



ผลของการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชัน  
ของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน

**Effect of Heat-Moisture Treatment on Rheological Properties and Retrogradation  
of Rice Starches Differing in Amylose Content**

ปาริดา ขุนแอ

**Parida Khunae**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Food Technology  
Prince of Songkla University**

**2550**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      ผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิด  
รีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน

ผู้เขียน                                      นางสาวปาริดา ขุนแเอ

สาขาวิชา                                    เทคโนโลยีอาหาร

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ชูรวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ ทัดติยกุล)

.....  
(Dr. Thierry Tran)

.....กรรมการ  
(ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน
ผู้เขียน	นางสาวปาริดา ขุนแอ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา	2550

### บทคัดย่อ

การศึกษาการตัดแปรสตาร์ชข้าว 3 ชนิดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ สตาร์ชข้าวเหนียว (อะมิโลส 1.41%), สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (อะมิโลส 14.96%) และ สตาร์ชข้าวเหนียว (อะมิโลส 20.16%) ด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น (HMT) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่ระดับความชื้นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 จากการศึกษาผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด พบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นไม่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง ลักษณะภายนอกของเม็ดสตาร์ช และยังคงมีรูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A สำหรับปริมาณผลึก (RC) และสัดส่วนของโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (RSA) ของสตาร์ชข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่ามีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวพบว่าค่า RC และ RSA ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบฟิสิกของโครงสร้างผลึกแบบ V (V-type crystalline) เพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน ( $T_o$ ) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปร แต่ค่าพลังงานในการเกิดเจลลาติไนเซชัน ( $\Delta H$ ) มีแนวโน้มลดลง สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรทุกระดับความชื้นและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT<sub>27</sub>) พบช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน ( $T_c$ - $T_o$ ) กว้างขึ้น และพบฟิสิกการดูดความร้อนแบบไบฟาสิก (biphasic endotherm) โดยค่า ( $T_c$ - $T_o$ ) ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับระดับความชื้นในการตัดแปร การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีผลต่อสมบัติทางรีโอโลยีซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์และเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ( $T_p$ ) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงขึ้น เมื่อระดับความชื้นในการตัดแปรเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชเพสท์ (ความเข้มข้นร้อยละ 4) พบว่าสตาร์ชข้าวที่ผ่าน

การตัดแปรทุกชนิดแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning ซึ่งค่าความหนืดปรากฏลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น สำหรับสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่าเมื่อระดับความชื้นในการตัดแปรเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว ( $k$ ) มีค่าลดลง แต่ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล ( $n$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนการตัดแปรแสดงพฤติกรรมการไหลที่ขึ้นกับเวลาชนิด thixotropic แต่เมื่อผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวมีแนวโน้มที่แสดงพฤติกรรมการไหลแบบไม่ขึ้นกับเวลา และจากการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติก พบว่าค่า Storage modulus ( $G'$ ) ของเจลจากสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นที่ใช้ตัดแปรมากขึ้น ไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลจากสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งก่อนและหลังการตัดแปรตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C แต่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลจากสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปร โดยพบการเพิ่มขึ้นของค่า RSA และค่า Instantaneous elastic ( $G_0$ ) อย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา จากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยสมการ Avrami พบว่าเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีค่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ใกล้เคียงกัน

<b>Thesis Title</b>	Effect of Heat-Moisture Treatment on Rheological Properties and Retrogradation of Rice Starches Differing in Amylose Content
<b>Author</b>	Miss Parida Khunae
<b>Major Program</b>	Food Technology
<b>Academic Year</b>	2007

### ABSTRACT

Starches from Glutinous rice (1.41% amylose), Jasmine rice named Khao Dawk Mali 105 (14.96% amylose) and Chiang rice (20.16% amylose) were exposed to heat-moisture treatment (HMT) at 100 °C for 16 hours and at different moisture levels (18%, 21%, 24% and 27%). The effect of heat-moisture treatment on structural and thermal properties of these three rice starches was investigated. The HMT did not change the size, shape and surface characteristics of rice starch granules. The A-type crystalline pattern of rice starches remained unchanged after HMT. The relative crystallinity (RC) and the ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) of heat-moisture treated Glutinous and Jasmine rice starches decreased with increasing moisture level of the treatments. In contrast, the RC of the treated Chiang rice starch remained practically unchanged. A peak of V-type crystalline was clearly presented in all treated Chiang rice starches. The peak became progressively stronger with increasing moisture level of the treatment. Differential scanning calorimetry (DSC) of all treated rice starches showed a shift of the gelatinization temperature to a higher temperature. Increasing moisture level of the treatments increased the onset gelatinization temperature ( $T_o$ ) but decreased the gelatinization enthalpy ( $\Delta H$ ) of rice starches. A broad gelatinization temperature range ( $T_c - T_o$ ) with a biphasic endotherm was found for all treated Chiang rice starches and Jasmine rice starch after HMT<sub>27</sub>. Additionally the ( $T_c - T_o$ ) of treated Chiang rice starches increased linearly with increasing moisture level of the treatments. HMT had an impact on the rheological properties as studied by a Brabender viscograph and a rheometer. After HMT, the pasting temperature ( $T_p$ ) of rice starches shifted to the higher values. Increasing moisture level of the treatments increased the  $T_p$  of rice starches. From flow behavior test, all treated rice starch pastes (4%, w/w) showed a shear thinning

behavior, the apparent viscosity decreases with increasing shear rate. The consistency coefficient ( $k$ ) of treated Chiang rice starches decreased with moisture level of the treatments, while the flow behavior index ( $n$ ) exhibited the opposite trend denoting slight shear thinning behavior. All native rice starches exhibited a combined hysteresis loop indicating a time-dependent shear thinning, thixotropic behavior. After HMT, Jasmine and Chiang rice starches trended to exhibit a time-independent behavior. The storage modulus ( $G'$ ) of gel from treated Jasmine and Chiang rice starches increased with increasing moisture level of the treatments. There was no retrogradation occur for both native and treated starch gels from Glutinous and Jasmine rice during storage at  $4^{\circ}\text{C}$  over storage time. In contrast, for native and treated Chiang rice starch gels, the RSA and the instantaneous elastic ( $G_0$ ) increased rapidly for the first 24 hours of storage time and then increased slowly with time until reached a constant value. The retrogradation rate calculated by Avrami equation for both native and treated Chiang rice starch gels was not significantly different.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ Dr. Thierry Tran อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและตรวจทานแก้ไขการเขียนวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ยูรวงศ์ ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ ทัดติยกุล กรรมการสอบที่ตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยแห่งชาติ (สกว.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และราชกรีฑาสโมสรที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและค่าใช้จ่ายระหว่างการศึกษา ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าว จ. พัทลุง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าวเหนียว และบริษัทกรุงเทพสตาร์ชอินดัสเทรียล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สตาร์ชข้าวเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากรคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองทั้งเครื่องมือเครื่องใช้ รวมทั้งการให้คำแนะนำในการปฏิบัติงาน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นกำลังใจในการศึกษา ขอขอบคุณพี่ๆ และน้องๆ ที่คอยให้กำลังใจในระหว่างการทำทดลองและการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ปาริดา ขุนแอ

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	2
1. ข้าว	2
2. สตาร์ชข้าว	4
2.1 การผลิตสตาร์ชข้าว	4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช	5
2.3 สมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช	8
2.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช	10
3. การตัดแปรรสตาร์ช	28
3.1 การตัดแปรรด้วยวิธีความร้อน	29
3.2 ผลของการตัดแปรรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช	32
3.3 ผลของการตัดแปรรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช	33
วัตถุประสงค์	35
<b>บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ</b>	36
วัสดุ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการทดลอง	37
1. การผลิตสตาร์ชจากข้าวเหนียว	37
2. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว	38
3. การตัดแปรรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีความร้อน	38
4. การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรรด้วยความ	



ร้อนขึ้น	38
----------	----

## สารบัญ (ต่อ)

5. การศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของสสารซ์ข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อน ขึ้น	40
<b>บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	44
1. องค์ประกอบทางเคมีของสสารซ์ข้าว	44
2. ลักษณะทางโครงสร้างของสสารซ์ข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น	45
2.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสสารซ์	45
2.2 โครงสร้างผลึกและสัดส่วนของโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อ ส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก	47
3. สมบัติเชิงหน้าที่ของสสารซ์ข้าว	52
3.1 สมบัติทางความร้อน	52
3.2 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย	58
3.3 สมบัติทางรีโอโลยี	62
3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	80
<b>บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	93
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	104
ก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	105
ข การทำนายอัตราการผลิตรีโทรเกรเดชันโดยใช้สมการ Avrami (Avrami equation)	113
ค การคำนวณพารามิเตอร์ของการคืบ ด้วยวิธีของ Inokuchi	114
ประวัติผู้เขียน	116

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ผลผลิตข้าวแต่ละพันธุ์ในภาคต่างๆ ของประเทศ	3
2. ปริมาณและมูลค่าสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าว พ.ศ. 2546-2547	4
3. สภาพที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนขึ้น	31
4. องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว	45
5. ปริมาณผลึกและค่า RSA ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	51
6. พารามิเตอร์ของการเกิดเจลลิตินเซชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	57
7. กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	59
8. ค่าพารามิเตอร์ทางความเหนียวของสตาร์ชข้าวจากการวัดด้วยเครื่อง Brabender viscosograph ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 6 (โดยน้ำหนักแห้ง)	65
9. ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) และค่าครรชนิพหุคูณการไหล (n) ของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น	68
10. พารามิเตอร์ของสมบัติวิสโคอีลาสติกที่วัดด้วยวิธีการสั่นทางพลวัต (ความถี่ 1 Hz) สำหรับสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น	75
11. ค่าพารามิเตอร์จากการศึกษาการก๊ีบของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 25 ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง	91

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1. โครงสร้างของอะมิโลส	5
2. โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	7
3. โครงสร้างเม็ดสตาร์ช	9
4. การเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ช	11
5. รีโอโลยีของอาหาร : การเปลี่ยนรูป (deformation) ของของแข็งและการไหล (flow) ของของเหลว	12
6. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของไหลนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียน	13
7. รูปแบบความหนืดของสตาร์ชสูกชนิดต่างๆ เมื่อแบ่งตามกำลังการพองตัว	16
8. กราฟแสดงการคืบและการคืนของวัสดุวิสโคอีลาสติก	19
9. ความเค้นและความเครียดของวัสดุ viscoelastic ที่ได้จากการทดสอบแบบสั้น	20
10. แผนภาพแสดงการเกิดเจลและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสายอะมิโลส	24
11. แผนภาพแสดงการเกิดเจลและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสายอะมิโลเพกทิน	25
12. ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวก่อนการตัดแปร : สตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเหนียว (c) และสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 : สตาร์ชข้าวเหนียว (a*) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b*) และสตาร์ชข้าวเหนียว (c*)	46
13. รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	49
14. รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	49
15. รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT <sub>18</sub> ), 21 (HMT <sub>21</sub> ), 24 (HMT <sub>24</sub> ) และ 27 (HMT <sub>27</sub> )	50

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

16. ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรความร้อนขึ้น 50
17. เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับ ความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 54
18. เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย ความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 54
19. เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับ ความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 55
20. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_0$ ) ของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ช ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นกับ ระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปร 55
21. ความสัมพันธ์ของช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c-T_0$ ) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นกับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ช 56
22. กำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าว เหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 60
23. ความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ สตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 60
24. ความสัมพันธ์ของค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าว เหนียวกับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปร 61
25. รูปแบบความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ช ข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น 64
26. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดและค่าการคืนตัวกับระดับ ความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียว 64

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

27. ความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏและอัตราการเนียนของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น 69
28. ความสัมพันธ์ของความเค้นเนียนและอัตราการเนียนของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น 69
29. ความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏและอัตราการเนียนของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) สตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ ) 70
30. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางความหนืด ( $k$ ) และค่าดรรชนีพฤติกรรมการไหล ( $n$ ) กับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียว 71
31. ความสัมพันธ์ของความเค้นเนียนและอัตราการเนียนของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) สตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น 72
32. ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเหนียว (+) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ( $\diamond$ ) และสตาร์ชข้าวเหนียว ( $\times$ ) ก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz 76
33. ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อน ( $\square$ ) และหลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21 ( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 4 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz 77
34. ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อน ( $\square$ ) และหลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz 78
35. ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อน ( $\square$ ) และหลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21 ( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz 79

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

36. ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรรูป (a) และหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) 82
37. ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการตัดแปรรูป (a) และหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) 83
38. ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรรูป (a) และหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) 84
39. ค่าสัดส่วนของปริมาณเกลียวคู่ต่อออสซิลูชัน (RSA) ของเจลสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT27) 85
40. การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้น (a) และเจลสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง 88
41. การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้น (a) และสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง 89
42. การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้น (a) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมงโดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 25°C และ 10 Pa 90
43. ความสัมพันธ์ของค่า instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ) กับเวลาการเก็บรักษาของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT27) 92

# บทที่ 1

## บทนำ

### บทนำต้นเรื่อง

ข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ผลผลิตข้าวประมาณร้อยละ 60-70 ใช้เพื่อการบริโภคโดยตรงและเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมแป้ง อุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และบะหมี่ เป็นต้น เมื่อพิจารณาคุณค่าทางอาหารพบว่าข้าวอุดมไปด้วยคุณค่าทางคาร์โบไฮเดรต มีวิตามินบีสูงและมีองค์ประกอบที่เป็นไขมันต่ำ ดังนั้นอาหารหลายชนิดจึงใช้ข้าวเป็นส่วนผสมสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อปรับปรุงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค ในปัจจุบันจึงมีอุตสาหกรรมหลายชนิดหันมาให้ความสนใจแปรรูปข้าว การแปรรูปข้าวสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบของเมล็ดข้าว เช่น ข้าวบรรจุกระป๋อง ข้าวแช่เยือกแข็ง ข้าวต้มหรือโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ในรูปของฟลาวัวร์ข้าว (rice flour) เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ขนมหิน และในรูปของสตาร์ชข้าว สตาร์ชดิบโดยทั่วไปมีคุณสมบัติบางประการไม่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ ลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีการคัดแปรคุณสมบัติบางประการของสตาร์ชดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น เช่น คุณสมบัติการให้ความข้นหนืด สมบัติในการเกิดโครงร่างตาข่าย สมบัติในการอุ้มน้ำ และสมบัติการประสานและทำให้วัตถุดิบติดกัน อีกทั้งยังใช้ในอุตสาหกรรมยาหรือใช้เป็นส่วนผสมเพื่อผลิตอาหารเพื่อสุขภาพ เช่น เป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารขบเคี้ยวที่มีปริมาณเส้นใยอาหารและโปรตีนสูง เป็นต้น (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546) การคัดแปรสตาร์ชสามารถทำได้ด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ การแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคัดแปรสตาร์ชซึ่งเป็นวิธีการคัดแปรทางกายภาพ ปราศจากการปนเปื้อนจากสารเคมีและสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการของสตาร์ชข้าวเพื่อให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การคัดแปรสตาร์ชจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงองค์ประกอบและสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชเนื่องจากสตาร์ชข้าวแต่ละพันธุ์มีองค์ประกอบหลักคืออะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สมบัติทางรีโอโลยี การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความ

สนใจที่จะศึกษาผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากสตาร์ชข้าวต่อไป

## ตรวจเอกสาร

### 1. ข้าว

ข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรโลกมากกว่าครึ่ง โดยเฉพาะชาวเอเชียบริโภคมากถึง 90% ข้าวที่ปลูกสำหรับบริโภคทั่วโลกมี 2 ชนิด คือ ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa* Linn.) และข้าวปลูกแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) มีจำนวนมากกว่า 120,000 สายพันธุ์ที่มีชื่อและลักษณะแตกต่างกัน จากความหลากหลายของข้าวชนิดต่างๆ ที่แพร่กระจายอยู่ทั่วโลก ข้าวเป็นธัญชาติ (เมล็ด) ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยววงศ์หญ้า (Family : Grammineae หรือ Poaceae) เรียกว่า ธัญพืชสกุลออริซา (Genus : *Oryza*) เจริญได้ดีในเขตร้อนและเขตอบอุ่น และสามารถขึ้นได้ตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงระดับสูงประมาณ 3,000 เมตร นอกจากนี้ยังทนต่อสภาพดินหลากหลายตั้งแต่พื้นที่ดินที่น้ำท่วมสูงจนถึงพื้นที่สูงตามไหล่เขา ทนดินที่มีแร่ธาตุเหล็ก อะลูมิเนียม ดินเค็ม เป็นต้น ข้าวกลุ่ม *Oryza sativa* ยังแยกออกได้เป็นอินดิกา (*indica*) มีปลูกมากในเขตร้อนและจาปอนิกา (*japonica*) มีปลูกมากในเขตอบอุ่น ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยอยู่ในกลุ่มอินดิกา (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ในประเทศไทยมีการปลูกข้าวมีทั่วทุกภูมิภาค โดยพันธุ์ข้าวที่ใช้ปลูกมีอยู่หลากหลายพันธุ์ การปลูกข้าวในแต่ละภาคของประเทศขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพันธุ์ข้าวต่อสภาวะแวดล้อมในแต่ละภาคและความนิยมในการบริโภคของประชากรที่มีอยู่ตามท้องถิ่นนั้นๆ จึงเห็นได้ว่าพันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกในภาคต่างๆ ในประเทศมีทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว โดยภาคกลางมีการปลูกทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวและนิยมบริโภคข้าวเจ้ากันเป็นส่วนใหญ่ ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือนิยมปลูกข้าวเหนียวและบริโภคข้าวเหนียวเป็นอาหารหลัก และภาคใต้นิยมปลูกและบริโภคข้าวเจ้าเกือบทั้งหมด พันธุ์ข้าวที่น่าสนใจในภาคต่างๆ ของประเทศดังตารางที่ 1 (ศูนย์วิจัยข้าว, 2548)



ตารางที่ 1 ผลผลิตข้าวแต่ละพันธุ์ในภาคต่างๆ ของประเทศ

Table 1. Rice products in each part of Thailand

พันธุ์ข้าว	ผลผลิต (กก./ไร่)	ปริมาณอะมิโลส* (ร้อยละ)	แหล่งปลูก/พื้นที่แนะนำ
ขาวดอกมะลิ	321	12.88	ทุกภาคโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
กข 15	346	18.00	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
กข 6	330	3.81	ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ปทุมธานี 1	630	12.89	ภาคกลาง
สุพรรณบุรี 1	604	20.93	ภาคกลาง
เจียวกู่พันธุ์	470	24.89	ภาคใต้

ที่มา : ศูนย์วิจัยข้าว (2548)

\*รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546)

ข้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีการส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศและผลิตภัณฑ์จากข้าวเป็นอีกหนึ่งในสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรที่น่าจับตามอง แม้ว่าตลาดในประเทศจะขยายตัวไม่มากนัก แต่ตลาดส่งออกมีแนวโน้มขยายเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ข้าวที่น่าสนใจได้แก่ แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว เส้นหมี่เส้นก๋วยเตี๋ยว และขนมปังขบเคี้ยว (rice cracker) เป็นต้น แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวที่ไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวเท่านั้น ยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันทั้งในแง่การบริโภคโดยตรงและการนำไปประกอบเป็นอาหารคาวหวานชนิดต่างๆ หรือการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารจากแป้ง โดยเฉพาะขนมขบเคี้ยวต่างๆ ซึ่งตลาดของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวนั้นมีทั้งในประเทศและต่างประเทศ จากการสำรวจของบริษัทผู้ผลิตแป้งข้าวเพื่อการส่งออก ปรากฏว่าประมาณร้อยละ 70-80 ของปริมาณการผลิตแป้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะส่งออกจำหน่ายต่างประเทศ และส่วนที่เหลือจะจำหน่ายเพื่อการบริโภคในประเทศ เส้นหมี่เส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดี และเป็นที่นิยมบริโภคอย่างแพร่หลายภายในประเทศ การผลิตจะใช้ปลายข้าวหรือข้าวหักเป็นวัตถุดิบในการผลิตที่สำคัญ ดังนั้นการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทนี้นับว่าเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับข้าวคุณภาพต่ำเป็นอย่างดี ปริมาณและมูลค่าสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าว พ.ศ. 2546 - 2547 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าว

Table 2. Quantity and value of rice and rice products

รายการ	ปีพ.ศ. 2546		ปีพ.ศ. 2547	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
ข้าวเจ้าขาว	3,279,915	28,961,070	5,133,597	46,925,117
ข้าวหอมมะลิ	2,202,797	31,304,748	2,279,622	35,572,011
ข้าวเหนียว	292,879	3,350,892	207,455	2,656,664
ข้าวกล้อง	59,663	501,468	126,559	1,149,570
ผลิตภัณฑ์จากข้าว	163,969	5,713,950	175,025	5,943,254
แป้งข้าวเจ้า	27,032	450,285	35,280	599,225
แป้งข้าวเหนียว	69,150	1,425,447	70,794	1,513,037
เส้นหมี่หรือเส้นก๋วยเตี๋ยว	40,579	1,366,630	43,796	1,559,205
รวมข้าวส่งออก	7,345,971	76,699,145	9,989,731	108,393,265

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2548)

## 2. สตาร์ชข้าว

### 2.1 การผลิตสตาร์ชข้าว

สตาร์ช หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ น้อยมาก แป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มากเรียกว่าฟลาวัวร์ (flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด (corn flour) แป้งข้าวสาลี (wheat flour) และแป้งข้าว (rice flour) เป็นต้น ซึ่งมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง สตาร์ชหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำฟลาวัวร์มาผ่านกระบวนการกำจัดส่วนประกอบเคมีอื่นๆ ที่อยู่ร่วมกับสตาร์ชออกเพื่อทำให้ได้สตาร์ชบริสุทธิ์ เช่น สตาร์ชข้าวโพด (corn starch) สตาร์ชข้าวสาลี (wheat starch) และ สตาร์ชข้าว (rice starch) เป็นต้น

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) เติร์ยมสตาร์ชข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ โดยนำเมล็ดข้าวที่ผ่านการโม่เปียก (wet milling) เพื่อให้ได้ฟลาวัวร์ข้าวหลังจากนั้นทำการสกัดโปรตีนโดยใช้สารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 เอทานอลร้อยละ 95 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.35 พบว่าสตาร์ชที่เตรียมได้มีโปรตีนน้อยกว่าร้อยละ 0.5 มีปริมาณของไขมันน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ปริมาณเถ้าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักแห้งและปริมาณสตาร์ชของข้าวทุกพันธุ์ที่ได้มากกว่าร้อยละ 95 (โดยน้ำหนักแห้ง)

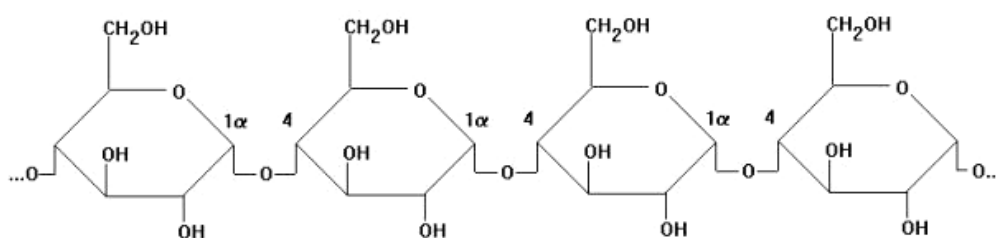
Noosuk และคณะ (2003) ทำการสกัดสตาร์ชจากข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (30-35°C) เป็นเวลา 5 เดือน สำหรับข้าวพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 1 โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.3 อัตราส่วน 1 : 5 แช่ที่อุณหภูมิ 33±2°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงเพื่อช่วยให้เมล็ดข้าวนุ่ม จากนั้นนำสารละลายต่างออกนำไปบดเปียกโดยใช้สารละลายค่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.3 อัตราส่วน 1 : 5 (Yamamoto *et al.*, 1973; Juliano, 1984) พบว่าสตาร์ชที่เตรียมได้มีปริมาณโปรตีนและปริมาณของไขมันน้อยกว่าร้อยละ 0.8 ปริมาณเถ้าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแห้ง

## 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คืออะมิโลสและอะมิโลเพกติน

### 2.2.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4 (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะมิโลส

Figure1. Amylose structure

ที่มา : Caplin (2004)

ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเมล็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนของผลึก (crystalline) อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกติน อยู่ใจกลางเมล็ดสตาร์ช สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเมล็ดสตาร์ช

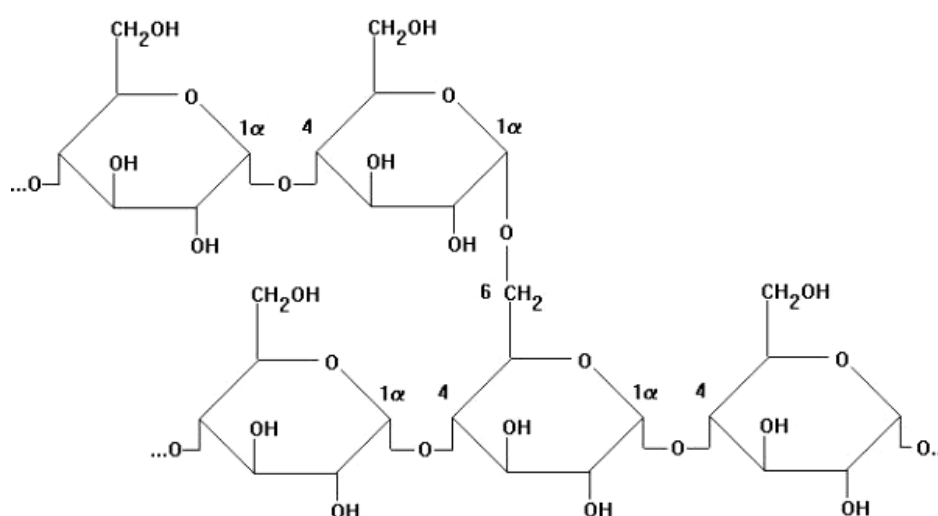
รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ทำการศึกษาปริมาณอะมิโลสของข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ ด้วยวิธีการตกตะกอนอะมิโลเพคตินด้วย concanavalin-A หรือ Con A สามารถจำแนกสตาร์ชข้าวออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามปริมาณอะมิโลสดังนี้ ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำซึ่งมีปริมาณอะมิโลสปรากฏ (apparent amylose) ประมาณร้อยละ 3.80 ได้แก่ พันธุ์กข 6 และพันธุ์ข้าวเหนียวสันป่าตอง กลุ่มที่ 2 เป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลางซึ่งมีปริมาณอะมิโลสปรากฏประมาณร้อยละ 12.88 ถึง 18.00 ได้แก่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พันธุ์พิษณุโลก 1 พันธุ์ปทุมธานี 1 พันธุ์กข 15 และพันธุ์สังข์หยดและกลุ่มสุดท้ายเป็นกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสสูงซึ่งมีปริมาณอะมิโลสปรากฏประมาณร้อยละ 20.31 ถึง 26.68 ได้แก่ ข้าวพันธุ์พิษณุโลก 2 พันธุ์สุพรรณบุรี 90 พันธุ์เหลืองประทิว 123 พันธุ์สุพรรณบุรี 1 พันธุ์ชัยนาท 1 พันธุ์ข้าวห้าร้อย พันธุ์กข 23 พันธุ์เฉียงพัทลุงและพันธุ์แจ๊กเชย นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชข้าวโดยใช้วิธีการเกิดสีกับไอโอดีน พบว่าจะให้ค่าปรากฏที่สูงกว่าวิธีการวิเคราะห์การตกตะกอนอะมิโลเพคตินด้วย Con A โดยพบว่าร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าปริมาณอะมิโลสที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 10 จนถึง 50 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณอะมิโลสที่วิเคราะห์ได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์ด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการรบกวนด้วยโมเลกุลของอะมิโลเพคตินและโมเลกุลที่มีขนาดกลาง (intermediate material)

Noosuk และคณะ (2003) ทำการศึกษาปริมาณอะมิโลสของข้าวไทยพันธุ์กข 6 พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ด้วยวิธีการตกตะกอนอะมิโลเพคตินด้วย Concanavalin-A หรือ Con A ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่แท้จริงโดยไม่มีอิทธิพลของอะมิโลเพคตินเข้ามาเกี่ยวข้อง และได้มีการตรวจสอบปริมาณอะมิโลสและ long-B chain amylopectin โดยแสดงเป็นปริมาณเทียบเท่าอะมิโลส (amylose equivalent, AE) ซึ่งโดยทั่วไปเรียกกันว่าปริมาณอะมิโลสทั้งหมด (total amylose) โดยละลายสตาร์ชในสารละลาย NaOH (1 นอร์มอล) ที่อุณหภูมิห้องแล้วทำปฏิกิริยากับไอโอดีน และปริมาณอะมิโลสที่ละลายน้ำได้ (soluble amylose, AM) โดยละลายสตาร์ชในน้ำที่อุณหภูมิ 98°C แล้วนำส่วนสารละลายที่กรองได้ไปทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ความแตกต่างระหว่าง AE กับ AM คือค่า AE เป็นค่าที่วัดรวมปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีนกับอะมิโลเพคตินสายยาวซึ่งเรียกว่าค่าปริมาณเทียบเท่าของอะมิโลสเนื่องจากอะมิโลเพคตินสายยาว (amylose equivalent of long-B chain amylopectin, AE<sub>LBCA</sub>) (Reddy *et al.*, 1993) จากการทดลองพบว่าปริมาณอะมิโลสที่ละลายน้ำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณอะมิโลสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Con A สามารถแบ่งสตาร์ชข้าวไทยออกเป็น 3 กลุ่ม ตามปริมาณอะมิโลสที่ละลายน้ำได้ กลุ่มที่ 1 คือสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (1-3%) ประกอบด้วยข้าวพันธุ์กข 6 และสตาร์ชข้าวเหนียว กลุ่มที่ 2 คือสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณ

อะมิโลสปานกลาง (14-15%) ได้แก่พันธุ์ข้าวคอกมะลิ 105 กลุ่มที่ 3 คือสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (21-23%) ได้แก่ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บข้าวขาวเป็นเวลา 5 เดือน ไม่ส่งผลต่อปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชข้าว

### 2.2.2 อะมิโลเพคติน

อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์สายสั้นมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อดัวยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,6 (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของอะมิโลเพคติน

Figure 2. Amylopectin structure

ที่มา : Caplin (2004)

หน่วยของกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในอะมิโลเพคตินทั้งหมด ขนาดของอะมิโลเพคตินในสตาร์ชแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของอะมิโลสคือประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำเนื่องจากอะมิโลเพคตินมีโครงสร้างเป็นกิ่ง

รุ่งนภา พงสวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ทำการศึกษาวิจัยการกระจายตัวของกิ่งก้านอะมิโลเพคตินของข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ ด้วยเครื่อง High Performance Anionic Exchange Chromatography พบว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ มีค่าร้อยละของการกระจายตัวของความยาวกิ่ง

ก้านอะมิโลเพคตินสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วงคือ  $\overline{DP}$ 6-12,  $\overline{DP}$ 13-24,  $\overline{DP}$ 25-36 และ  $\overline{DP}$ มากกว่าหรือเท่ากับ 37 สำหรับสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง พบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์พิษณุโลก 1 พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์กข 15 มีค่าร้อยละการกระจายตัวของ  $\overline{DP}$ 13-24 อยู่ในช่วง 52-55 เมื่อเปรียบเทียบแล้วน้อยกว่าข้าวพันธุ์ปทุมธานีและพันธุ์สังข์หยดซึ่งมีร้อยละการกระจายตัวสูงถึง 59 หากพิจารณาความยาวของก้านของสายอะมิโลเพคตินในช่วงที่มี  $\overline{DP}$  มากกว่า 37 พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์กข 15 และพันธุ์สังข์หยดมีร้อยละการกระจายตัวเท่ากับ 4 สำหรับข้าวในกลุ่มสุดท้ายที่จัดว่ามีปริมาณอะมิโลสสูง สามารถจำแนกข้าวออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะมีร้อยละของการกระจายตัวของความยาวก้านของสายอะมิโลเพคตินสายสั้นซึ่งมี  $\overline{DP}$ 6-12 มากกว่า  $\overline{DP}$ 13-24 ได้แก่ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 และพันธุ์ชัยนาท 1 สำหรับข้าวกลุ่มที่สองมีร้อยละการกระจายตัวของ  $\overline{DP}$ 6-12 น้อยกว่า  $\overline{DP}$ 13-24 ได้แก่ ข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 พันธุ์สุพรรณบุรี 1 พันธุ์ขาวห้าวร้อย พันธุ์กข 23 พันธุ์เงี้ยวพัทลุงและพันธุ์แจ้เขย

Noosuk และคณะ (2005) ทำการศึกษาร้อยละการกระจายตัวของก้านอะมิโลเพคตินข้าวไทยพันธุ์กข 6 พันธุ์ขาวดอกมะลิและพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ด้วยเครื่อง High Performance Anionic Exchange Chromatography พบว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีสายอะมิโลเพคตินที่มี  $\overline{DP}$ 3-11 น้อยกว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสดำ แต่สตาร์ชที่มีอะมิโลเพคตินต่ำจะมีสายอะมิโลเพคตินที่มี  $\overline{DP}$ 12-22 มากกว่า เมื่อคำนวณค่าสัดส่วนของสายอะมิโลเพคติน (amylopectin chain ratio, ACR) ของสตาร์ชข้าวไทยนี้พบว่าสามารถแบ่งสตาร์ชข้าวไทยได้เป็น 2 กลุ่มตามค่า ACR ได้แก่ อะมิโลเพคตินชนิด “ S ” ซึ่งมีค่า ACR เท่ากับ 0.25 ได้แก่ สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสดำและปานกลางและอะมิโลเพคตินชนิด “ L ” ซึ่งมีค่า ACR เท่ากับ 0.19 ได้แก่ สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

## 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช

### 2.3.1 ขนาดและรูปร่าง

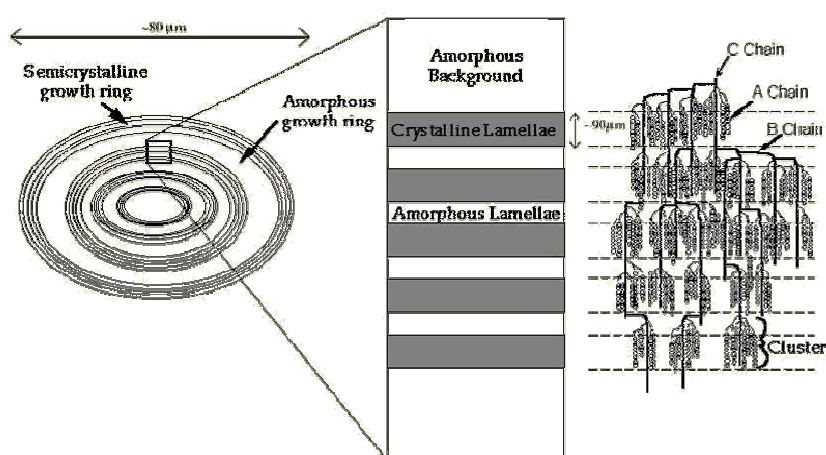
สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ช (granule) ขนาดเล็กซึ่งสามารถวัดขนาดและการกระจายด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer และลักษณะของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งสตาร์ชนั้นๆ เม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีลักษณะแบน มีหลายเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-5 ไมโครเมตร (Maningat and Seib, 1992) สตาร์ชข้าวจะมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในบรรดาสตาร์ชธัญพืช ซึ่งในธรรมชาติจะ

มีขนาดอยู่ในช่วง 3-10 ไมโครเมตร ขนาดเม็ดสตาร์ชข้าวเฉลี่ยโดยทั่วไปประมาณ 4-6 ไมโครเมตร (Juliano, 1984)

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ศึกษาขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ พบว่าสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์มีขนาดและรูปร่างของเม็ดที่คล้ายคลึงกัน โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 3 ถึง 12 ไมโครเมตร และมีลักษณะเหลี่ยม สอดคล้องกับการทดลองของ Noosuk และคณะ (2003) พบว่าลักษณะเม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาดและรูปร่างเหมือนเม็ดสตาร์ชข้าว โดยทั่วไปคือมีขนาดเล็ก มีรูปร่างคล้ายหกเหลี่ยม ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชมีลักษณะเรียบและไม่มีการปนเปื้อนจากองค์ประกอบอื่นและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3-5 ไมโครเมตร

### 2.3.2 โครงสร้างผลึก

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวกันในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) สายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกตินดังภาพที่ 3 เม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืช) ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B (สตาร์ชจากพืชหัว) ถ้าการจัดเรียงตัวแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว) ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดของโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกได้โดยเทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction)



