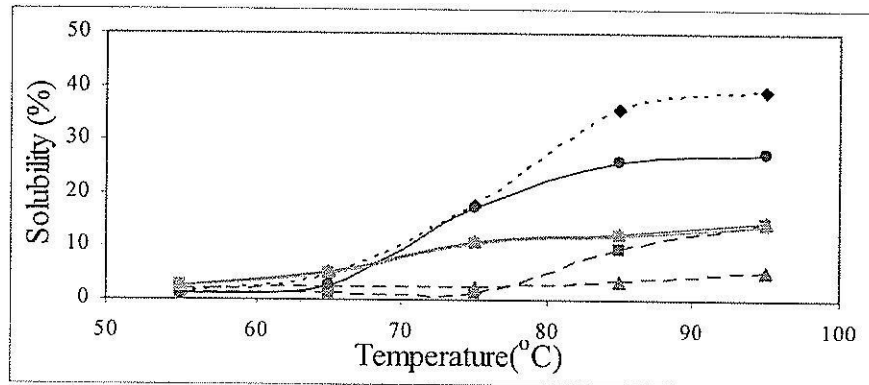
(ค)



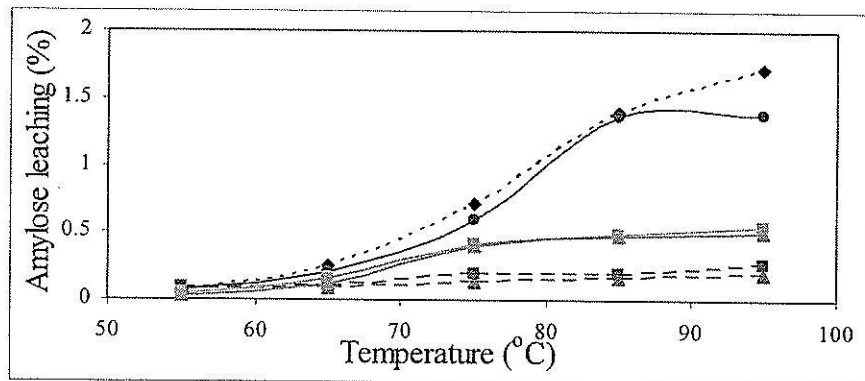
ภาพที่ 6 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



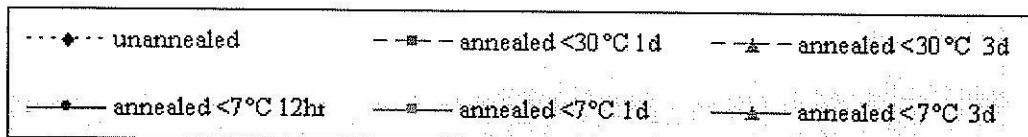
(ก)



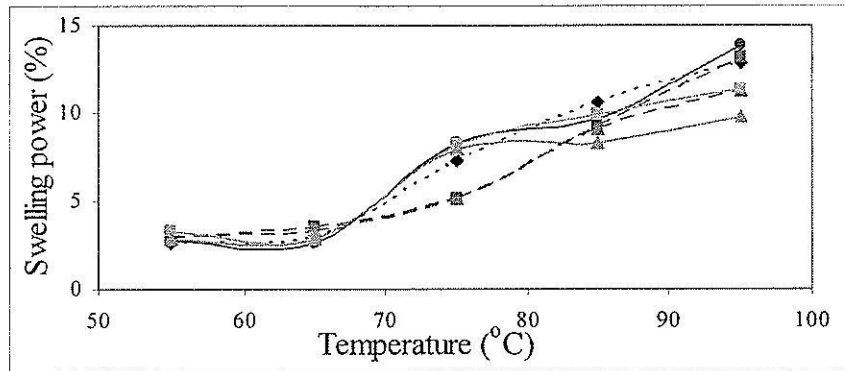
(ข)



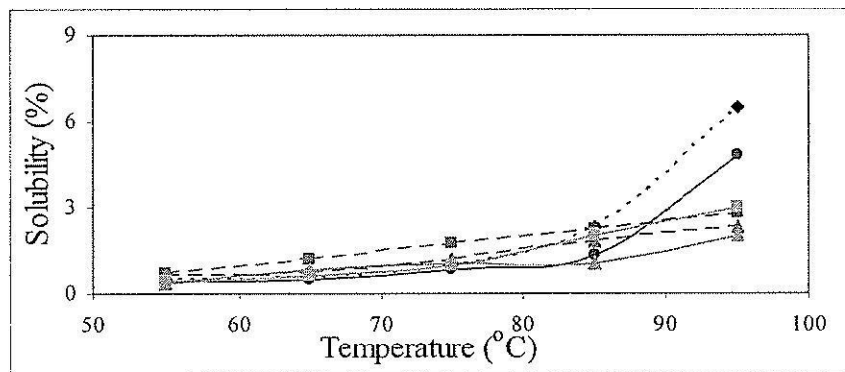
(ค)



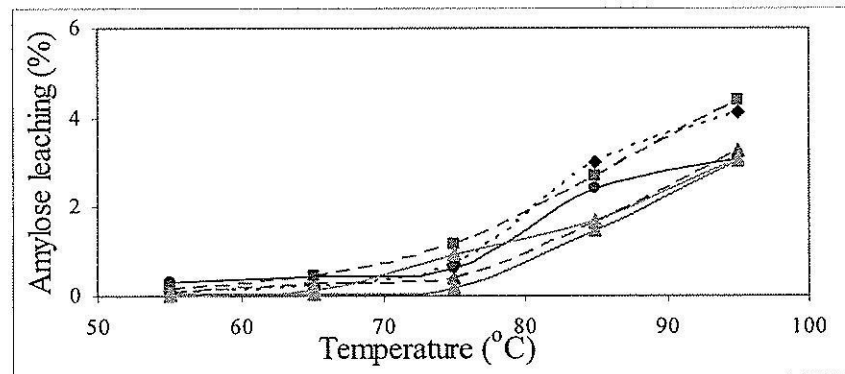
ภาพที่ 7 กำล้างการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่พันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%



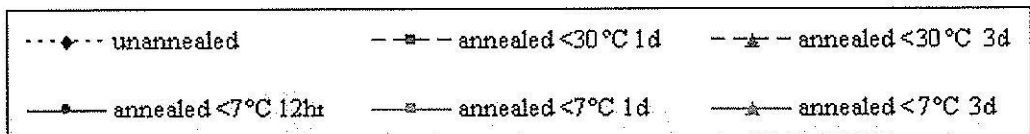
(ก)



