

ผลของขนาดเมล็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ  
*Cajanus cajan* (L.)



นางสาวปณทริกา วิไลพล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF GRANULE SIZE ON PHYSICO-CHEMICAL AND FUNCTIONAL  
PROPERTIES OF PIGEON PEA *Cajanus cajan* (L.) STARCH



Miss Puntarika Wilaipol

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของขนาดเมล็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและ  
สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.)

โดย

นางสาวปณทริกา วิไลพล

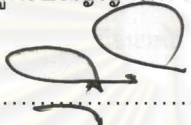
สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

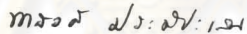
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

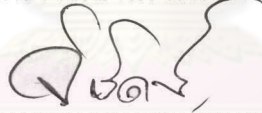
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชนิษฐา ธนานุงศ์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ดริช กวักเพชร)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สุนีย์ ไชตินอน)

ปุ่นทริกา วิไลพล : ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.). (Effects of Granule Size on Physico-Chemical and Functional Properties of Pigeon Pea *Cajanus cajan* (L.) Starch) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล, 98 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแฮะ และผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีคาร์โบไฮเดรต เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน เท่ากับ ร้อยละ 98.95, 0.64, 0.27, 0.10 และ 0.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีแอมิโลสร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช มีค่า  $L$ ,  $a$ ,  $b$  และค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 76.09, -0.61, 1.16 และ 76.05 ตามลำดับ เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรี มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ มีลักษณะของ birefringence ที่ชัดเจน โดยเม็ดสตาร์ชมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ไมครอน และมีโครงสร้างผลึกแบบ C มีความสามารถในการจับน้ำ 0.74 กรัม/น้ำ/กรัมสตาร์ชแห้ง กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมสตาร์ชแห้ง) และการละลาย (ร้อยละ) มีค่าเท่ากับ 2.41 และ 1.29 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 10.89 และ 10.84 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 95 °C ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช พบว่าอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตในเซชันในช่วงอุณหภูมิ 69 °C ถึง 79 °C เท่ากับ 343.76 kJ mole<sup>-1</sup> จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่า มีค่า pasting temperature 81.28 °C, peak viscosity, breakdown และ setback เท่ากับ 4,106.5 1,082.5 และ 2,812.5 cP ตามลำดับ สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันเท่ากับ 70.95-83.95 °C และมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 12.97 J/g เจลของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า  $G'$  มากกว่า  $G''$  ที่ทุกความถี่ของการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าความเป็นของเหลว และเมื่อจำแนกสตาร์ชถั่วมะแฮะออกเป็น 4 ขนาด โดยใช้เวลาในการตกตะกอนเท่ากับ 15, 30, 60 และมากกว่า 60 นาที ซึ่งได้สตาร์ชที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 28.13, 26.99, 24.50 และ 20.49 ไมครอน ตามลำดับ พบว่า เม็ดสตาร์ชทั้ง 4 ขนาด มีรูปร่างกลมและรี มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ มีลักษณะของ birefringence ที่ชัดเจน และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C แต่มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช พบว่าอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิไม่ได้มีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30, 60 และมากกว่า 60 นาที ขนาดของเม็ดสตาร์ชมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช โดยปริมาณแอมิโลส การละลาย สมบัติด้านการเกิดเพสต์ ได้แก่ peak viscosity, final viscosity และ setback และสมบัติด้านความร้อน ได้แก่  $\Delta H$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น ส่วนความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว และสมบัติด้านการเกิดเพสต์ ได้แก่ pasting temperature มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กลง ส่วนสมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาดนั้น มีค่าใกล้เคียงกัน

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อผู้ผลิต..... ปุ่นทริกา วิไลพล.....  
 สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....   
 ปีการศึกษา 2553.....

# # 5172366023 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : PIGEON PEA STARCH / GRANULE SIZE / FUNCTIONAL PROPERTIES

PUNTARIKA WILAIPOL : EFFECTS OF GRANULE SIZE ON PHYSICO-CHEMICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF PIGEON PEA *Cajanus cajan* (L.) STARCH. THESIS ADVISOR : JIRARAT TATTIYAKUL, Ph. D., 98 pp.