ภาพที่ 3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ช

Figure 3. Structure of starch granule

ที่มา : Jenkins และคณะ (1994)

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวไทย 16 สายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชข้าวทุกพันธุ์มีโครงสร้างผลึกแบบ A เมื่อพิจารณาค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าว 3 กลุ่ม พบว่าสตาร์ชข้าวกลุ่มที่ไม่มีปริมาณอะมิโลส (waxy type) มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงสุดอยู่ในช่วง 24-26 สตาร์ชข้าวกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง มีร้อยละความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 17-23 ในขณะที่สตาร์ชข้าวกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีร้อยละของความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 17-23 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลางและสูงนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในส่วนของค่าร้อยละความเป็นผลึก

Noosuk และคณะ (2003) ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากข้าวไทย 3 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์สุพรรณบุรี 1 พันธุ์ขาวดอกมะลิ และข้าวเหนียวกข 6 พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ A ปริมาณผลึกของสตาร์ชข้าวมีค่าลดลงแบบเชิงเส้น ( $R^2=0.85$ ,  $p\leq 0.01$ ) เมื่อปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลึกเมล็ดสตาร์ชเกิดขึ้นในโครงสร้างของอะมิโลเพคตินของสตาร์ชข้าว ดังนั้นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินมากก็จะมีปริมาณผลึกมากขึ้นด้วย สตาร์ช กลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (1-3%) มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 33-34 สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง (14-15%) มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 22-28 สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (21-23%) มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 23-24

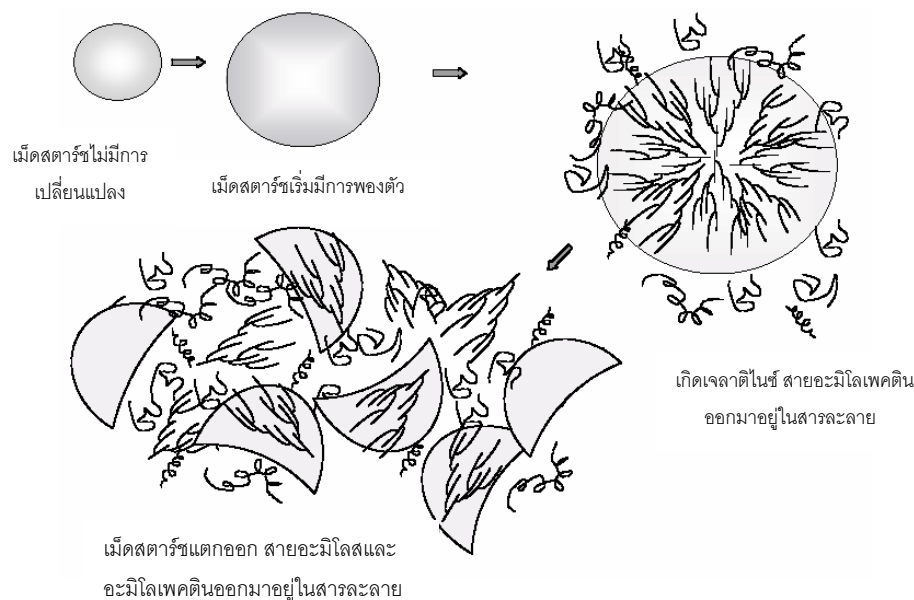
## 2.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช

### 2.4.1 การเกิดเจลลิตินเซชัน

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเมล็ดสตาร์ชอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เมล็ดสตาร์ชละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่สตาร์ชอยู่ในน้ำเย็นเมล็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ชพันธะไฮโดรเจนคลายตัวลงเมล็ดสตาร์ชดูดน้ำแล้วพองตัวสารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดขึ้นและใสขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization) (ภาพที่ 4) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเจลลิตินเซชัน ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินเซชันของสตาร์ชสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และให้ผลเป็นค่าพลังงานที่เรียกว่าค่าเอนทัลปี (enthalpy,  $\Delta H$ ) (Zobel, 1984) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินเซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของเมล็ดสตาร์ชได้ สตาร์ชที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมากจะ



มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว



ภาพที่ 4 การเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช

Figure 4. Starch gelatinization

ที่มา : Tester และคณะ (2004)

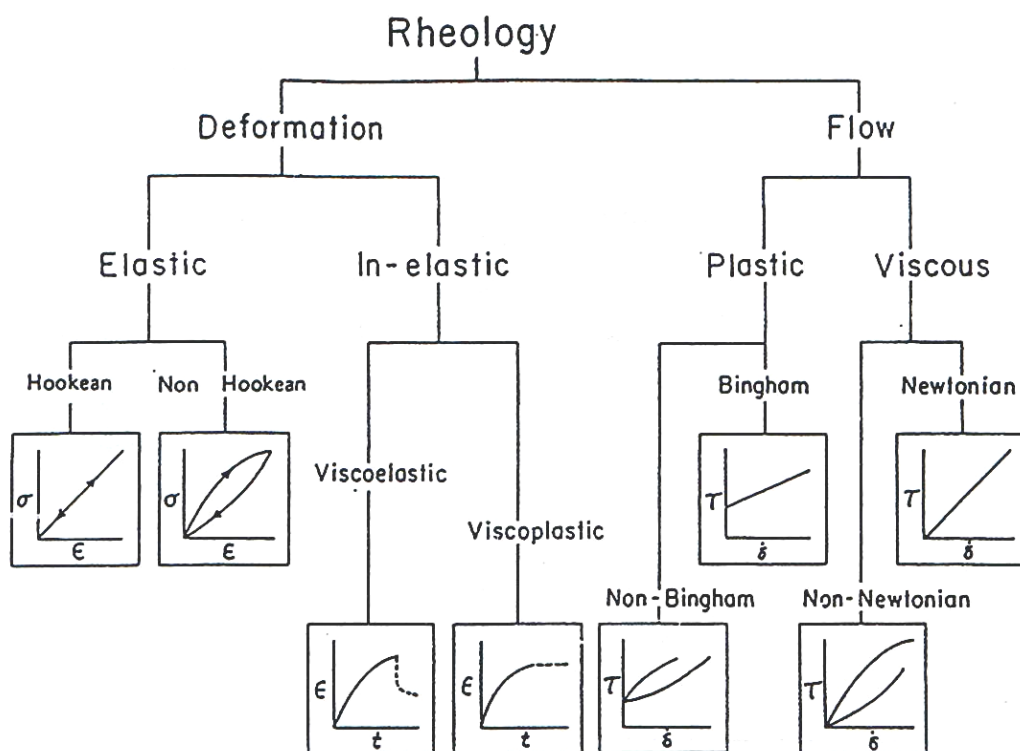
รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ศึกษาการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ ด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวให้ผลที่สอดคล้องกับอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง RVA โดยอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature) ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (3.8%) และสตาร์ชข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (18.00-25.10%) อยู่ในช่วง 65.84 ถึง 72.75 และ 73.85 ถึง 77.15°C ตามลำดับ ค่าพลังงานสำหรับการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy,  $\Delta H$ ) อยู่ในช่วง 11.86 ถึง 13.40 J/g สำหรับสตาร์ชข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและ 13.56 ถึง 16.91 J/g สำหรับสตาร์ชข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

Noosuk และคณะ (2003) ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวไทย 3 สายพันธุ์โดยใช้เครื่อง DSC พบว่าการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ได้แก่ สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและปานกลาง ซึ่งมีค่า  $T_0$  ในช่วง 61-63 °C สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

ซึ่งมีค่า  $T_0$  ในช่วง  $72-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  นอกจากนั้นพบว่าค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชข้าว ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างชนิดของข้าว โดยมีค่าในช่วง  $11.52-14.48\text{ J/g}$

#### 2.4.2 สมบัติรีโอโลยี

รีโอโลยี หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปและการไหล ซึ่งพฤติกรรมทางกลของวัสดุสามารถแสดงออกมาในเทอมของตัวแปร 3 ชนิด ได้แก่ แรง การเปลี่ยนรูปและเวลา ดังภาพที่ 5 สมบัติทางรีโอโลยีของอาหารแบ่งเป็น 2 จำพวกหลักๆ คือ ของแข็ง (solid) และของไหล (fluid) เพื่อให้การอธิบายและการวิเคราะห์ง่ายและสะดวกขึ้นจึงแบ่งการพิจารณาวัสดุเป็นกลุ่มๆ ตามสมบัติพื้นฐาน จากศึกษาสามารถแบ่งสมบัติตามพฤติกรรมด้านรีโอโลยีของวัสดุได้เป็น 3 คุณลักษณะพื้นฐานคือ elasticity, plasticity และ viscosity คุณลักษณะทางอุดมคติของทั้งสามลักษณะแสดงสมบัติในรูปของ Hookean body, St. Venant body และ Newtonian liquid ตามลำดับ คุณลักษณะทั้งสามนี้ใช้เป็นมาตรฐานหรือพื้นฐานในการเปรียบกับค่าวัสดุจริง



ภาพที่ 5 รีโอโลยีของอาหาร : การเปลี่ยนรูป (deformation) ของของแข็งและการไหล (flow) ของของเหลว

Figure 5. Rheology in food: Deformation and flow

ที่มา : Mohsenin (1970)

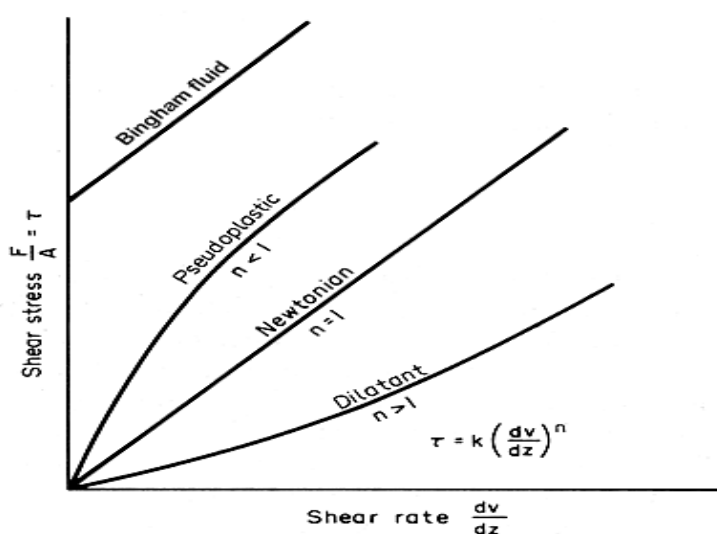
### 2.4.2.1 สมบัติทางความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติของของไหลในการต้านทานต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของไหล เมื่อของไหลได้รับความเค้น ของไหลจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่อง

#### (1) พฤติกรรมการไหล (Flow behavior)

พฤติกรรมการไหลของอาหารสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะความสัมพันธ์ของระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน ได้แก่ ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian)

ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) ดังภาพที่ 6 ความเค้นเฉือน (shear stress) ของของไหลนิวโตเนียนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับอัตราการเฉือน (shear rate) ถ้านำความเค้นเฉือนมาพลอตกับอัตราการเฉือนจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด ซึ่งเส้นตรงนี้มีค่าความชันที่คงที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความหนืด (coefficient of viscosity,  $\mu$ ) หรือความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) หรือเรียกสั้นๆ ว่าความหนืด (viscosity,  $\eta$ )



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของของไหลนิวโตเนียน และนอนนิวโตเนียน

Figure 6. Relationship between shear stress and shear rate of Newtonian and Non-Newtonian fluid

ที่มา : Singh และ Heldman (1993)

ของไหลนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian fluids) พบในอาหารที่เป็นของไหลประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ละลายได้ (dissolved macromolecules) และอนุภาคแขวนลอย (suspended particle) ทำให้พฤติกรรมการไหลแตกต่างจากของไหลนิวโตเนียนเป็นอย่างมาก

นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของของไหลนิวโตเนียนไม่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำเนิด ของไหลนอนนิวโตเนียนแบ่งตามพฤติกรรมการไหลได้ 2 แบบ ได้แก่ ของไหลนอนนิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลาและของไหลนอนนิวโตเนียนที่ขึ้นกับเวลา

ของไหลนอนนิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-independent non-Newtonian fluids) หมายถึงของไหลที่ความหนืดปรากฏขึ้นกับอัตราการเฉือนเท่านั้นแต่ไม่ขึ้นกับเวลา สำหรับ shear-thinning liquid พบว่าเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดปรากฏลดลงบางครั้งเรียก shear-thinning liquid ว่า pseudoplastic ซึ่งได้แก่ condensed milk, fruit puree, มาของเนส เป็นต้น เมื่อพลอตอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนจะได้ non-linear falling curve (เส้นโค้งนูน) สำหรับ shear-thickening liquid หรือ dilatant liquid พบว่าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างอาหารกลุ่มนี้ เช่น homogenized peanut butter, สารละลายแป้งข้าวโพด เข้มข้น 60% เป็นต้น เมื่อพลอตอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนจะได้ non-linear rising curve (เส้นโค้งเว้า) แต่ถ้าของไหลนอนนิวโตเนียนต้องใช้ความเค้นเฉือนเริ่มต้นค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า yield stress ( $\tau_0$ ) ก่อนที่จะเกิดการไหลได้ แสดงว่าของไหลนั้นมีพฤติกรรม plastic ด้วย

ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของของไหลนอนนิวโตเนียนที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 1, 2 และ 3

Power law model

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

เมื่อ  $k$  = สัมประสิทธิ์ความคงตัว ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )

$n$  = ดัชนีพฤติกรรมการไหล

Bingham plastic model

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Herschel-Bulkley model

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

อาหารเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนแบบที่ไม่ขึ้นกับเวลาส่วนใหญ่เป็น pseudoplastic materials ( $n < 1$ ) ในขณะที่ส่วนน้อยเป็น dilatant ( $n > 1$ )

ของไหลนอนนิวโตเนียนที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent non Newtonian fluid) (ภาพที่ 6) หมายถึงของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของของไหลนอนนิวโตเนียนเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time of shearing) นั่นคือความเค้นเฉือนของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลา ณ อัตราเดียวกันอาหารที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียนหลายชนิดที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมีพฤติกรรมรีโอโลยีที่ขึ้นกับเวลา นั่นคือความหนืดปรากฏของอาหารดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าความหนืดปรากฏลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเรียกของไหลนั้นว่า thixotropic fluids ในทางกลับกันถ้าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเรียกว่า rheopectic fluids

## (2) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญของสตาร์ชเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ปริมาณอะมิโลส และความเข้มข้นของสตาร์ช

### ● ชนิดของสตาร์ช

สตาร์ชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติความหนืดต่างกันไป ความหนืดที่เกิดขึ้นของสารละลายสตาร์ชแต่ละชนิดจะให้ลักษณะ (profile) ของความหนืดแตกต่างจากการแบ่งประเภทของสตาร์ชตามกราฟความหนืดตามวิธีของ Schoch และ Maywald (1968) สามารถแบ่งรูปแบบความหนืดของสตาร์ชเพสท์ที่วัดด้วยเครื่อง Brabender Viscoamylograph ตามกำลังการพองตัวของสตาร์ช แบ่งเป็น 4 แบบ ดังนี้

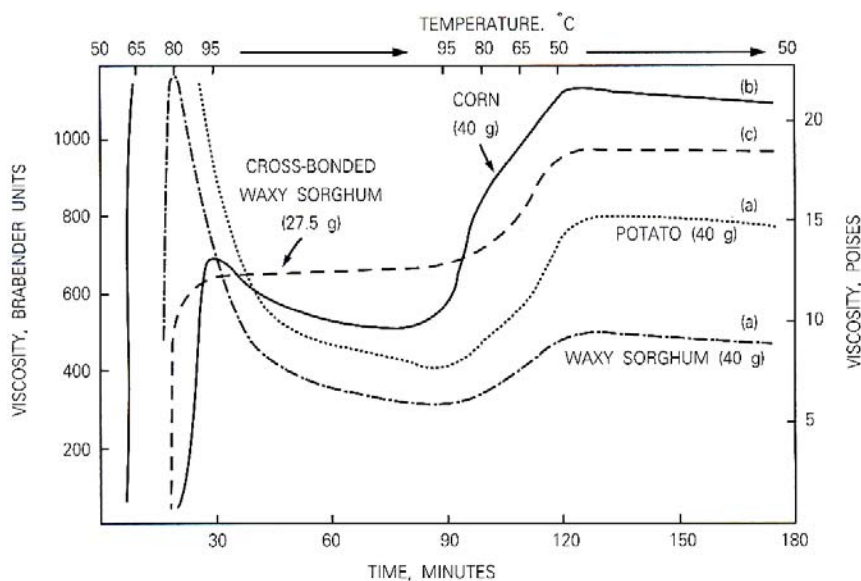
แบบ a : กราฟจากเมล็ดสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูง (high-swelling starches) เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง (potato starch) สตาร์ชข้าวฟ่าง (waxy sorghum starch) เมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชเมล็ดสตาร์ชจะมีกำลังการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดสตาร์ชกระจายตัวแตกออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ลักษณะกราฟความหนืดจึงสูงขึ้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

แบบ b : กราฟจากเมล็ดสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง (moderate-swelling starches) ได้แก่สตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ เม็ดสตาร์ชไม่พองตัวมากถึงขั้นกระจายตัวออก จึงได้ลักษณะกราฟความหนืดที่สูงชันน้อยกว่าและเกิดการสลายตัวระหว่างการหุงต้มน้อยกว่า

แบบ c : กราฟจากเมล็ดสตาร์ชที่มีการพองตัวน้อย (restricted-swelling starches) ได้แก่สตาร์ชจากถั่วต่างๆ และสตาร์ชครอสลิงหรือพันธะข้าม (cross-linked หรือ cross-bonded) วิธีครอสลิงทำให้การพองตัวและการละลายของเมล็ดสตาร์ชลดลง ทำให้เมล็ดสตาร์ชที่พองตัวมี

เสถียรภาพมากขึ้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด มีค่าความหนืดซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุก (ภาพที่ 7)

แบบ d : กราฟจากเมล็ดสตาร์ชที่มีการพองตัวน้อยมาก (highly-restricted swelling starches) ได้แก่ สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น สตาร์ชข้าวโพดอะมิโลสซึ่งมีอะมิโลส 50 ถึง 80% (ไม่มีแสดงในภาพ)



ภาพที่ 7 รูปแบบความหนืดของสตาร์ชชนิดต่างๆ เมื่อแบ่งตามกำลังการพองตัว

Figure 7. Viscosity profile of starches following the swelling power

ที่มา : Leach (1965)

- ปริมาณอะมิโลส

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ (2546) ทำการศึกษาสมบัติความหนืดของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ สตาร์ชปริมาณอะมิโลสต่ำ (3.8%) สตาร์ชปริมาณอะมิโลสปานกลาง (12.88-15.95%) และสตาร์ชปริมาณอะมิโลสสูง (18.00-25.10%) ด้วยเครื่อง Rapid Visco amylograph (RVA) พบว่าอุณหภูมิที่สารละลายสตาร์ชเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะสูงกว่าสตาร์ชพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวที่มีอะมิโลสต่ำมีแนวโน้มสูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายอย่างต่อเนื่อง ความร้อนและแรงเฉือนจากการกวนจะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีแนวโน้มให้ค่าความหนืดต่ำสุดหลังผ่านการต้มสุกกว่าสตาร์ชกลุ่มที่มีอะมิโลสต่ำ เมื่อสารละลายสตาร์ชเย็นตัวลงจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น (Final viscosity) ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ช (retrogradation) สำหรับสตาร์ชข้าวที่มี

ปริมาณอะมิโลสสูงมีแนวโน้มให้ความหนืดสุดท้ายหลังตั้งทิ้งไว้ให้เย็นและการคืนตัวสูงกว่า  
สตาร์ชกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ

Noosuk และคณะ (2003) ศึกษาพฤติกรรมการเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าว  
ขณะได้รับความร้อนจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง RVA พบว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมี  
ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ซึ่งแสดงถึงระดับการพองตัวที่เพิ่มขึ้นอย่าง  
รวดเร็ว จากค่า breakdown และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature)  
สามารถแบ่งสตาร์ชจากข้าวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและ  
อะมิโลสปานกลาง ซึ่งมีค่า breakdown ในช่วง 1839 – 2282 mPa.s และมีค่าอุณหภูมิที่เริ่ม  
เปลี่ยนค่าความหนืดในช่วง 67 – 71 °C และสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ซึ่งมีค่า breakdown  
ในช่วง 1082 – 1148 mPa.s และมีค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วง 77 - 80 °C  
สำหรับความแตกต่างของค่า setback ของสตาร์ชนั้น พบว่าเป็นผลเนื่องจากปริมาณอะมิโลสโดย  
setback มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชข้าว ( $R^2=0.96, p\leq 0.01$ )

- ความเข้มข้นของสตาร์ช

Evans และ Haisman (1979) ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏและความ  
เข้มข้นของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด พบว่าความหนืดปรากฏที่อัตราการเฉือนต่างๆ  
( $\eta_p$ ) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วงอัตราการเฉือน  $10^1$  ถึง  $10^3 \text{ s}^{-1}$   
แสดงดังสมการที่ 4

$$(\eta_p)^{0.4} = k^n (c - c_0) \quad (4)$$

เมื่อ  $c_0$  คือความเข้มข้นที่ความหนืดเข้าใกล้ศูนย์และ  $k$  คือค่าคงที่

นอกจากนี้พบว่าความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏกับความเข้มข้นนี้ได้มีการ  
รายงานไว้โดย Bagley และ Christianson (1982) และ Doublier (1981) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์  
ของกฎยกกำลังในการอธิบายอิทธิพลของความเข้มข้นสำหรับสตาร์ชข้าวสาลีในช่วงอัตราการเฉือน  
ช่วง  $20\text{-}200 \text{ s}^{-1}$

Noosuk และคณะ (2003) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนและความเค้น  
เฉือนของสตาร์ชข้าวที่มีความเข้มข้นในช่วง 1–8% (โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่อัตรา  
การเฉือนในช่วง  $50\text{-}1000 \text{ s}^{-1}$  พบว่าเป็นไปตามสมการกฎยกกำลัง (power law equation) และมี  
พฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว ( $k$ )  
ของสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้นสามารถพิจารณาได้จากการลดลงของค่า  
 $n$  เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสมบัติการไหลแบบซูโดพลาสติกเพิ่มมากขึ้น และ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ซูโดพลาสติก (pseudoplastic constant,  $m$  ซึ่งค่านี้มีค่าเท่ากับ  $n-1$ ) กับค่าความเข้มข้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำๆ ค่า  $m$  มีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงสมบัติการไหลแบบนิวโตเนียน ขณะที่ความเข้มข้นสูงๆ ค่า  $m$  มีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่และแสดงการไหลแบบนอนนิวโตเนียน

#### 2.4.2.2 สมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic)

สมบัติวิสโคอีลาสติกเป็นคุณสมบัติของอาหารที่มีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของแข็งกับของไหล เช่น เจล การวิเคราะห์สมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกของอาหารนั้น อาศัยหลักการของพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเค้นหรือความเครียดของวัสดุนั้น ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ ได้แก่

- การวิเคราะห์การคลายความเค้น (Stress relaxation) เป็นการศึกษาการตอบสนองต่อความเครียดที่คงที่ของวัสดุวิสโคอีลาสติก ในเทอมของ stress relaxation modulus,  $G(t)$  ซึ่งเป็น viscoelastic parameter และมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างความเค้นที่เปลี่ยนแปลงต่อความเครียด ดังแสดงในสมการที่ 5

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

เมื่อ  $G(t)$  = stress relaxation modulus (Pa)

$\sigma(t)$  = ความเค้นที่เปลี่ยนแปลง

$\varepsilon_0$  = ความเครียด

วัสดุ viscoelastic solid ความเค้นจะลดลงจนเป็นค่าหนึ่งที่เรียกว่า ค่าความเค้นสมดุล (equilibrium stress value,  $\sigma_e > 0$ ) ในทำนองเดียวกัน shear modulus ( $G$ ) ก็จะถึงจุดสมดุล  $G_e > 0$  วัสดุ viscoelastic liquid ความเค้นลดลงเป็นศูนย์ วัสดุ viscous liquid ไม่สามารถที่จะควบคุมความเค้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ทำให้ความเค้นถูกปลดปล่อยทันทีทันใด

- การวิเคราะห์ความคืบ (Creep) เป็นการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความเค้นที่คงที่ของวัสดุวิสโคอีลาสติกในรูปของ creep compliance,  $J(t)$  ซึ่งเป็น viscoelastic parameter และมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อความเค้น ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (6)$$

เมื่อ  $J(t)$  = creep compliance ( $\text{Pa}^{-1}$ )

$\varepsilon(t)$  = ความเครียดที่เปลี่ยนแปลง

$\sigma_0$  = ความเค้น

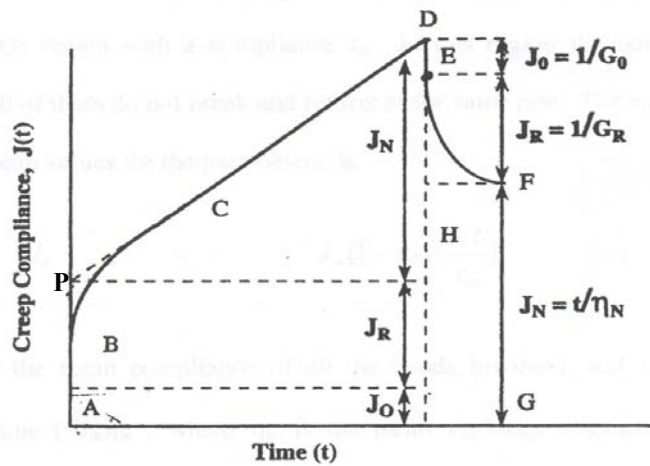


วัสดุ viscoelastic solid เมื่อให้ load คงที่  $J$  จะเข้าสู่สถานะสมดุล  $J_e$  หลังจากเอา load ออก ณ เวลา  $t_1$   $J$  จะลดลงเป็นศูนย์ วัสดุ viscoelastic liquid เมื่อให้ load คงที่  $J$  จะเป็นฟังก์ชันเส้นตรงของเวลา หลังจากเอา load ออก ณ เวลา  $t_1$   $J$  จะลดลงเป็นค่าคงที่หนึ่ง (finite value)

Burger model ซึ่งได้มาจากการนำ Maxwell model และ Kelvin model มาต่ออนุกรมสามารถอธิบายพฤติกรรม creep ได้ดังสมการที่ 7 และแสดงดังภาพที่ 8

$$J(t) = J_0 + J_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{t}{\eta_N} \tag{7}$$

- โดย  $J(t)$  = the measured compliance (1/Pa)
- $J_0$  = the instantaneous elastic compliance (1/Pa)  
=  $1/G_0$
- $J_1$  = the retarded elastic compliance (1/Pa)  
=  $1/G_1$
- $\eta_1$  = the retarded viscosity (Pa.s)
- $\eta_N$  = the terminal viscosity (Pa.s)
- $\tau_1$  = the retardation time (s)  
=  $J_1 \cdot \eta_1$



ภาพที่ 8 กราฟแสดงการคืบและการคืนของวัสดุวิสโคอีลาสติก

Figure 8. Relationship between creep compliance and time of viscoelastic material

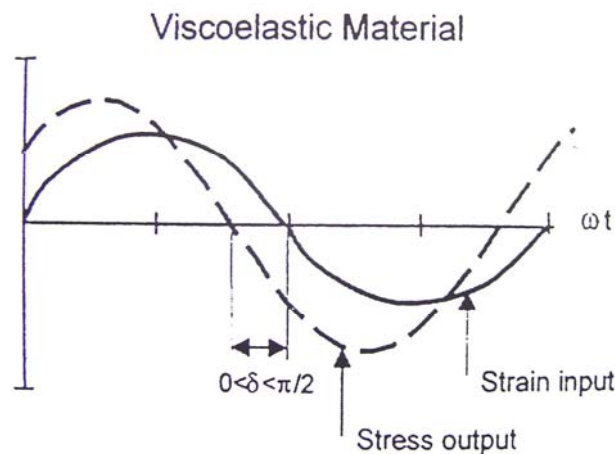
ที่มา : Sherman (1970)

- การวิเคราะห์การสั่นทางพลวัต (Dynamic oscillation) เป็นการศึกษาการตอบสนองต่อความเค้นหรือความเครียดภายใต้การเคลื่อนที่แบบไซน์ (harmonic oscillation) ของวัสดุวิสโคอีลาสติกในเทอมของ viscoelastic parameter หลายตัว ได้แก่ storage modulus ( $G'$ ), loss modulus ( $G''$ ) และ loss tangent ( $\tan \delta$ )

ค่า storage modulus แสดงถึงปริมาณของพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด ดังนั้นวัสดุ Hookean จึงสามารถเก็บพลังงานไว้ได้ทั้งหมด ขณะที่วัสดุไหลหนืดไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้เลย พลังงานที่ได้รับจะสูญสลายไปกับการเคลื่อนที่แบบไหลหนืดทั้งหมด ส่วน loss modulus แสดงถึงพลังงานที่สูญสลายไปเนื่องจากความหนืด และแสดงถึงสัดส่วนของการแสดงสถานะการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญ ได้แก่ loss tangent ดังสมการที่ 8

$$\tan \delta = G'' / G' \quad (8)$$

การวิเคราะห์สมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกแบบการวิเคราะห์แบบสั่นทางพลวัตนั้นในปัจจุบันเป็นที่นิยมมากเนื่องจากใช้เวลาในการทดลองสั้นและควบคุมพารามิเตอร์ได้สะดวก เหมาะสมกับการศึกษาระบบอาหารประเภทพอลิเมอร์และเจล หลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ การให้วัสดุได้รับความเครียดในลักษณะการสั่นแบบ sine wave และความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลาภายใต้การเคลื่อนที่แบบ harmonic ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความเค้นและความเครียดของวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ได้จากการทดสอบแบบสั่น

Figure 9. Stress and strain of viscoelastic material

ที่มา : Ak และ Gunasekaran (2001)

## (2) ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ช

- ความเข้มข้นของสตาร์ช

Lii และคณะ (1995) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 5-30% ต่อสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชข้าวได้หว่าน 3 ชนิด ได้แก่ KSS7, TNu67 และ TCw70 พบว่าผลของความเข้มข้นของสตาร์ชมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการเกิดโครงข่ายที่มีการตรึงเม็ดสตาร์ชที่มีการพองตัวเอาไว้ สำหรับสตาร์ชที่มีความเข้มข้นต่ำ ( $\leq 5\%$ ) พบว่าความเข้มข้นของอะมิโลสที่ออกมา (leached-out amylose) และการพองตัวของเม็ดสตาร์ชไม่สูงพอที่จะเกิดอันตรกิริยาต่อกันเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายขึ้นได้ส่งผลให้  $G'$  มีค่าต่ำ ขณะที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสูงๆ (10-30%) สามารถเกิดอันตรกิริยาที่เพียงพอต่อการเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายจึงทำให้  $G'$  มีค่าสูงขึ้น

จากการศึกษาการเกิดเจลของสตาร์ชชนิดต่างๆ พบว่า ค่า  $G'$  เพิ่มขึ้นเมื่อสตาร์ชมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับสตาร์ชที่มีความเข้มข้นต่ำ ( $\leq 10\%$ ) เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่พองตัวได้ไม่จำกัดเท่ากับที่ความเข้มข้นสูง ( $\geq 25\%$ ) และพบว่าสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงจะมีโครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชสูงขึ้น ส่วนสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวต่ำพบว่าโครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงน้อยกว่าความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำ พื้นที่ผิวที่สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างเม็ดสตาร์ชที่พองตัวในระบบที่มีความเข้มข้นต่ำมีค่าน้อยกว่าในระบบที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นค่า  $G'$  และ  $G'_{\max}$  ในระบบที่มีความเข้มข้นต่ำจะต่ำกว่าค่า  $G'$  ในระบบที่มีความเข้มข้นสูง (Tsai *et al.*, 1997)

- ปริมาณอะมิโลส

Lii และคณะ (1996) ศึกษาผลของปริมาณของอะมิโลสต่อสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชข้าวระหว่างการให้ความร้อน พบว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีค่า  $G'$  สูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เนื่องจากสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมีกำลังการพองตัวที่สูงกว่าจึงเกิดการแตกตัวได้ง่ายทำให้ความแข็งแรงของเจลมีค่าต่ำ ขณะที่สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีกำลังการพองตัวต่ำจึงมีความแข็งแรงของโครงสร้างมากกว่าทำให้เจลที่มีความแข็งแรงกว่า

Noosuk และคณะ (2005) ศึกษา Creep สำหรับแป้งเปียกของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันที่มีความเข้มข้น 6-15% (โดยน้ำหนัก) หลังจากลดอุณหภูมิเป็น  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชข้าวอะมิโลสต่ำ (อะมิโลส 1-3%) ความเข้มข้น 6% แสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนโดยมีค่าความหนืด  $16.4\text{ (Pa}\cdot\text{s)}$  ส่วนสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง (14-15%) และปริมาณอะมิโลสสูง (21-23%) แสดงพฤติกรรมการไหลแบบวิสโคอีลาสติก ซึ่งสามารถอธิบายด้วยแบบจำลอง 4-element Burger model พบว่าค่า

$G_0$  (instantaneous elastic modulus),  $G_1$  (retard elastic modulus),  $\eta_1$ , และ  $\eta_N$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะมิโลสและความเข้มข้นของอะมิโลสของสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากปริมาณอะมิโลสและความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้นจึงทำให้โครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลางและอะมิโลสดำมีค่า retardation time ( $\tau_1$ ) ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีค่า  $\tau_1$  ที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญซึ่งเกิดจากผลของความแข็งแรงของสตาร์ชเช่นกัน

### 2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมากทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) (Smith, 1979) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการจับเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจลเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้นการคืนตัวของแป้งเปียกของสตาร์ชทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ในการคืนตัวของสตาร์ชเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เจลขุ่น

#### 2.4.3.1 การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน

##### (1) การตรวจวัดสมบัติรีโอโลยี

การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ทำได้โดยการตรวจวัดสมบัติรีโอโลยี โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่า  $G'$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความยืดหยุ่น (elastic) ของสารกับเวลา นอกจากนั้นยังสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากค่า instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ) และค่า retard elastic modulus ( $G_1$ ) จากการศึกษาการคืบ (creep study)

Noosuk และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันสตาร์ชข้าวไทยที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยการตรวจติดตามค่า  $G'$  ในช่วงของการเก็บรักษา พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ค่า  $G'$  เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ช่วงนี้จะเกิดขึ้นอย่าง

สมบูรณ์ภายในระยะเวลา 85-90 ชั่วโมง ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่สายโมเลกุลของสตาร์ชสามารถกลับมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้สมบูรณ์