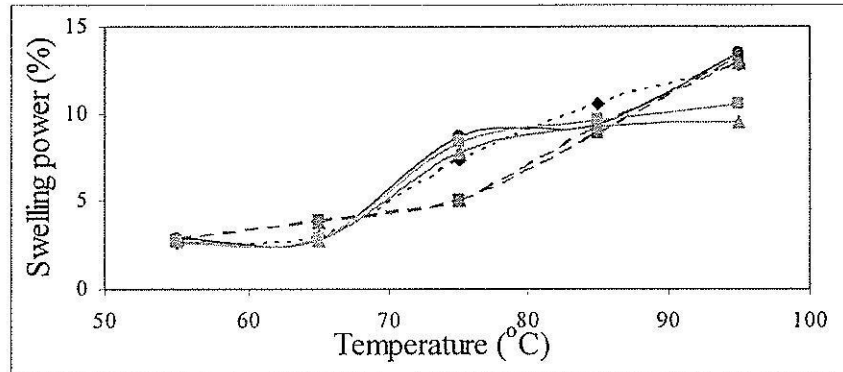
(ข)



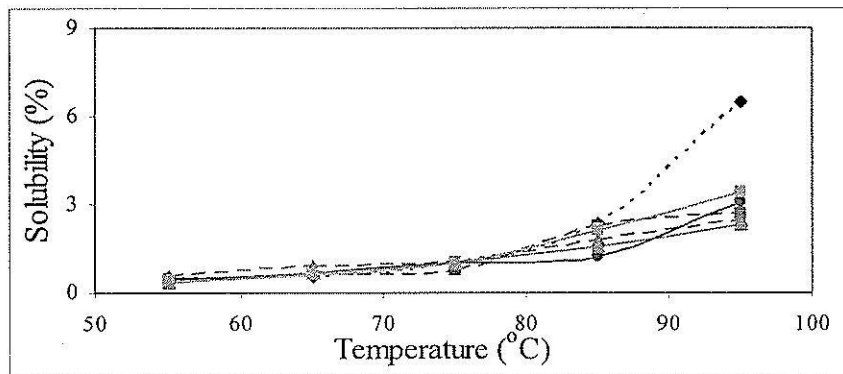
(ค)



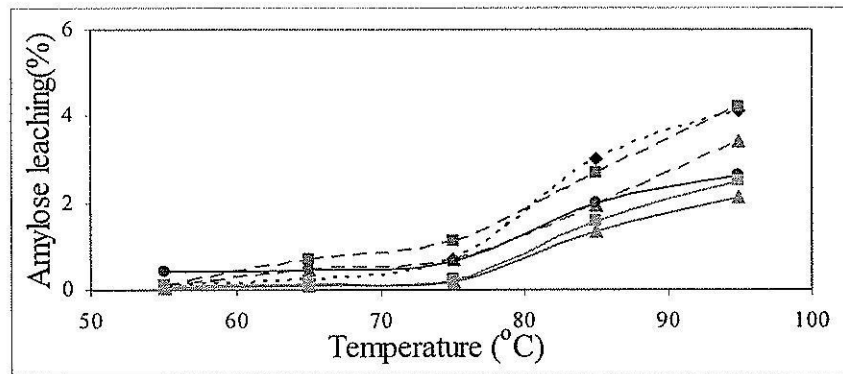
ภาพที่ 8 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวรีข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 65%



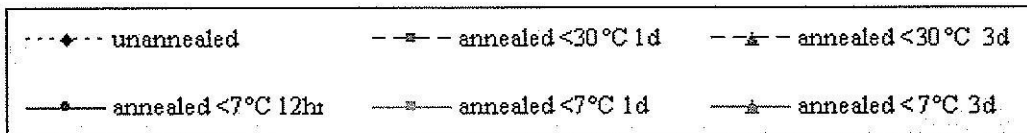
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 9 กำลังการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งฟลาวร์ข้าวเจ้าใหม่พันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$, 30°C และ 7°C ในน้ำ 75%

ค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสาลีข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าข้าวเหนียว โดยค่าดังกล่าวของข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 30°C เป็นเวลา 1 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า T_0 , T_p และ T_c ของแป้งสาลีข้าวเหนียว ซึ่งค่า T_0 และ T_p ของข้าวเหนียว สูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน ($P < 0.05$) โดยที่ค่า T_c ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ($P > 0.05$) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากในข้าวเจ้ามีปริมาณอะมิโลสในชั้นอัสฐานมากกว่าในข้าวเหนียว (Juliano, 1984) ซึ่งอะมิโลสอาจเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกในระหว่างที่ข้าวเจ้าเจริญเติบโต และเมื่อผ่านการ annealing แล้วอะมิโลสที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับออกมาอยู่ในชั้นอัสฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ให้มีความเป็นระเบียบและมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ชั้นอัสฐานของข้าวเจ้าอยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น (Tester et al., 2000) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ทำเม็ดแป้งของแป้งสาลีข้าวเจ้าเกิดการเจลาติไนเซชัน จึงทำให้ค่า T_0 ของข้าวเจ้าสูงขึ้นเร็วกว่าของข้าวเหนียว

ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) ของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ในการ annealing เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing ดังตารางที่ 24 และ 25 ตามลำดับ เนื่องจากระหว่างระยะเวลาในการ annealing ชั้นอัสฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้ความหนาของชั้นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการ annealing ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Genkina, Lyubov, Wasserman and Yuryev (2004) ที่พบว่าในช่วงแรกของการ annealing ชั้นผลึกภายในเม็ดแป้งมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ΔH เพิ่มขึ้น จึงมีการปรับตัวเพื่อให้พลังงานที่มีอยู่ภายในชั้นผลึกเสถียรมากขึ้น เมื่อเวลาในการ annealing นานขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นผลึกลดลง ส่งผลให้ค่า ΔH ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน ($T_c - T_0$) ของข้าวเหนียวแคบลง เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 3 วัน แต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่พบความเปลี่ยนแปลงของช่วง $T_c - T_0$ ในแป้งสาลีข้าวเจ้า ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ annealing โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะมิโลเพกตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในข้าวเหนียวจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้เม็ดแป้งมีความ homogeneous เพิ่มมากขึ้น (Kiseleva, Genkina, Tester, Wasserman, Popov, and Yuryev, 2004)

ตารางที่ 24 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กช 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
สถานะที่ใช้ในการ 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 25 T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH ของการเกิดผลึกในเซชันของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กษ 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ 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
สถานะที่ใช้ในการ 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