The objective of this research was to examine physico-chemical properties and effects of granule size on functional properties of pigeon pea starch. Pigeon pea starch contained 98.95% carbohydrate, 0.64% crude fiber, 0.27% fat, 0.10% ash, and 0.04% protein on dry weight basis. The starch contained 64.61% amylose. The L, a, b and white index values of the starch were 76.09, -0.61, 1.16 and 76.05, respectively. Pigeon pea starch granules were round and oval, had smooth surface, and had clear birefringence with an average size of 27.32 microns. The starch showed a characteristic C-type diffraction pattern. The starch was found to have low water binding capacity (0.74 g water / g dry starch). The swelling power and the solubility of pigeon pea starch was 2.41 g/g dry starch and 1.29%, respectively, at 70 °C and increased to 10.89 g/g dry starch and 10.84%, respectively, at 95 °C. The granule growth rate increased with increasing temperature. The activation energy of the gelatinization of pigeon pea starch dispersion in the temperature range of 69-79 °C was found to be 343.76 kJ mole<sup>-1</sup>. The starch showed high pasting temperature (81.28 °C), peak viscosity (4,106.5 cP), breakdown (1,082.5 cP) and setback (2,812.5 cP). From DSC measurement, the gelatinization temperature of pigeon pea starch was 70.95-83.95 °C and  $\Delta H$  was 12.97 J/g. From frequency sweep test, the 12% (w/w) pigeon pea starch gel gave higher G' than G'' indicating the typical characteristic of weak gel. Upon classified into four sizes using different setting time of 15, 30, 60 and over 60 min which resulted in starch with an average granule size of 28.13, 26.99, 24.50 and 20.49 microns, respectively. All pigeon pea starch with different granule sizes had round and oval shape, smooth surface, and clear birefringence. They showed a characteristic C-type diffraction pattern. The starch showed significantly different color. The fractions that had the largest granule sizes had the granule growth rate that increased with increasing temperature. The granule growth rate for the fractions with smaller granule sizes was not affected by gelatinization temperature. It was found that starch with larger granule sizes had higher amylose content, lower water binding capacity, lower swelling power, higher solubility, and higher  $\Delta H$ . Peak viscosity, final viscosity and setback increased with an increase in average granule size but pasting temperature increased with a decrease in average granule size. From the rheological properties measurement, pigeon pea starch of different granule sizes exhibited similar profiles in temperature sweep test and frequency sweep test.

Department : Food Technology.....

Student's Signature Puntarika Wilaiapol

Field of Study : Food Technology.....

Advisor's Signature

Academic Year : 2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการทำวิจัย และตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชนิษฐา ธนानวงศ์ อาจารย์ ดร. ดริษ กวักเพฑูรย์ และ ดร. สุณีย์ โชติธีรนาท ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมถึงได้เสนอแนวทางแก้ไขและปรับปรุง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์และให้การสนับสนุนด้านต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้ ทุนวิจัยและวัตถุดิบสตาร์ชถั่วมะแฮะจากโครงการวิทยาเพื่อพื้นที่ในแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2551-2555: งานวิจัยด้านอาหารจากทรัพยากรท้องถิ่นเพื่อพัฒนาอาชีพของชุมชน โครงการย่อย: การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งถั่วมะแฮะ และทุนวิจัยสนับสนุนโครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีงบประมาณ 2553 กลุ่มวิจัยอาหารและน้ำ (Food and Water Cluster) เรื่อง “โครงการวิจัยการจำแนกขนาดเม็ดแป้งและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งถั่วมะแฮะเพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร” (The National Research University Project of CHE and Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund (FW 005B))