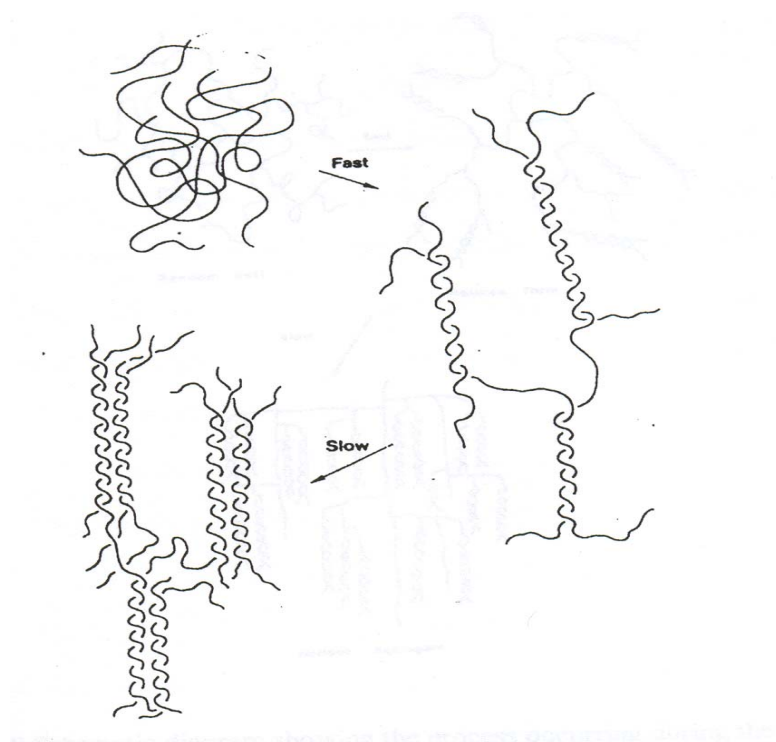
## (2) การวัดด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง FT-IR ทำได้โดยอาศัยหลักการที่เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนแสงอินฟราเรด โมเลกุลจะถูกกระตุ้นเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงซึ่งเพียงพอต่อการทำให้เกิดการยืดตัว (stretching) หรือเกิดการงอ (bending) ทำให้ปรากฏเป็นพีคการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (IR absorption peak) ที่ค่าความถี่ต่างๆ สำหรับสตาร์ชซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันหลักที่จำเพาะคือ COH นั้นสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ดีที่ความถี่ในช่วง 1200-1000  $\text{cm}^{-1}$  ดังนั้นการตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจึงติดตามจากการเปลี่ยนแปลงพีคในช่วงความถี่ดังกล่าว

van Soet และคณะ (1994) ศึกษาจลพลศาสตร์ของการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันฝรั่ง (10% โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่อง FT-IR โดยศึกษาความถี่ในช่วง 1300-800  $\text{cm}^{-1}$  สำหรับสตาร์ชมันฝรั่ง (native potato starch) พบพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ความถี่ 1047, 1018 และ 994  $\text{cm}^{-1}$  และพบว่าพีคการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับปริมาณของผลึกสตาร์ชและปริมาณความชื้น สำหรับสตาร์ชเจลาติไนเซชันพบว่าพีคที่มีความหนาแน่นสูงที่ความถี่ 1022  $\text{cm}^{-1}$  ในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่เก็บรักษาเป็นเวลาหลายสัปดาห์ พบพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัด 3 พีค คือที่ความถี่ 1053, 1022 และ 1000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพีคการดูดกลืนแสงระหว่างการเก็บรักษาเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันหลักของสตาร์ช นอกจากนี้ van Soet และคณะ (1995) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันฝรั่งความเข้มข้น 18% ด้วยเครื่อง FT-IR ในช่วงความถี่ 1300-800  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าความสูงของพีคการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  มีความสัมพันธ์กับปริมาณของผลึก (crystalline) ในโครงสร้างของสตาร์ช ขณะที่พีคการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1022  $\text{cm}^{-1}$  มีความสัมพันธ์กับส่วน ออสัญฐาน (amorphous) และอัตราส่วนของความสูงของพีคที่ 1047 ต่อความถี่ 1022  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงสัดส่วนของความเป็นผลึกของโครงสร้างต่อส่วนอสัญฐาน (short-range molecular order to amorphous)

Goodfellow และ Wilson (1990) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินของสตาร์ชข้าวสาลีด้วยเครื่อง FT-IR ที่ช่วงความถี่ 1300-900  $\text{cm}^{-1}$  เป็นเวลา 300 ชั่วโมง พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดขึ้น 2 ช่วง โดยช่วงแรกพบการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาครึ่งชั่วโมง โดยพบการเปลี่ยนแปลงของพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ความถี่ 1053 และ 1003  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นผลมาจากอะมิโลสโดยพบว่ามีกรรวมตัวกันเกิดเป็นสาย

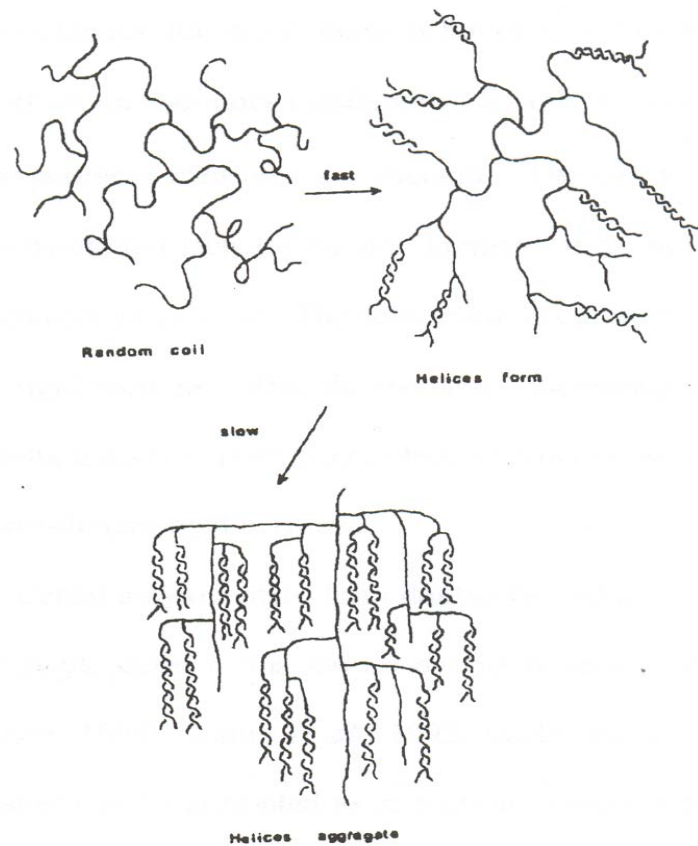
เกลียวคู่ของอะมิโลส จากนั้นมีการรวมตัวกันเพื่อพัฒนาเป็นโครงร่างตาข่ายของเจลอะมิโลส ดังภาพที่ 10 จากนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างช้าๆ จนครบเวลา 300 ชั่วโมง โดยพบการเปลี่ยนแปลงพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ความถี่  $1053\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นผลจากอะมิโลเพคติน โดยพบว่าช่วงแรกการเกิดเป็นเกลียวคู่ของสายกิ่งอะมิโลเพคติน จากนั้นมีการรวมตัวกันอย่างช้าๆ เพื่อพัฒนาเป็นผลึกของโครงสร้างดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงการเกิดเจลและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสายอะมิโลส

Figure 10. Schematic of retrogradation of amylose chains

ที่มา : Goodfellow และ Wilson (1990)



ภาพที่ 11 แผนภาพแสดงการเกิดเจลและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสายอะมิโลเพคติน

Figure 11. Schematic of retrogradation of amylopectin chains

ที่มา : Goodfellow และ Wilson (1990)

#### 2.4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ

##### (1) ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคติน

Lu และคณะ (1997) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลเพคตินจากสตาร์ชข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ของไต้หวัน พบว่าอะมิโลเพคตินสายสั้น ( $\overline{DP}$  10-15 หน่วยกลูโคส) ส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก พันธะเกลียวคู่ของอะมิโลเพคตินจัดเรียงตัวกัน ดังนั้นพลังงานที่ใช้จึงสูงกว่า (Sander *et al.*, 1990) Gidley และ Bulpin (1987) พบว่าความยาวของสายอะมิโลเพคตินที่

มากกว่า 10 หน่วยกลูโคสขึ้นไปเป็นที่ต้องการสำหรับการเกิดเป็นเกลียวคู่เพื่อพัฒนาเป็นโครงสร้างผลึกต่อไป ขณะที่สายของอะมิโลเพคติน ( $\overline{DP}$  6-9 หน่วยกลูโคส) จะขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Levin and Slade, 1986; Shi and Seib, 1992) การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชข้าวบาร์เลย์ เป็นสัดส่วนตรงกับสัดส่วนโมลของอะมิโลเพคตินสายยาว ( $\overline{DP}$  14-24) และเป็นสัดส่วนผกผันกับสัดส่วนโมลของอะมิโลเพคตินสายสั้น ( $\overline{DP}$  6-9) (Shi and Seib, 1992)

Noosuk และคณะ (2005) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันซึ่งได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงค่า  $G'$  และอัตราส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก (short-range molecular order to amorphous: RSA) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C จากการศึกษาไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองสำหรับสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและอะมิโลสปานกลางในช่วงการเก็บรักษา 70 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวทั้งสองมีปริมาณอะมิโลสและสัดส่วนของความยาวสายของอะมิโลเพคตินที่  $\overline{DP}_n$  12-14 ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชไม่สามารถเกิดอันตรกิริยาต่อกันเพื่อเกิดเป็นเจลที่มีโครงร่างตาข่ายสามมิติออกจากรูปแบบที่พบในสตาร์ชข้าวอะมิโลสต่ำและอะมิโลสสูงมีสัดส่วนของอะมิโลเพคตินสายสั้น ( $\overline{DP}_n$  3-11) สูงซึ่งสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลได้ในขณะเดียวกันพบว่าเจลของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (สตาร์ชข้าวสุพรรณบุรี 1 และสตาร์ชข้าวทางการค้า) พบการเปลี่ยนแปลงของค่า  $G'$  และ RSA ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยการเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ค่า  $G'$  และ RSA เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ช่วงนี้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 85-90 ชั่วโมง ช่วงที่ 3 เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นน้อยมากจนมีค่าคงที่ซึ่งเป็นช่วงที่ผลึกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

## (2) ความเข้มข้นของสตาร์ช

Noosuk และคณะ (2003) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ซึ่งเป็นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการหาค่า RSA พบว่าการฟอร์มตัวของสายเกลียวคู่แบ่งเป็นสามช่วง ได้แก่ ช่วงการจัดเรียงตัวของสายสตาร์ช การกลับมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกและช่วงของการจัดเรียงตัวของสายสตาร์ชอย่างสมบูรณ์ ช่วงแรกของการกลับมาจัดเรียงตัวของสายสตาร์ชอยู่ในช่วง 10, 20 และ 22 ชั่วโมงสำหรับสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับช่วงนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า RSA เท่ากับ 0.001/h, 0.002/h และ 0.003/h สำหรับสตาร์ชที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ ช่วง



สุดท้ายของการกลับมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกพบที่ 55, 90 และ 95 ชั่วโมง สำหรับสตาร์ชที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า RSA เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสตาร์ชทำให้ปริมาณของอะมิโลสและสัดส่วนร้อยละของอะมิโลเพคติน  $\overline{DP}_n$  12-24 ในโครงข่ายของเจลเพิ่มขึ้นการพอร์มโครงข่ายสามมิติสูงขึ้นระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชัน อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามปริมาณอะมิโลสที่เพิ่มขึ้น (ความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำ) ในสตาร์ชเจลาตินส์เนื่องจากการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสตาร์ช (Slade and Levine, 1987)

Orford และคณะ (1987) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันพบว่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น โดยพบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสตาร์ชกับค่า  $G'$  สำหรับสตาร์ชธัญพืช พืชหัวและพืชราก ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 20% พบว่าค่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของเจลสตาร์ชเพิ่มขึ้นเป็น 30% และ 40% พบว่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า  $G'$  เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากการเพิ่มความเข้มข้นของอะมิโลสในสารละลายสตาร์ชและจากผลการศึกษาของ Gudmundsson (1994) พบว่าปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมีผลมาจากปริมาณน้ำในสตาร์ช

### (3) อุณหภูมิและเวลาในการเก็บรักษา

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมีผลอย่างมากจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาโดยพบว่าในการเก็บรักษาเจลสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำ 45-50% ที่อุณหภูมิต่ำแต่ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิ glass transition จะช่วยเพิ่มการเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อเปรียบเทียบกับในการเก็บรักษาเจลที่อุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะในช่วงวันแรกของการเก็บรักษา (Gudmundsson, 1994) สำหรับการเก็บรักษาเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  จะมีผลยับยั้งการเกิดผลึกใหม่ และพบว่าที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า  $32-40^{\circ}\text{C}$ ) ก็มิผลทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงเช่นกัน (Colwell, 1969; Eliasson, 1985) เมื่อสตาร์ชที่ผ่านการเจลาตินในเซชันถูกทำเย็นตัวลง พบว่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเจลมีค่าลดลงและเมื่อนำเจลของสตาร์ชเจลาตินส์ไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำค่าหนึ่ง พบการพัฒนาของโครงร่างตาข่ายของโครงสร้างซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยการสั่นทางพลวัต (dynamic viscosity) ในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา ค่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเกิดโครงร่างตาข่ายของอะมิโลสซึ่งพัฒนาเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ (Hansen *et al.*, 1990) Miles และคณะ (1985) สนับสนุนการศึกษาการดังกล่าวโดยพบว่าค่า  $G'$  ของสตาร์ชถั่วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของสตาร์ชลงจาก  $90^{\circ}\text{C}$  เป็น  $26^{\circ}\text{C}$  และสำหรับสตาร์ชที่สามารถพองตัวได้มาก เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าในช่วงแรกการพัฒนาโครงร่างตาข่ายของเจลสตาร์ชเกิดขึ้นได้น้อยเนื่องจากปริมาณอะมิโลส

ในสารละลายที่มีปริมาณน้อยจึงทำให้เจลมีความแข็งแรงต่ำแต่เมื่อเก็บรักษาเจลให้นานขึ้นพบว่าเจลมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นเนื่องจากการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ของอะมิโลเพคติน

Lii และคณะ (1995) รายงานว่าระหว่างการลดอุณหภูมิของเจล ค่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นโดยสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (25.6%) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $G'$  สูงกว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (14.80%) เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชเดียวกันพบว่าค่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการลดอุณหภูมิของเจลลง ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดจากอันตรกิริยาของสายโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่อุณหภูมิต่ำ การลดอุณหภูมิของเจลลงส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยในช่วงแรกเป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส (Billiaderis and Zawistowski, 1990)

### 3. การตัดแปรรสตาร์ช

สตาร์ชตัดแปรร (modified starch) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าว เป็นต้น มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน เอนไซม์ หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่างๆ ของสตาร์ชตัดแปรรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สตาร์ชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ขนาด รูปร่าง และการพองตัว แต่สิ่งที่สตาร์ชทุกชนิดมีคล้ายกันคือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสตาร์ชแต่ละชนิดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆ กัน ถ้าสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติเหล่านี้ได้จะทำให้สามารถนำสตาร์ชไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากขึ้น การตัดแปรรสตาร์ชจึงได้เริ่มมีผู้ค้นคว้าวิจัยขึ้น ทั้งโดยทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชมีความพร้อมในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดีมาก (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

สตาร์ชดิบ (native starch) โดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือน ในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการตัดแปรรคุณสมบัติบางประการของสตาร์ชดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะการผลิตได้ การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (Retrogradation) และการสูญเสีย น้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือ

ความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น (BeMiller, 1997) การดัดแปรนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ได้แก่ การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification) และการดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification)

การดัดแปรทางกายภาพด้วยวิธีใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (hydrothermal treatment) เป็นการดัดแปรโดยการให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่มีการควบคุมความชื้นภายใต้สภาวะที่กำหนด กระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นมี 2 วิธี ได้แก่การให้ความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment, HMT) และวิธีการทำแอนนิลิ่ง (annealing, AN) ซึ่งเป็นการดัดแปรที่ปราศจากการเกิดเจลลาตินในเซชัน การเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของเม็ดสตาร์ช รวมทั้งลักษณะของ birefringence การให้ความร้อนชื้น (HMT) เป็นการให้ความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงแต่ปริมาณความชื้นต่ำ ส่วนการทำแอนนิลิ่ง (AN) เป็นการให้ความร้อนต่อสารละลายสตาร์ช (slurry) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาตินในเซชันเป็นเวลานาน ทั้งนี้การดัดแปรทางกายภาพยังปราศจากการปนเปื้อนสารเคมี (Thomas and Atwell, 1999) ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคในปัจจุบันตระหนักและให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก

### 3.1 การดัดแปรด้วยวิธีความร้อนชื้น

การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเป็นการให้ความร้อนต่อสตาร์ชที่มีความชื้นต่ำ โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้องเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ glass transition temperature ( $T_g$ ) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) ของสตาร์ช สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (ตารางที่ 3) จะส่งผลให้สตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและปริมาณผลึก กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน ความสามารถในการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ได้ในสตาร์ชของธัญพืช พืชหัว และสตาร์ชถั่ว การดัดแปรสตาร์ชจากพืชหัวด้วยความร้อนชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพมากกว่าการดัดแปรสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่วและสตาร์ชจากธัญพืช (Hoover and Vasanthan, 1994) นอกจากนี้พบว่า การดัดแปรสตาร์ชจากพืชหัวและพืช รากด้วยความร้อนชื้นมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของโครงสร้างผลึก (A, B, A+B) (Hoover, 2001) เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลของสตาร์ช การเกิดอันตรกิริยากันระหว่างสายโมเลกุลระหว่างการได้รับความร้อนชื้นในบริเวณอสัณฐาน (amorphous) การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชพืชหัวให้ใกล้เคียงกับสตาร์ชจากธัญพืชได้แก่ ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน การพองตัว และการโปร่งแสงของแป้งเปียกของสตาร์ช และยัง

พบว่าโครงสร้างผลึกของสสารไขมันฝรั่งมีการเปลี่ยนแปลงจากชนิด B เป็นแบบ A+C ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างผลึกสสารข้าวโพดและธัญพืชอื่นๆ ระดับของการเปลี่ยนแปลงที่พบขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นระหว่างการทำให้ความร้อนขึ้น ชนิดของสสาร และปริมาณอะมิโลส (Hoover and Vassanthan, 1994)

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ในการคัดแปรสตาarch ด้วยความร้อนชื้น

Table 3. Heat-moisture treatment conditions for starches

Starch Source	Temp ( <sup>o</sup> C)	Time	Water content (%)	Reference
Potato	100	10 h	30	Gunaratne and Hoover (2002)
	120	1h	20-25	Lim et al. (2001)
	100	16 h	18-27	Kulp and Lorenz (1981)
	90-130	24 h	17-26	Vermeyley et al. (2006)
	84-105	16 h	20-36	Eerlingen et al. (1997)
Sweet potato	110	0-16 h	25	Lilai et al. (1999)
	110	3 h	25-28	Singh et al. (2005)
Bambara groundnut	100	16 h	18-27	Adebowale and lawal (2002)
Taro	100	10 h	30	Gunaratne and Hoover (2002)
Yam	100	10 h	30	Gunaratne and Hoover (2002)
	90	10 h	18-30	Naksriarporn et al. (2005)
Wheat	100	16 h	18-27	Kulp and Lorenz (1981)
Maize	100	16 h	30	Hoover and Manuel (1996b)
	120	1 h	25,30	Lim et al. (2001)
Legume	100	16 h	30	Hoover and Manuel (1996a)
Breadfruit	100	16 h	18	Adebowale et al. (2005a)
Finger millet	100	16 h	20-30	Adebowale et al. (2005b)
Red sorghum	100	16 h	18-27	Adebowale et al. (2005c)
New cocoyam	110	16 h	18-27	Lawal (2005)
	100	10 h	30	Gunaratne and Hoover (2002)
White sorghum	100	16 h	18-27	Olayinka et al. (2006)
Mucona bean	10	16 h	18-27	Adebowale and lawal (2002)

### 3.2 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ช

ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (SEM) พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชและที่ผิวของเม็ดสตาร์ชไม่มีการเสียหาย รอยแตก เนื่องมาจากการตัดแปรและยังคงมีความสมบูรณ์เหมือนกับสตาร์ชก่อนทำการตัดแปร เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการตัดแปรไม่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันได้ มีเพียงการเปลี่ยนแปลงภายในเท่านั้น ทั้งในการตัดแปรในสตาร์ชพีชหัวและพีชราก (Gunaratne and Hoover, 2002) สตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenz, 1981; Stute, 1992) สตาร์ชถั่ว (Hoover and Manuel, 1996a; Adebawale and Lawal, 2002; Adebawale and Lawal, 2003) สตาร์ชyam (Lawal, 2005) สตาร์ชข้าวฟ่าง (Adebawale *et al.*, 2005b)

เมื่อทำการศึกษารูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นด้วยเครื่อง XRD พบว่ารูปแบบผลึกของสตาร์ชบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือจากรูปแบบผลึกชนิด B เปลี่ยนเป็นรูปแบบผลึกชนิด A หรือ C สำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชyam (Stute, 1992; Kawabata *et al.*, 1994; Gunaratne and Hoover, 2002; Kulp and Lorenz, 1981; Vermeulen *et al.*, 2006) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ B เป็นแบบ A สามารถยืนยันได้โดยการตรวจสอบด้วยเครื่อง  $^{13}\text{C}$  CP/MAS (Gidley and Bociek, 1985) และพบว่าสตาร์ชท้าวายม่อม (Arrow root) และสตาร์ชมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากชนิด C เป็น A (Lorenz and Kulp, 1982) สำหรับสตาร์ชที่มีรูปแบบผลึกแบบ A พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996b; Adebawale *et al.*, 2005b; Kawabata *et al.*, 1994; Lawal, 2005) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าปริมาณผลึกของสตาร์ชบางชนิดได้แก่ สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ สตาร์ช triticle และสตาร์ชมันสำปะหลัง (Lorenz and Kulp, 1982; Abraham, 1993) มีค่าลดลงเมื่อผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น สำหรับสตาร์ชจากธัญพืชบางชนิดที่ทำการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเมื่อตรวจสอบรูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบพิกัดใหม่เพิ่มขึ้นมา 2 พิกัด ซึ่งเป็นพิกัดของลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งอธิบายได้ว่าการจัดเรียงตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (Kawabata *et al.*, 1994; Lim *et al.*, 2001) Lim และคณะ (2001) ได้ทำการตรวจสอบพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลสกับไขมันด้วยเครื่อง DSC ในสตาร์ชข้าวโพดพบว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลสกับไขมันมีค่าเพิ่มขึ้น Hoover และ Vasanthan (1994) และ Hoover และ Manuel (1996b) ก็พบว่าปริมาณอะมิโลสปรากฏในสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพดที่ทำการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมี

ค่าลดลงเนื่องมาจากมีการจัดเรียงตัวใหม่ของสายอะมิโลสกับปริมาณไขมันที่หลงเหลืออยู่ใน  
สตาร์ชระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

### 3.3 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช

#### 3.3.1 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางความร้อนด้วย  
เครื่อง DSC โดยทั่วไปสตาร์ชที่ทำการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน  
( $T_0$ ) สูงขึ้น ทั้งในสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชถั่ว สตาร์ชพีชหัวและพีชราก สตาร์ช  
มันเทศ สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวฟ่าง (Kulp and Lorenz, 1981; Hoover and Manuel, 1996a;  
Hoover and Manuel, 1996b; Collado and Corke, 1999; Takaya *et al.*, 2000; Lim *et al.*, 2001;  
Gunaratne and Hoover, 2002; Adebowal and Lawal, 2003; Adebowale *et al.*, 2005b) ทั้งนี้  
เนื่องมาจากสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของเม็ด  
สตาร์ช ซึ่งการเปลี่ยนแปลงหลักๆ ได้แก่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายของอะมิโลส (AM-AM)  
และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายอะมิโลสและไขมัน (AM-lipid complex) นอกจากนี้การตัดแปร  
ด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้โมเลกุลภายในสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบทำให้พันธะ  
ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงขึ้นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดเจลลิตีในเซชัน  
(Hoover and Manuel, 1996b) ส่วนพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ( $\Delta H$ ) ของสตาร์ชมีแนวโน้ม  
ลดลงเนื่องมาจากการที่สายเกลียวคู่ (double helix) บางส่วนที่อยู่ในบริเวณผลึกของสตาร์ชอาจเกิด  
การคลายเกลียวมากขึ้น (Hoover and Manuel, 1996b; Gunaratne and Hoover, 2002; Lim *et al.*,  
2001) สำหรับช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตี-ในเซชัน ( $T_c$ - $T_0$ ) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่าน  
การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายอะมิโลสกับอะมิโลส  
(AM-AM) อะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (AM-AMP) หรือสายอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid)  
ระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (Hoover and Manuel, 1996b) Lim และคณะ (2001) พบว่า  
การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นในบางกรณีทำให้ลักษณะของกราฟการดูดความร้อนเป็นแบบ  
ไบฟาสิค (biphasic endotherm) ในสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพด (Donovan *et al.*, 1983;  
Lim *et al.*, 2001)

#### 3.3.2 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อความสามารถในการพองตัวและการละลาย

การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการ  
การละลายลดลงสามารถอธิบายได้ว่าระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นอาจเกิดอันตรกิริยา  
ระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลส (AM-AM) สายโมเลกุลของอะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (AM-  
AMP) (Hoover and Manuel, 1996a; Gunaratne and Hoover, 2002) Cooked และ Gidley (1992)

อธิบายว่าอันตรกิริยาภายในเมล็ดสตาร์ชแข็งแรงมากขึ้น อาจเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโลสและไขมันระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังการพองตัวลดลง โดยพบในสตาร์ชธัญพืช สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชพืชหัวและพืชราก (Hoover and Manuel, 1996a; Hoover and Manuel, 1996b; Gunaratne and Hoover, 2002) Tester และ Morrison (1990) รายงานว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันภายในเมล็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดเหนียวจะยับยั้งกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของเมล็ดสตาร์ชได้

### 3.3.3 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อความหนืดของสตาร์ช

การตัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้สมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชที่ทำการวัดด้วยเครื่อง Brabender viscosograph หรือ RVA มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Tp) ของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวโอ๊ต สตาร์ช lentil และสตาร์ชจากกลอย (Kulp and Lorenze, 1981; Hoover and Vasanthan, 1994) มีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น เนื่องจากเมล็ดสตาร์ชสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะภายในเมล็ดสตาร์ชที่เพิ่มมากขึ้น (Stute, 1992) สำหรับค่าความหนืดสูงสุด (Pv) มีค่าลดลง อันตรกิริยาระหว่างสายและภายในสายของโมเลกุลสตาร์ชเพิ่มขึ้น ได้แก่ การเกิดอันตรกิริยากันของสายอะมิโลสและอะมิโลเพคติน (AM-AMP) และสายอะมิโลสกับลิพิด (AM-lipid) ระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (Hoover and Manuel, 1996 a,b) นอกจากนี้พบว่าค่า breakdown (BD) ของสตาร์ชถั่วมีค่าลดลงเมื่อผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ภายในเมล็ดสตาร์ชส่งผลให้เมล็ดสตาร์ชทนต่อความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้นจึงแตกตัวได้น้อยลง (Adebowale and Lawal, 2002; Adebowale and Lawal, 2003)

### 3.3.4 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

Eerlingen และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น โดยศึกษาค่า storage modulus ( $G'$ ) ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ (3, 6 และ 20%w/w) พบว่าค่า  $G'$  ของสตาร์ชที่ความเข้มข้นสูงขึ้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการพองตัวและมีการเกิดอันตรกิริยากันของสายโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันมากขึ้น และพบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นทำให้ค่า  $G'$  ของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างเมล็ดสตาร์ชส่งผลให้เมล็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นและกำลังการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชมีค่าลดลง



### 3.3.5 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดด้วยเครื่อง DSC ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรเร็วกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร (Takaya *et al.*, 2000) แต่จากการศึกษาค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการเกาะติด (Adhesiveness) ของเจลสตาร์ชมันเทศมีค่าลดลงเมื่อสตาร์ชผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (Collado and Corke, 1999; Singh *et al.*, 2005) เมื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการวัดปริมาณน้ำที่ถูกบีบออกจาก (syneresis) จากเจลสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลางและสูงพบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลเอ่อออกมาจึงน้อยกว่า (Hoover and Manuel, 1996b)

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้ความร้อนขึ้น
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้น
3. ศึกษาผลของปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชข้าวโพดและระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรต่อสมบัติรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด

## บทที่ 2

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

#### วัสดุ

##### 1. วัตถุดิบ

- สตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากบริษัทกรุงเทพสตาร์ชอินดัสเตรียล จำกัด
- ข้าวเหนียวจากศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง จ.พัทลุง

##### 2. สารเคมี

- สารเคมีที่ใช้ในการสกัดสตาร์ช คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคลอไรด์ และเอทานอล 95% (commercial grade)
- สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ กรดซัลฟูริก คอปเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดบอริก โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต เมทิลีนบลู เมทิลเรด แอลกอฮอล์ สารละลายไอโอดีน (analytical grade)

#### อุปกรณ์

##### 1. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับผลิตสตาร์ช

- เครื่องโม่แป้ง ยี่ห้อ central ประเทศไทย
- เครื่องบดผสม ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-11 ประเทศญี่ปุ่น
- ตู้อบลมร้อนแบบถาด ประเทศไทย
- เครื่องโฮโมจิไนส์เซอร์ ยี่ห้อ IKA รุ่น RW20.n ประเทศเยอรมัน
- เครื่องเหวี่ยงแยก ยี่ห้อ Hittich รุ่น Universal 16 ประเทศเยอรมัน
- ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมครอน ยี่ห้อ Fritsch ประเทศเยอรมัน

##### 2. อุปกรณ์สำหรับการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

- เครื่องนวดผสมแป้ง ยี่ห้อ Thai mixer รุ่น KV-05 ประเทศไทย
- กระป๋องขนาด 307 x 108
- ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมัน
- เครื่องบดผสม ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-11 ประเทศญี่ปุ่น

### 3. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเคมีและกายภาพ

- เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ Sartorius ประเทศเยอรมัน
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น 1000C ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AL204 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องกวน (magnetic Stirrer) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น LR 49683C ประเทศอังกฤษ
- เครื่อง vortex mixer ยี่ห้อ IKA รุ่น MS1 ประเทศเยอรมัน
- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ ThermoSpectronic รุ่น G-20 ประเทศอังกฤษ
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น W350 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมัน
- นาฬิกาจับเวลา
- กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ SEM รุ่น JSM-5800LV ประเทศญี่ปุ่น
- เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyser) ยี่ห้อ COULTER รุ่น LS230 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องวัดปริมาณผลึก (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Phillips รุ่น X'Pert MPD ประเทศเนเธอร์แลนด์
- เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transfer Infrared Spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น IFS-48 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ Brabender รุ่น Viscograph ประเทศเยอรมัน
- เครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ Haake รุ่น RheoStressRS75 ประเทศเยอรมัน
- เครื่อง Differential Scanning Calorimeter ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น DSC7 ประเทศสหรัฐอเมริกา

### วิธีการ

#### 1. การผลิตสตาร์ชจากข้าวเหนียว

นำแป้งข้าวที่ได้จากการโม่เปียกแช่ในสารละลาย 5% NaCl ปริมาตร 4 เท่าของแป้ง แล้วทำการกวน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที นำตะกอนแป้งที่ได้แช่ใน 70% ethanol ปริมาตร 4 เท่าของแป้งแล้วทำการกวน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที แล้วนำตะกอนแป้งแช่ในสารละลาย 0.35% NaOH ทำการกวน 12 ชั่วโมง จากนั้นวางทิ้งไว้ข้ามคืนให้แป้งตกตะกอน เติสารละลายส่วนใสออกแล้วล้างตะกอนแป้งด้วยน้ำกลั่น (2 ครั้ง) โดยเติมน้ำกลั่นปริมาตร 1 เท่าของตะกอนแป้ง แล้วนำไปหมุน

เหวี่ยงด้วยความเร็ว 2500 รอบต่อนาที แล้วปรับพีเอชเป็น 7 ด้วย 1 M HCl แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง จากนั้นนำสตาร์ชไปอบที่อุณหภูมิ 45<sup>o</sup>C จนความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เปียก (คัดแปลงจากวิธีของรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ, 2546)

## 2. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว

นำสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผลิตได้จากข้อ (1) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ สตาร์ชข้าวเหนียวมาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า (AOAC., 2000) และ ปริมาณอะมิโลส (Sowbhagya และ Bhattacharya, 1979 และ Shanthly *et al.*, 1980)

## 3. การดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีความร้อนขึ้น

นำสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว ซึ่งเป็น สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ มาปรับความชื้นเป็น 4 ระดับ (18%, 21%, 24% และ 27% โดยน้ำหนัก) จากนั้นวางทิ้งไว้ให้เกิดสมดุลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปบรรจุในกระป๋องแล้วปิดฝาให้สนิท นำไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100<sup>o</sup>C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (Hoover และ Manuel, 1996a) จากนั้นนำสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45<sup>o</sup>C จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 12 โดยน้ำหนักเปียก นำสตาร์ชแห้ง ไปบรรจุในภาชนะป้องกันอากาศและความชื้น และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4<sup>o</sup>C ตลอดการวิจัย นำ สตาร์ชดัดแปรที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง (ข้อ 4) และสมบัติเชิงหน้าที่ (ข้อ 5) ศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงหน้าที่กับปริมาณอะมิโลส และระดับความชื้นของสตาร์ชข้าวที่ ทำการดัดแปร

## 4. การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

### 4.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอก มะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (ข้อ 3) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยนำตัวอย่างสตาร์ชมากระจายลงบนแท่นตัวอย่าง ทำ การเคลือบผิวหน้าของตัวอย่างด้วยทอง นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาส่องด้วยกล้อง SEM ที่ กำลังขยาย 1000 2500 และ 5000 เท่า โดยกำหนดค่า kV เท่ากับ 10

#### 4.2 ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ช

ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ใช้ He-Ne เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 630 nm การวัดค่าครอบคลุมขนาดอนุภาค 0.05 ถึง 880 ไมโครเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นดิสเฟสเฟส (disperse phases) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำสตาร์ชข้าวประมาณ 0.5 กรัมเติมลงในน้ำกลั่นแล้วทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonic ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดขนาดและการกระจายตัวของขนาดด้วยเครื่อง PSA

#### 4.3 ศึกษาชนิดและปริมาณผลึก

ศึกษาชนิดและปริมาณผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) โดยบรรจุตัวอย่างสตาร์ชลงในช่องใส่ตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจสอบการแทรกสอดของรังสี X-ray ที่มุม  $2\theta$  ในช่วง 4-34 (40 kv, 30 mA,  $\lambda_{\alpha} = 0.154$  nm) ทำการคำนวณค่าร้อยละปริมาณผลึกโดยคำนวณอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคที่ปรากฏต่อพื้นที่ทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการเปรียบเทียบพีคที่ได้จากการตรวจวัดกับทฤษฎีของ Zobel (1964) เพื่อวิเคราะห์ชนิดของผลึก

4.4 ศึกษาสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (double helices) ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก (Ratio of short-rang molecular order to amorphous: RSA)

ศึกษาอัตราส่วน โมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อออสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยใช้เซลล์วัดตัวอย่างชนิด attenuated total reflectance (ATR) แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 25°C ที่มุมของแสงตกกระทบตัวอย่างที่ 45° นำสตาร์ชข้าวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความถี่ในช่วง 1200-800  $\text{cm}^{-1}$  คำนวณอัตราส่วนของการดูดกลืนแสงที่ความถี่ (wave number) 1047  $\text{cm}^{-1}$  ต่อ 1022  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อออสัณฐาน (van Soet *et al.*, 1995)

## 5. การศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

### 5.1 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and water solubility)

ศึกษากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปร (ข้อ 3) โดยเตรียมสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทำการดูดส่วนละลายส่วนใส แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นชั่งน้ำหนักสตาร์ชแห้งที่เหลือค้างอยู่เพื่อนำมาคำนวณค่าร้อยละการละลาย (สมการที่ 1) สำหรับตะกอนเปียกสตาร์ชเปียกในหลอดนำมาชั่งน้ำหนักสตาร์ชที่พองตัวเพื่อคำนวณค่ากำลังการพองตัว (สมการที่ 2) (ดัดแปลงจาก Schoch, 1964 และ Eliasson, 1985)

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชส่วนที่ละลายได้ในน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของสตาร์ช (กรัม)}} \quad (1)$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่พองตัว (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแห้งของสตาร์ช (กรัม)}} \quad (2)$$

### 5.2 สมบัติการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization properties)

ศึกษาสมบัติการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปร (ข้อ 3) โดยการเตรียมตัวอย่างสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวในน้ำด้วยอัตราส่วน 1 : 4 โดยน้ำหนัก จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดสมดุลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) อัตรา 10°C/นาที ช่วงอุณหภูมิ 10-95°C ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature) และอุณหภูมิตสุดท้าย (conclusion temperature) ของการเกิดเจลาตินในเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน (enthalpy of gelatinization) (Lii *et al.*, 1995)

### 5.3 สมบัติทางรีโอโลยี

#### 5.3.1 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสต์ (Pasting properties)

ศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) โดยเตรียมสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 6 กวนผสมให้เข้ากัน ใส่ลงในเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคกราฟ (brabender viscograph) ซึ่งตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนดังนี้ ช่วงแรกเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 50°C ในอัตรา 1.5 °C/นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 15 นาที แล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 50 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 30 นาที บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า breakdown และค่าการคืนตัว (setback) (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

#### 5.3.2 พฤติกรรมการไหล (Flow behavior)

ศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) โดยเตรียมสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าความหนืดและความเค้นเฉือนที่อัตราการเฉือนในช่วง 0-300 s<sup>-1</sup> ที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ซึ่งต่อกับหัววัดชนิด coaxial cylinder (Z41) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) และค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index) (Noosuk *et al.*, 2005)