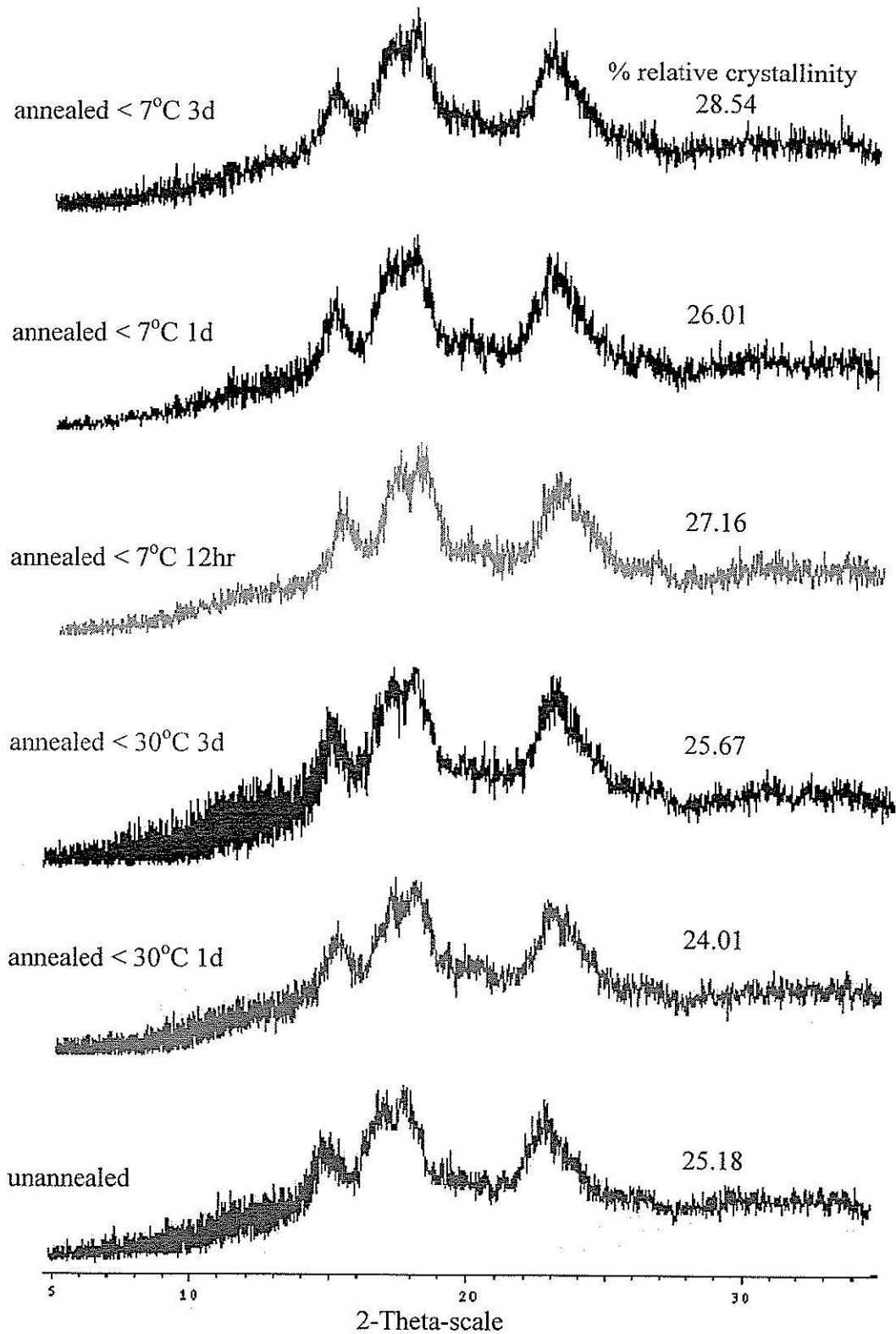
ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.5 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชข้าว

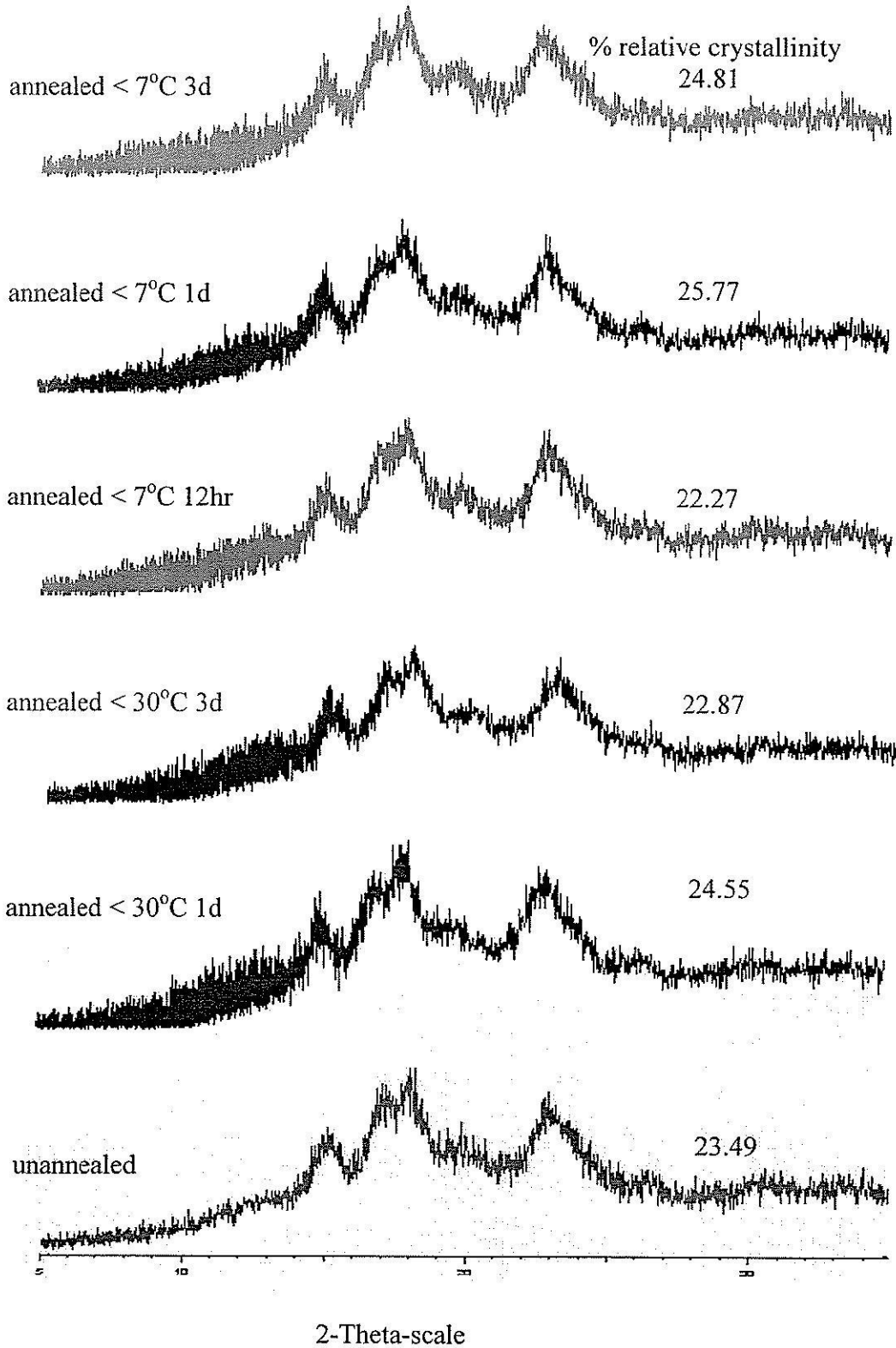
แป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 และข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านการ annealing ในทุกสภาวะ พบพิกที่ปรากฏที่มุม 15° , 17° , 18° และ 23° ดังภาพที่ 10 และ 11 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A (Buleon, Colonna, Planchot and Ball, 1998) และพบว่าพิกที่ปรากฏนี้ ไม่ต่างจากพิกที่ปรากฏในแป้งสตาร์ชของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการ annealing แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Stute (1992) ที่ทำการ annealing แป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 52°C เป็นเวลา 14 และ 95 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านการ annealing แล้ว โครงสร้างผลึกของแป้งสตาร์ชมันฝรั่งยังคงเป็นแบบ B เหมือนกับที่พบในแป้งสตาร์ชมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ relative crystallinity แปรผันตรงกับค่า ΔH โดยเมื่อปริมาณ relative crystallinity เพิ่มขึ้นค่า ΔH ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อปริมาณ relative crystallinity ลดลงค่า ΔH ก็ลดลง ตามสภาวะที่ทำการ annealing แสดงให้เห็นว่าการ annealing ทำให้อะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น จนกว่าจะเกิดความสมบูรณ์มากที่สุด