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ทั้งในด้านวิชาการและจริยธรรม ซึ่งเป็นรากฐานอย่างยิ่งในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาเอก พี่ ๆ และเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณรพีพร ประสาท คุณธิษัมพร พิมพ์แก้ว และคุณปาริชาติ บำรุง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจกันมาตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติ พี่ น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนให้กำลังใจอันมีค่ายิ่งเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยยินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา ณ ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ถั่วมะแฮะ.....	3
2.2 แป้งและสตาร์ช.....	4
2.3 สมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญของสตาร์ช.....	5
2.3.1 สมบัติทางเคมี.....	5
2.3.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่.....	7
3. วิธีการทดลอง.....	22
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	23
3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	23
3.2.3 การศึกษาผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่.....	24
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	27
4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	27
4.2 ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่.....	39
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	58

	หน้า
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	28
4.2	อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า $E_a$ .....	33
4.3	เปรียบเทียบค่า $E_a$ ของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิการเกิด เจลลิตีในเซชัน.....	34
4.4	สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	35
4.5	สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช: น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC.....	36
4.6	เปรียบเทียบสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	37
4.7	ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชและปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ แยกขนาดแล้ว.....	40
4.8	ปริมาณของสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลา.....	40
4.9	ค่าสี L, a, b และค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาด แล้ว.....	41
4.10	ค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว....	45
4.11	กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ แยกขนาดแล้ว.....	47
4.12	การละลายที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยก ขนาดแล้ว.....	48
4.13	อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ และค่า $E_a$ .....	50
4.14	สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่ระดับ ความเข้มข้น 12% (w/w).....	52
4.15	สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC.....	53
ก.1	ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A, B และ C.....	76
ก.2	Temperature profile STD 1.....	80
ก.3	ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความเหนียวด้วยเครื่อง RVA.....	81
ค.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ยังไม่ได้ผ่านการแยกขนาด	87

ตารางที่		หน้า
ค.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	88
ค.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	89
ค.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	90
ค.5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที.....	91
ค.6	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	92
ค.7	พลังงานก่อกัมมันต์ ( $E_a$ ) ที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	92
ง.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสในสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.7).....	93
ง.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.7).....	93
ง.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีและค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.9).....	93
ง.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.10).....	94
ง.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.11).....	94
ง.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.12).....	95
ง.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.14).....	96
ง.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.15).....	97

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ฝักถั่วมะแฮะ.....	3
2.2	ต้นถั่วมะแฮะ.....	4
2.3	โครงสร้างของแอมิโลส.....	5
2.4	โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน.....	6
2.5	โครงสร้างของแอมิโลเพกติน.....	7
2.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A B C และ V	8
2.7	รูปแบบ unit cells ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B.....	9
2.8	ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จากเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA).....	13
2.9	กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช.....	15
2.10	โมดูลัสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	17
2.11	ช่วง Linear viscoelastic range.....	18
3.1	วิธีการจำแนกขนาดสตาร์ชถั่วมะแฮะออกเป็น 4 ขนาด.....	25
4.1	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	29
4.2	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	30
4.3	X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	31
4.4	กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C.....	32
4.5	การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C.....	33
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะความ เข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	38
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz.....	39
4.8	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่แยกที่เวลา ต่าง ๆ.....	42
4.9	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาด แล้ว.....	43
4.10	X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว.....	44

รูปที่		หน้า
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	54
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz.....	55
ก.1	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส.....	73
ข.1	ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	85
ข.2	ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว.....	85
ข.3	กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C.....	86
ข.4	การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C.....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

แป้งเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานสูง ทั้งยังเป็นแหล่งอาหารหลักของประชากรอุตสาหกรรมแป้งจึงเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอาหารที่สำคัญ นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมแปรรูป เป็นต้น ซึ่งในแต่ละอุตสาหกรรมนั้นมีความต้องการแป้งที่มีสมบัติแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงก่อให้เกิดความพยายามที่จะเสาะแสวงหาแป้งชนิดใหม่ที่มีสมบัติจำเพาะ หรือใช้เทคนิคต่าง ๆ เข้ามาช่วยเพื่อตัดแปรแป้งให้มีสมบัติตามที่ต้องการ