#### 5.3.3 สมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic properties)

ศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปร (ข้อ 3) โดยเตรียมสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่า Storage modulus ( $G'$ ) Loss modulus ( $G''$ ) และค่า Loss tangent ( $\tan \delta$ ) ที่ช่วงความถี่ 0.1-10 Hz ที่อุณหภูมิ 60°C โดยควบคุมความเครียดที่ 2% (ซึ่งได้จากการวัด linear viscoelastic range) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ซึ่งต่อกับหัววัดชนิด cone and plate พิจารณาเปรียบเทียบกับลักษณะของเจลของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปร (Noosuk *et al.*, 2005)

## 5.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

### 5.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรรูป (ข้อ 3) โดยการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง FTIR ทำการเตรียมสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C จากนั้นถูกทำให้เย็นลงจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเป็น 30°C แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นำตัวอย่างที่เก็บรักษาไว้วันที่ 0, 2, 5, 8, 26, 50, 74 และ 98 ชั่วโมง ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่ในช่วง 1200 – 800  $\text{cm}^{-1}$  จำนวนอัตราส่วนค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  ต่อ 1022  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก (van Soet *et. al.*, 1995) ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึกกับเวลา ทำการคำนวณค่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้สมการ Avrami ดังภาคผนวกที่ 1 (Avrami, 1941)

### 5.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอีลาสติก

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอีลาสติกระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรรูป (ข้อ 3) โดยศึกษาการคืบ (creep study) ทำการเตรียมสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C จากนั้นทำให้เย็นลงเป็น 30°C แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C นำตัวอย่างที่เก็บรักษาไว้วันที่ 0, 2, 5, 8, 26, 50, 74 และ 98 ชั่วโมง ไปศึกษาการคืบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ซึ่งต่อกับหัววัดชนิด parallel plate โดยบันทึกค่า compliance ของการคืบของตัวอย่างภายใต้ความเค้นเฉือน 10 Pa ในช่วงเวลา 400 วินาที หลังจากนั้นปล่อยแรงออกแล้วบันทึกค่า compliance ของการคืนตัวของตัวอย่างในช่วงเวลา 400 วินาที (Noosuk *et al.*, 2005) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่า compliance กับเวลาในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวนค่า instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ), retard elastic modulus ( $G_1$ ), retard viscoelastic ( $\eta_1$ ) และ final viscoelastic ( $\eta_N$ ) โดยใช้วิธีการของ Inokuchi ดังภาคผนวกที่ 2 (Sharma and Sherman, 1966 และ Sherman, 1966)



### 5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้อ 5.1 ถึง 5.4 โดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงหน้าที่กับปริมาณอะมิโนสและระดับความชื้นของสตาร์ชข้าวที่ทำการตัดแปร โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination,  $r^2$ )

### บทที่ 3

#### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### 1. องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ สตาร์ชข้าวเหนียงแสดงดังตารางที่ 4 โดยสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.24 ถึง 0.56 (โดยน้ำหนักแห้ง) ไขมันร้อยละ 0.46 ถึง 0.51 (โดยน้ำหนักแห้ง) และเถ้าร้อยละ 0.17 ถึง 0.21 (โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งแสดงว่าสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดมีความบริสุทธิ์สูง สำหรับ ปริมาณอะมิโลสของสตาร์ชข้าวซึ่งวิเคราะห์จากค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างอะมิโลสกับไอโอดีน 2 แบบ คือการวิเคราะห์ปริมาณเทียบเท่าอะมิโลส (amylose equivalent) หรือปริมาณอะมิโลสปรากฏ และการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้ (soluble amylose) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าปริมาณเทียบเท่าอะมิโลสมีค่าสูงกว่าปริมาณอะมิโลสที่ละลาย ได้มาก เนื่องจากปริมาณเทียบเท่าอะมิโลสมีอิทธิพลของอะมิโลเพคตินสายยาว (long B-chain) ซึ่งสามารถจับกับไอโอดีนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนทำให้ปริมาณอะมิโลสที่วัดได้มีค่าสูงเกิน จริง (Reddy *et al.*, 1993; Ramesh *et al.*, 1999) ส่วนปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้ของสตาร์ชข้าว พบว่าไม่มีผลรบกวนจากอะมิโลเพคตินสายยาว โดยมีค่าสอดคล้องกับปริมาณอะมิโลสที่แท้จริง (true amylose) ของสตาร์ชซึ่งวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสหลังจากทำการตกตะกอนอะมิโลเพคติน ด้วย Concanavalin-A (Con A) (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ, 2546; Noosuk *et al.*, 2003) เมื่อจำแนกกลุ่มของสตาร์ชข้าวตามปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ สตาร์ชข้าวเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสดำ (อะมิโลสร้อยละ 1.41) สตาร์ช ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง (อะมิโลสร้อยละ 14.96) และสตาร์ชข้าวเหนียงจัดอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (อะมิโลสร้อยละ 20.16) สอดคล้องกับการจำแนกกลุ่มของสตาร์ชข้าวไทย (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ, 2546) ซึ่ง ปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันนี้จะมีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ ของสตาร์ชข้าว ได้แก่ กำลังการพอง ตัวและการละลาย สมบัติทางความร้อน สมบัติทางรีโอโลยีและสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Noosuk *et al.*, 2003; Noosuk *et al.*, 2005)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ สตาร์ชข้าวเจียง

Table 4. Chemical compositions of starches obtained from Glutinous, Jasmine and Chiang rice

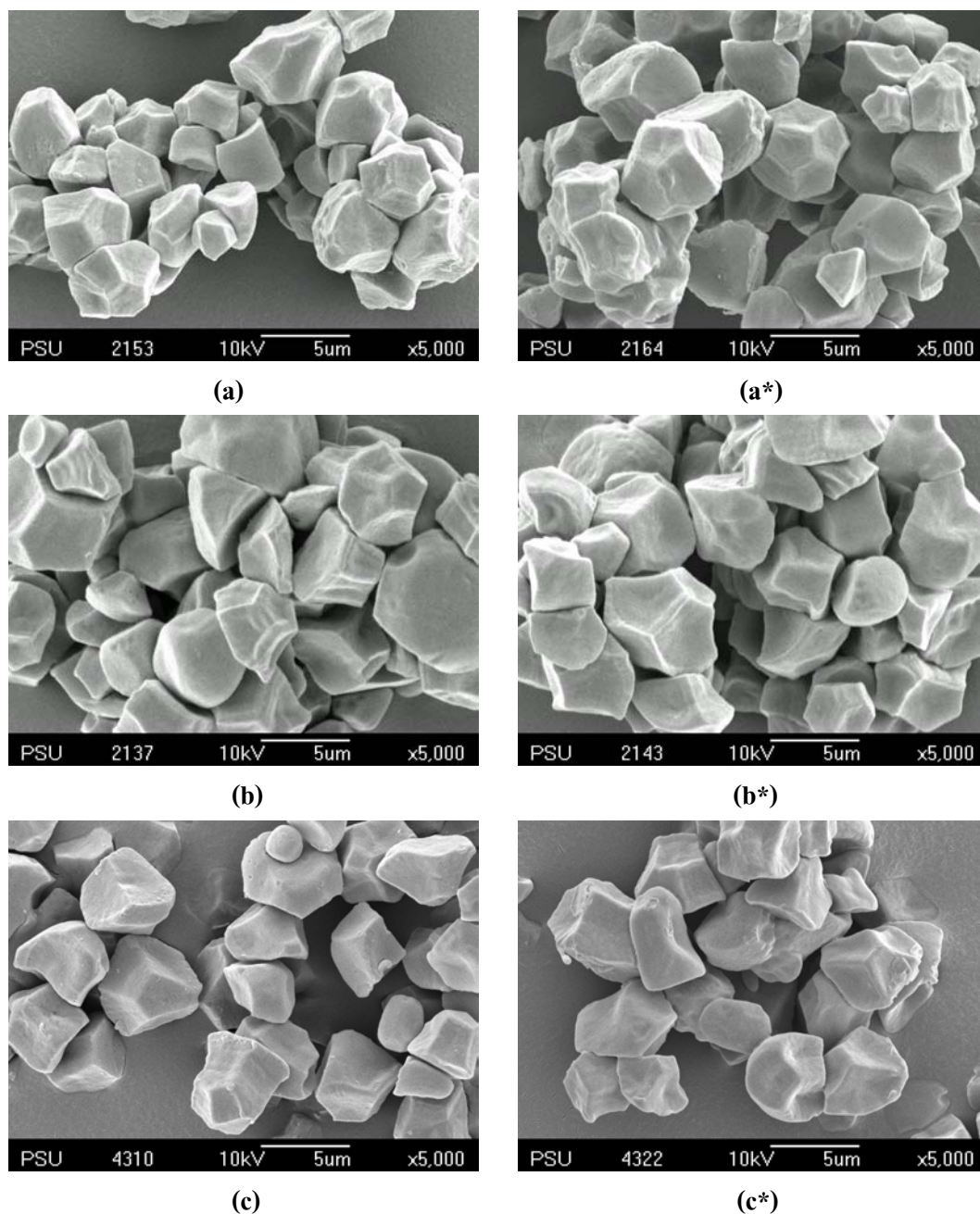
Chemical composition	Starch		
	Glutinous	Jasmine	Chiang
Protein (%wb)	0.24±0.00	0.34±0.00	0.56±0.01
Fat (%wb)	0.46±0.02	0.47±0.02	0.51±0.01
Ash (%wb)	0.17±0.00	0.18±0.02	0.21±0.04
Moisture (%wb)	10.21±0.05	7.67±0.53	12.19±0.04
Amylose equivalent (%db)	6.09±0.46	18.87±0.15	30.40±0.46
Soluble amylose (%db)	1.41±0.24	14.96±0.70	20.16±0.07

Note: Each value is mean of triplicate ± SD.

## 2. ลักษณะทางโครงสร้างของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

### 2.1 ลักษณะรูปร่างและขนาด (granule shape and size) ของเม็ดสตาร์ชข้าว

จากการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าเม็ดสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีขนาดเล็ก รูปร่างหลายเหลี่ยม ผิวของเม็ดสตาร์ชเรียบไม่มีการป่นเปื้อนจากองค์ประกอบอื่น (ภาพที่ 12a, 12b และ 12c) และจากการตรวจสอบขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียงมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ยเท่ากับ 5.21, 4.68 และ 5.65 ไมโครเมตรตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเม็ดสตาร์ชข้าวทั่วไป (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิตและคณะ, 2546 และ Noosuk *et al.*, 2003) จากการตัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากสตาร์ชดิบ โดยเม็ดสตาร์ชข้าวยังคงมีความสมบูรณ์ไม่เกิดการเสียหายจากผลของความร้อนขึ้น (ภาพที่ 12a\*, 12b\*, 12c\*) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp and Lorenz, 1981) สตาร์ชมันสำปะหลัง (Abraham, 1993) สตาร์ชถั่ว (Hoover and Manuel, 1996a) สตาร์ชถั่วหรั่ง (Adebowale and Lawal, 2002) สตาร์ชถั่ว (Adebowale and Lawal, 2003) และสตาร์ชข้าวฟ่าง (Adebowal *et al.*, 2005b)



ภาพที่ 12 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวก่อนการตัดแปร : สตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเจ้า (c) และสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 : สตาร์ชข้าวเหนียว (a\*) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b\*) และสตาร์ชข้าวเจ้า (c\*)

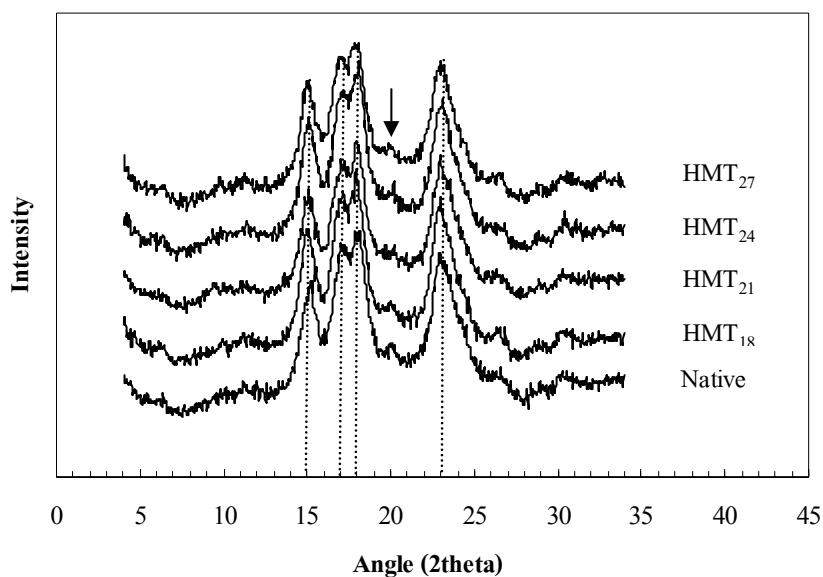
Figure 12. SEM micrographs (x5000) of native rice starches : Glutinous (a), Jasmine (b) and Chiang (c) and heat-moisture treated rice starches at 27% moisture content : Glutinous (a\*), Jasmine (b\*) and Chiang (c\*)

## 2.2 โครงสร้างผลึก (Crystallinity) และสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก (Ratio of short-rang molecular order to amorphous: RSA)

จากการตรวจสอบรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาว ดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) พบว่าสตาร์ชข้าวทุกชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่มีพีคเด่นชัดที่มุม ( $2\theta$ ) เท่ากับ 15.2, 17.0, 17.9 และ 21.2  $^{\circ}(2\theta)$  (ดังภาพที่ 13 – ภาพที่ 15) ซึ่งเป็นรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ A (Zobel, 1988) โดยการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ (double helices) ในบริเวณผลึกจะมีความแน่นอน และจัดเรียงตัวแบบ monoclinic (Imberty *et al.*, 1988) นอกจากนี้พบว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดพบพีคขนาดเล็กที่มุม 20  $^{\circ}(2\theta)$  ซึ่งเป็นพีคของโครงสร้างผลึกแบบ V (V-type crystallinity) โดยเป็นโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) เนื่องจากสตาร์ชจากธัญพืชมีปริมาณไขมันอยู่ค่อนข้างสูงจึงทำให้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมันได้มากกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ (Zobel, 1988) เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (Relative Crystallinity: RC) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่า RC ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าสูงสุด (33.53%) (ตารางที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอะมิโลเพคตินที่มีอยู่มากที่สุดในสตาร์ชข้าวเหนียว โดยอะมิโลเพคตินซึ่งเป็นสายโมเลกุลหลักที่จัดเรียงตัวเป็นเกลียวคู่ในบริเวณผลึกของเม็ดสตาร์ช (French, 1984) นอกจากนี้ Gunaratne และ Hoover (2002) ยังได้อธิบายว่าค่า RC ในสตาร์ชแต่ละชนิดยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ (1) ขนาดของผลึก (2) การจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในบริเวณผลึก (3) ค่าเฉลี่ยของความยาวสายของอะมิโลเพคติน (4) สัดส่วนของอะมิโลเพคตินสายสั้น ( $\overline{DP}$  10-13) สำหรับการศึกษาสัดส่วนของโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐาน (RSA) ซึ่งคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของสตาร์ชที่ความถี่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  ต่อ 1022  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าค่า RSA ของสตาร์ชข้าวเหนียว (0.74) มีค่าสูงกว่าของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (0.70) และสตาร์ชข้าวเหนียว (0.69) ตามลำดับ (ตารางที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอะมิโลเพคตินของสตาร์ชข้าวแต่ละชนิด

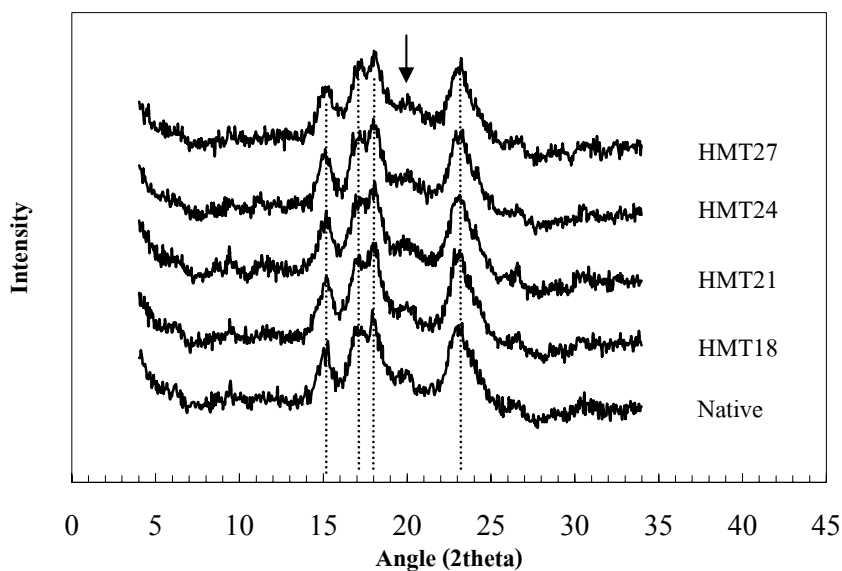
หลังจากทำการตัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่ารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบ A (ภาพที่ 13 - ภาพที่ 15) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นสำหรับสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ชนิดอื่นๆ ได้แก่ สตาร์ชข้าวโพด (Kawabata *et al.*, 1994; Hoover and Manuel, 1996b) สตาร์ชเผือก, สตาร์ชมันสำปะหลัง (Gunaratne and Hoover, 2002) และสตาร์ชข้าวฟ่าง (Adebowale *et al.*, 2005b) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบ A มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกอย่างหนาแน่นทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่ของสาย

โมเลกุลของสตาโรลขณะตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจึงไม่ส่งผลให้รูปแบบของโครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง (Gunaratne and Hoover, 2002) เมื่อพิจารณาค่า RC ของสตาโรลข้าวเหนียวและสตาโรลข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่ามีค่า RC ลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการสูญเสียความเป็นผลึกระหว่างการให้ความร้อนขึ้น (Hoover and Vassanthan, 1994) การสูญเสียความเป็นผลึกของสตาโรลเหล่านี้ อาจเนื่องมาจากการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้กิ่งก้านของสายโมเลกุลอะมิโลเพคตินที่อยู่ในบริเวณก้ำกึ่งระหว่างบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐาน (intercrystalline amorphous regions) สามารถเกิดอันตรกิริยากับสายโมเลกุลอะมิโลส (AM-AMP) (Hoover *et al.*, 1993; Kawabata *et al.*, 1994; Hoover and Manuel, 1996a,b; Lim *et al.*, 2001) ส่วนสตาโรลข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบว่ามีค่า RC ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 5) เนื่องจากสตาโรลข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูงสามารถเกิดโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมันและเกิดโครงสร้างผลึกใหม่ของสายอะมิโลส (AM-AM) ในบริเวณอสัณฐาน (Hoover and Manuel, 1996a,b; Gunaratne and Hoover, 2002) ซึ่งการเกิดโครงสร้างผลึกนี้มีค่าเทียบเท่ากับการสูญเสียโครงสร้างผลึกอันเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (AM-AMP) นอกจากนี้พบว่าการเกิดโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมันของสตาโรลข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 15) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระดับความร้อนขึ้นของการตัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นสายอะมิโลสซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณอสัณฐานสามารถเคลื่อนที่ภายในเม็ดสตาโรลได้ง่ายขึ้นและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมันได้มากขึ้น (Kawabata *et al.*, 1994; Hoover and Vassanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996a,b) เมื่อพิจารณาค่า RSA ของสตาโรลข้าวทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่ามีค่าลดลง และเมื่อระดับน้ำที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น ค่า RSA ของสตาโรลข้าวเหนียวและสตาโรลข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่สำหรับสตาโรลข้าวเหนียวพบว่ามีค่า RSA มีค่าลดลงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า RC



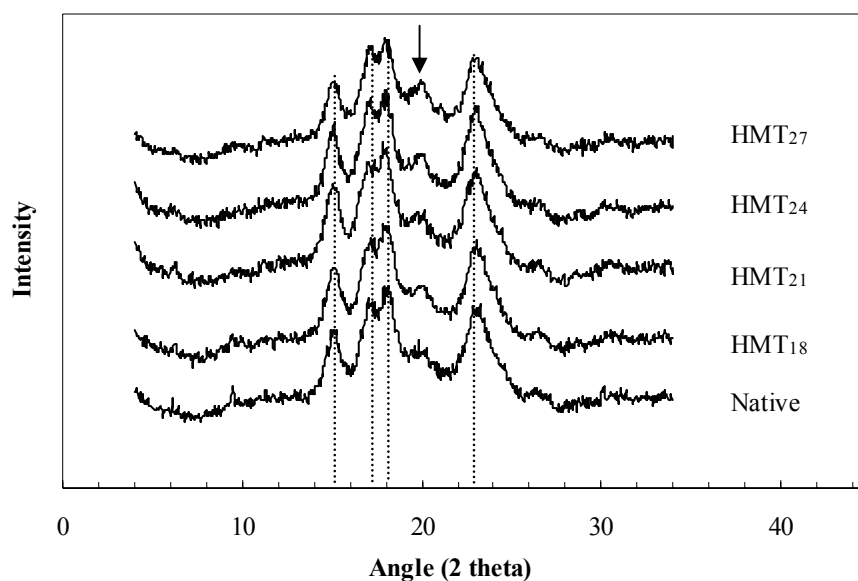
ภาพที่ 13 รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 13. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated Glutinous rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



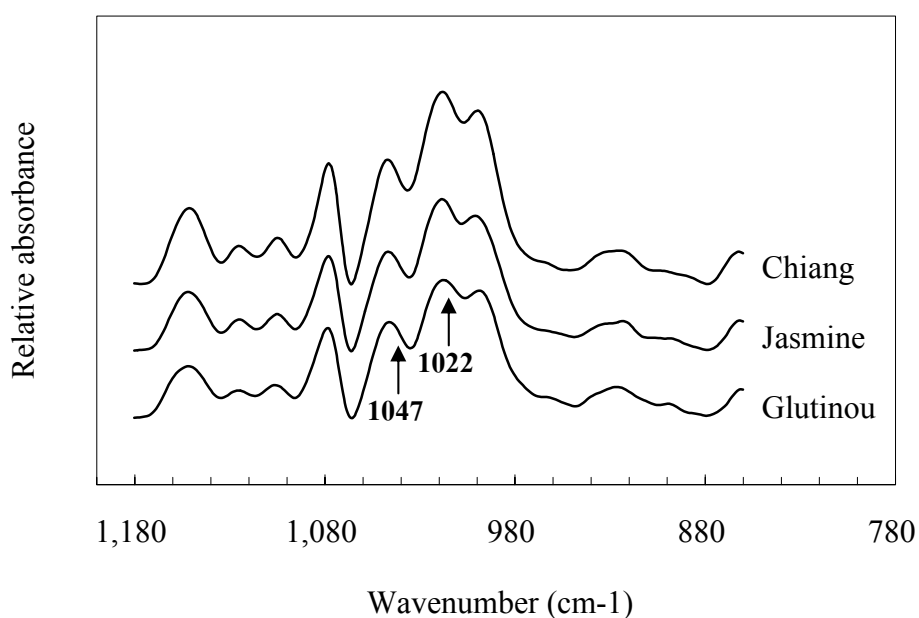
ภาพที่ 14 รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 14. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated Jasmine rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 15 รูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 15. Crystallinity pattern of native and heat-moisture treated Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 16 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรความร้อน

Figure 16. FTIR spectra of native starches obtained from Glutinous, Jasmine and Chiang rice



ตารางที่ 5 ปริมาณผลึกและสัดส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอสัณฐานในโครงสร้างผลึก (RSA) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Table 5. Relative crystallinity and ratio of short-range molecular order to amorphous (RSA) of native and heat-moisture treated rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content

Starch	Treatment	Relative crystallinity (%)	ratio of short-rang molecular order to amorphous
Glutinous	native	33.53 <sup>ab</sup> ±0.39	0.74 <sup>a</sup> ±0.01
	HMT <sub>18</sub>	35.14 <sup>a</sup> ±1.22	0.73 <sup>a</sup> ±0.01
	HMT <sub>21</sub>	33.89 <sup>ab</sup> ±0.54	0.72 <sup>ab</sup> ±0.01
	HMT <sub>24</sub>	32.56 <sup>c</sup> ±0.23	0.70 <sup>b</sup> ±0.01
	HMT <sub>27</sub>	31.23 <sup>c</sup> ±1.10	0.70 <sup>b</sup> ±0.02
Jasmine	native	28.45 <sup>a</sup> ±1.15	0.7 <sup>a</sup> ±0.01
	HMT <sub>18</sub>	27.71 <sup>ab</sup> ±2.56	0.69 <sup>a</sup> ±0.02
	HMT <sub>21</sub>	27.62 <sup>ab</sup> ±1.56	0.68 <sup>a</sup> ±0.02
	HMT <sub>24</sub>	26.03 <sup>bc</sup> ±0.76	0.67 <sup>b</sup> ±0.01
	HMT <sub>27</sub>	24.73 <sup>c</sup> ±0.76	0.67 <sup>b</sup> ±0.01
Chiang	native	29.92 <sup>ns</sup> ±1.05	0.69 <sup>a</sup> ±0.00
	HMT <sub>18</sub>	28.58 <sup>ns</sup> ±0.00	0.68 <sup>a</sup> ±0.00
	HMT <sub>21</sub>	30.77 <sup>ns</sup> ±0.04	0.67 <sup>b</sup> ±0.00
	HMT <sub>24</sub>	30.46 <sup>ns</sup> ±1.06	0.67 <sup>b</sup> ±0.01
	HMT <sub>27</sub>	30.31 <sup>ns</sup> ±0.00	0.67 <sup>b</sup> ±0.01

Note : Each value is mean of duplicate ± SD. Different superscripts in the column for each rice starch denote significant differences ( $p < 0.05$ ).

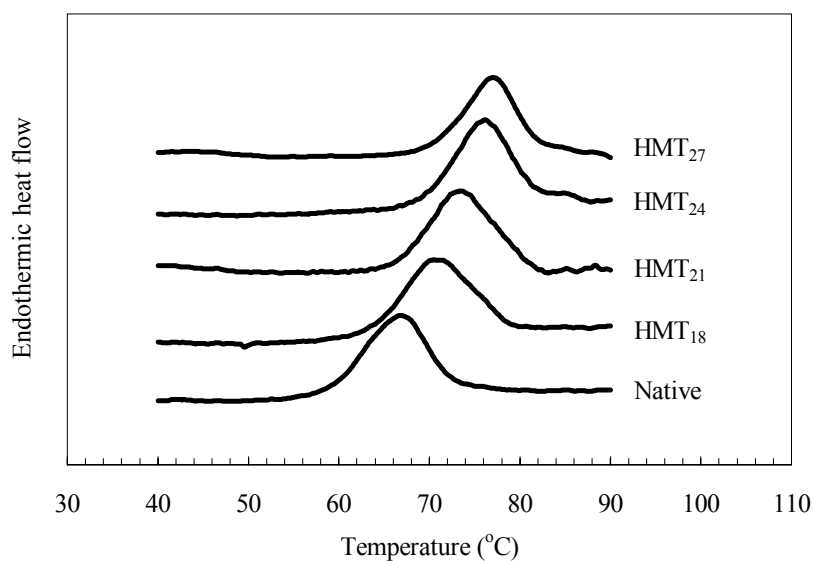
### 3. สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชข้าว

#### 3.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวสามารถตรวจวัดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดแสดงพีคที่มีลักษณะดูดความร้อน (endotherm) ซึ่งแสดงถึงการใช้พลังงานในการหลอมละลายผลึกของสตาร์ช (ภาพที่ 17 – ภาพที่ 19) และสามารถวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_o$ ) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c$ ) ช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c-T_o$ ) และพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $\Delta H$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าค่า  $T_o$  ของสตาร์ชข้าวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีค่าเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สตาร์ชข้าวเหนียว ( $69.81^{\circ}\text{C}$ ), สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ( $60.75^{\circ}\text{C}$ ) และสตาร์ชข้าวเหนียว ( $59.44^{\circ}\text{C}$ ) เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างภายในโมเลกุลของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมละลายเม็ดสตาร์ช (Vanderputte *et al.*, 2003) นอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิ  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ของสตาร์ชอาจส่งผลมาจาก (1) โครงสร้างโมเลกุลของสายอะมิโลเพคติน (ความยาวสายและปริมาณของกิ่งก้านของอะมิโลเพคติน) (2) โครงสร้างเม็ดสตาร์ช (อัตราส่วนของผลึกและออสติฐาน) (Cooke and Gidley, 1992) เมื่อเปรียบเทียบค่า  $\Delta H$  ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่า  $\Delta H$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าสูงที่สุดทั้งนี้เนื่องมาจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลเพคตินสูงส่งผลให้ปริมาณเกลือวุ้นในบริเวณผลึกของเม็ดสตาร์ชมีค่ามากขึ้นดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานปริมาณมากในการหลอมละลายผลึก (Gunaratne and Hoover, 2002) นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c-T_o$ ) ของสตาร์ชข้าวเหนียว ( $13.52^{\circ}\text{C}$ ) สูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ( $10.52^{\circ}\text{C}$ ) และสตาร์ชข้าวเหนียว ( $7.94^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ อาจเนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีการกระจายตัวของความยาวสายโมเลกุลของอะมิโลเพคตินที่จัดเรียงตัวเป็นผลึก (crystalline heterogeneity) มากกว่าสตาร์ชข้าวชนิดอื่น (Cooke and Gidley, 1992)

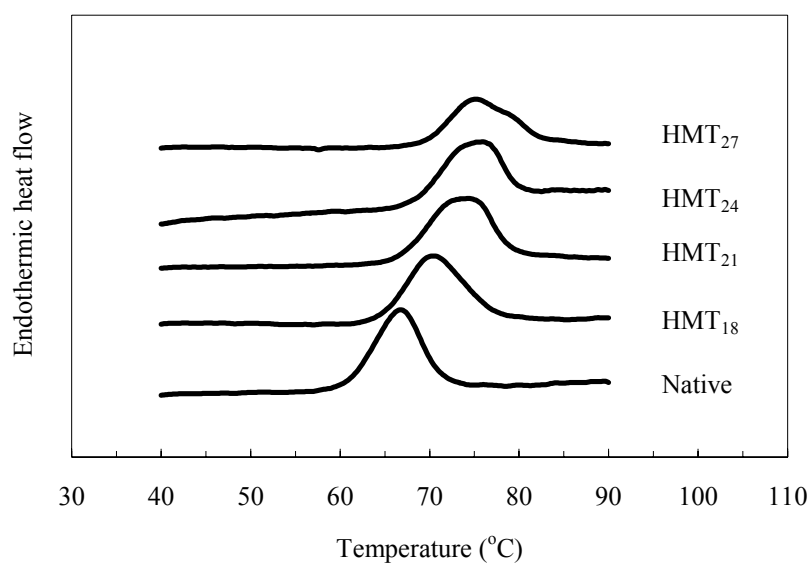
การตัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าอุณหภูมิ  $T_o$  ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ( $R^2=0.97$ ,  $p\leq 0.05$ ) เมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 20) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน (Hoover and Manuel, 1996b) Lim และคณะ (2001) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของค่า  $T_o$  ของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของสายกิ่งอะมิโลเพคติน

บริเวณที่ก้ำกึ่งระหว่างผลึกและอสัณฐาน (intercrystalline amorphous parts) ส่งผลให้สายโมเลกุลของอะมิโลเพคตินบริเวณนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและมีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับสายโมเลกุลของอะมิโลสในบริเวณอสัณฐานได้มากขึ้น นอกจากนี้สตาร์ชข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (ภาพที่ 15) ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่า  $\Delta H$  ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าสายเกลียวคู่ของอะมิโลเพคตินที่อยู่ในบริเวณผลึกบางส่วนมีการคลายเกลียวมากขึ้นดังผลการทดลองที่พบว่าค่า RSA มีค่าลดลง (ตารางที่ 5) ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการหลอมละลายผลึกจึงลดลง (Cook and Kidley, 1992; Gunaratne and Hoover, 2002) สำหรับช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชัน (Tc-To) ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายอะมิโลสและอะมิโลเพคติน (AM-AMP) ส่งผลให้การกระจายตัวของสายอะมิโลเพคตินลดลง สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีช่วงของอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ( $R^2=0.98$ ,  $p<0.05$ ) เมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 21) แสดงว่าช่วงอุณหภูมิในการหลอมละลายผลึกกว้างขึ้น นอกจากนี้ยังพบลักษณะของพีคการดูดความร้อนแบบไบฟาสิก (biphasic endotherm) สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรทุกระดับความชื้น (ภาพที่ 19) และสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ทำการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (ภาพที่ 18) Lim และคณะ (2001) อธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันและลักษณะไบฟาสิกเนื่องจากมีความหลากหลายของโครงสร้างผลึก (heterogeneity of the crystallites) ที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid) และระหว่างสายอะมิโลส (AM-AM) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นสำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลี (Donavan *et al.*, 1983; Collado and Cork, 1999), สตาร์ชถั่ว (Adebawale and Lawal, 2003) สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด (Hoover and Vassanthan, 1994; Lim *et al.*, 2001)



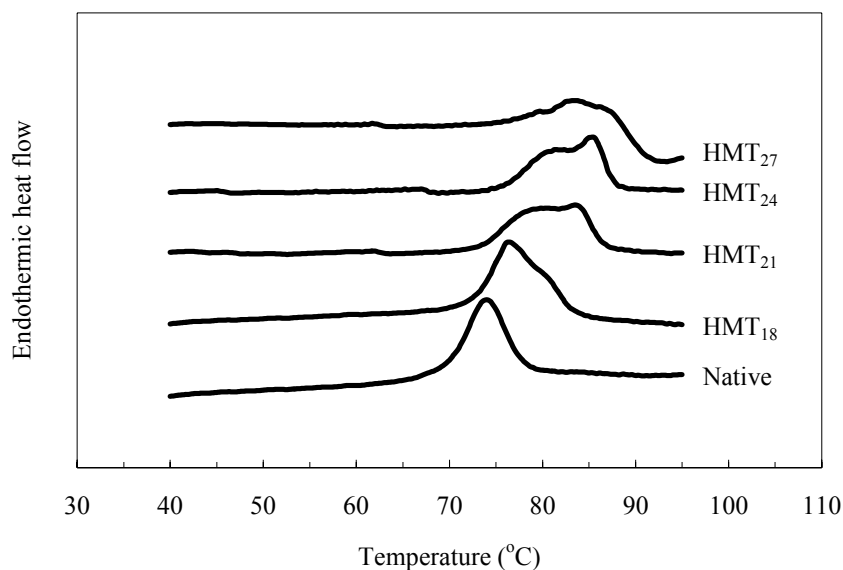
ภาพที่ 17 เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ )

Figure 17. Thermogram of native and heat-moisture treated Glutinous rice starches at 18% ( $HMT_{18}$ ), 21% ( $HMT_{21}$ ), 24% ( $HMT_{24}$ ) and 27% ( $HMT_{27}$ ) moisture content



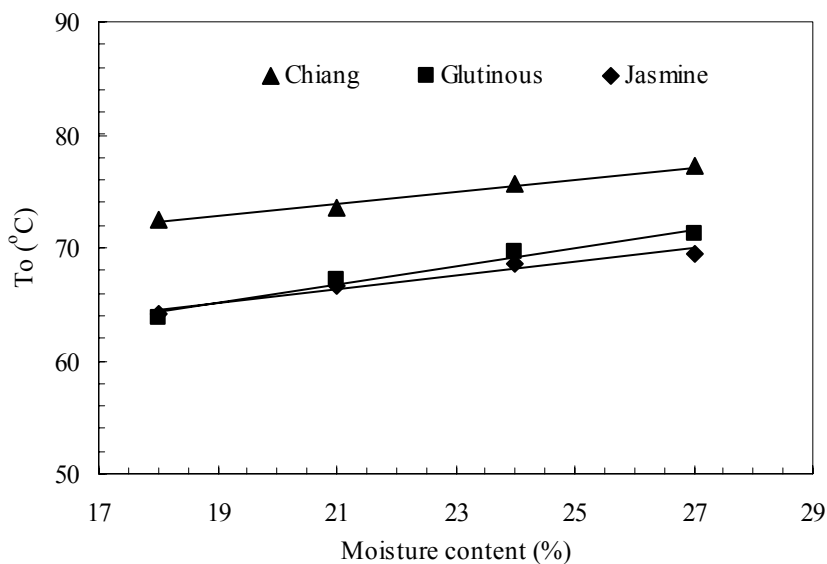
ภาพที่ 18 เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $HMT_{18}$ ), 21 ( $HMT_{21}$ ), 24 ( $HMT_{24}$ ) และ 27 ( $HMT_{27}$ )

Figure 18. Thermograms of native and heat-moisture treated Jasmine rice starches at 18% ( $HMT_{18}$ ), 21% ( $HMT_{21}$ ), 24% ( $HMT_{24}$ ) and 27% ( $HMT_{27}$ ) moisture content