3.6 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการย่อยด้วยกรดของแป้งสตาร์ชข้าว

การย่อยด้วยกรดของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$, 7°C เป็นเวลา 1 และ 3 วัน แสดงดังภาพที่ 12 ก และ ข ตามลำดับ ซึ่งสภาวะดังกล่าวเกิดผลของการ annealing ที่มากและค่อนข้างคงที่แล้ว การศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้งด้วยการย่อยด้วยกรดแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วง 8 วันแรกเป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นออสัญฐาน และในช่วงที่ 2 เป็นการย่อยในชั้นผลึกซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 10-30 ของการย่อยด้วยกรด (Nakazawa and Wang, 2003) จากผลการทดลองพบว่าในช่วง 8 วันแรกแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing แล้วมีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่าการ annealing เพียง 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและเด็คซ์ตรินสายสั้นที่เคยแทรกตัวอยู่ในชั้นผลึกถูกขับให้ออกมาอยู่ในชั้นออสัญฐาน และเกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้ชั้นออสัญฐานอยู่ในสภาวะ 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) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นออสัญฐานของแป้งสตาร์ชที่ผ่านการ annealing เป็นระยะเวลานานมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ในระยะเวลานั้นและที่ไม่ผ่านการ annealing ซึ่งสอดคล้อง

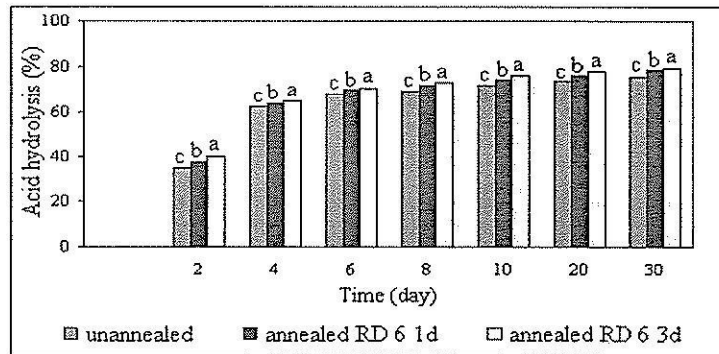


ภาพที่ 10 รูปแบบของการหักเห่งสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$ 30 และ 7°C

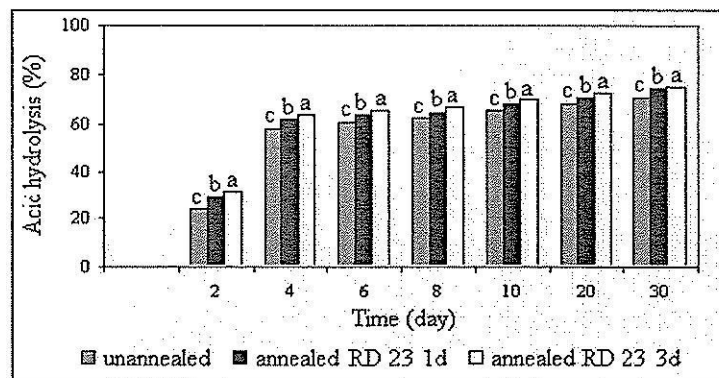


ภาพที่ 11 รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$ 30 และ 7°C

กับการทดลองของ Tester et al. (1998) ที่พบว่าแป้งสาลีข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing แล้วทำให้ชั้นออสติยานมีระเบียบมากขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดในชั้นออสติยานของแป้งสาลีข้าวสาลีที่ผ่านการ annealing สูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing แต่หลังจาก 8 วันแล้ว เป็นการย่อยที่เกิดขึ้นภายในชั้นผลึก โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดของแป้งสาลีข้าวสาลีทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการ annealing แล้วมีค่าสูงกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) โดยข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing เป็นเวลา 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยกรดสูงกว่า 1 วัน ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ในระยะเวลาสั้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในชั้นผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างขึ้นภายในชั้นผลึก ซึ่งจะช่วยให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นผลึกได้ง่ายและเกิดการย่อยได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Nakazawa and Wang (2003) ที่รายงานว่า การ annealing ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นผลึกมากขึ้น จากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลเพกตินเพื่อให้เกิดความเหมาะสม จึงทำให้กรดสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นผลึกได้ง่ายและย่อยได้มากขึ้น



(ก)



(ข)

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 12 การย่อยด้วยกรดของแป้งสาลีข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ก) และแป้งสาลีข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 (ข) เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$, 7°C เป็นเวลา 1 และ 3 วัน

3.7 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าว

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ RVA (Rapid visco analyzer) ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแสดงดังตารางที่ 26 และ 27 ตามลำดับ พบว่าค่า PT ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30°C ไม่ต่างจากที่ไม่ผ่านการ annealing ($p > 0.05$) แต่ค่า PT ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าสูงขึ้นเมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิสูง สามารถเหนียวน้ำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ เพื่อลดความไม่ระเบียบภายในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกได้มากกว่าการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ (Tester et al., 1998; Tester et al., 2000). จึงทำให้เม็ดแป้งสตาร์ชของข้าวที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูงมีความแข็งแรงมากกว่าเม็ดแป้งที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้เม็ดแป้งเริ่มเกิดการพองตัว เป็นผลให้ค่า PT ของข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิสูง มีค่าสูงกว่าที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำ

ค่า PV, TV และ FV ของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่ทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C เป็นเวลา 3 วัน มีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผ่านการ annealing ($p < 0.05$) เนื่องจากการ annealing ที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานาน ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1995; Tester et al., 1998) เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ยาก ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าต่ำลง หลังจากผ่านการเจลาติไนซ์แล้ว อาจมีเด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งน้อย เด็กซ์ตรินสายสั้นและอะมิโลสเหล่านี้จึงรวมตัวกันได้ยาก (aggregate) ส่งผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า PV, TV และ DB ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อน ค่า FV และ SB ซึ่งเป็นความหนืดระหว่างช่วงที่เย็นของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีค่าสูงขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาการ annealing เนื่องจากในระหว่างเวลาที่ทำการ annealing มีการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึกระหว่างอะมิโลสในชั้นอสัณฐาน และระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน จนมีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในชั้นอสัณฐานและชั้นผลึกภายในเม็ดแป้ง (Genkina, Lyubov, Wasserman and Yuryev, 2004; Tester et al., 1998) จึงทำให้ความหนืดขณะร้อนและเย็นของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าแตกต่างกันตามระยะเวลาในการ annealing

ตารางที่ 26 ลักษณะความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวพันธุ์ กช 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	
สถานะที่ใช้ในการ annealing							
$T_a < T_o$ 30 °C ในน้ำ 65%							๘๔
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 27 ลักษณะความหนืดของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 ที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing

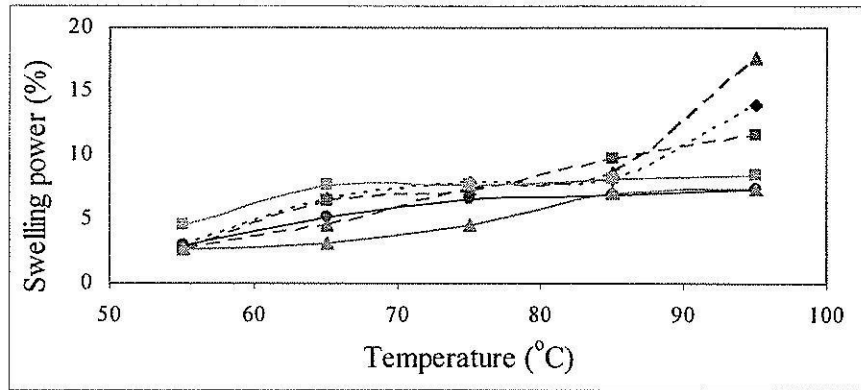
ตัวอย่าง		Viscosity Parameter (RVU)					
		Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature(°C)
ไม่ผ่านการ annealing		157.33±0.59ab	136.96±0.11b	20.37±0.47b	169.21±1.41ab	32.25±1.29bc	82.02±0.07b
สภาวะที่ใช้ในการ annealing							
T _a <T _o 30 °C ในน้ำ 65%							
	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)

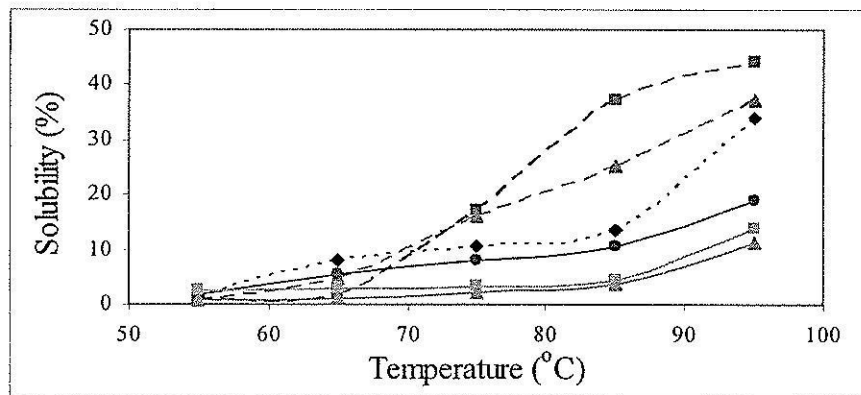
3.8 ผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการ annealing ต่อกำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งสาลีข้าว

กำลังการพองตัว การละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกจากเม็ดแป้งของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการ annealing แสดงดังภาพที่ 13-14 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวของแป้งสาลีข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ผ่านการ annealing สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 85 และ 95°C ($p < 0.05$) เมื่อทำการ annealing ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ที่ $T_a < T_0$ 30°C ดังภาพที่ 13 และ 14 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

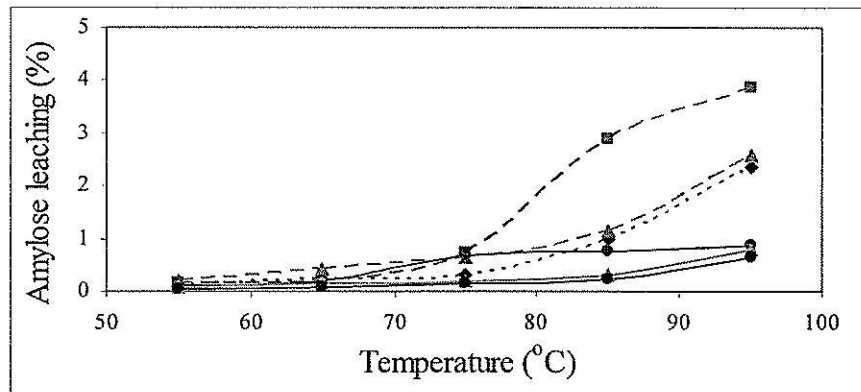
เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 7°C จะทำให้ค่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งของแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้าลดลง (ภาพที่ 13 และ 14) เมื่อเทียบกับที่ไม่ผ่านการ annealing และเมื่อเวลาที่ใช้ในการ annealing นานขึ้น เป็น 3 วัน พบว่ากำลังการพองตัว การละลาย และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้งต่ำกว่าใน 12 ชั่วโมงแรกของการ annealing ($p < 0.05$) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากเมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและสมบูรณ์มากขึ้นภายในเม็ดแป้ง 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



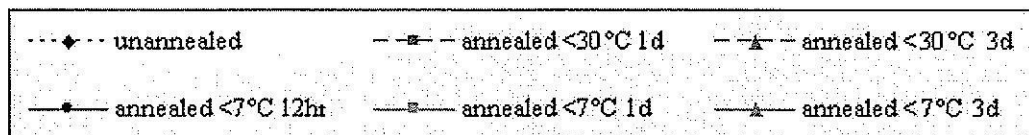
(ก)



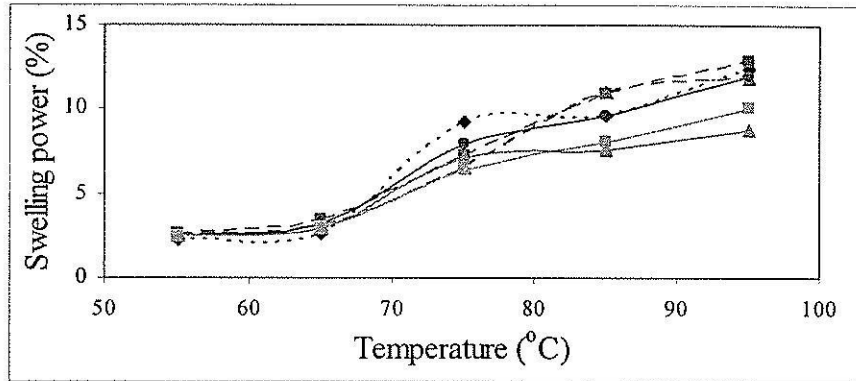
(ข)