ปัจจุบันนี้ ในประเทศไทยมีการผลิตแป้งหลากหลายชนิด ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและระดับชาวบ้าน แต่ยังมีแป้งบางชนิดที่ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น แป้งสาลี แป้งมันฝรั่ง เนื่องจากการปลูกในประเทศไทยยังมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ และปริมาณการผลิตไม่เพียงพอ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการนำเข้าแป้งจากต่างประเทศ จึงได้มีการศึกษาถึงการนำแป้งชนิดอื่น ๆ ที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบในประเทศมาผลิตแป้งที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงพอที่จะนำมาทดแทนแป้งที่จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่ใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศให้คุ้มค่า

ถั่วมะแฮะเป็นพืชที่เจริญได้ดีในเขตร้อนหรือกึ่งร้อน สามารถทนความแห้งแล้งและลมแรงได้เป็นอย่างดี ปลูกได้ง่ายถึงแม้ว่าจะมีดินที่ไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์และปลูกได้ตลอดทั้งปี เป็นพืชที่มีการส่งเสริมให้ปลูกเพื่อปรับปรุงดิน ในประเทศไทยมีการปลูกถั่วมะแฮะมากในแถบภาคเหนือ ผักอ่อนและเมล็ดสามารถนำมาเป็นอาหารได้ ส่วนประกอบหลักของถั่วมะแฮะคือสตาร์ชซึ่งมีอยู่มากกว่าร้อยละ 50 มีโปรตีนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 20 (Oshodi และ Ekperigin, 1989) การไม่แห้งและสกัดโปรตีนออกด้วยสารละลายต่างส่งผลให้ได้สตาร์ชถั่วมะแฮะมีโปรตีนประมาณร้อยละ 0.5 และมีสตาร์ชประมาณร้อยละ 70 ที่ผ่านมามีการศึกษาการใช้สตาร์ชถั่วมะแฮะทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในผลิตภัณฑ์ เช่น บะหมี่ ขนมอบ ขนมทอดกรอบ เป็นต้น ซึ่งการที่จะนำสตาร์ชถั่วมะแฮะไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมให้ประสบผลสำเร็จนั้น ต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแฮะ จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีขนาดเม็ดสตาร์ชในช่วง 15 ไมครอนถึง 50 ไมครอน (Agunbiade และ Longe, 1999) ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างกว้าง มีรายงานวิจัยว่าขนาดเม็ดสตาร์ชส่งผลถึงสมบัติการเกิดเพสต์ และการผสมสตาร์ชที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชต่างกันในส่วนต่าง ๆ กันสามารถดัดแปลงสมบัติการเกิดเพสต์ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแฮะ และอิทธิพลของขนาดเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และเพื่อเป็นการขยายการใช้ประโยชน์จากสตาร์ชถั่วมะแฮะให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ถั่วมะแฮะ (Pigeon pea)

ถั่วมะแฮะเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งใน order Leguminosae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cajanus cajan* ส่วนชื่อสามัญที่นิยมเรียก ได้แก่ red gram, pigeon pea, arhar, tur, congo pea และ no-eye pea เป็นต้น สำหรับชื่อภาษาไทยจะเรียกแตกต่างกันไปตามท้องถิ่นกล่าวคือ ภาคกลางเรียกว่า ถั่วแระหรือถั่วแม่ตาย ทางภาคเหนือเรียกว่า ถั่วมะแฮะต้นหรือถั่วมะแฮะ และทางภาคใต้เรียกว่า ถั่วแระ (วิเชียร วรพุทธพร, 2525)