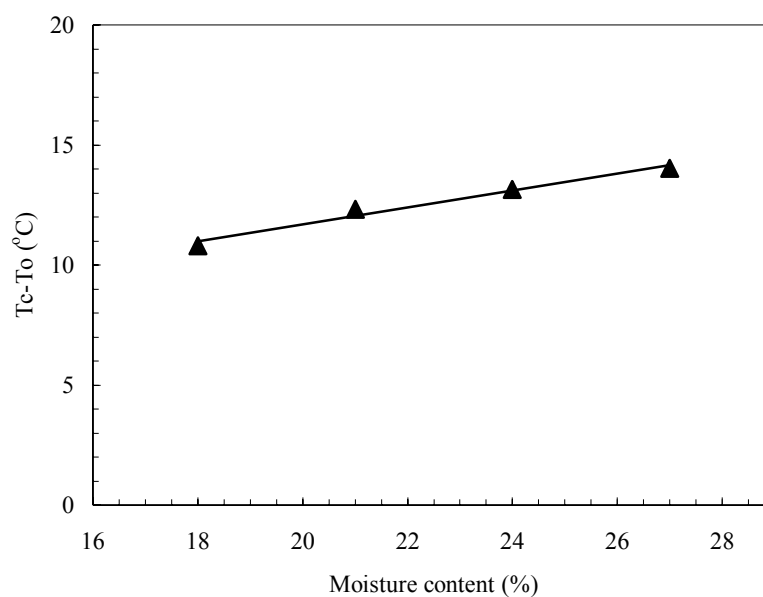
ภาพที่ 19 เทอร์โมแกรมของสตาร์ชข้าวเหนียงก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 19. Thermogram of native and heat-moisture treated Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาติไนเซชัน (To) ของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียงที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นกับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปร

Figure 20. Relationship of onset gelatinization temperature (To) of heat-moisture treated Glutinous, Jasmine and Chiang rice starches and moisture content of the treatments



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ของช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน ( $T_c-T_o$ ) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นกับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ช

Figure 21. Relationship of gelatinization temperature range ( $T_c-T_o$ ) of heat-moisture treated Chaing rice starch and moisture content of the treatments

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้น ร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Table 6. Gelatinization parameters of native and heat-moisture treated Glutinous, Jasmine and Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content

Starch	Treatment	To	Tp	Tc	$\Delta H$	Tc-To
Glutinous	Native	59.44 <sup>c</sup> ±0.22	66.72 <sup>c</sup> ±0.43	72.59 <sup>c</sup> ±0.33	14.65 <sup>ab</sup> ±0.66	13.52 <sup>bc</sup> ±0.35
	HMT <sub>18</sub>	63.87 <sup>d</sup> ±0.51	71.03 <sup>d</sup> ±0.33	79.13 <sup>b</sup> ±0.27	14.84 <sup>a</sup> ±0.26	14.45 <sup>a</sup> ±0.50
	HMT <sub>21</sub>	67.24 <sup>c</sup> ±0.64	73.78 <sup>c</sup> ±0.23	82.12 <sup>a</sup> ±0.53	14.58 <sup>ab</sup> ±0.57	14.03 <sup>ab</sup> ±0.13
	HMT <sub>24</sub>	69.56 <sup>b</sup> ±0.51	76.47 <sup>b</sup> ±0.31	82.53 <sup>a</sup> ±0.67	13.57 <sup>b</sup> ±0.14	12.80 <sup>c</sup> ±0.49
	HMT <sub>27</sub>	71.26 <sup>a</sup> ±0.54	77.36 <sup>a</sup> ±0.30	82.56 <sup>a</sup> ±0.39	11.87 <sup>c</sup> ±0.70	11.49 <sup>d</sup> ±0.38
Jasmine	Native	60.75 <sup>c</sup> ±0.44	66.50 <sup>d</sup> ±0.33	71.17 <sup>c</sup> ±0.28	11.53 <sup>ab</sup> ±0.34	10.52 <sup>c</sup> ±0.14
	HMT <sub>18</sub>	64.18 <sup>d</sup> ±0.37	69.97 <sup>c</sup> ±0.31	76.82 <sup>d</sup> ±0.31	11.77 <sup>a</sup> ±0.60	12.37 <sup>ab</sup> ±0.20
	HMT <sub>21</sub>	66.68 <sup>c</sup> ±0.27	73.42 <sup>b</sup> ±0.52	79.07 <sup>c</sup> ±0.25	11.98 <sup>a</sup> ±0.65	12.40 <sup>ab</sup> ±0.23
	HMT <sub>24</sub>	68.54 <sup>b</sup> ±0.44	74.97 <sup>a</sup> ±0.65	80.04 <sup>b</sup> ±0.33	10.19 <sup>b</sup> ±0.24	11.94 <sup>b</sup> ±0.24
	HMT <sub>27</sub>	69.53 <sup>a</sup> ±0.45	75.08 <sup>a</sup> ±0.55	82.49 <sup>a</sup> ±0.50	8.87 <sup>c</sup> ±0.68	12.96 <sup>a</sup> ±0.69
Chiang	Native	69.81 <sup>c</sup> ±0.08	73.86 <sup>d</sup> ±0.16	77.75 <sup>c</sup> ±0.38	12.64 <sup>ab</sup> ±0.69	7.94 <sup>c</sup> ±0.37
	HMT <sub>18</sub>	72.46 <sup>d</sup> ±0.16	76.76 <sup>c</sup> ±0.24	83.26 <sup>d</sup> ±0.30	13.25 <sup>a</sup> ±0.39	10.80 <sup>d</sup> ±0.35
	HMT <sub>21</sub>	73.50 <sup>c</sup> ±0.48	83.38 <sup>b</sup> ±0.37	86.60 <sup>c</sup> ±0.22	12.62 <sup>ab</sup> ±0.68	12.33 <sup>c</sup> ±0.40
	HMT <sub>24</sub>	75.66 <sup>b</sup> ±0.64	85.03 <sup>a</sup> ±0.20	87.60 <sup>b</sup> ±0.54	11.69 <sup>b</sup> ±0.31	13.15 <sup>bc</sup> ±0.47
	HMT <sub>27</sub>	77.17 <sup>a</sup> ±0.62	86.03 <sup>a</sup> ±0.36	88.73 <sup>a</sup> ±0.17	9.78 <sup>c</sup> ±0.31	14.04 <sup>a</sup> ±0.44

Note : Each value is mean of duplicate ± SD. The different superscripts in the column for each rice starch denote the significant differences ( $p < 0.05$ ).

### 3.2 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย (Swelling power and Solubility)

การศึกษากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวสายโมเลกุลที่อยู่ภายในหลุดออกมา (leaching) อยู่ในสารละลายสตาร์ช โดยพบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวมีค่าจากมากไปน้อยเรียงตามลำดับดังนี้ สตาร์ชข้าวเหนียว (43.81) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (24.43) และสตาร์ชข้าวเหนียว (19.90) ซึ่งตรงข้ามกับค่าความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวที่เรียงตามลำดับดังนี้คือ สตาร์ชข้าวเหนียว (19.20%) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (17.52%) และสตาร์ชข้าวเหนียว (12.56%) ดังแสดงในตารางที่ 7 การพองตัวของเม็ดสตาร์ชเกิดจากการที่ระบบของสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำเพียงพอได้รับความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลต่างๆ ภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายนอกเม็ดสตาร์ชสามารถเข้าไปจับกับไฮโดรเจนได้มากขึ้นเม็ดสตาร์ชจึงมีการพองตัวได้มากขึ้น ดังนั้นสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงจะมีความแข็งแรงของโครงสร้างมากจึงทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชมีค่าต่ำ (Hoover, 2001) ซึ่งจะตรงข้ามกับค่าความสามารถในการละลาย เนื่องจากขณะที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว สายโมเลกุลของอะมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถหลุดออก (amylose leaching) มาอยู่ในสารละลายสตาร์ชได้มากกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ จึงเห็นได้ว่าสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลส สูงมีค่ากำลังการพองตัวต่ำและมีความสามารถในการละลายสูงกว่าสตาร์ชข้าวชนิดอื่นๆ

เมื่อทำการตัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดมีค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายลดลง (ตารางที่ 7 และภาพที่ 22 – ภาพที่ 23) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรสตาร์ชชัยพืชม สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชพืชมหัวด้วยความร้อนขึ้น (Hoover and Vasanthan, 1994; Hoover and Manuel, 1996a,b; Kulp and Lorenz, 1981) ซึ่งอธิบายได้ว่าการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุล (AM-AM, AM-AMP) และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) จึงทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น กำลังการพองตัวจึงมีค่าลดลงและสายโมเลกุลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชหลุดออกมาอยู่ในสารละลายสตาร์ชได้น้อยลง (Hoover and Manuel, 1996a,b; Gunaratne and Hoover, 2002) และจากการทดลองพบว่าเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าลดลงแบบเชิงเส้น ( $R^2=0.97, p \leq 0.05$ ) ดังภาพที่ 24 ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ



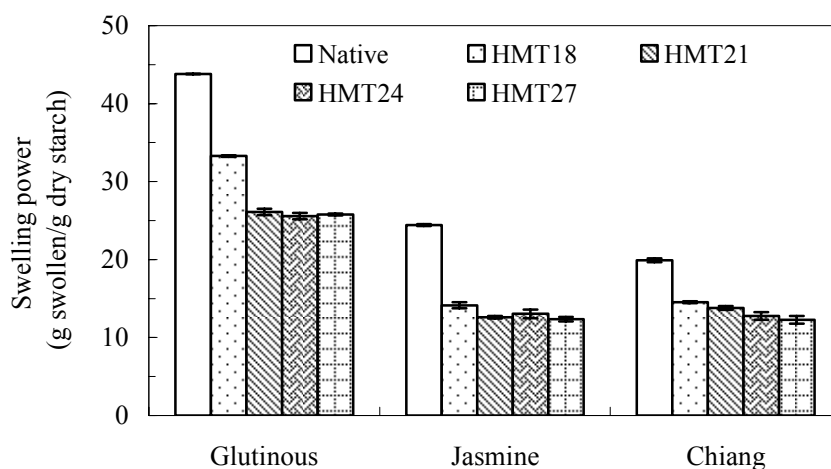
105 พบว่าเมื่อความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสูงกว่าร้อยละ 18 ค่ากำลังการพองตัวมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ )

ตารางที่ 7 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Table 7. Swelling power and water solubility of native and heat-moisture treated rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content

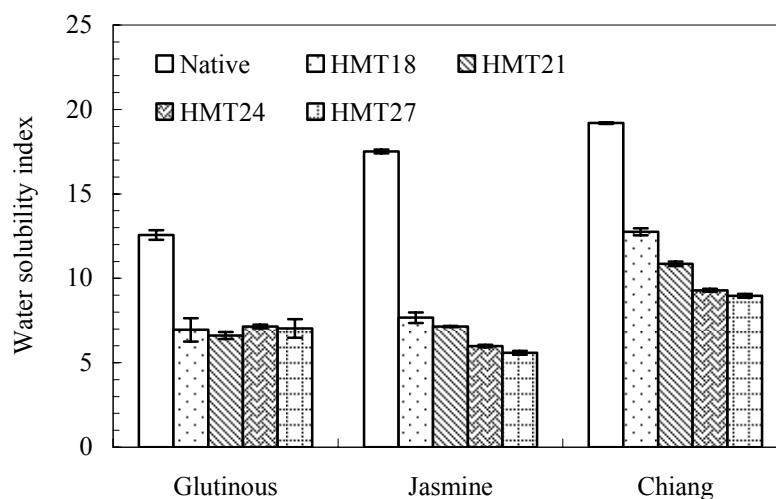
treatment	Glutinous		Jasmine		Chiang	
	Swelling power	Solubility (%)	Swelling power	Solubility (%)	Swelling power	Solubility (%)
Native	43.81 <sup>a</sup> ±0.28	12.56 <sup>a</sup> ±0.19	24.43 <sup>a</sup> ±0.12	17.52 <sup>a</sup> ±0.15	19.90 <sup>a</sup> ±0.05	19.20 <sup>a</sup> ±0.69
HMT <sub>18</sub>	33.28 <sup>b</sup> ±0.09	6.95 <sup>b</sup> ±0.69	14.14 <sup>b</sup> ±0.37	7.67 <sup>b</sup> ±0.31	14.53 <sup>b</sup> ±0.11	12.75 <sup>b</sup> ±0.20
HMT <sub>21</sub>	26.11 <sup>c</sup> ±0.41	6.61 <sup>b</sup> ±0.21	12.61 <sup>cd</sup> ±0.18	7.14 <sup>b</sup> ±0.04	13.79 <sup>c</sup> ±0.24	10.85 <sup>c</sup> ±0.13
HMT <sub>24</sub>	25.59 <sup>c</sup> ±0.42	7.14 <sup>b</sup> ±0.11	13.04 <sup>c</sup> ±0.54	5.99 <sup>b</sup> ±0.08	12.77 <sup>d</sup> ±0.49	9.30 <sup>d</sup> ±0.09
HMT <sub>27</sub>	25.77 <sup>c</sup> ±0.11	7.03 <sup>b</sup> ±0.55	12.37 <sup>d</sup> ±0.29	5.59 <sup>b</sup> ±0.11	12.29 <sup>d</sup> ±0.49	8.97 <sup>d</sup> ±0.11

Note : Each value is mean of duplicate ± SD. The different superscripts in the column for each rice starch denote the significant differences ( $p<0.05$ ).



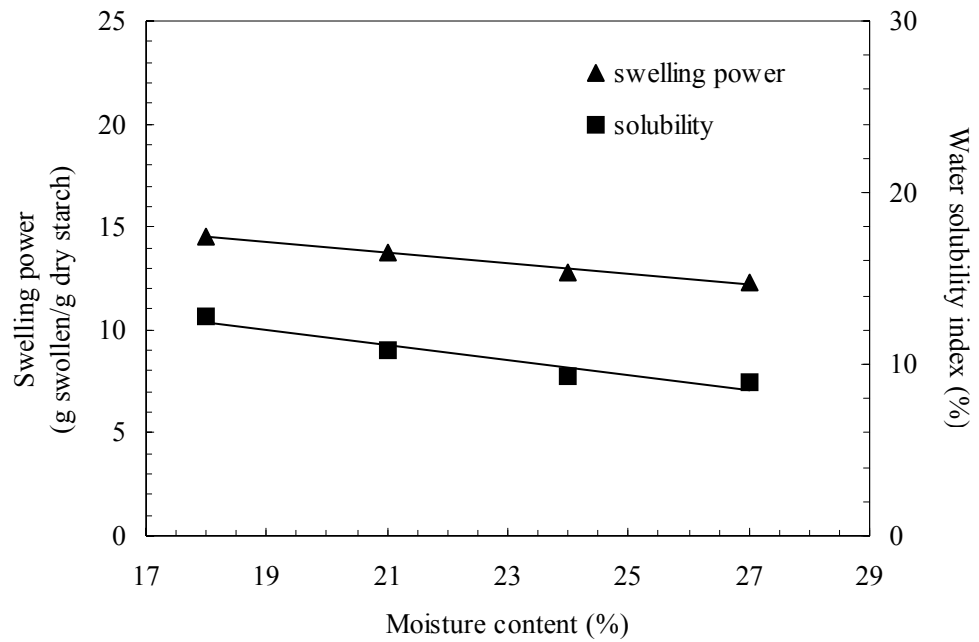
ภาพที่ 22 กำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียงก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 22. Swelling power of native and heat-moisture treated of Glutinous, Jasmine and Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 23 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียงก่อนและหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 23. Water solubility index of native and heat-moisture treated of Glutinous, Jasmine and Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าว  
เชียงใหม่กับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปร

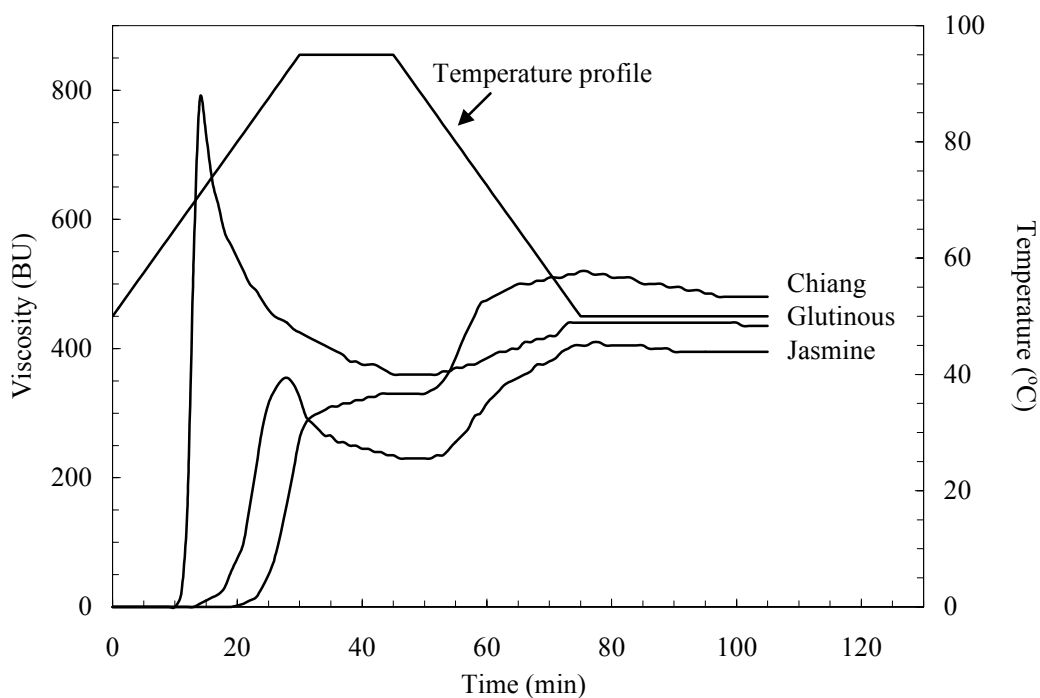
Figure 24. Relationship of swelling power and water solubility of heat-moisture treated Chiang  
rice starch and moisture content of the treatments

### 3.3 สมบัติทางรีโอโลยี (Rheological properties)

#### 3.3.1 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชเพสต์ (Pasting properties)

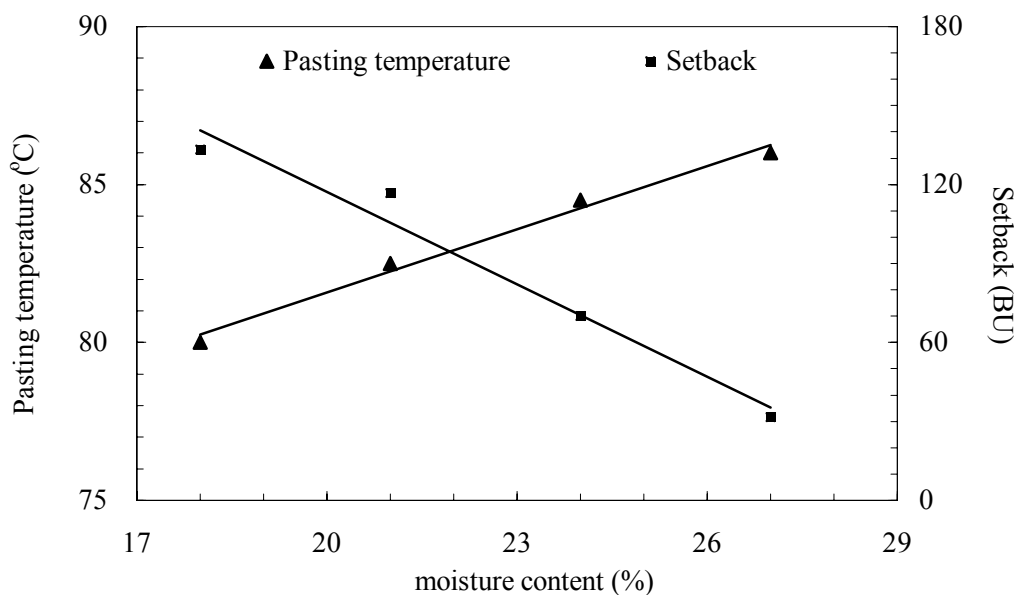
ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดอย่างหนึ่งของสตาร์ช ซึ่งความหนืดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคกราฟเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินและติดตามสมบัติทางความหนืดในขณะที่สารละลายสตาร์ชได้รับความร้อนรวมทั้งความคงตัวของสารละลายสตาร์ชเมื่อให้ความเย็นในช่วงของการลดอุณหภูมิ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนการตัดแปรพบว่าสตาร์ชแต่ละชนิดมีรูปแบบความหนืด (pasting profile) แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 25 เมื่อแบ่งตามรูปแบบความหนืดของสตาร์ชตามวิธีของ Schoch และ Maywald (1968) พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมีรูปแบบความหนืดแบบ a คือลักษณะของกราฟความหนืดจะสูงขึ้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการให้ความร้อน สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีรูปแบบความหนืดแบบ b คือลักษณะกราฟความหนืดมีความสูงชันและการสลายตัวของเม็ดสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อนน้อยกว่ากราฟความหนืดแบบ a สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวมีรูปแบบของกราฟความหนืดแบบ c คือลักษณะกราฟไม่ปรากฏยอดสูงสุดและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นระหว่างการลดอุณหภูมิ สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดแสดงดังตารางที่ 8 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด (Tp) ของสตาร์ชข้าวเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สตาร์ชข้าวเหนียว (78.5 °C), สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (69.5 °C) และสตาร์ชข้าวเหนียว (64.0 °C) เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสสูงจึงมีความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชสูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการเกิดเป็นสตาร์ชเพสต์ (Eliasson, 1985) ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด (Pv) และ Breakdown (BD) ของสตาร์ชข้าวเหนียวสูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากค่า Pv เป็นค่าความหนืดขณะที่เม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวสูงสุดและ BD บ่งบอกถึงความถึงการแตกสลายของเม็ดสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อน ดังนั้นสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีค่ากำลังการพองตัวต่ำจึงไม่พบค่า Pv และ BD ในกราฟความหนืด เมื่อลดอุณหภูมิของสตาร์ชลงพบว่าค่าความหนืดเนื่องมาจากการคืนตัว (setback: SB) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งค่า SB แสดงถึงแนวโน้มการกลับมาจัดเรียงใหม่ของสายโมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ในสตาร์ชเพสต์ โดยเฉพาะสายโมเลกุลอะมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ได้ง่ายกว่าโมเลกุลของอะมิโลเพคติน ดังนั้นสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสที่สูงกว่าจึงมีค่า SB มากกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวตามลำดับ ดังตารางที่ 8

หลังจากทำการตัดแปรรูปข้าวทั้ง 3 ชนิดด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าสมบัติทางความเหนียวของสสารพืชมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางความเหนียวพบว่า ค่า  $T_p$  ของสสารข้าวทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรูปเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 8) สำหรับสสารข้าวเลี้ยงสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่า  $T_p$  กับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรูปด้วยสมการเชิงเส้น ( $R^2=0.99, p\leq 0.05$ ) (ภาพที่ 26) สามารถอธิบายได้ว่าการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นทำให้สายโมเลกุลภายในเม็ดสสารเกิดการเคลื่อนที่และสามารถเกิดอันตรกิริยาขึ้นระหว่างสายโมเลกุล (AM-AM, AM-AMP และ AM-lipid complex) ส่งผลให้โครงสร้างภายในเม็ดสสารมีความแข็งแรงขึ้น (Stute, 1992; Hoover and Manuel, 1996b) ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมบัติทางความร้อนที่ศึกษาในหัวข้อ 3.1 และมีความสอดคล้องกับผลการทดลองการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นของสสารมันฝรั่ง (Kulp and Lorenze, 1981) สสารข้าวโพด (Hoover and Manuel, 1996a, b) สสารข้าวโอ๊ต สสารถั่ว lentil และสสารถั่วลันเตา (Hoover and Vasanthan, 1994) ค่า BD ของสสารข้าวเหนียวและสสารข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความแข็งแรงของเม็ดสสารเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้น และทำให้การแตกตัวของเม็ดสสารลดลง (Adebawal and Lawal, 2003) สำหรับค่า SB ของสสารข้าวเลี้ยงที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้น พบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรูปเพิ่มขึ้นโดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยสมการเชิงเส้น ( $R^2=0.97, p\leq 0.05$ ) (ภาพที่ 26) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดสสารที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นมีความแข็งแรงขึ้น สายโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสสารจึงหลุดออกมาในสารละลายได้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณอะมิโลสที่กลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงร่างตาข่าย (network) ลดลง



ภาพที่ 25 รูปแบบความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น

Figure 25. Pasting profile of native Glutinous Jasmine and Chiang rice starch



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดและค่าการคืนตัวกับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียว

Figure 26. Relationship of pasting temperature and setback and moisture level of treated Chiang rice starch

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ทางความหนืดของแป้งข้าวจากการวัดด้วยเครื่อง Brabender viscograph ที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 6 (โดยน้ำหนักแห้ง)

Table 8. Viscosity parameter from brabender viscograph of rice starches at 6% (w/w)

Starch	Treatment	Pasting temperature (Tp)	Peak viscosity (Pv)	Viscosity		Breakdown (Pv-Hv)	Setback (Cv-Hv)
				at 95 <sup>o</sup> C 15 min (Hv)	at 50 <sup>o</sup> C (Cv)		
Glutinous	Native	64.0 <sup>c</sup> ±1.1	788.3 <sup>b</sup> ±17.7	363.3 <sup>b</sup> ±5.7	446.7 <sup>b</sup> ±5.8	425.0 <sup>a</sup> ±17.7	83.3 <sup>a</sup> ±7.1
	HMT <sub>18</sub>	65.0 <sup>c</sup> ±0.0	826.7 <sup>a</sup> ±23.1	415.0 <sup>a</sup> ±15.0	480.0 <sup>a</sup> ±18.0	411.7 <sup>a</sup> ±12.6	65.0 <sup>b</sup> ±5.0
	HMT <sub>21</sub>	68.0 <sup>b</sup> ±0.0	786.7 <sup>b</sup> ±20.8	410.0 <sup>a</sup> ±10.0	476.7 <sup>a</sup> ±11.6	376.7 <sup>b</sup> ±11.6	66.7 <sup>b</sup> ±5.8
	HMT <sub>24</sub>	68.5 <sup>b</sup> ±1.7	753.3 <sup>b</sup> ±15.3	396.7 <sup>a</sup> ±11.6	465.0 <sup>ab</sup> ±8.7	356.7 <sup>b</sup> ±5.8	68.3 <sup>b</sup> ±2.9
	HMT <sub>27</sub>	72.0 <sup>a</sup> ±0.9	751.7 <sup>b</sup> ±22.6	395.0 <sup>a</sup> ±2.0	443.3 <sup>b</sup> ±15.3	356.7 <sup>b</sup> ±2.9	48.3 <sup>c</sup> ±5.8
Jasmine	Native	69.5 <sup>d</sup> ±0.0	348.3 <sup>ns</sup> ±7.6	235.0 <sup>c</sup> ±0.0	405.0 <sup>b</sup> ±5.0	113.0 <sup>a</sup> ±7.6	170.0 <sup>c</sup> ±5.0
	HMT <sub>18</sub>	71.5 <sup>c</sup> ±1.1	356.7 <sup>ns</sup> ±17.7	303.3 <sup>ab</sup> ±10.6	536.7 <sup>a</sup> ±11.6	53.3 <sup>b</sup> ±7.1	233.3 <sup>a</sup> ±3.5
	HMT <sub>21</sub>	72.0 <sup>bc</sup> ±0.9	350.0 <sup>ns</sup> ±10.0	295.0 <sup>b</sup> ±5.0	528.3 <sup>a</sup> ±12.6	55.0 <sup>b</sup> ±5.0	233.3 <sup>a</sup> ±7.6
	HMT <sub>24</sub>	73.0 <sup>b</sup> ±0.9	343.3 <sup>ns</sup> ±5.8	298.3 <sup>ab</sup> ±2.9	516.7 <sup>a</sup> ±5.8	45.0 <sup>b</sup> ±5.0	218.3 <sup>ab</sup> ±2.9
	HMT <sub>27</sub>	76.0 <sup>a</sup> ±0.9	340.0 <sup>ns</sup> ±5.0	306.7 <sup>a</sup> ±5.8	521.7 <sup>a</sup> ±18.9	33.3 <sup>c</sup> ±2.9	215.0 <sup>b</sup> ±13.2
Chiang	Native	78.5 <sup>c</sup> ±0.0	-	331.7 <sup>c</sup> ±2.9	528.3 <sup>a</sup> ±7.6	-	196.7 <sup>a</sup> ±0.0
	HMT <sub>18</sub>	80.0 <sup>d</sup> ±0.0	-	388.3 <sup>a</sup> ±2.9	521.7 <sup>a</sup> ±5.8	-	133.3 <sup>b</sup> ±2.9
	HMT <sub>21</sub>	82.5 <sup>c</sup> ±0.9	-	368.3 <sup>b</sup> ±2.9	485.0 <sup>b</sup> ±5.0	-	116.7 <sup>c</sup> ±2.9
	HMT <sub>24</sub>	84.5 <sup>b</sup> ±0.0	-	281.7 <sup>d</sup> ±2.9	351.7 <sup>c</sup> ±2.9	-	70.0 <sup>d</sup> ±5.0
	HMT <sub>27</sub>	86.0 <sup>a</sup> ±0.9	-	191.7 <sup>c</sup> ±2.9	223.3 <sup>d</sup> ±2.9	-	31.7 <sup>c</sup> ±2.9

Note : Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in the column for each rice denote the significant differences (p<0.05)

### 3.3.2 พฤติกรรมการไหล

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียงโดยการเตรียมสตาร์ชเพสที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 (โดยน้ำหนัก) ทำการวัดที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  ในช่วงอัตราการเฉือนเท่ากับ  $0-300\text{ s}^{-1}$  จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด พบว่าเป็นไปตามกฎสมการยกกำลัง (power law) ดังสมการที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูง ( $R^2=0.99, p\leq 0.05$ )

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือความเค้นเฉือน (Pa),  $\dot{\gamma}$  คืออัตราการเฉือน ( $\text{s}^{-1}$ ),  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) และ  $n$  คือครรชนิแสดงพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนืดปรากฏและความเค้นเฉือนของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบว่าความหนืดปรากฏลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 27) และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล ( $n$ ) ของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดพบว่า มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear-thinning (Pseudoplastic) (Evan and Haisman, 1979; Doublier, 1981; Colas, 1986; Ellis *et al.*, 1989; Noel *et al.*, 1993) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ทางความหนืด ( $k$ ) พบว่าค่า  $k$  ของสตาร์ชข้าวเหนียว ( $10.77\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) สูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ( $3.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) และสตาร์ชข้าวเจียง ( $1.48\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) ตามลำดับ เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เม็ดสตาร์ชสามารถฟองตัวได้มาก และสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างเม็ดสตาร์ช (granule-granule interaction) และสายโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ชกับเม็ดสตาร์ช (amylose-granule interaction) ได้สูง จึงส่งผลให้ค่าความหนืดสูงกว่าสตาร์ชข้าวชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนในช่วงที่มีการเพิ่มและลดอัตราการเฉือน พบว่าสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิด เกิดฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) (ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 9) แสดงว่ามีพฤติกรรมการไหลที่ขึ้นกับเวลาชนิด thixotropic โดยพบว่าค่า hysteresis loop ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียง ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นของสตาร์ชข้าวเหนียวสามารถถูกทำลายได้ง่ายกว่าของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเจียง ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน และไม่สามารถคืนตัวได้เมื่อลดอัตราการเฉือนลง



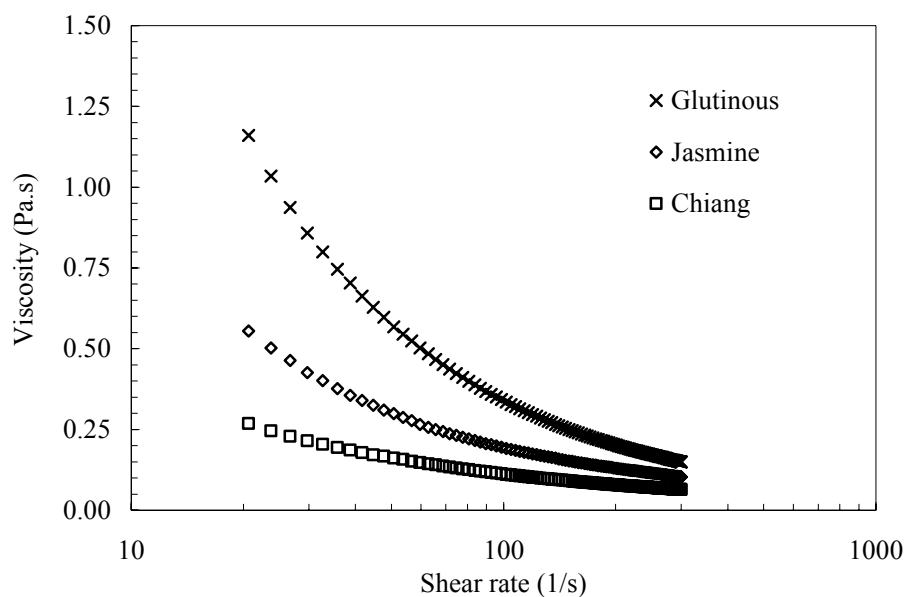
หลังจากทำการตัดแปรสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นต่าง ๆ พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการเฉือนและความเค้นเฉือนเป็นไปตามกฎสมการยกกำลัง (power law equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในระดับที่สูง ( $R^2=0.99$ ,  $p\leq 0.05$ ) พฤติกรรมการไหลของสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการตัดแปรยังคงเป็นแบบ Shear-thinning (ภาพที่ 28) และพบว่าค่า  $k$  มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า  $n$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 9) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสตาร์ชข้าวผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการพองตัวลด (ดังหัวข้อ 3.2) ดังนั้นความหนืดจึงมีค่าลดลงด้วย สำหรับสตาร์ชข้าวเฉียงพบว่าความสัมพันธ์ของค่า  $k$  และค่า  $n$  กับระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรสามารถอธิบายด้วยสมการโพลิโนเมียล ( $R^2=0.99$ ,  $p\leq 0.05$ ) (ภาพที่ 30) นอกจากนั้นพบว่าค่า hysteresis loop ของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเฉียงหลังการตัดแปรมีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 31) เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงขึ้น จึงสามารถทนต่ออัตราการเฉือนได้มากขึ้น

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) และค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) ของสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการคัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

Table 9. Consistency coefficient (k) and flow behavior index (n) of native and heat-moisture treated rice starches

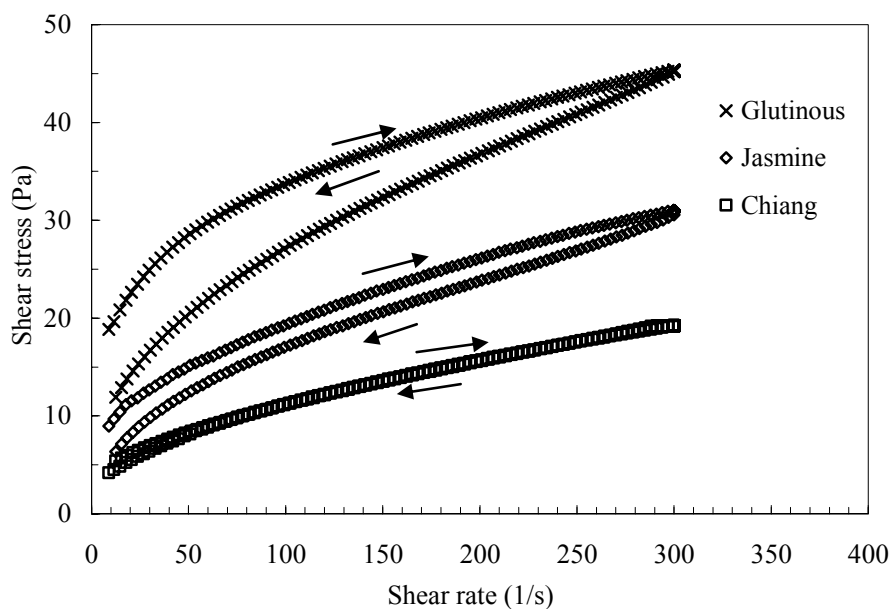
Starch	Treatment	k (Pa.s <sup>n</sup> )	n	$\eta_{100}$
Glutinous	Native	10.77 <sup>a</sup> ±0.64	0.27 <sup>b</sup> ±0.01	0.333 <sup>a</sup> ±0.002
	HMT18	10.40 <sup>ab</sup> ±0.22	0.29 <sup>a</sup> ±0.01	0.401 <sup>a</sup> ±0.013
	HMT21	10.88 <sup>a</sup> ±0.52	0.29 <sup>a</sup> ±0.00	0.399 <sup>b</sup> ±0.005
	HMT24	9.94 <sup>bc</sup> ±0.18	0.28 <sup>ab</sup> ±0.00	0.347 <sup>b</sup> ±0.032
	HMT27	9.63 <sup>bc</sup> ±0.28	0.28 <sup>ab</sup> ±0.00	0.335 <sup>b</sup> ±0.003
Jasmine	Native	3.2 <sup>a</sup> ±0.14	0.39 <sup>d</sup> ±0.00	0.191 <sup>a</sup> ±0.006
	HMT18	1.60 <sup>b</sup> ±0.41	0.43 <sup>c</sup> ±0.02	0.112 <sup>b</sup> ±0.020
	HMT21	0.84 <sup>c</sup> ±0.04	0.48 <sup>b</sup> ±0.00	0.075 <sup>c</sup> ±0.003
	HMT24	0.23 <sup>d</sup> ±0.01	0.62 <sup>a</sup> ±0.01	0.038 <sup>d</sup> ±0.001
	HMT27	0.19 <sup>d</sup> ±0.01	0.62 <sup>a</sup> ±0.01	0.033 <sup>d</sup> ±0.001
Chiang	Native	1.48 <sup>a</sup> ±0.22	0.46 <sup>c</sup> ±0.02	0.120 <sup>a</sup> ±0.008
	HMT18	0.62 <sup>b</sup> ±0.02	0.52 <sup>d</sup> ±0.00	0.066 <sup>b</sup> ±0.001
	HMT21	0.46 <sup>b</sup> ±0.02	0.55 <sup>c</sup> ±0.00	0.049 <sup>c</sup> ±0.012
	HMT24	0.16 <sup>c</sup> ±0.02	0.65 <sup>b</sup> ±0.01	0.033 <sup>d</sup> ±0.002
	HMT27	0.07 <sup>c</sup> ±0.00	0.74 <sup>a</sup> ±0.00	0.021 <sup>c</sup> ±0.001