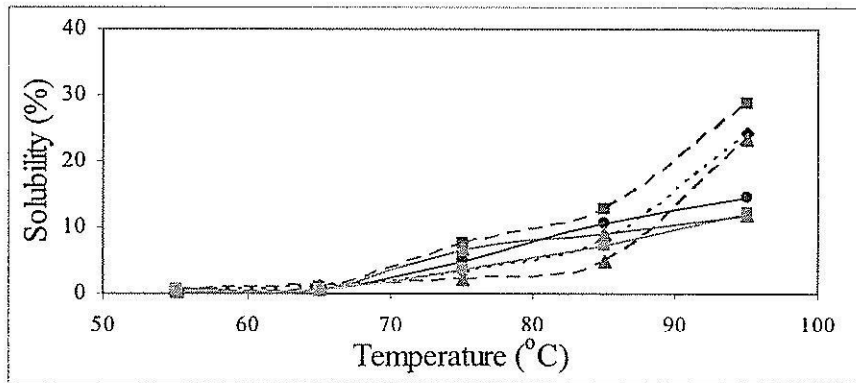
(ค)



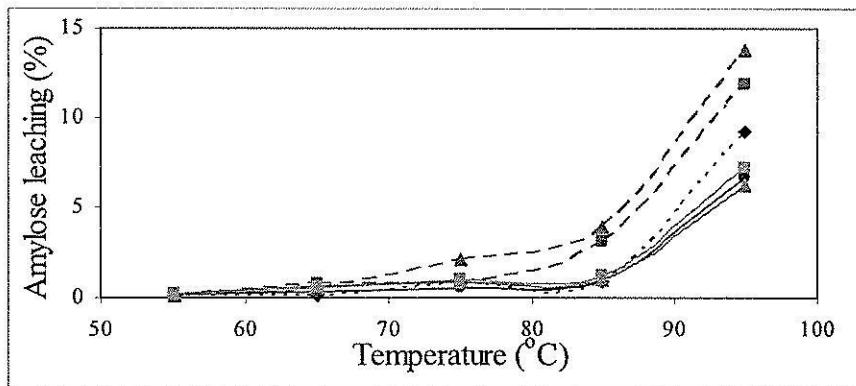
ภาพที่ 13 กำจัดการพองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง (ค) ของแป้งสาลีข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_g$ 30 และ 7°C



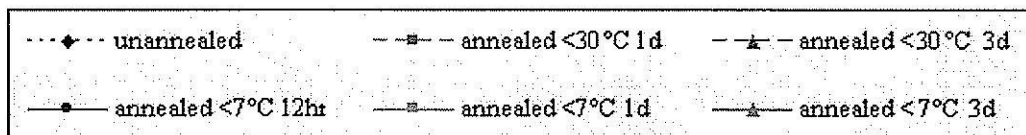
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 14 กำจัดการฟองตัว (ก) การละลาย (ข) และอะมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง(ค) ของแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ กข 23 เมื่อทำการ annealing ที่ $T_a < T_0$ 30 และ 7°C

4. ผลของวิธีการตัดแปรทางกายภาพแข็งมันสำปะหลังต่อลักษณะความหนืด

การตัดแปรทางกายภาพกับแข็งมันสำปะหลังวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของแข็งให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้น ซึ่งเมื่อใช้วิธีการตัดแปรที่แตกต่างกันออกไปก็อาจส่งผลต่อลักษณะความหนืดของแข็งแตกต่างกันด้วย จากผลการทดลองตารางที่ 28 พบว่าการตัดแปรทางกายภาพด้วยวิธี annealing และ HMT ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่มีผลในการทำลายโครงสร้างของเม็ดแข็ง แต่มีผลให้โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในเม็ดแข็งเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น หรืออาจเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น (Tester, Debon and Sommerville, 2000; Nakazawa and Wang, 2003) จึงเป็นผลให้มีค่า PT สูงกว่าแข็งมันสำปะหลังดิบ ส่วนการตัดแปรด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการเอกซ์ทรูชันนั้น จะมีทั้งความร้อนและแรงทางกลเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงทำให้เม็ดแข็งเกิดการแตกหักและถูกทำลายได้ น้ำจึงสามารถแทรกผ่านเข้าไปในชั้นออสชันฐานได้ง่ายและเม็ดแข็งเกิดการพองตัวได้อย่างรวดเร็ว (Perez-Sira and Caracas, 1997) จึงส่งผลให้แข็งมันสำปะหลังที่ได้หลังการตัดแปรทางกายภาพด้วย 2 วิธีการดังกล่าวสามารถละลายได้ในน้ำเย็น เนื่องจากมีค่า PT ประมาณ 25°C

สำหรับลักษณะความหนืดอื่นๆ พบว่าแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรวิธี annealing มีค่า PV และ BD ใกล้เคียงกับแข็งมันสำปะหลังดิบ ส่วนแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธี HMT มีค่า PV และ BD ต่ำกว่าแข็งมันสำปะหลังดิบ และมีค่า FV และ SB สูงกว่าแข็งมันสำปะหลังดิบ แสดงให้เห็นว่าการทำ HMT ส่งผลให้แข็งมันสำปะหลังมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งสถานะที่ใช้ในการทำ HMT นี้ อาจส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของเม็ดแข็งเกิดการคลายตัว ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการเคลื่อนที่ไปในส่วนออสชันฐานซึ่งจัดตัวไม่หนาแน่นนัก และเมื่อปล่อยเย็นตัวลง พันธะที่คลายตัวออกจะกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล จากการยึดเกาะกันระหว่างสายอะมิโลสด้วยกันเองหรืออะมิโลสกับอะมิโลเพกติน ทำให้มีการคืนรูปที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับแข็งมันสำปะหลังวัตถุดิบพบว่าแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรวิธี annealing และ HMT มีค่า BD ต่ำกว่า แสดงว่าการตัดแปรทั้ง 2 วิธี ทำให้เจลแข็งที่ได้มีความทนจากแรงเฉือนมากขึ้น แสดงถึงแข็งมีความคงตัวมากขึ้น โดยเฉพาะแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธี HMT ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสถานะที่ใช้เหนี่ยวนำให้โมเลกุลของแข็งมีความแข็งแรงมากขึ้น และสำหรับการ annealing สถานะที่ใช้มีผลให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นออสชันฐานและชั้นผลึกได้มาก ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินเกิดการเคลื่อนตัวได้ดี จึงส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ระหว่างเกลียวของอะมิโลสและของอะมิโลเพกติน ให้มีความเป็นระเบียบและมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เม็ดแข็งมีความแข็งแรงมาก