ถั่วมะแฮะมีต้นกำเนิดในประเทศอินเดีย และแพร่กระจายไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แอฟริกา และอเมริกา ปัจจุบันถั่วมะแฮะมีการปลูกและบริโภคกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะประเทศที่อยู่ในเขตร้อนหรือกึ่งร้อน ลักษณะโดยทั่วไปของถั่วมะแฮะเป็นไม้พุ่มล้มลุกหรือยืนต้น สูงตั้งแต่ 2 ถึง 12 ฟุต ถั่วมะแฮะมีมากมายหลายพันธุ์ จึงมีลักษณะแตกต่างกันไปทั้งในด้านความสูง อายุเก็บเกี่ยว สี ขนาด รูปร่างของฝักและเมล็ด ซึ่งตัวอย่างของฝักถั่วมะแฮะ และต้นถั่วมะแฮะ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ถั่วมะแฮะยังมีคุณสมบัติพิเศษเหนือพืชอื่นหลายชนิดคือ มีความทนทานต่อความแห้งแล้ง และทนทานต่อกระแสดมแรงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีระบบรากลึกจึงเหมาะที่จะปลูกในบริเวณแห้งแล้ง หรือบริเวณที่มีดินที่ไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์ เช่น แถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (วิเชียร วรพุทธพร, 2525)



รูปที่ 2.1 ฝักถั่วมะแฮะ

ที่มา: แก้วตา ธรรมอิน (ม.ป.ป.)



## รูปที่ 2.2 ต้นถั่วมะแฮะ

ที่มา: แก้วตา ธีมอิน (ม.ป.ป.)

ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วมะแฮะประกอบไปด้วยโปรตีนประมาณ 22% คาร์โบไฮเดรต 40% ไขมัน 1.5% แร่ธาตุ 3.5% มีปริมาณแคลเซียม ฟอสฟอรัส และเหล็กสูง รวมทั้งวิตามินต่าง ๆ ยกเว้นพวกแอสคอร์บิกแอซิด จึงเหมาะที่จะใช้เป็นอาหารเสริมโปรตีนพวก ธัญพืช และพืชให้แป้งอื่น ๆ ซึ่งบริโภคนอกในเขตร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนจากสัตว์ รวมทั้งปลา พบว่าถั่วมะแฮะมีกรดอะมิโนเมทไธโอนีนและซีสตีโนในปริมาณต่ำ แต่ก็ยังมีกรดอะมิโน ทั้งสองสูงกว่าพวกธัญพืช และพืชบริโภคแป้งอื่น ๆ (กฤษฎา สัมพันธ์รักษ์, 2531)

## 2.2 แป้งและสตาร์ช

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนของพืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว คำว่า “แป้ง” หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก โดยทั่วไปแป้งที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันได้แก่ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่า สตาร์ช (starch) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โดยส่วนใหญ่แล้วจะดูปริมาณ โปรตีนเป็นหลัก ซึ่งอาจดูได้จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งถั่วเขียว ม.อ.ก. 948-2533 ที่กำหนดให้ต้องมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าร้อยละ 0.4