Note : Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in the column for each rice denote the significant differences (p<0.05)



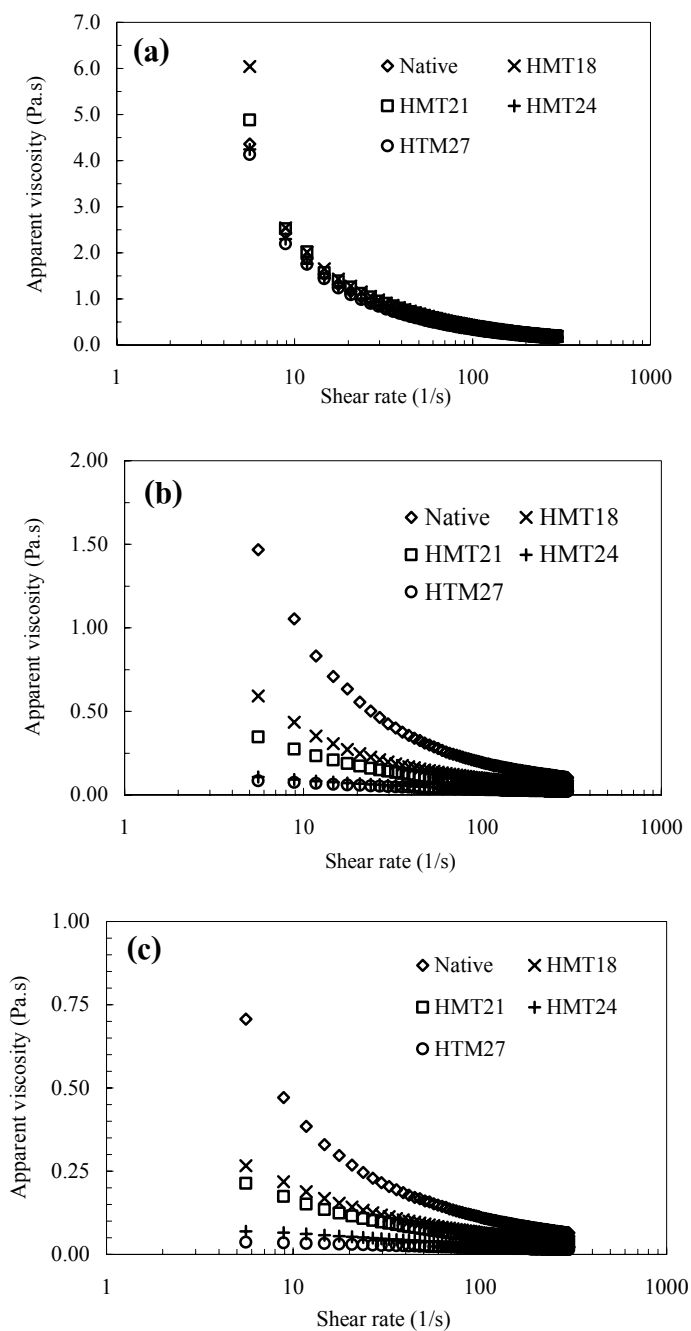
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏและอัตราการเฉือนของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวแข็งก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

Figure 27. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native starches obtained from Glutinous Jasmine and Chiang rice



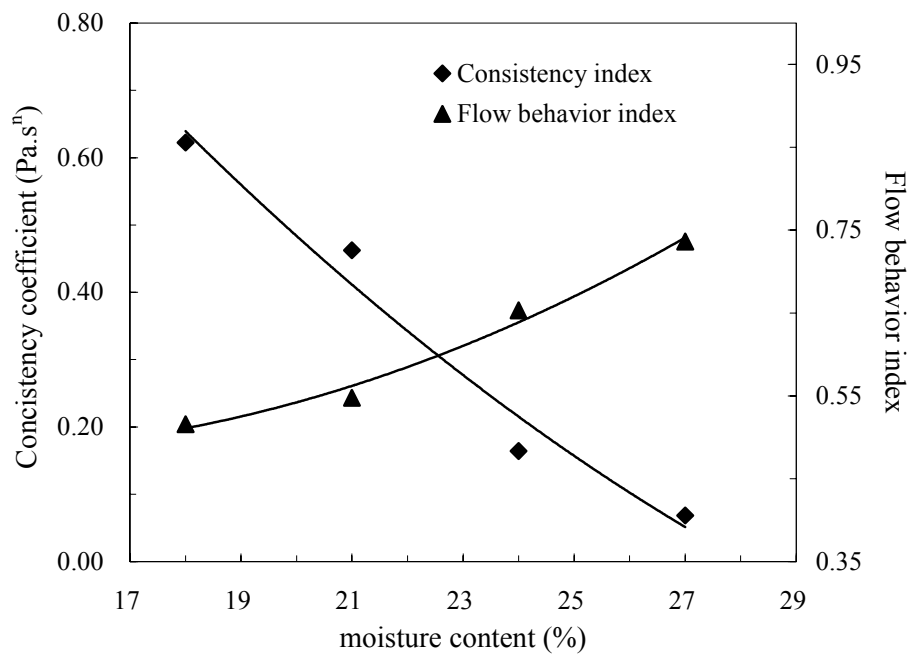
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวแข็งก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

Figure 28. Relationship of shear stress and shear rate of native starches obtained from Glutinous, Jasmine and Chiang rice



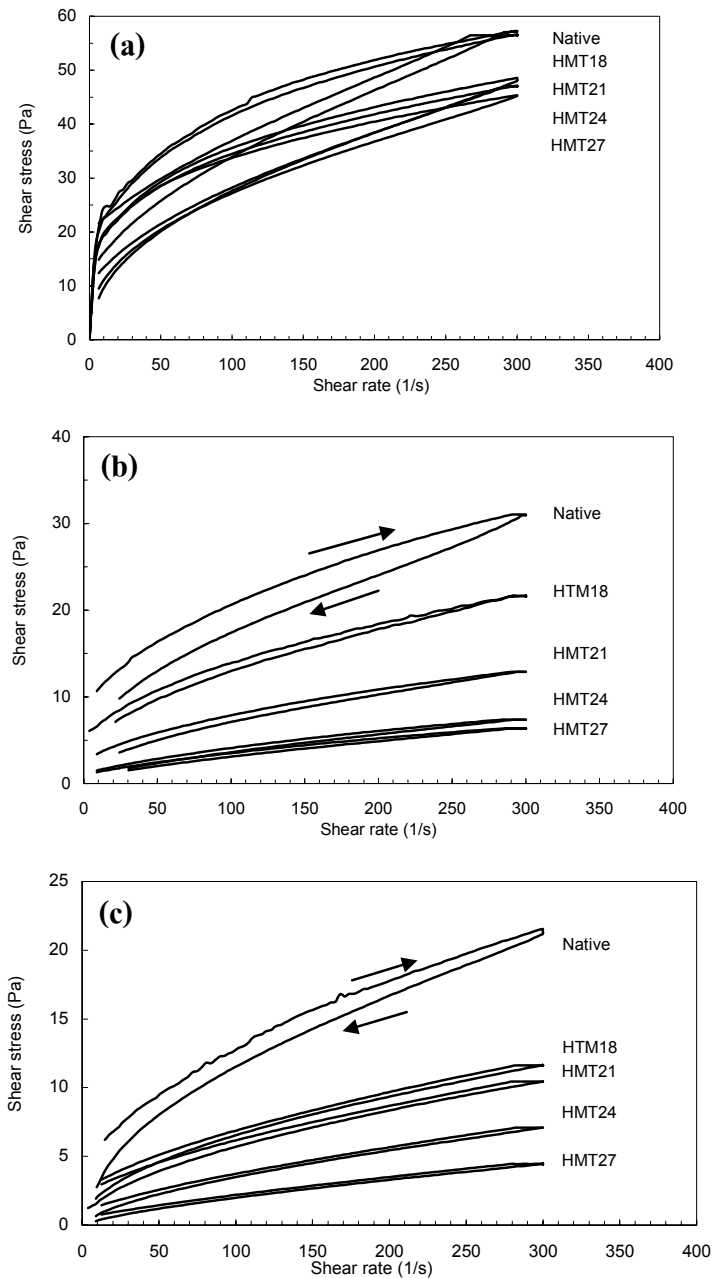
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏและอัตราการเฉือนของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) สตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 (HMT<sub>18</sub>), 21 (HMT<sub>21</sub>), 24 (HMT<sub>24</sub>) และ 27 (HMT<sub>27</sub>)

Figure 29. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native and heat-moisture treated Glutinous Jasmine and Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว ( $k$ ) และค่าดัชนีพฤติกรรมกรไหล ( $n$ ) กับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรสตาร์ชข้าวเหนียว

Figure 30. Relationship of consistency coefficient ( $k$ ) and flow behavior index ( $n$ ) of Chiang rice starch with difference moisture content



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) สตาร์ชข้าวเชิง (c) ก่อนและหลังการคัดแปรด้วยด้วยความร้อนชื้น

Figure 30. Relationship of apparent viscosity and shear rate of native and heat-moisture treated Glutinous Jasmine and Chiang rice starches at 18% (HMT<sub>18</sub>), 21% (HMT<sub>21</sub>), 24% (HMT<sub>24</sub>) and 27% (HMT<sub>27</sub>) moisture content

### 3.3.4 สมบัติวิสโคอีลาสติก

การวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกแบบการสั่นทางพลวัต (Dynamic oscillation) เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ storage modulus ( $G'$ ), loss modulus ( $G''$ ) และ loss tangent ( $\tan \delta$ ) ซึ่งค่า  $G'$  หมายถึงปริมาณพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด  $G''$  หมายถึงพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด และค่า  $\tan \delta$  หมายถึงสัดส่วนของการแสดงสถานะการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น ( $G''/G'$ ) โดยการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกนี้เป็นการศึกษา frequency sweep test ของสตาร์ชเพสต์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 อุณหภูมิ 60 °C โดยทำการทดลองในช่วง linear viscoelastic เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ไม่มีอิทธิพลจากความเครียดของตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์วิสโคอีลาสติกของสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่าสตาร์ชข้าวทุกชนิดมีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ดังตารางที่ 10 ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเจล (Biliaderis *et al.*, 1992) และพบว่าค่า  $G'$  (ความถี่ 1 Hz) ของสตาร์ชข้าวเหนียว (316 Pa) สูงกว่าสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (230 Pa) และสตาร์ชข้าวเหนียว (7.68 Pa) ตามลำดับ (ตารางที่ 10) ซึ่งแสดงว่าเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวมีความแข็งแรงกว่าเจลสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว นอกจากนั้นพบว่าเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่า  $\tan \delta$  ต่ำสุด (0.09) ซึ่งแสดงว่ามีความยืดหยุ่นของเจลที่สูง ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสที่สูง เมื่อผ่านการเจลาติไนเซชัน พบว่าสายโมเลกุลอะมิโลสสามารถหลุดออกมาอยู่ในสารละลายได้มาก จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลอะมิโลสหรืออะมิโลเพคตินกับเม็ดสตาร์ช (AM-granule, AMP-granule) หรือการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเม็ดสตาร์ช (granule-granule) และสายโมเลกุลของอะมิโลสกับอะมิโลส (AM-AM) ได้มากขึ้น (Biliaderis and Julino, 1993; Lii *et al.*, 1995 and Tsai *et al.*, 1997) จึงส่งเสริมให้เจลของสตาร์ชข้าวเหนียวมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นกว่าเจลของสตาร์ชข้าวอีก 2 ชนิด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า  $G'$  กับค่าความถี่ (ภาพที่ 32) พบว่าค่า  $G'$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจลที่มีพฤติกรรมคล้ายของไหลหนืด (fluid-like behavior) หรือเจลอ่อน (weak gel) สำหรับสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่าค่า  $G'$  และ  $G''$  ไม่เปลี่ยนแปลงกับค่าความถี่ (ภาพที่ 33 - ภาพที่ 34) ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจลที่แท้จริง (true gel) (Clark and Ross-Murphy, 1987) เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว

หลังจากการดัดแปรสตาร์ชข้าวทั้ง 3 ชนิดด้วยความร้อนขึ้น พบว่าค่า  $G'$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ดังตารางที่ 10 ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน (AM-AMP) ที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น อาจถูกทำลายด้วยความร้อนขณะที่สตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่า  $G'$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งอาจเนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid complex) หรืออันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุล (AM-AMP) ระหว่างการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นนั้นยังคงปรากฏอยู่ในเจลของสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดนี้ จึงส่งเสริมให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มมากขึ้น และพบว่าค่า  $G'$  ของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 10)

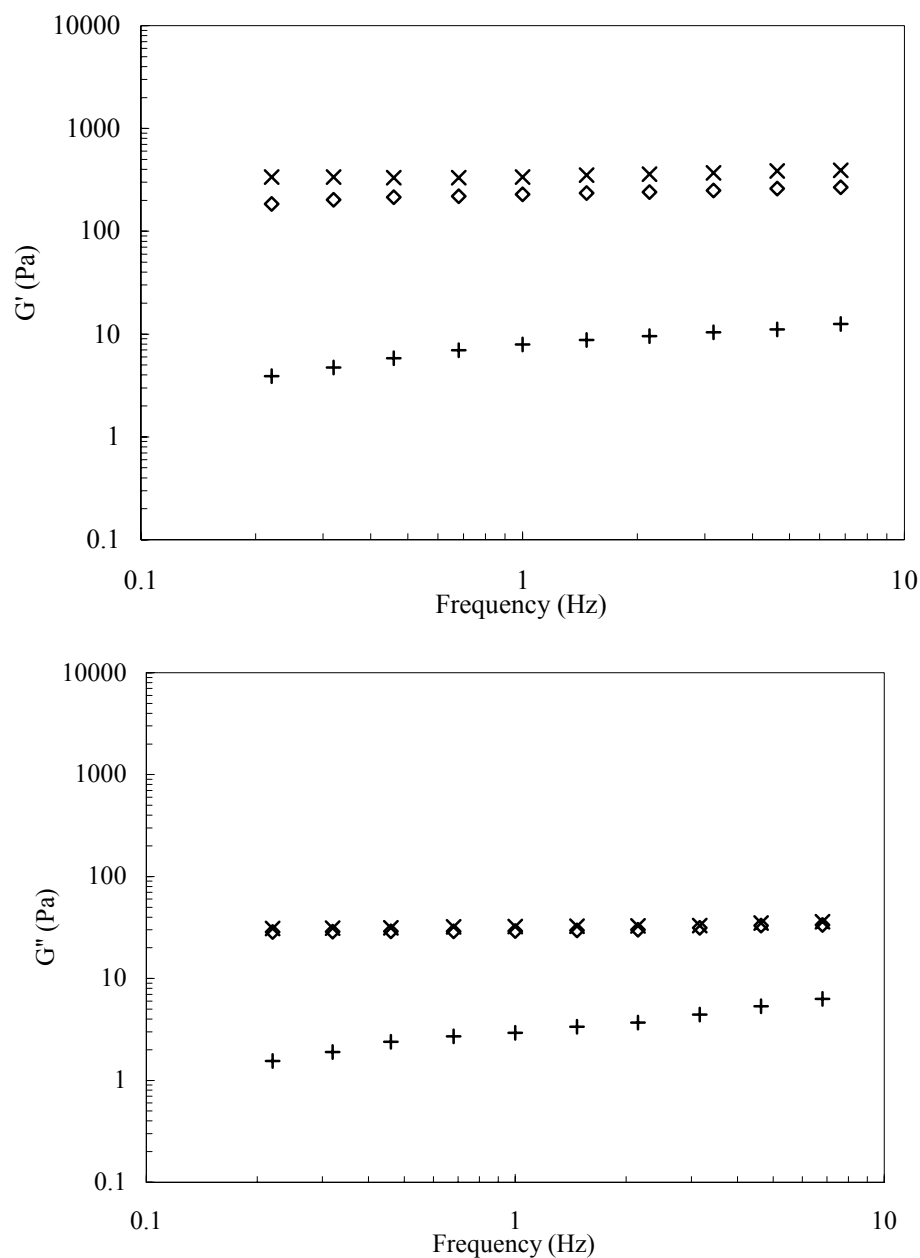


ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ของสมบัติวิสโคอีลาสติกที่วัดด้วยวิธีการสั่นทางพลวัต (ความถี่ 1 Hz) สำหรับสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้น

Table 10. Viscoelastic parameter of native and heat-moisture treated rice starches at concentration of 8% (w/w)

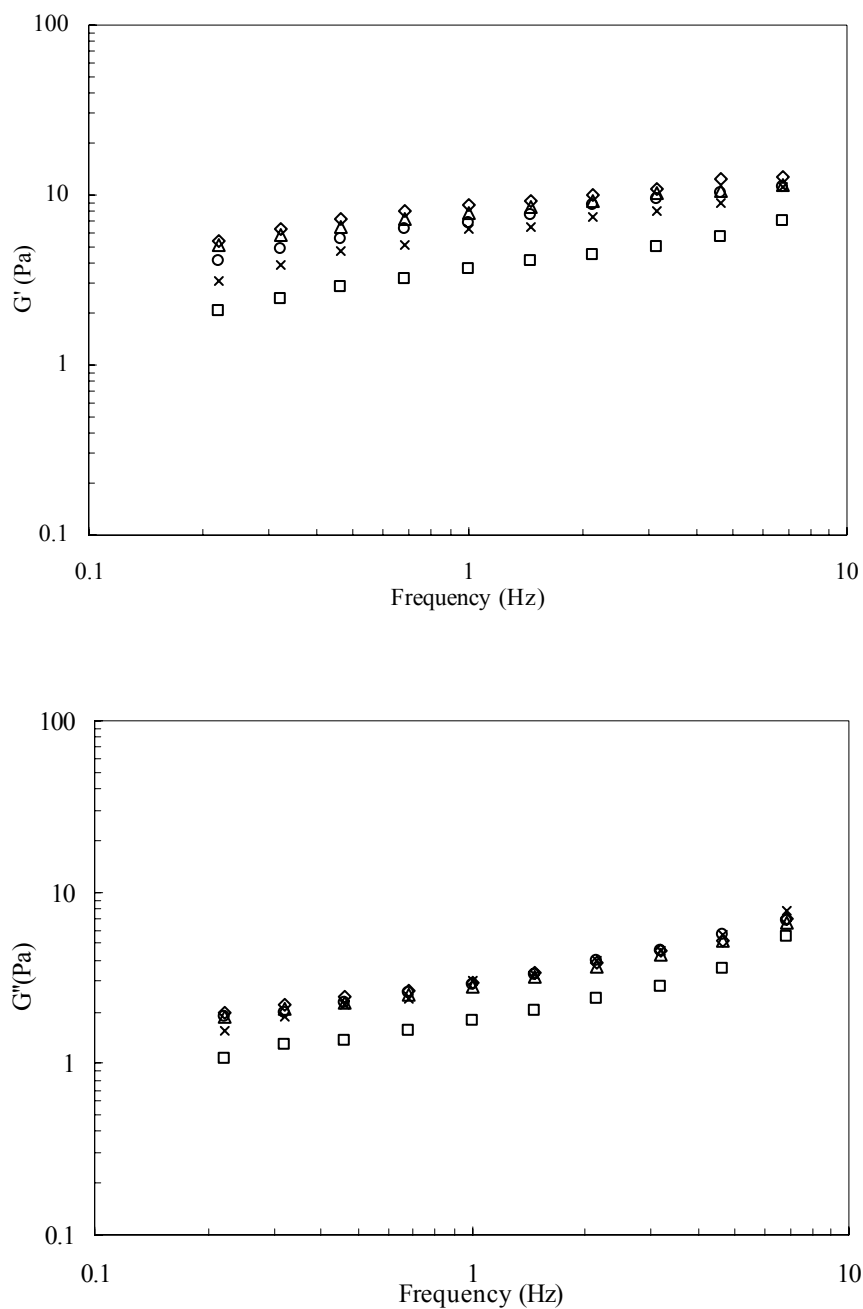
Starch	treatment	G'	G''	tan $\delta$
Glutinous	Native	7.68 <sup>ns</sup> ±0.22	2.87 <sup>ns</sup> ±0.05	0.373 <sup>ns</sup> ±0.004
	HMT18	8.97 <sup>ns</sup> ±1.03	3.36 <sup>ns</sup> ±0.55	0.372 <sup>ns</sup> ±0.018
	HMT21	9.29 <sup>ns</sup> ±0.66	3.11 <sup>ns</sup> ±0.13	0.335 <sup>ns</sup> ±0.009
	HMT24	8.61 <sup>ns</sup> ±0.35	3.04 <sup>ns</sup> ±0.01	0.353 <sup>ns</sup> ±0.016
	HTM27	8.89 <sup>ns</sup> ±0.02	3.05 <sup>ns</sup> ±0.02	0.343 <sup>ns</sup> ±0.001
Jasmine	Native	230.00 <sup>c</sup> ±10.23	29.2 <sup>b</sup> ±2.25	0.152 <sup>a</sup> ±0.014
	HMT18	463.00 <sup>b</sup> ±11.43	36.47 <sup>a</sup> ±1.72	0.079 <sup>b</sup> ±0.002
	HMT21	464.50 <sup>b</sup> ±20.50	35.20 <sup>a</sup> ±0.20	0.076 <sup>b</sup> ±0.003
	HMT24	504.00 <sup>a</sup> ±9.00	38.00 <sup>a</sup> ±0.70	0.075 <sup>b</sup> ±0.000
	HTM27	516.50 <sup>a</sup> ±2.50	39.05 <sup>a</sup> ±0.35	0.076 <sup>b</sup> ±0.001
Chiang	Native	316.00 <sup>d</sup> ±14.99	32.20 <sup>b</sup> ±3.06	0.104 <sup>ns</sup> ±0.006
	HMT18	470.00 <sup>cd</sup> ±18.83	36.63 <sup>b</sup> ±0.31	0.086 <sup>ns</sup> ±0.002
	HMT21	501.50 <sup>bc</sup> ±8.50	37.35 <sup>b</sup> ±2.35	0.078 <sup>ns</sup> ±0.007
	HMT24	511.67 <sup>b</sup> ±13.89	47.70 <sup>a</sup> ±1.63	0.090 <sup>ns</sup> ±0.012
	HTM27	645.67 <sup>a</sup> ±11.15	54.90 <sup>a</sup> ±3.22	0.082 <sup>ns</sup> ±0.004

Note : Each value is mean of triplicate ± SD. The difference superscripts in the column for each rice denote the significant differences (p<0.05)



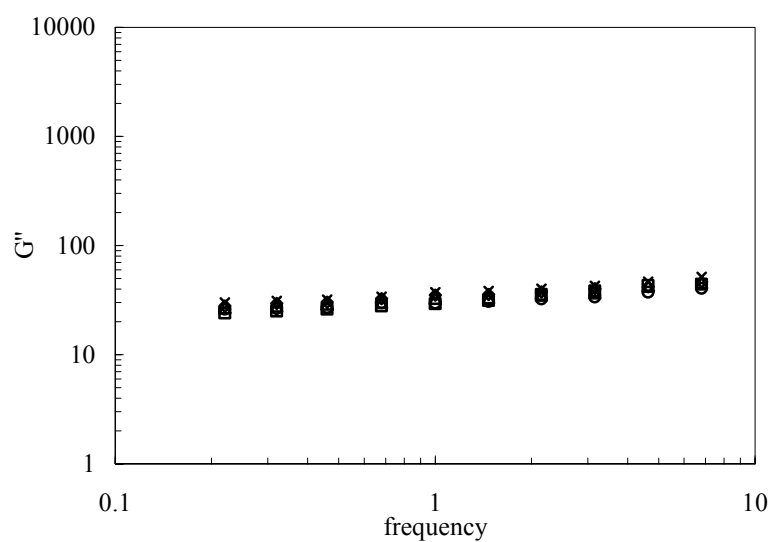
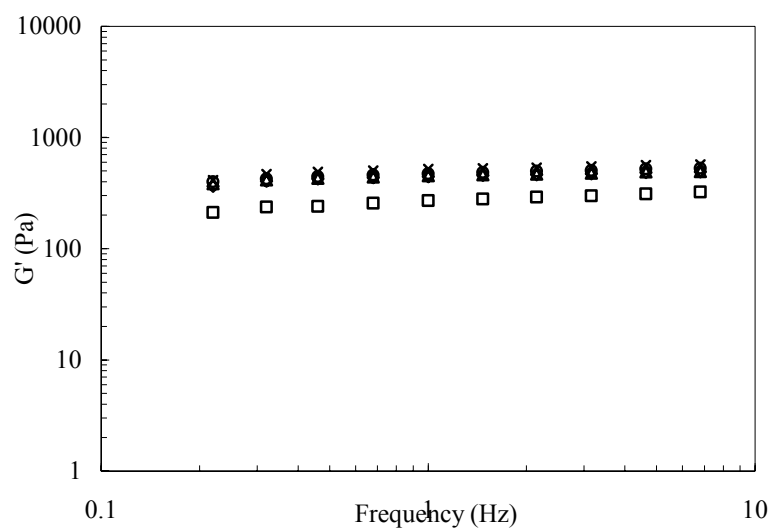
ภาพที่ 32 ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเหนียว (+) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (◇) และสตาร์ชข้าวเจียง (×) ก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz

Figure 32. Effect of frequency on  $G'$  and  $G''$  for native Glutinous (+), Jasmine (◇) and Chiang rice (×) starch paste at 4% concentration. All samples were measured at  $60^{\circ}\text{C}$  and at 0.1 – 10 Hz



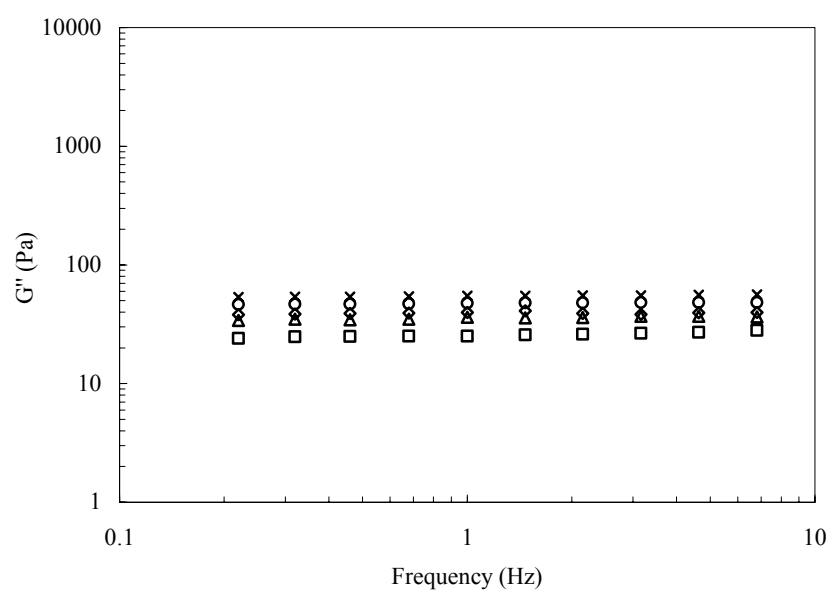
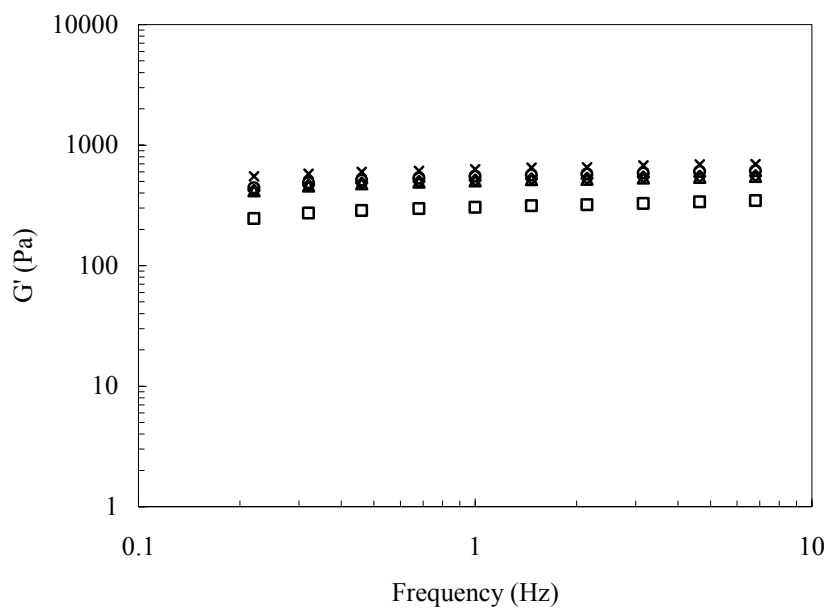
ภาพที่ 33 ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อน ( $\square$ ) และหลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21 ( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 4 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz

Figure 33. Effect of frequency on  $G'$  and  $G''$  for native ( $\square$ ), and heat-moisture treated Glutinous rice at 18% ( $\Delta$ ), 21% ( $\diamond$ ), 24% ( $\circ$ ) and 27% ( $\times$ ) moisture content. All samples were measured at  $60^{\circ}\text{C}$  and at 0.1 – 10 Hz



ภาพที่ 34 ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อน ( $\square$ ) และ หลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21 ( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz

Figure 34. Effect of frequency on  $G'$  and  $G''$  for native ( $\square$ ), and heat-moisture treated Jasmine rice at 18% ( $\Delta$ ), 21% ( $\diamond$ ), 24% ( $\circ$ ) and 27% ( $\times$ ) moisture content. All samples were measured at  $60^{\circ}\text{C}$  and at 0.1 – 10 Hz



ภาพที่ 35 ผลของความถี่ต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ของสตาร์ชข้าวเจียงก่อน ( $\square$ ) และหลังการตัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ( $\Delta$ ), 21 ( $\diamond$ ), 24 ( $\circ$ ) และ 27 ( $\times$ ) ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 8 อุณหภูมิขณะวัด  $60^{\circ}\text{C}$  ความถี่ 0.1-10 Hz

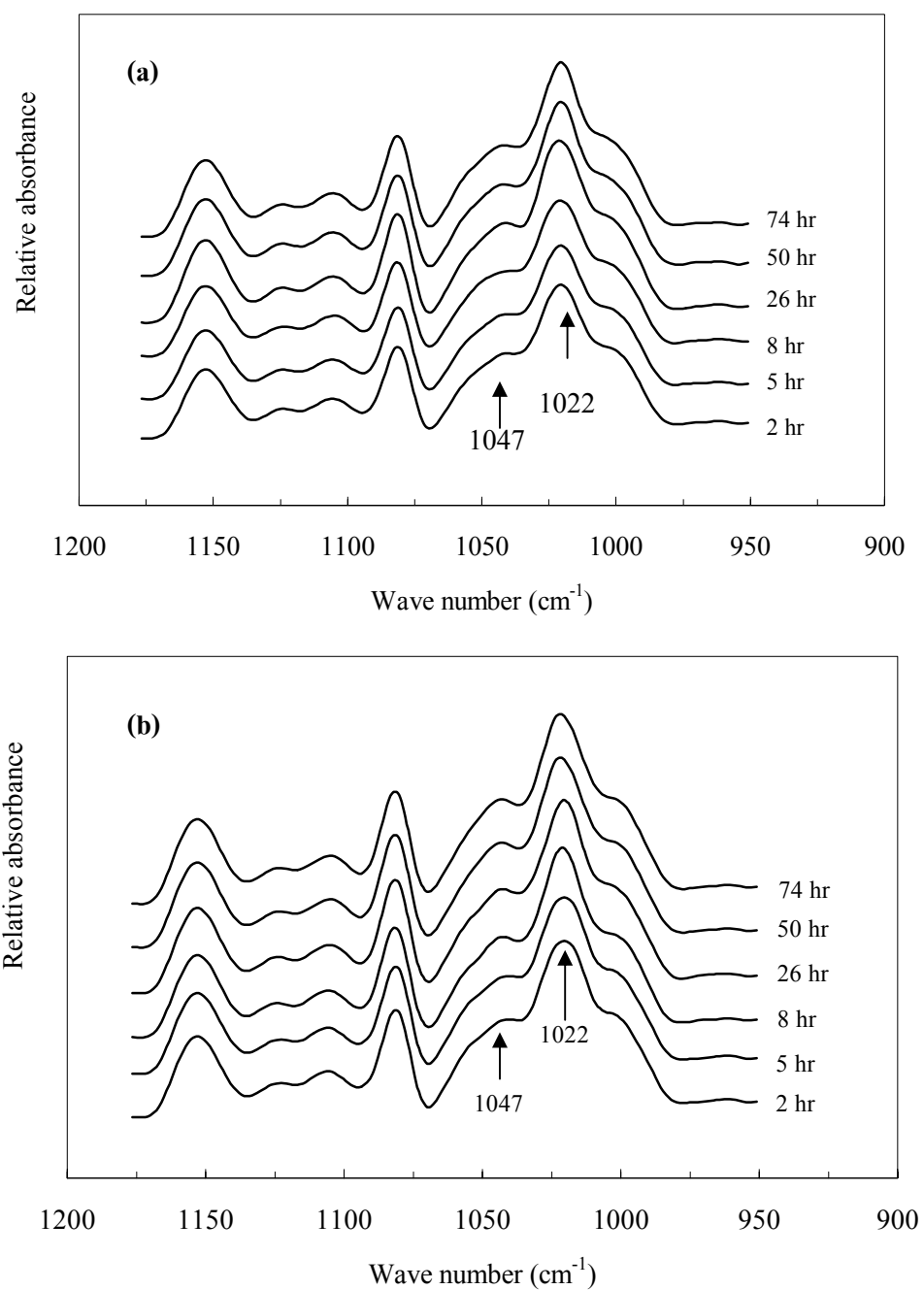
Figure 35. Effect of frequency on  $G'$  and  $G''$  for native ( $\square$ ), and heat-moisture treated Chaing rice at 18% ( $\Delta$ ), 21% ( $\diamond$ ), 24% ( $\circ$ ) and 27% ( $\times$ ) moisture content. All samples were measured at  $60^{\circ}\text{C}$  and at 0.1 – 10 Hz

### 3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

#### 3.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณเกลียวคู่ต่อสัดส่วนในโครงสร้างผลึก (Ratio of short range molecular order to amorphous, RSA)

การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวด้วยเครื่อง Fourier transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณสายเกลียวคู่ต่อออสันฐาน โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่วัดการยืด (stretching) ของหมู่ C-C กับ C-O และการงอ (bending) ของหมู่ COH ในช่วงจำนวนคลื่น (wave number) 1300–800  $\text{cm}^{-1}$  (Cael *et al.*, 1975) โดยพิคการดูดกลืนแสงที่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  มีความสัมพันธ์กับปริมาณสายเกลียวคู่หรือปริมาณผลึก และพิคการดูดกลืนแสงที่ 1022  $\text{cm}^{-1}$  มีความสัมพันธ์กับส่วนออสันฐานของสตาร์ช ดังนั้นอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 1047 ต่อ 1022  $\text{cm}^{-1}$  จึงแสดงถึงสัดส่วนของปริมาณสายเกลียวคู่ต่อส่วนออสันฐาน (van Soet *et al.*, 1995) จากผลการทดลองการเก็บรักษาเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวและเจลสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งก่อนและหลังการตัดแปรเป็นเวลานาน 74 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4°C พบว่าพิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (FTIR spectra) ที่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 36 และภาพที่ 37) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลจากสตาร์ชข้าวทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากปริมาณอะมิโลสที่มีอยู่ไม่เพียงพอในการเกิดอันตรกิริยาต่อกันเป็นโครงสร้างสามมิติของเจล สำหรับเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปร พบว่าพิคที่ 1047  $\text{cm}^{-1}$  และค่า RSA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น (ภาพที่ 38) ซึ่งแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเหนียว จากภาพที่ 39c พบว่าค่า RSA ของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปรมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษาและจากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง 24 - 74 ชั่วโมง และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษานานกว่า 74 ชั่วโมง ช่วงแรกของการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากสายโมเลกุลอะมิโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจัดเรียงตัวกันใหม่ได้โดยง่ายโดยเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของเจลสตาร์ช (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001) ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลอะมิโลสพหุเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านจำนวนมาก การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น (Goodfellow and Wilson, 1990; van Soet, 1994; Hoover, 2001) สำหรับช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงหรือเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นช่วงที่โครงสร้างผลึกเกิดการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์ (Hoover, 2001) จากการคำนวณอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชโดยใช้

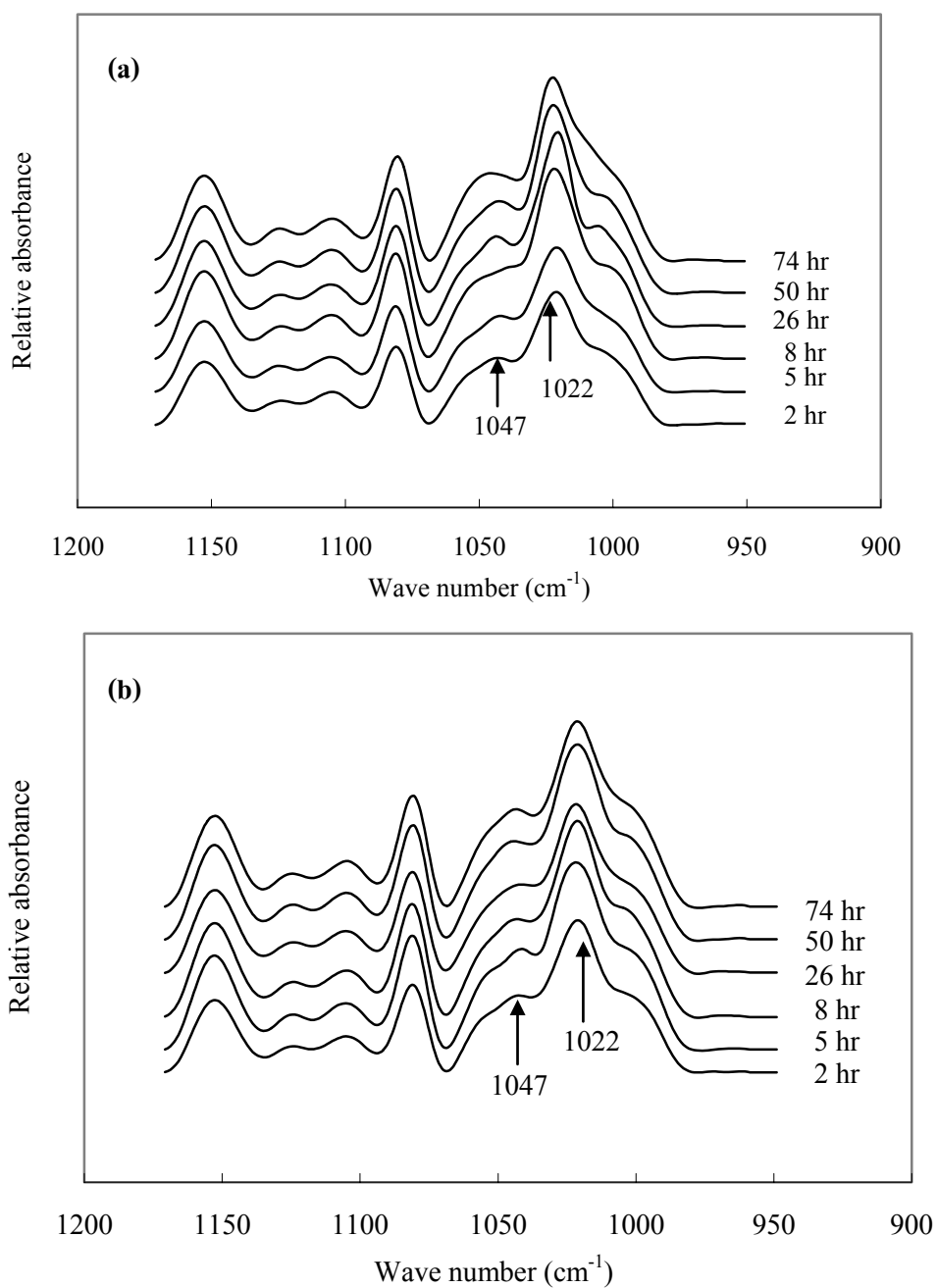
สมการ Avrami (Avrami equation) พบว่าอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการดัดแปรมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ  $0.91 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$  และ  $0.79 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$  ตามลำดับ



ภาพที่ 36 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลของสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการคั่วแปร (a) และหลังการคั่วแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b)

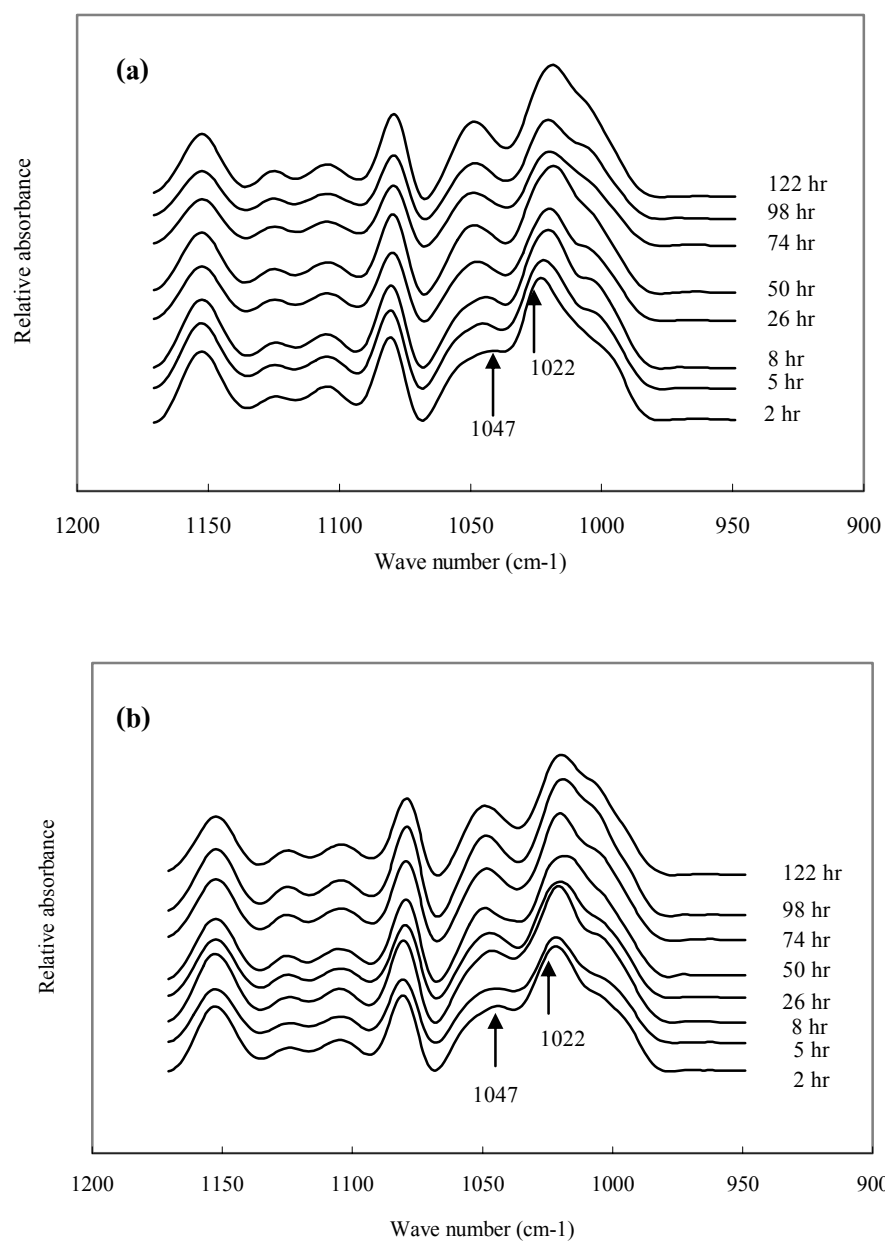
Figure36. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Glutinous rice starch gel





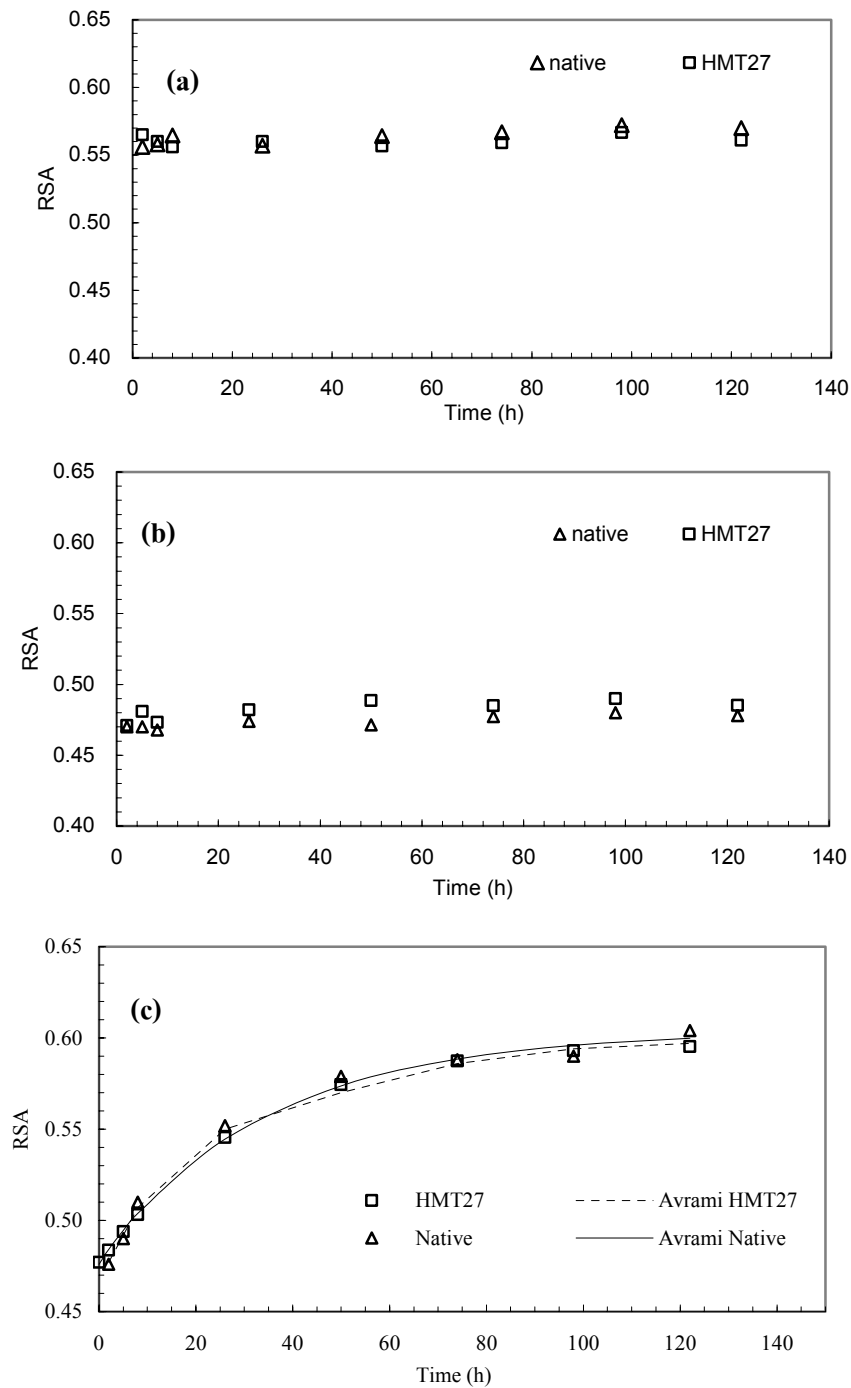
ภาพที่ 37 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลของสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการตัดแปรรูป (a) และหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b)

Figure37. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Jasmine rice starch gel



ภาพที่ 38 ลักษณะกราฟการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ สำหรับ เจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรรูป (a) และหลังการตัดแปรรูปด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b)

Figure38. FTIR spectra at various storage times for (a) native and (b) heat-moisture treated at 27% moisture content of Chiang rice starch gel



ภาพที่ 39 ค่าสัดส่วนของปริมาณเกลียวคู่ต่อออสันฐาน (RSA) ของเจลสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเหนียว (c) ก่อนและหลังการตัดแปร ด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT27)

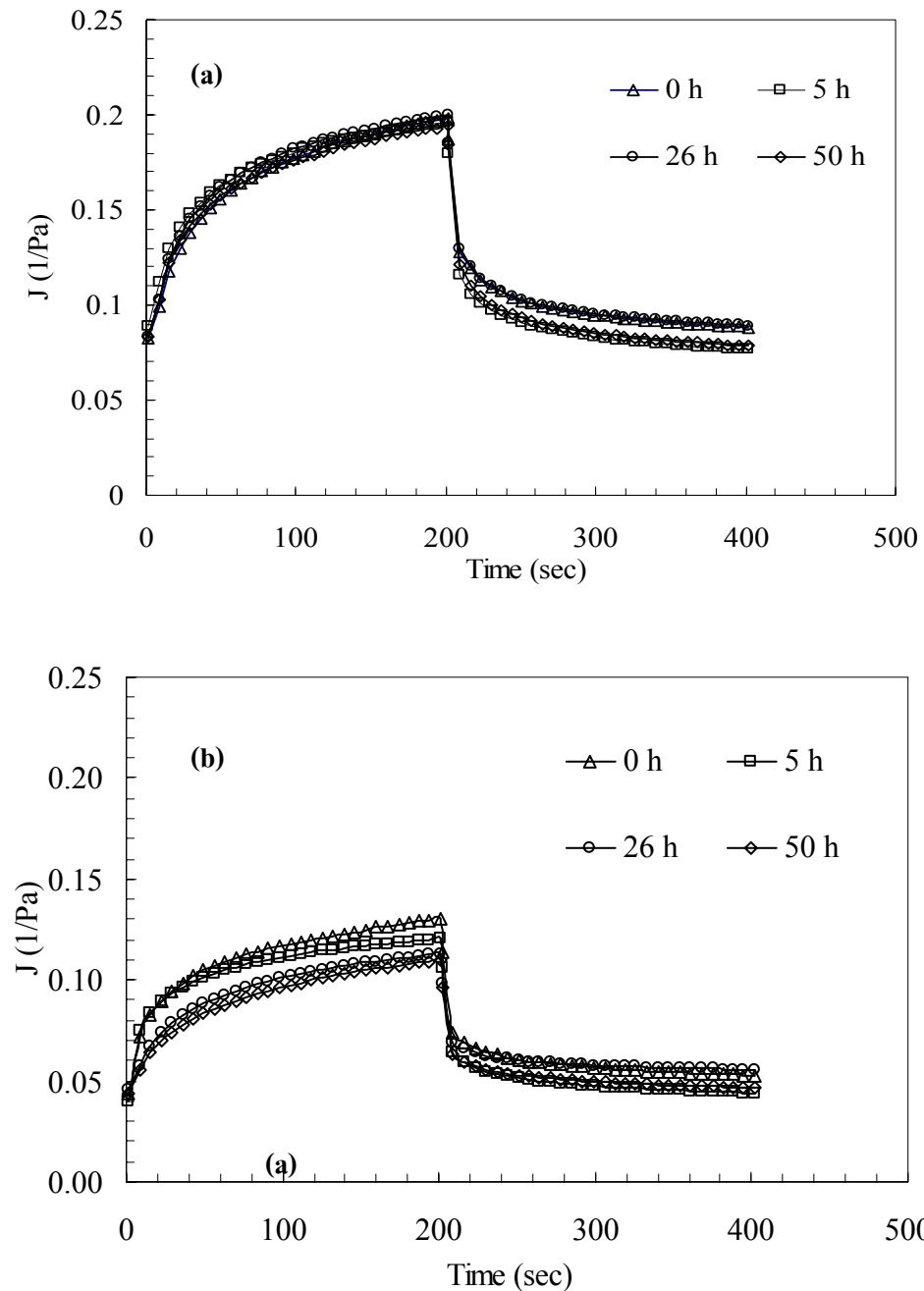
Figure 39. The change for the ratio of short-range molecular order to amorphous region (RSA) of native and heat-moisture treated at 27% moisture content of Glutinous (a), Jasmine (b) and Chiang (c) rice starch gel

### 3.4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงการคืบ (Creep study)

ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงการคืบของเจลสตาร์ชข้าวชนิดต่างๆ ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง ซึ่งได้กราฟการคืบและการคืนตัวของการคืบ (creep and creep recovery) ดังภาพที่ 40 และภาพที่ 41 จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การคืบด้วยวิธี Inokuchi (Sharma and Sherman, 1966; Sherman, 1966) พบว่าค่า instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ) ของเจลสตาร์ชข้าวเหนียว เจลสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเจลสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเท่ากับ 3984.40, 511.52 และ 6.69 Pa ตามลำดับ (ตารางที่ 11) ซึ่งค่า  $G_0$  แสดงถึงความแข็งแรงของเจล สำหรับสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูงพบว่าความแข็งแรงของเจลมีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสายโมเลกุลของอะมิโลสสามารถเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่เหนียวทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของเจลที่มีความแข็งแรง (Slade and Levine, 1987)

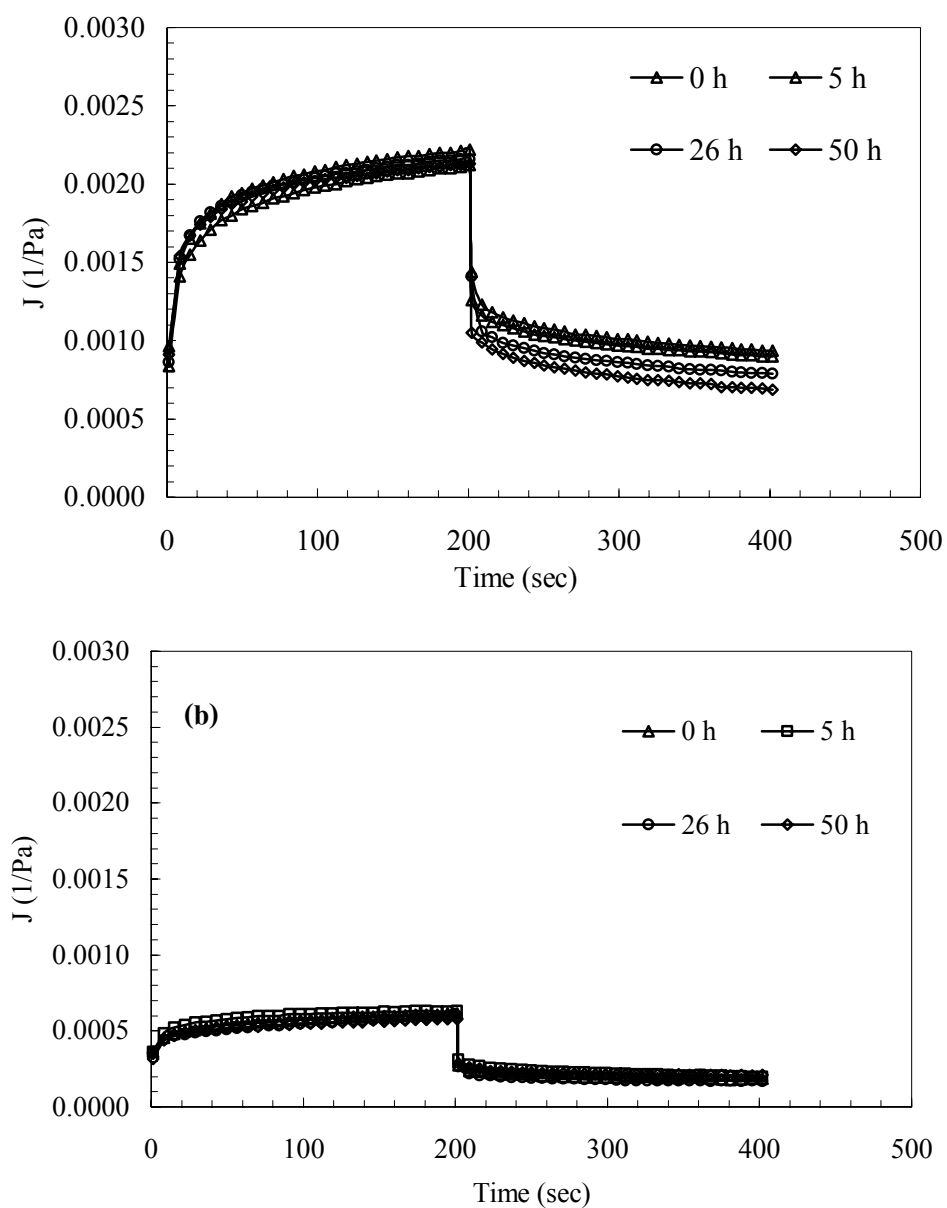
เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์การคืบของสตาร์ชข้าวหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่าค่า  $G_0$  ของเจลจากสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเจลของสตาร์ชข้าวทั้ง 2 ชนิดหลังการตัดแปรมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสายโมเลกุลของอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid complex) หรืออันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุล (AM-AMP) ที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นยังคงปรากฏอยู่ในเจลของสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดนี้ จึงส่งเสริมให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มมากขึ้น สำหรับเจลของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น พบว่า  $G_0$  มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุล (AM-AMP) ที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น อาจถูกทำลายด้วยความร้อนขณะที่สตาร์ชเกิดเจลดีไนซ์ จากการศึกษาการเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเป็นระยะเวลา 50 ชั่วโมง พบว่าลักษณะกราฟการคืบของสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาใดๆ มีค่าไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) ดังภาพที่ 40 และภาพที่ 41 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังข้อ (3.4.1) แต่อย่างไรก็ตามพบว่ากราฟการคืบของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปรมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (ภาพที่ 42) ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสสูง ดังนั้นสายโมเลกุลของอะมิโลสจึงสามารถเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้มากขึ้นจึงทำให้เจลมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยพบว่าค่า  $G_0$  ของสตาร์ชข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปรในช่วงเวลา 26 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 43c) ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR (ภาพที่ 39c) จากนั้น

พบว่าค่า  $G_0$  เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเก็บรักษาในช่วง 26-50 ชั่วโมงนานกว่า 26 ชั่วโมง และมีค่าเข้าสู่สมดุลเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 50 ชั่วโมง



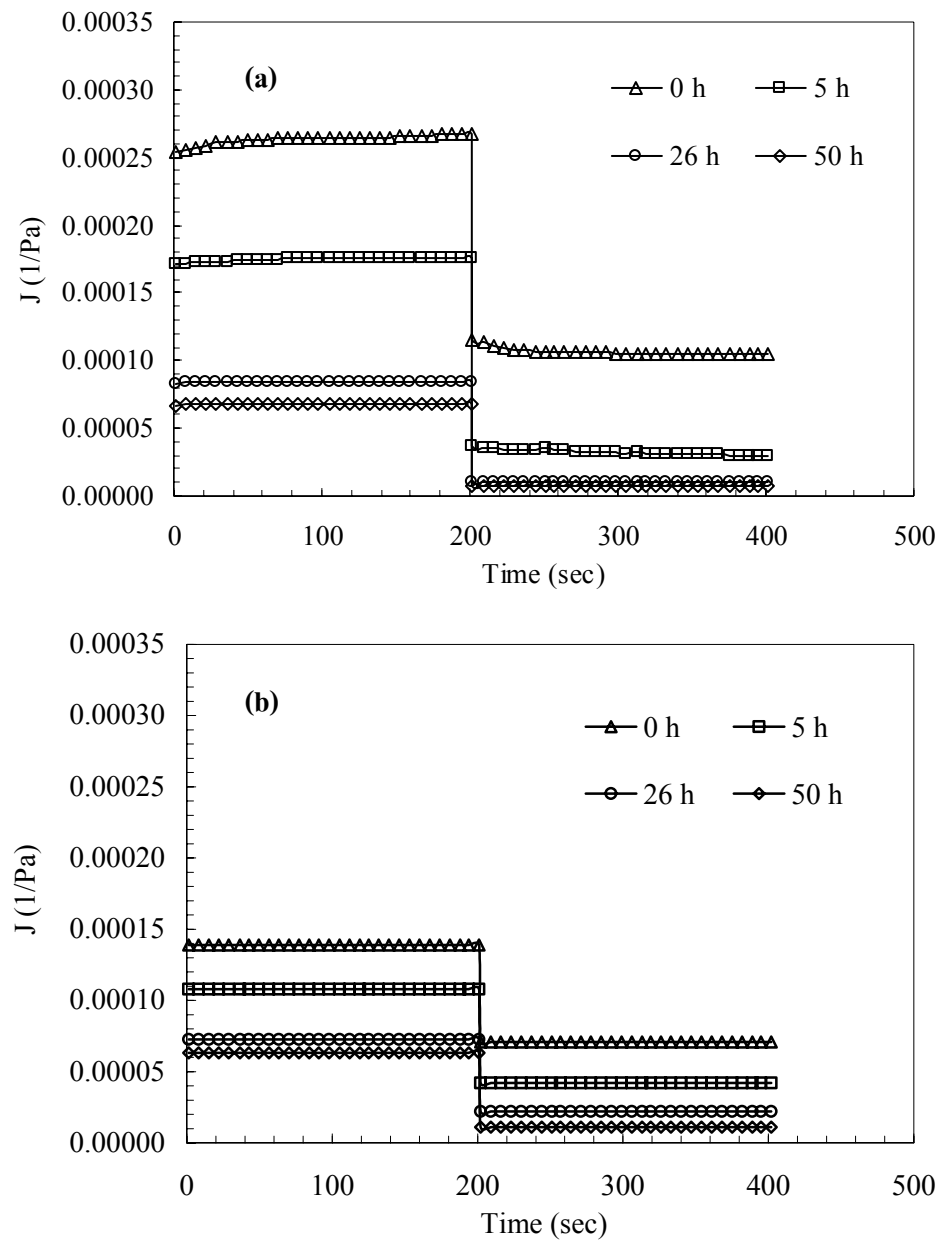
ภาพที่ 40 การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (a) และเจลสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง

Figure 40. Creep compliance and creep recovery for native and HMT27 Glutinous rice starch gels after storage at 4°C for 50 hours



ภาพที่ 41. การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (a) และสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง

Figure 41. Creep compliance and creep recovery for native and HMT27 Jasmine rice starch gels after storage at 4 °C for 50 hours.



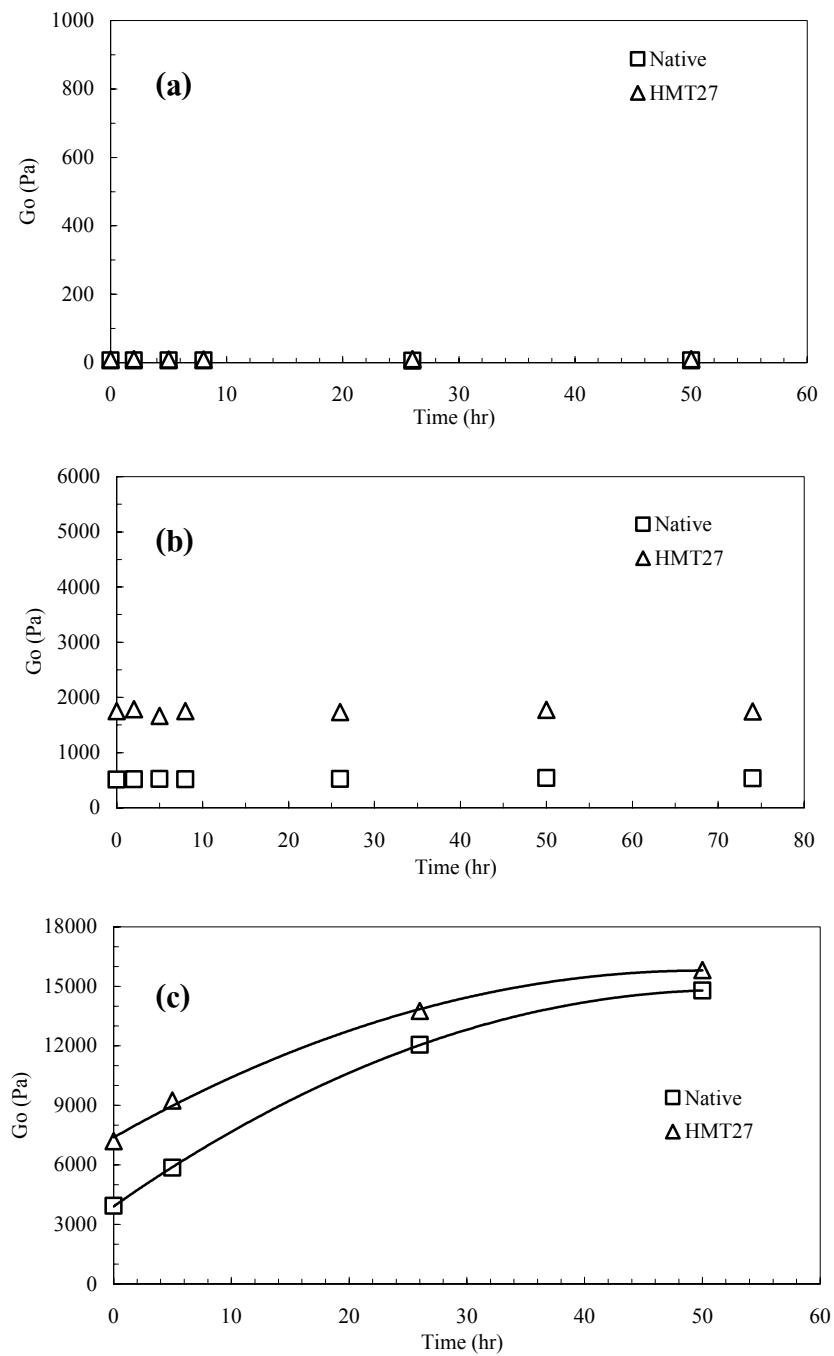
ภาพที่ 42. การคืบและการคืนตัวของการคืบของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (a) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (b) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 50 ชั่วโมงโดยทำการวัดที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และ 10 Pa

Figure 42. Creep compliance and creep recovery for native and HMT27 Chaing rice starch Gels after storage at  $4^{\circ}\text{C}$  for 50 hours



ตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์จากการศึกษาการคืบของสตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสตาร์ชข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 25 ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 ชั่วโมง

Starch	Treatment	Time	Ideal elastic	Viscoelastic			Viscosity
			Go (Pa)	G1 (Pa)	n1 (Pa.s)	t1 (sec)	nn (Pa.s)
Glutinous	Native	0	13.66±2.79	13.96±0.73	(2.11±0.02)x10 <sup>2</sup>	18.61±0.16	(5.82±0.05)x10 <sup>3</sup>
		5	12.66±1.82	13.32±1.17	(2.00±0.04)x10 <sup>2</sup>	18.05±0.12	(5.32±0.01)x10 <sup>3</sup>
		26	12.01±1.22	12.40±0.39	(1.97±0.02)x10 <sup>2</sup>	18.68±0.54	(5.49±0.02)x10 <sup>3</sup>
		50	13.14±2.75	13.26±0.85	(2.05±0.01)x10 <sup>2</sup>	19.98±0.20	(5.49±0.01)x10 <sup>3</sup>
	HMT27	0	20.97±2.37	22.73±0.16	(3.37±0.09)x10 <sup>2</sup>	19.31±0.40	(8.80±0.01)x10 <sup>3</sup>
		5	21.86±3.97	24.67±0.26	(3.80±0.01)x10 <sup>2</sup>	19.82±0.10	(8.39±0.04)x10 <sup>3</sup>
		26	23.71±1.26	24.05±0.47	(3.78±0.04)x10 <sup>2</sup>	19.40±0.55	(8.49±0.04)x10 <sup>3</sup>
		50	24.20±1.32	24.52±0.19	(3.80±0.09)x10 <sup>2</sup>	19.50±0.28	(8.54±0.05)x10 <sup>3</sup>
Jasmine	Native	0	1030.99±42.46	1258.38±21.75	(2.48±0.09)x10 <sup>4</sup>	17.84±0.14	(3.78±0.09)x10 <sup>5</sup>
		5	1164.61±28.48	1250.45±115.31	(2.53±0.04)x10 <sup>4</sup>	17.47±0.08	(3.68±0.06)x10 <sup>5</sup>
		26	1106.45±49.83	1295.06±28.48	(2.57±0.01)x10 <sup>4</sup>	17.16±1.21	(3.60±0.01)x10 <sup>5</sup>
		50	1173.66±40.99	1244.38±32.60	(2.51±0.04)x10 <sup>4</sup>	17.52±0.04	(3.70±0.02)x10 <sup>5</sup>
	HMT27	0	1750.91±50.41	6205.52±341.20	(9.27±0.04)x10 <sup>4</sup>	18.66±0.53	(2.18±0.08)x10 <sup>6</sup>
		5	1736.30±39.74	6203.81±145.63	(9.24±0.03)x10 <sup>4</sup>	18.88±1.13	(2.12±0.09)x10 <sup>6</sup>
		26	1731.03±39.18	6231.14±152.58	(9.47±0.03)x10 <sup>4</sup>	18.57±0.59	(2.23±0.09)x10 <sup>6</sup>
		50	1776.62±38.22	6582.91±515.38	(9.30±0.04)x10 <sup>4</sup>	18.41±0.12	(2.24±0.07)x10 <sup>6</sup>
Chiang	Native	0	3938.01±83.15	-	-	-	-
		5	5847.95±85.87	-	-	-	-
		26	12048.19±79.79	-	-	-	-
		50	14792.90±132.96	-	-	-	-
	HMT27	0	7194.25±57.54	-	-	-	-
		5	9236.00±99.67	-	-	-	-
		26	13755.16±43.99	-	-	-	-
		50	15822.78±81.11	-	-	-	-



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ของค่า instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ) กับเวลาการเก็บรักษาของสตาร์ชข้าวเหนียว (a) สตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 (b) และสตาร์ชข้าวเลี้ยง (c) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 27 (HMT27)

Figure 43. Relationship of instantaneous elastic modulus ( $G_0$ ) of native and heat-moisture treated starches at 27% moisture content of Glutinous (a), Jasmine (b) and Chiang (c) rice starch gel at storage time

## บทที่ 4

### สรุป

1. การตัดแปรรสสารข้าวด้วยวิธีความร้อนสูง ส่งผลให้สายโมเลกุลภายในเม็ดสสารข้าว เกิดอันตรกิริยาต่อกันในบริเวณอัญฐาน โดยสสารข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (สสารข้าวเหนียว) เมื่อผ่านการตัดแปรรด้วยความร้อนสูงพบว่าเกิดโครงสร้างผลึกแบบ V (V-type crystallinity) เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสายโมเลกุลอะมิโลสกับไขมัน (AM-lipid complex) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรเพิ่มสูงขึ้น พบว่าอันตรกิริยานี้ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับสสารข้าวปริมาณอะมิโลสปานกลาง (สสารข้าวขาวดอกมะลิ 105) และ สสารข้าวปริมาณอะมิโลสดำ (สสารข้าวเหนียว) เมื่อผ่านการตัดแปรรด้วยความร้อนสูง พบว่า ปริมาณผลึก (RC) และสัดส่วนของ โมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ต่อส่วนอัญฐาน (RSA) มีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากกึ่งก้านของสายโมเลกุลอะมิโลสเพคตินสามารถเกิดอันตรกิริยากับสาย โมเลกุลของอะมิโลส (AM-AMP interaction) ทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึกภายในเม็ด สสารข้าว และเมื่อระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรเพิ่มสูงขึ้น พบว่า RC และ RSA มีค่าลดลง

2. การเกิดอันตรกิริยาของสายโมเลกุลภายในเม็ดสสารข้าวที่ผ่านการตัดแปรรด้วยความร้อนสูง (ดังสรุปในข้อ 1) ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน และอุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืดของสสารข้าวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความหนืดปรากฏ ค่ากำลัง การพองตัวและความสามารถในการละลายและการแตกตัวของเม็ดสสารข้าวมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรรด้วยความร้อนสูงส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสสารข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และเมื่อปริมาณอะมิโลสในสสารข้าวและระดับความชื้นที่ใช้ในการตัดแปรรมีค่าเพิ่มขึ้น ก็ยังส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างของสสารข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับสสารข้าวที่มีปริมาณ อะมิโลสปานกลาง (สสารข้าวขาวดอกมะลิ 105) และสสารข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (สสารข้าวเหนียว) เมื่อผ่านการตัดแปรรด้วยความร้อนสูง พบว่าลักษณะเจลที่ได้มีความแข็งแรงและความ ยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลสสารข้าวเหนียวและเจลสสารข้าวขาว ดอกมะลิ 105 ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรร แต่สำหรับเจลของสสารข้าวเหนียวพบว่าสามารถ เกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสสารข้าวเหนียวทั้งก่อนและหลังการตัดแปรรมีค่าไม่แตกต่างกัน

3. จากโครงสร้าง และสมบัติของสสารข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการตัดแปรรด้วยความร้อนสูง โดยเฉพาะสสารข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง พบว่ามีสมบัติที่ใกล้เคียงกับสสารข้าว ที่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีทางเคมีแบบเชื่อมข้าม (cross-linking) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน อุตสาหกรรมอาหารที่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง และใช้แรงเฉือนในกระบวนการผลิต

เช่น อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง เป็นต้น ดังนั้นการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจึงเป็นการเพิ่มแนวทางในการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของสตาร์ชข้าวโดยปราศจากการปนเปื้อนจากสารเคมี

### **ข้อเสนอแนะ**

เพื่อให้การประยุกต์ใช้สตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ควรทำการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่อื่น ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ การคงตัวต่อกรดและด่าง ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และความสามารถในการถูกย่อยด้วยกรด เป็นต้น ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ และควรศึกษาถึงความเหมาะสมของเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชด้วยวิธีความร้อนขึ้น โดยต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานและต้นทุนในการผลิต

## เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. 2546. การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ ในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2548. ปริมาณและมูลค่าสินค้า (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.oae.go.th> (10 ตุลาคม 2548)
- ศูนย์วิจัยข้าว. 2548. สถานการณ์การผลิตข้าว (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.doa.go.th/rri/> (10 ตุลาคม 2548)
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 147: 342-347.
- Abraham, T. E. 1993. Stabilization of paste viscosity of cassava starch by heat-moisture treatment. *Starch*. 45: 131-135.
- Adebowale, K. O. and Lawal, O. S. 2002. Effect of annealing and heat moisture conditioning on the physicochemical characteristics of Bambara groundnut (*Vandzeia subterranea*) starch. *Nahrung/Food*. 46: 311-316.
- Adebowale, K. O. and Lawal, O. S. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. *Food Hydrocolloid*. 17: 265–272.
- Adebowale, K. O., Olu-Owolabi, B. I., Olawumi, E. and Lawal, O. S. 2005a. Funtional properties of native, physically and chemically modified breadfruit (*Artocarpus artilis*) starch. *Industrial Crops and Products*. 21: 343-351.
- Adebowale, K. O., Afolabi, T. A. and Olu-Owolabi, B. I., 2005b. Hydrothermal treatments of Finger millet (*Eleusine coracana*) starch. *Food Hydrocolloid*. 19: 974-983.