จีน (Jacobs and Delcour, 1998; Tester, Debon and Karkalas, 1998) ซึ่งจะเห็นได้จากผลของค่า PT ที่เพิ่มมากขึ้นจากการดัดแปรทั้งสองแบบนี้

แป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่า PV, BD, FV และ SB สูงกว่า แป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่มีแรงเฉือน มีความรุนแรงมากกว่า โมเลกุลของเม็ดแป้ง จึงเกิดการแตกหัก ได้มาก จึงทำให้มีค่าความหนืดของแป้งพรีเจลจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าต่ำกว่าจากการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

ตารางที่ 28 ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังหลังผ่านจากการดัดแปรทางกายภาพด้วยวิธีการต่างๆ

Parameter	Native tapioca starch	Annealing	HMT	Drum dryer	Extrusion
Pasting temperature (°C)	71.78	73.98	76.73	25.42	25.20
Peak Viscosity (RVU)	164.92	160.61	144.00	381.78	168.53
Breakdown (RVU)	112.38	87.08	42.44	355.42	142.08
Final viscosity (RVU)	101.96	113.08	166.06	150.36	97.83
Set back (RVU)	49.42	39.56	64.50	124.00	71.39

Annealing : ปริมาณความชื้น 70%, อุณหภูมิ 57°C, ระยะเวลา 6 วัน

HMT : ปริมาณความชื้น 20%, อุณหภูมิ 100°C, ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

Drum dryer : ปริมาณความชื้น 70%, ความเร็วลูกกลิ้ง 0.845 rpm, อุณหภูมิลูกกลิ้ง 120°C

Extrusion : ปริมาณความชื้น 80%, ความเร็วรอบสกรู 100 rpm, อุณหภูมิใบเรลโซนสุดท้าย 95°C

บทที่ 4

บทสรุป

การเพิ่มปริมาณของแข็งและอุณหภูมิถูกกึ่งของการผลิตแป้งพรีเจลด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ มีผลในการเพิ่ม PT และลดค่า WAI และ WSI ของแป้งฟลาวัวร์ข้าว ส่วนการเพิ่มปริมาณความชื้นของวัตถุดิบในการผลิตแป้งพรีเจลด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้เพิ่มความห่อลื่นภายในบาเรล ส่งผลให้เม็ดแป้งถูกทำลายโดยแรงทางกลได้น้อยลง ดังนั้นจึงมีค่า DG ต่ำกว่าส่งผลให้มีค่า WAI และ WSI น้อยกว่า แต่มีลักษณะความหนืดสูงขึ้น แป้งพรีเจลที่ผลิตด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่จะมีค่า PT สูงกว่าการผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ขณะที่มีความหนืดต่ำกว่าเล็กน้อยที่สภาวะการผลิตเดียวกัน ส่วนแป้งมันสำปะหลังพรีเจลที่ผลิตได้จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สามารถละลายได้ในน้ำเย็นและมีลักษณะความหนืดสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จากการกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

การทำ HMT กับเมล็ดข้าวส่งผลให้แป้งสตาร์ชและแป้งฟลาวัวร์ข้าวที่ได้มีค่า PT สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกและอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้ยังส่งผลให้แป้งฟลาวัวร์ข้าวมีค่า PV, SB และกำลังการพองตัวสูงขึ้นด้วย แต่ค่าการละลายและการปลดปล่อยอะไมโลสมีค่าต่ำลง ส่วนแป้งสตาร์ชข้าวมีค่า PV, SB, กำลังการพองตัว, ค่าการละลายของสตาร์ช และร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยมากกว่าหรือน้อยกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการ HMT ขึ้นอยู่กับปริมาณอะมิโลส ความชื้นและเวลาในการให้ความร้อน สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการ HMT จะมีค่า PT สูงกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านกระบวนการแต่มีค่า BD ต่ำกว่า

การ annealing ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตไนเซชัน (T_g) โดยใช้น้ำปริมาณมาก ในระยะเวลาหนึ่ง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้มีการปรับเปลี่ยนและจัดเรียงตัวของอะมิโลสในชั้นอสัณฐานให้อยู่ในสภาวะ glassy มากขึ้น ในขณะที่อะมิโลเพกตินในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ โดยการพันเกลียวคู่กันที่เป็นระเบียบและเหมาะสมมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเป็นผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวและแป้งสตาร์ชข้าวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้แป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่ และแป้งมันสำปะหลังมีค่า PT สูงขึ้นด้วย ตลอดจนทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนเซชันของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่ใกล้เคียงกับข้าวเหนียวเก่า แต่ลักษณะความหนืดของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวและข้าวเจ้าเก่าและแป้งสตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้าใหม่มีค่าลดลง ส่วนลักษณะความหนืดแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียวใหม่และข้าวเจ้าใหม่อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ทำการ annealing

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 292 หน้า.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 292 หน้า.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, วัชรวิ เลิศมงคล, จำลอง เขียมจันทรรจ, ปิยะ ดวงพัตรา, เอ็จ สโรบล, ปิยะวุฒิ พูลสงวน, เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ, และวิจารณ์ วิชชุกิจ. (2542). การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ โครงการผลกระทบทางสังคมเนื่องจากวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาภูวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. (2546). การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันต่าง ๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. ใน รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- เสรี เต๋นवलักษณ์. 2545. สถานการณ์การค้าและส่งออกมันสำปะหลัง และผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังของไทย: ปัจจุบันและอนาคต. เอกสารประกอบการบรรยายและสัมมนาวิชาการ วันที่ 28 มีนาคม 2545 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- สุนีย์ โชตินิรนาท, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2546. การปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังโดยใช้วิธีความร้อน-ความชื้น. การสัมมนาเรื่อง "การพัฒนาการใช้ประโยชน์แป้งในอุตสาหกรรมอาหาร" 26 มิถุนายน 2546. ณ โรงแรมรามาร์คเด็นส์ กรุงเทพฯ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, W. F., and Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci Today*. 14:4-8.
- AOAC. (1997) Official Methods of analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *Int J Biol Macromol*. 23: 85-112.

- Camire, M. E., Camire, A., and Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Food Sci Nutr.* (29): 35-57.
- 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.
- Chiang, B-Y., and Johnson, J. A. (1997). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and O-toluidine reagent. *Cereal Chem.* 54(3): 429-435.
- 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.
- Collonna, P., Doublier, J. L., Melcion, J. P., Monredon, F., and Mercier, C. (1984). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch: I. Physical and macromolecular modifications. *Cereal Chem.* 61: 538-543.
- Donovan, J. W., Lorenz, K., and Kulp, K. (1983). Differential scanning calorimetry of heat moisture treatment treated wheat and potato starches. *Cereal Chem.* 60: 381-387.
- Doublier, J. L. (1981). Rheological studies on starch-Flow behavior of wheat starch pastes. *Starch/Starke.* 33: 415-420.
- Doublier, J. L., Colonna, P., and Mercier, C. (1986). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. II. Rheological characterization of wheat starch pastes. *Cereal Chem.* 63:240-246.
- 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.
- 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.-C., and Gudmundsson, M. (1996). Starch: Physicochemical and Functional aspects. In "Carbohydrates in Food" Eliasson, A-C (ed.). Marcel Dekker, Inc. New York.
- 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.