- Adebowale, K. O., Olu-Owolabi, B. I., Olayinka, O. O and Lawal. O. S. 2005c. Effect of heat-moisture treatment and annealing on physicochemical properties of red sorghum starch. *African Journal of Biotechnology*. 4(9): 928-933.
- Ak, M. M. and Gunasekaran, S. 2001. Linear viscoelastic methods. In *Nondestructive food evaluation*. (Gunasekaran, S., ed.). Marcel Dekker, New York.
- AOAC. 2000. *Official Methods of Analysis*. 16<sup>th</sup> Ed. Association of Official Analytical Chemists Washington.
- Avrami, M. 1941. Granulation, phase change, and microstructure, kinetics of phase change. III. *J. Chem. Phys.* 9: 177-184.
- Bagley, E. B. and Christianson, D. D. 1982. Swelling capacity of starch and its relationship to suspension viscosity effect of cooking time, temperature and concentration. *J. Texture Stud.* 13: 115-126.
- BeMiller, J. N. 1997. Starch modification : challenges and prospect. *Starch*. 49: 127-131.
- Bhattacharya, K. R., Sowhagya, C. M. and Indudhara Swamy, Y. M. 1982. Quality Profile of Rice : A tentative Sheme for classification. *J. Food Sci.* 47: 564-569.
- Billiaderis, C. G. and Zawistowski, J. 1990. Viscoelastic behavior of aging starch gels: effect of concentration, temperature, and starch hydrolyzates on network properties. *Cereal Chem.* 67: 240-246.
- Billiaderis, C. G. and Tonogai, J. R. 1991. Influence of lipids on thermal and mechanical properties of concentrated starch gels. *J. Agric. Food Chem.* 39: 833-840.
- Billiaderis, C. G. 1992. Characterization of starch network: by small strain dynamic rheometry. In R. J. Alexander and H. F. Zobel (ed.), *Developments in carbohydrate chemistry*, 87-135. Minnesola: American Association of Cereal Chemists.
- Billiaderis, C. G. and Juliano, B. O. 1993. Thermal and mechanical-properties of concentrated rice starch gels of varying composition. *Food Chem.* 48(3): 243-250.
- Cael, J. J., Koenig, J. L. and Blackwell, J. 1973. Infrared and Raman spectroscopy of carbohydrates. Part III: Raman spectra of the polymorphic forms of amylose. *Carbohydr. res.* 29: 123-134.

- Caplin, C. 2004. Amylose and Amylopectin (online). Available:  
<http://www.lsbu.ac.uk/water/hystah.html> (6 August 1998)
- Clark, A. H. and Ross-Murphy, S. B. 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Advanced polymer Science*, 85: 57-192.
- Colas, B. 1986. Flow behavior of crosslinked corn starch. *Lebensmittel wissenschaft U. Technol.* 19: 308-311.
- Collado L. S. and Corke, H. 1999. Heat-moisture treatment effects on sweetpotato starches differing in amylose content. *J. of Food Chem.* 65: 339-346.
- Colwell, K. H., Axford, D. W. E. Chamberlain, N. and Elton, G. S. H. 1969. Effect of storage temperature on the aging of concentrated wheat starch gels. *J. Sci. Food Agric.* 20: 550-555.
- Cooke, D. and Gidley, M. J. 1992. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization: origin of enthalpic transition. *Carbohydr. Res.* 227: 103-112.
- Donovan, J. W., Lorenz, K. and Kulp, K. 1983. Differential scanning calorimetry of heat-moisture 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.* 33: 415-420.
- Elliasson, A.-C. 1985. Retrogradation of starch as measured by differential scanning calorimetry. In *New Approaches to Research on Cereal Carbohydrates.* (Hill, R. D. and Munck, L., eds), p. 93-98. Elsevier Science Publisher. Amsterdam.
- Ellis, H. S., Ring, S. G. and Whittam, M. A. 1989. A comparison of the viscous behavior of wheat and maize starch pastes. *J. Cereal sci.* 10: 33-44.
- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K. and Delcour, J. A. 1997. Effects of hydrothermal treatments on the rheological properties of potato starch. *Carbohydr. Res.* 297: 347-356.
- Evans, I. D. and Haisman, D. R. 1979. Rheology of gelatinized starch suspension. *J. Texture stud.* 10: 347-370.

- French, D. 1984. Organization of starch granules. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller and E.F. Passcall (eds.), Starch chemistry and Technology. 183-247. New York: Academic Press.
- Gidley, M. J. and Bociek, S. M. 1985. Molecular organization in starches: A  $^{13}\text{C}$ CP/MAS NMR study. J. AM. Chem. Soc. 107: 7040-7044.
- Gidley, M. J. and Bulpin, P. V. 1987. Crystallization of mato-oligosaccharides as models of the crystalline forms of starch: minimum chain-length requirement of the formation of double helices. Carbohydr. Res. 161: 291-300.
- Goodfellow, B. and Wilson, R. H. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. Biopolymers. 30: 1183-1189.
- Gudmundsson, M. 1994. Retrogradation of starch and the role of its components. Thermoclimica Acta. 246 : 329-341.
- 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.
- Hansen, L.M., Hosney, R. C. and Faubion, J. M. 1990. Oscillatory probe rheometry as a tool for determining the rheological properties of starch-water system. J. Texture Stud. 21: 213-224.
- Hoover, R., Swamidass, G. and Vasanthan, T. 1993. Studies on the physicochemical properties of native, defatted, and heat-moisture treated pigeon pea (*Cajanus cajan* L) starch. Carbohydrate Res. 246: 185-203.
- Hoover, R. and Vasanthan, T. 1994. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, tuber, and legume starches. Carbohydr. Res. 252: 33-53.
- Hoover, R. and Manuel, H. 1996a. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. Food Research International. 29: 731-750.
- Hoover, R. and Manuel, H. 1996b. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and Amylomaize V starches. J. Cereal Sci. 23: 153-162.



- Hoover, P. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydr. Polym.* 45: 253-267.
- Imberty, A., Chanzy, H., Perez, S., Buleon, A. and Tran, V. 1988. The double helical nature of the crystalline part of A-starch. *J. Molecular Bio.* 201: 365-378.
- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., Donald, A. M., Bras, W., Derbyshire, G. E., Mant, G. R. and Ryan, A. J. 1994. In situ simultaneous small and wide-angle x-ray scattering: a new technique to study starch gelatinization: *J. Polym. Sci., Polym Phys. Ed.* 32: 1579-1583.
- Juliano, B. O. 1984. Rice starch: Production, Properties, and Uses. In *Starch: Chemistry and Technology*. (Whister, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E. F. eds). p. 507-528. Academic Press Inc. New York.
- Kawabata, A., Takase, N., Miyoshi, E., Sawayama, S., Kimura, T. and Kudo, A. 1994. Microscopic observation and X-ray diffractometry of heat-moisture treated starch granules. *Starch.* 46: 463-469.
- Kulp, K. and Lorenze, K. 1981. Heat-moisture Treatment of Starch: I Physicochemical Properties. *Cereal Chem.* 46-52.
- Lawal, O. S. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules.* 37: 268-277.
- Leach, H. W., McCowen, L. D. and Schoch, T. G. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chem.* 36: 534-544.
- Leach, H. W. 1965. Gelatinization of starch. In *Starch: Chemistry and Technology*. Vol I. (Whistler, R. L. Paschell, E. F. BeMiller, J. N. and Roberts, H. J., eds. p. 289-307. Academic Press. New York.
- Levine, H., Slade, L. 1986. A polymer physicochemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). *Carbohydr. Polym.* 6: 213-244.
- Lii, C. Y., Shao, Y. Y. and Tseng, K. H. 1995. Gelation Mechanism and rheological properties of rice starch. *Cereal Chem.* 72(4): 393-400.

- Lii, C.-Y., Tsai, M.-L. and Tseng, K.-H. 1996. Effect of amylose content on the rheological properties of rice starch. *Cereal Chem.* 73(4): 415-420.
- 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.
- Lorenz, K. and Kulp, K. 1982. Cereal and root starch modification by heat-moisture treatment. 1. Physicochemical properties. *Starch.* 34: 50-54.
- Lu, S., Chen, L.-N. and Lii, C.-Y. 1997. Correlations between the fine structure, physicochemical properties, and retrogradation of amylopectins from Taiwan rice varieties. *Cereal Chem.* 74(1): 34-39.
- Maningat, C. C. and Seib, P. A. 1992. Starch: Occurrence, isolation, and properties of starch granules. In AACC Short Course—"Structure, Properties, and Food use" December 3-4, 1992. Chicago.
- Miles, M. I., Morris, V. J., Orford, P. D. and Ring, S. G. 1985. The role of amylose and amylopectin in gelation and retrogradation of starch. *Carbohydr. Res.* 135: 271-281.
- Mohsenin, N. N. 1970. Physical properties of plant and animal Material. Vol 1. Gordon and Breach. New York.
- Naksriaporn, T., Tattiyakul, J. and Pradipasena, P. 2005. Heat-moisture modification of Thai yam *Dioscorea hispida* Dennst starch. The 3<sup>rd</sup> conference on starch technology. 287-293.
- Noel, T. R., Ring, S. G. And Whittam, M. A. 1993. Physical properties of starch products. Structure and functional. In E. Dickinson, and P. Walstra (ed.), *Food colloids and polymers: stability and mechanical properties*, 126-135. Cambridge, Royal Society of Chemistry.
- Noosuk, P., Hill, S. E., Pradipasena, P. and Mitcheli J. R. 2003. Structure-viscosity relationships for Thai rice starches. *Starch/starke.* 55: 337-344.
- Noosuk, P., Hill, S. E., Farhat, I. A., Pradipasena, P. and Mitcheli J. R. 2005. Relationship between viscoelastic properties and starch structure in rice from Thailand. *Starch/starke.* 57: 587-598.

- Olayinka, O. O. Adebowale, K. O. and Olu-Owolabi, B. I. 2006. Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch. *Food Hydrocolloids*. Inpress.
- Orford, P. D., Ring, S. G., Carroll, V., Miles, M. J. and Morris, V. J. 1987. The effect of concentration and botanical source on the gelation and retrogradation of starch. *J. Sci. Agric.* 39: 169-177.
- Ramesh, M., Mitchell, J. R., Jumel, K. and Harding, S. E. 1999. Amylose content of rice starch. *Starch/Starke*. 8-9: 311-313.
- Reddy, R. K., Zakiuddin, S. and Bhattacharya, K. R. 1993. The fine structure of rice starch amylopectin and its relation to the texture of cooked rice. *Carbohydr. Polym.* 22: 267-275.
- Sanders, E. B. Thompson, D. B. and Boyer, C. D. 1990. Thermal behavior during gelation and amylopectin fine structure for selected maize genotype as expressed in four inbred lines. *Cereal Chem.* 67: 594-602.
- Schoch, T. J. 1964. Swelling power and solubility of granular starch. In *Methods in Carbohydrate Chemistry*. (Whistler, R. L., ed)p. 106-108. Academic Press. New York.
- Schoch, T. J. and Maywald, F.C. 1968. Preparation and properties of various legume starch. *Cereal Chem.* 45: 564-573.
- Shanthy, A. P., Sowhagya, C. M. and Bhattachaya, K. R. 1980. Simplified determination of water-insoluble amylose content of rice. *Starch/Starke*. 12: 409-411.
- Sharma, F. and Sherman, P. 1966. The texture of ice cream. 2. Rheological properties of frozen ice cream. *Journal of Food science*. 31: 399-706.
- Sherman, P. 1970. *Industrial rheology with particular reference to foods, Phamaceutical, and cosmetics*. Academic Press. London
- Sherman, P. 1966. The texture of ice cream. 3. Rheological properties of mix and melted ice cream. *Journal of Food science*. 31: 707-716.
- Shi, Y. C. and Seib, P. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. *Carbohydr. Res.* 227: 131-145.

- Singh R. P. and Heldman D. R. 1993. *Introductions to food engnerring*, Second Edition, Academic Press New York.
- Singh, S., Raina, C. S. Bawa, A. S. and Saxena, D. C. 2005. Effect of heat-moisture treatment and Acid modification on rheological, textural, and differential scanning calorimetry characteristics of sweetpotato sarch. *Food Engineering and Physical Properties*. 70: 373-378.
- Slade, L. and Levine, H. 1987. Recent advances in starch retrogradation. In *Industrial polysaccharides. The impact of Biotechnology and Advanced Methodologies*; Stivala, S. S., Crescenzi, V., Dea, I. C. M., Eds.; Gordon and Breach Science: New york, 1987. 387-430.
- Smith, R. J. 1979. *Food Carbohydrate*. The AVI publishing Co., Westort, Concentricut: 416.
- Sowhagya, C. M. and Bhattacharya, K. R. 1979. Simplified determination of amylose in milled rice. *Satrch/starke*. 31(5): 159-163.
- Stute, R. 1992. Hydrothermal modification of starches: The difference between annealing and heat/moisture-treatment. *Starch/Starke*. 44: 205–214.
- Takaya, T., Sano, C. and Nishiami, K. 2000. Thermal studies on the gelatinization and retrogeadation of heat-moisture treated starches. *Carbohydr. polym.* 41: 97-1000
- Tester, R. F. and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effect of amylopectin, amylose and lipids. *Cereal Chemistry*, 67: 551–559.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, x. 2004. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationships. *World's Poultry science Journal*, 60: 186-195
- Tohmas, D. J. and Atwell, W. A. 1999. Starch structure. In *Starches*. (Tohmas, D. J. and Atwell, W. A. eds.). p. 1–11. American Association of Cereal Chemists. Minnesota.
- Tsai, M., Li, C. and Lii, C. 1997. Effect of granular structures on the pasting behaviors of starches. *Cereal Chem.* 74(6): 750-757.

- Vandeputte, G.E., Vermeulen R., Geeromsb and J. Delcour, J.A. 2003. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *Journal of Cereal Science*. 38: 61–68.
- van Soet, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D. J. F. and Vliegthart, J. F. G. 1994. Retrogradation of potato starch as studied by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. *Starch/Starke*. 46(12): 453-457.
- van Soet, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D. J. F. and Vliegthart, J. F. G.. 1995. Shot-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydr. Res*. 279: 201-214.
- Vermeulen, R. Goderis, B. and Delcour, J. A. 2006. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. *Carbohydr. Polym*. 64: 364-375.
- Yamamoto, K., Sumie, S. and Toshio, O. 1973. Properties of rice starch prepared by askali method with various condition. *Denpun Kagaku*. 20: 99-102.
- Zobel, H. F. 1964. X-ray analysis of starch granules. In *Method in Carbohydrate Chemistry*. (Whistler, R. L. Smith, R. J. and Bemiller, J. N., eds). p. 109-113. Academic press. Inc., New York.
- Zobel, H. F. 1984. Gelatinisation of starch and mechanical properties of starch pastes, pp. 285-309. In *Starch: Chemical and technology*. 2<sup>nd</sup> ed. (Whistler, R. L. BeMiller, J. N. and Paschell, E. F., eds). Academic Press, Inc., New York.
- Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. 1988. Starch gelatinization: An x-ray diffraction study. *Cereal Chem*. 65: 443.

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี

#### 1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (A.O.A.C, 2000)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. เดซิเคเตอร์ (desiccator)
4. ภาชนะอะลูมิเนียมมีฝาปิด (moisture can)

##### วิธีการ

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก
2. ทำซ้ำกับข้อที่ 1 จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างที่ต้องการให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ประมาณ 1-2 กรัมลงในภาชนะหาความชื้นซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว
4. นำไปอบในตู้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาประมาณ 5-6 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิของภาชนะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำกลับไปเข้าตู้อบอีกครั้ง
5. ทำซ้ำเช่นข้อที่ 4 จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
6. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W_1}$$

กำหนดให้  $W_1$  คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

## 2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (A.O.A.C, 2000)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน (soxhlet apparatus) ประกอบด้วยขวดกลม (สำหรับใส่ตัวทำละลาย) ซอกเลต (soxhlet) อุปกรณ์ควบแน่น (condenser) และเตาให้ความร้อน (heating mantle)
2. หลอดใส่ตัวอย่าง (extraction thimble)
3. สำลี
4. ตู้อบไฟฟ้า
5. เครื่องชั่งไฟฟ้า
6. โถดูดความชื้น (desiccator)

### สารเคมี

1. ปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether)

### วิธีการ

1. อบขวดกลมสำหรับหาปริมาณไขมัน ซึ่งมีขนาดบรรจุ 250 มิลลิลิตร ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ถึงอุณหภูมิของขวดกลมลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก
2. ทำซ้ำเช่นข้อที่ 1 จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 – 3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนักประมาณ 1 - 2 กรัม ห่อให้มีคิซิดแล้วใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง คลุมด้วยสำลีเพื่อให้สารตัวทำละลายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
4. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในซอกเลต เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในขวดหาไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร แล้ววางบนเตาให้ความร้อน
5. ทำการสกัดไขมันเป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยปรับเตาความร้อนให้หยดของสารทำละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่อนาที
6. เมื่อครบ 14 ชั่วโมงแล้ว นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจากซอกเลต และกลั่นเก็บสารทำละลายจนเหลือสารทำละลายในขวดกลมเพียงเล็กน้อยด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศ
7. นำขวดหาไขมันอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $80-90^{\circ}\text{C}$  จนแห้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ถึงอุณหภูมิของขวดกลมลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก



8. ทำซ้ำเช่นข้อที่ 7 จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
9. คำนวณหาปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \frac{W_2 \times 100}{W_1}$$

กำหนดให้  $W_1$  คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

$W_2$  คือ น้ำหนักไขมันหลังอบ (กรัม)

### 3. การวิเคราะห์โปรตีนโดยวิธี Kjeldahl Method (AOAC, 2000)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดย่อยโปรตีน ขนาด 200 มิลลิลิตร
2. อุปกรณ์ให้ความร้อน
3. อุปกรณ์กลั่นโปรตีน (Semi-microdistillation)
4. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. ปิเปต ขนาด 5, 10 มิลลิลิตร
7. บิวเรตต์
8. ตู้ดูดควัน
9. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
10. ลูกแก้ว (Glass bead)
11. เตาย่อย (VELP DK6)
12. เครื่องดักจับไอกรด (scrubber)

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ )
2. ตัวเร่งผสม (Catalyst) ระหว่าง  $CuSO_4$  กับ  $K_2SO_4$  อัตราส่วน (Cu :  $K_2SO_4$ ) คือ 1 : 10
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %
4. กรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (HCl 0.1 N)
5. กรดบอริกเข้มข้น 4 %
6. โพแทสเซียมไฮโดรเจนซัลเฟต

7. อินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator ระหว่าง Methylene blue 0.1 กรัม กับ Methyl red 0.2 กรัม ละลายในแอลกอฮอล์ 90 % 100 มิลลิลิตร)

### วิธีการ

#### การทำมาตรฐานสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต
  - 1.1 ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตที่ผ่านการอบแห้ง (อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ให้ได้น้ำหนักอยู่ในช่วง 2.0 – 2.2 กรัม โดยเครื่องชั่งละเอียดบนที่กน้ำหนักที่ชั่ง
  - 1.2 นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าขวดให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
  - 1.3 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอน
2. การเตรียมสารละลาย 0.1 M HCl จากกรดเกลือเข้มข้น
  - 2.1 รินกรดเกลือเข้มข้นจากขวดลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร (ทำในตู้ควัน)
  - 2.2 ตวงกรดเกลือเข้มข้นให้มีปริมาตร 4.0 - 4.5 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร
  - 2.3 เทกรดเกลือเข้มข้นที่ตวงแล้วลงในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตรที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเข้ากันดี
  - 2.4 สารละลาย HCl ที่เตรียมขึ้นนี้มีความเข้มข้นประมาณ 0.1 M ถ้าเก็บในขวดแก้ว เพื่อเก็บสารละลายนี้ไว้ใช้ต่อไป
3. การทำมาตรฐานสารละลายกรดเกลือ
  - 3.1 ปิเปตสารละลายกรดเกลือมา 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย
  - 3.2 ฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด เขย่าสารละลายในขวดให้เข้ากัน
  - 3.3 ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานทุตียูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่งสารละลายในขวดเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์
  - 3.4 ไทเทรตซ้ำ 2 ครั้ง
  - 3.5 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดเกลือ

## วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน ประมาณ 1-2 กรัม ใสลงในขวดย่อยโปรตีน
2. การย่อย
  - 2.1. เติมตัวเร่งผสม (Catalyst) ระหว่าง  $\text{CuSO}_4$  กับ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ( $\text{CuSO}_4$  0.5 กรัม และ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  5 กรัม) ในขวดย่อยโปรตีน เพื่อเร่งปฏิกิริยาการย่อย
  - 2.2. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร (ค่อยๆ ไหลตามข้างขวด) เขย่าเบาๆ จนแห้ง ไม่จับเป็นก้อน ปิดปากขวดด้วยกระดาษแก้วกลม
  - 2.3. ย่อยบนอุปกรณ์ให้ความร้อนอ่อนๆ จนได้สารละลายสีเขียวใส
  - 2.4. ปล่อยให้เย็น
3. การกลั่น
  - 3.1. เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิลดลงแล้ว จึงเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %
  - 3.2. จัดอุปกรณ์กลั่น
  - 3.3. เติมกรดบอริกเข้มข้น 4 % ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วหยดอินดิเคเตอร์ 5-6 หยด นำไปรองรับของเหลวรองรับสารละลายที่กลั่นได้ โดยใช้ อุปกรณ์ควบแน่นจุ่มในสารละลายกรดบอริก
  - 3.4. กลั่นจนกระทั่งไม่มีแอมโมเนียเหลือ ให้ได้สารละลายที่กลั่นได้ประมาณ 150 มิลลิลิตร
4. การไทเทรต
  - 4.1. ไทเทรตสารละลายที่กลั่นได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน สังเกตสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงอ่อน จุดปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้
  - 4.2. ทำ blank โดยใส่สารเคมีและขั้นตอนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง แต่ไม่ใส่ตัวอย่าง

**สูตรคำนวณ**

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{1.4007 \times N \times (A-B) \times F}{W}$$

โดย A = ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับ blank

W = น้ำหนักตัวอย่าง

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)

F = แฟกเตอร์เท่ากับ 5.95

**4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000)****เครื่องมือและอุปกรณ์**

1. ถ้วยครุชเชิล
2. เตาไฟฟ้า
3. เตาเผา
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. เเดซิเคเตอร์

**วิธีการ**

1. เเผาครุชเชิลเพื่อหาน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัมใส่ครุชเชิล นำไปเผาบนเตาไฟฟ้าจนควันหมด
3. นำไปเผาจนได้ต่อในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทา
4. จากนั้นนำมาใส่เดซิเคเตอร์ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่ง เเผตัวอย่างซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม

**สูตรคำนวณ**

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละของน้ำหนั)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{(W_1 - W)}$$

โดย W = น้ำหนักของครุชเชิล (กรัม)

W<sub>1</sub> = น้ำหนักของครุชเชิลและตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W<sub>2</sub> = น้ำหนักของครุชเชิลและตัวอย่างหลังเผาน้ำหนักคงที่ (กรัม)

## 5. การวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลส

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างน้ำ
2. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

### สารเคมี

1. เอทานอล
2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มอล
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล
4. สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.2 %
5. กระจกทรงเบอร์ 4
6. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

### วิธีการ

#### 1. ปริมาณเทียบเท่าอะมิโลส (Amylose equivalent)

- 1.1. ชั่งสตาร์ช 100 mg นำไปละลายในเอทานอล 1 ml และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1 นอร์มอล) 10 ml
- 1.2. ให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่อุณหภูมิ 95°C นาน 5 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.3. นำสารละลายสตาร์ชในข้อ (1.2) มาปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 ml
- 1.4. ดูดสารละลายสตาร์ชจากข้อ (1.3) มา 5 ml เติมน้ำกลั่น 50 ml และปรับให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล
- 1.5. เติมสารละลายไอโอดีน 2 ml ปรับปริมาตรเป็น 100 ml และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 nm คำนวณค่าปริมาณเทียบเท่าอะมิโลสด้วยสมการที่ (1)
- 1.6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของอะมิโลสมาตรฐาน (Standard amylose) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับวิธีการข้างต้น (ข้อ 1.1-1.5) แต่ใช้สารละลายอะมิโลสมาตรฐาน ปริมาตร 1 ml แทนสารละลายสตาร์ช 5 ml (ข้อ 1.4)

## 2. ปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้ (Soluble amylose)

- 2.1. ชั่งสตาร์ช 100 mg นำไปละลายในเอทานอล 1 ml และน้ำกลั่น 50 ml
- 2.2. ให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 2.3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 ml แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
- 2.4. ดูดสารละลายสตาร์ชมา 5 ml แล้วทำการทดลองตามข้อ 1.4-1.5 คำนวณค่าปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้

### สูตรคำนวณปริมาณอะมิโลสเทียบเท่า/ปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้

$$AE = \frac{R \times a \times 20}{A \times r}$$

โดย	AE	=	ปริมาณอะมิโลสเทียบเท่า/ปริมาณอะมิโลสที่ละลายได้
	R	=	ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง
	A	=	ค่าการดูดกลืนแสงของ Standard amylose
	r	=	น้ำหนักตัวอย่าง (db)
	a	=	น้ำหนักของ Standard amylose

**ภาคผนวก ข การทำนายอัตราการเกิดรีโทรเกรดเดชันโดยใช้สมการ Avrami (Avrami equation)**

การศึกษาจลนศาสตร์ของการเกิดรีโทรเกรดเดชันของสตาร์ช ทำได้โดยการใช้สมการของ Avrami (Avrami, 1941) ในการทำนายการเกิดรีโทรเกรดเดชันที่เวลาต่างๆ โดยคำนวณจากสัดส่วนที่ยังไม่เกิดผลึกใหม่ในเวลาใดๆ  $U(t)$  ดังสมการที่ 10

$$U(t) = \exp(-kt^n) \quad (10)$$

เมื่อ  $k$  = อัตราการเติบโตของผลึก

$n$  = ค่าคงที่ Avrami

ค่า  $U(t)$  สามารถเขียนในรูปสัดส่วนที่ยังไม่เกิดผลึกใหม่ดังสมการที่ 11

$$U(t) = \frac{Y_\infty - Y_t}{Y_\infty - Y_0} \quad (11)$$

เมื่อ  $Y_t$  = พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการเกิดผลึกใหม่ (ได้แก่  $G'$ , RSA)

$Y_0$  = พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการเกิดผลึกใหม่ที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ )

$Y_\infty$  = พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการเกิดผลึกใหม่เมื่อเข้าสู่สมดุล ( $t = \infty$ )

เมื่อรวมสมการ 10 และ 11 เข้าด้วยกันจะได้สมการใหม่แสดงดังสมการที่ 12

$$Y(t) = Y_\infty - [(Y_\infty - Y_0) \exp(-kt^n)] \quad (12)$$

ค่า  $k$  และ  $n$  ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 1 โดยการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่า  $\log(-\ln [U(t)])$  และ  $\log(t)$

จากค่า  $k$  และค่า  $n$  ที่คำนวณได้สามารถนำไปคำนวณอัตราการเกิดรีโทรเกรดเดชัน (G) ด้วยสมการที่ 13

$$G = k^{1/n} \quad (13)$$

ค่าคงที่ Avrami ( $n$ ) มีความสัมพันธ์กับจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างการเติบโตของผลึกรอบๆ นิวเคลียสที่มีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Sherman, 1970) โดยพบว่าค่า  $n$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 4 ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกของการเกิดนิวเคลียส (Mandalkern, 1964) จากกลไกพื้นฐานของการเกิดรีโทรเกรดเดชัน พบว่าสตาร์ชสามารถเกิดนิวเคลียสขึ้นทันทีแล้วมีการพัฒนาเป็นโครงสร้างผลึกที่มีรูปร่างแบบแท่ง (rod-like) โดยมีค่า  $n$  เท่ากับ 1

**ภาคผนวก ค การคำนวณพารามิเตอร์ของการคืบ (Creep study) ด้วยวิธีของ Inokuchi (Inokuchi graphical procedure)**

การศึกษาศสมบัติวิเสโคอีลาสติกของเจสตาตาร์ช้าวโดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า Creep compliance  $J(t)$  ที่เวลาต่างๆ โดยค่า  $J$  คืออัตราส่วนของความเครียด ( $\epsilon$ ) ต่อค่าแรงเฉือน ( $\sigma$ ) จากกราฟของ Creep compliance (ภาพที่ 8) สามารถแบ่งการคำนวณออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้ (Sharma and Sherman, 1996 and Sherman, 1966):

(1) ช่วง instantaneous elastic compliance,  $J_0$ , (A-B) ซึ่งบ่งบอกถึงการที่พันธะภายในวัสดุมีการยึดตัวอย่างยืดหยุ่น ถ้าเอาแรงเฉือนออกวัสดุสามารถเกิดการคืนตัว (recovery) ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงดังสมการที่ (14)

$$J_0 = \frac{1}{G_0} = \frac{\epsilon_0(t)}{\sigma} \quad (14)$$

(2) ช่วง time-dependent retarded elastic compliance,  $J_R$ , (B-C) ซึ่งแสดงค่า retarded elastic modulus ( $G_R$ ), ความหนืด ( $\eta_R$ ) และ retard time ( $\tau$ ) ซึ่งเท่ากับ ( $\eta_R/G_R$ ) ช่วงนี้เป็นช่วงที่พันธะของวัสดุมีการแตกออกและคืนรูป (reform) โดยพันธะทั้งหมดไม่ได้แตกออกและคืนรูปที่อัตราเดียวกัน ดังนั้นค่า  $\tau$  จึงมีหลายค่า ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_i$ ) และค่า  $G$  และ  $\eta_R$  ก็มีหลายค่าเช่นกัน ( $G_1, G_2, G_3, \dots, G_i$  และ  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_i$ )

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรด้วยสมการอย่างง่าย ดังนี้

$$J_R = \frac{1}{G_R} = J_a(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = \frac{\epsilon_R(t)}{\sigma} \quad (15)$$

เมื่อ  $J_a$  คือค่าเฉลี่ยของค่า retarded elastic compliance

สมการที่ (15) สามารถเขียนในรูปแบบสมการที่มีหลายองค์ประกอบดังนี้

$$J_R = \sum_{i=1}^n J_i(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) = \sum_{i=1}^n J_i(1 - e^{-\frac{t}{\eta_i/G_i}}) \quad (16)$$

โดยที่  $\eta_i$  คือจำนวนขององค์ประกอบของค่าความหนืดซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า retarded elastic compliance



สามารถประยุกต์วิธีการคำนวณโดยใช้กราฟของ Inokuchi (1955) กับสมการ (16) ได้สมการดังนี้

$$Q = \sum_{i=1}^n J_i - \frac{\varepsilon_R(t)}{\sigma} \quad (17)$$

สมการ (17) แสดงถึงคือระยะห่างระหว่างเส้นตรง DCP กับเส้นโค้ง DCB ที่เวลาใด ๆ ดังนั้นสามารถแสดงสมการที่ (17) ในรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Q = \sum_{i=1}^n J_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (18)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(Q)$  กับเวลา แล้วได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถคำนวณค่า single retardation time ( $\tau_1$ ) และ Creep compliance ( $J_1$ ) แต่ถ้ากราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง ก็ให้เขียนกราฟใหม่ระหว่าง  $\ln(Q - J_1 e^{-t/\tau_1})$  กับเวลา แล้วคำนวณค่า second retardation time ( $\tau_2$ ) และ secondary compliance ( $J_2$ ) แต่ถ้ากราฟยังไม่เป็นเส้นตรงก็ต้องเขียนกราฟใหม่ครั้งที่ 3 ระหว่าง  $\ln(Q - J_1 e^{-t/\tau_1} - J_2 e^{-t/\tau_2})$  กับเวลาแล้วคำนวณค่า  $\tau_3$  และ  $J_3$  ซึ่งจะต้องดำเนินการด้วยวิธีนี้ซ้ำจนกระทั่งได้กราฟเส้นตรง

(3) ช่วง Newtonian flow,  $J_N$  (C-D) เป็นช่วงที่พันธะของวัสดุเกิดการแตกออก และไม่สามารถคืนรูปได้ จึงทำให้วัสดุเกิดการไหลแบบนิวโตเนียน โดยการไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (19)

$$J_N = \frac{\varepsilon_N(t)}{\sigma} = \frac{t}{\eta_N} \quad (19)$$

เมื่อ  $\varepsilon_N$  คือ ค่าความเครียด (shear strain) ในช่วงที่กราฟการคืบมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นค่าความชันของกราฟคือส่วนกลับของค่าความหนืด ( $1/\eta_N$ )

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวปาริดา ขุนแอ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4882013		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (อุตสาหกรรมเกษตร)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2544

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานวิจัยแห่งชาติ (สกว.)
- ทุนความเป็นเลิศคณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนผู้ช่วยสอน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนราชกรีฑาสโมสร ปีการศึกษา 2548 จากสมาคมราชกรีฑาสโมสร

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Khunae, P., Tran, T. and Sirivongpaisal, P. 2007. Structural and thermal properties of heat-moisture treated high amylose rice starch. *Proceeding: 10<sup>th</sup> ASEAN FOOD CONFERENCE 2007: Food for Mankind-Contribution of Science and Technology*. August 21-23, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Khunae, P., Tran, T. and Sirivongpaisal, P. 2007. Effect of hydrothermal treatment on rheological properties of high amylose rice starch. *Proceeding: ISOPOW10: 10<sup>th</sup> International Symposium on the properties in Food, Health, Phamaceutical and Biological System*. September 2-7, Bangkok Thailand.
- Khunae, P., Tran, T. and Sirivongpaisal, P. 2007. Effect of heat-moisture treatment on structural and thermal properties of rice starch differing in amylose content. *Starch/Starke*. 59: 593-599.