- Gunaratne, A., and Hoover, R. (2002). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydr Polym.* 49:425-437.
- Hagenimana, A., Ding, X., and Fang, T. (2005). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *J Cereal Sci.* 43:38-46.
- Hoover, R. A., and Vasanthan, T. (1994). Effect of heat moisture treatment on structure and physicochemical properties of cereal, legume and tuber starches. *Carbohydr Res.* 252: 33-53.
- Hoover, R., and Manuel, H. (1996). Effect of heat-moisture treatment and physicochemical properties of on the structure legume starches. *Food Res Int.* 29(8): 731-750.
- Ilo, S., Liu, Y., and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.* 32: 79-88.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modification of granular starch, with retention of the granular structure : A Review. *J Agri 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.
- Kalogia, E. P., Xynogalos, V. A., Karapantsios, T. D., and Kostoglou, M. (2002). Effect of feed concentration on the production of pregelatinized starch in a double drum dryer. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.* 35: 703-714.
- Kalogianni, E.R., Xynogalos, V.A., Karapantsios, T.D., and Kostoglou, M. (2002). Effect of feed concentration on the production of pregelatinized starch in a double drum dryer. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.* 35:703-714.
- 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.
- Kodan, R. S., Bryant, R. J., and Pepperman, A. B. (2003). Functional peoperties of extrudated rice flours. *J Food Sci.* 68: 1699-1672.
- Kulp, K., and Lorenz, K. (1981). Heat moisture treatment of starches I. Physicochemical properties. *Cereal Chem.* 58: 46-48.
- Lai, H. M. (2001). Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. *J Agri Food Chem.* 72: 455-493.
- Larsson, I. and Eliasson, A. C. (1991). Annealing of Starch at Intermediate Water content. *Starch/Starke.* 43: 227-231.
- Lillford, P.J., and Morrison, A. (1997). Structure/Function relationship of starches in food. In "Starch: Structure and Functionality" Frazer, P.J.; Donald, A.M. and Richmond, P. (eds.). The Royal Society of Chemistry, U.K.
- Lim, S.-T., Chang, E.-H., and Chung, H.-J. (2001). Thermal transition characteristics of heat-moisture treated corn and potato starches. *Carbohydr Polym.* 46:107-115.

- McPherson, A. E., Bailey, T. B., and Jane, J. (2000). Extrusion of cross-linked hydroxypropylated corn starches. I. Pasting properties. *Cereal Chem.* 77: 320-325.
- Mercier, C., Charbonniere, R., Grebaut, J., and De la Gueriviere, J. F. (1980). Formation of amylose lipid complexes by twin-screw extrusion cooking of manioc starch. *Cereal Chem.* (57): 4-9.
- Miyazaki, M., and Morita, N. (2005). Effect of heat-moisture treated maize starch on the properties of dough and bread. *Food Res Int.* 38 : 369-376.
- 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 annealed starch and branch-structure of their Naegeli dextrins. *Carbohydr Res.* 338: 2871-2882.
- Perez-Sira, E., Gonzalez-Parada, Z., and Caracas. (1997). Functional properties of cassava (*Manihot esculenta Crantz*) starch modified by physical methods. *Starch/Starke.* 49: 49-53.
- Pomeranz, Y. (1991). Functional properties of food components, 2nd ed. pp.27-28, Academic Press, New York.
- 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/Starke.* 45:345-351.
- Singh, N., Kaur, K. K., and Sekhon, K. S. (1999). Effects of phosphate salts on extrusion behavior of rice. *Food chem.* 64: 481-488.
- Stute, R. H. (1992). Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture-Treatment. *Starch/Starke.* 44: 205-214.
- Takaya, T., Sano, C., and Nishinari, K. Thermal studies on the gelatinization and retrogradation of heat-moisture treated starch. *Carbohydr Polym.* 41:97-100.
- 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.
- Vallous, N.A., Gavrielidou, M.A., Karapantsios, T.D., and Kostoglou. (2002). Performance of double drum dryer for producing pregelatinized maize starch. *J Food Eng.* 51:171-183.
- 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.
- Vlachos, N. A., and Karapantsios, T. D. (2000). Water content measurement of thin sheet starch products using a conductance technique. *J Food Eng.* 46(2): 91-98.
- 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.

ภาคผนวก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

3. อบตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิ 105°C นาน 5-6 ชั่วโมง

4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก

5. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบด้วยแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบไฟฟ้าทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อให้มีคิซิดและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต

4. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในขวดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร

5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควมแน่น และเปิดสวิทซ์ให้ความร้อน โดยใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง

6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว

7. คำนวณปริมาณไขมันจากสูตร

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

3. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มีมิดชิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380°C จนได้สารละลายใส ปล่อยให้เย็น
5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิทซ์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น
6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด เรียบร้อยแล้ว ไปปรับรองของเหลวที่กลั่นโดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้
7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนัก และทำการกลั่นที่ประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
8. ไตรเตรทสารละลายที่กลั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. ทำ blank และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง
10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

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

W

เมื่อ A = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเตรตกับ blank (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25

W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ทำตามวิธี Colorimetric ของ Juliano (1971) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และใช้อะมิโลสบริสุทธิ์ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

วิธีการ

1. ชั่งแป้งมา 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมเอทิลนอลความเข้มข้น 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัว
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
4. นำไปต้มให้ความร้อนในน้ำเดือดนาน 10 นาที ให้เป็นแป้ง ทิ้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
5. ดูดสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมได้มา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
6. นำไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตร แล้วปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0
7. นำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม เตรียมเป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทิ้งไว้ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน แล้วดูดสารละลายอะมิโลสมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสง
8. คำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน แล้วแสดงค่าเป็น % โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ / การประชุมระดับชาติและนานาชาติ

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2009. Effect of extrusion parameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2009. Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2009. Physical modification of rice flour by extrusion. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Kiatpongarp, W. 2009. Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical and textural properties of high amylose rice during storage. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anaheim, CA, USA.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage. Poster presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2008. Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch. Oral presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Apirattanusorn, S., **Tongta, S.**, Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. *J. Agric. Food. Chem.* 56:8549-8557.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2008. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 1(02):97-104.
- Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. *Khon Kaen University Research Journal*. 12(4):431-441.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2007. Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongjarp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. Oral presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):195-204.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):185-193.
- Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. J. Agric. Food. Chem., 55: 1463-1468.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Kiatponglar, W. and K. Siroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In ' Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. Poster presentation The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.

Sottirattanapan, P. and Tongta, S. 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. Suranaree Journal of Science and Technology. 10(3):220-229.

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4150