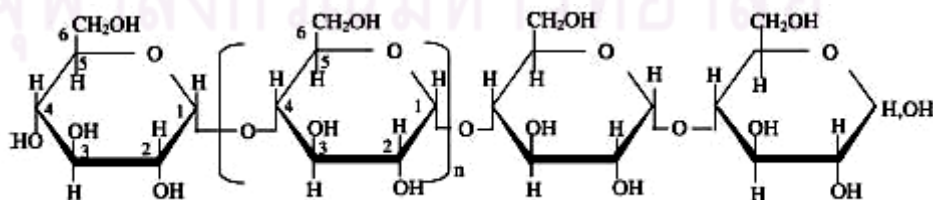


## 2.3 สมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญของสตาร์ช

### 2.3.1 สมบัติทางเคมี

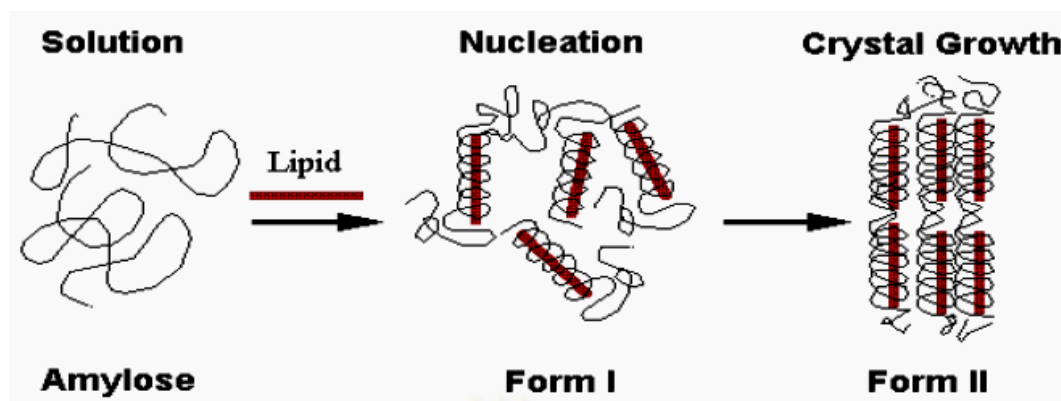
สตาร์ชเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญในพืชอยู่ภายในเมล็ดสตาร์ช (Singh และคณะ, 2003) สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  สตาร์ชประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมี สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกตินแตกต่างกัน จึงทำให้สตาร์ชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ในสตาร์ชยังมีสารตัวกลาง ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เป็นต้น ซึ่งไขมันที่รวมอยู่ในเมล็ดสตาร์ชจะไปลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และความสามารถในการจับน้ำ และยังสามารถรวมตัวกับแอมิโลสเกิดเป็น inert complex ทำให้เกิดฟิล์มที่มีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น โปรตีนที่เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเมล็ดสตาร์ช ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิว ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาตินไนซ์เปลี่ยนแปลงไป (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage (รูปที่ 2.3) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก มีความยืดหยุ่นและสามารถเคลื่อนที่ได้ จากการที่แอมิโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงทำให้สามารถจับกับโมเลกุลชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น แอมิโลสจับกับแอมิโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (double helices) หรือเกลียวเดี่ยว (single helices) ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง (Bowers, 1992) นอกจากนี้แอมิโลสยังสามารถจับกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose-lipid-complex) ที่มีความเสถียร (รูปที่ 2.4) การทำลายสารประกอบเชิงซ้อนนี้ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Kugimiya, Donovan และ Wong, 1980)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแอมิโลส

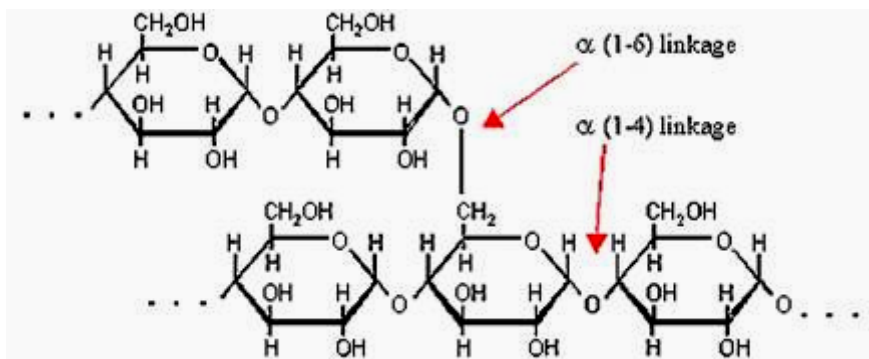
ที่มา: Julaino (1971)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน  
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Kugimiya และคณะ (1980)

แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glucosidic linkage (รูปที่ 2.5) แอมิโลเพกตินมีน้ำหนักมากกว่าแอมิโลสประมาณ 1,000 เท่า คือ ประมาณ  $10^7$ - $10^8$  ดาลตัน เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าและมีกิ่งสาขาทำให้มีการคั่นตัวต่ำ นอกจากนี้แอมิโลเพกตินสามารถเกิดเกลียวคู่โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งแอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน (Hizukuri, 1986) ดังนั้นจึงทำให้แอมิโลเพกตินมีความสำคัญมากกว่าแอมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ โดยแอมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวกันทำให้เกิดโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งรวมตัวเป็นเม็ดสตาร์ชได้ ส่วนแอมิโลสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดส่วนที่เป็นผลึกได้ (Oates, 1997)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแอมิโลเพกติน

ที่มา: Julaino (1971)

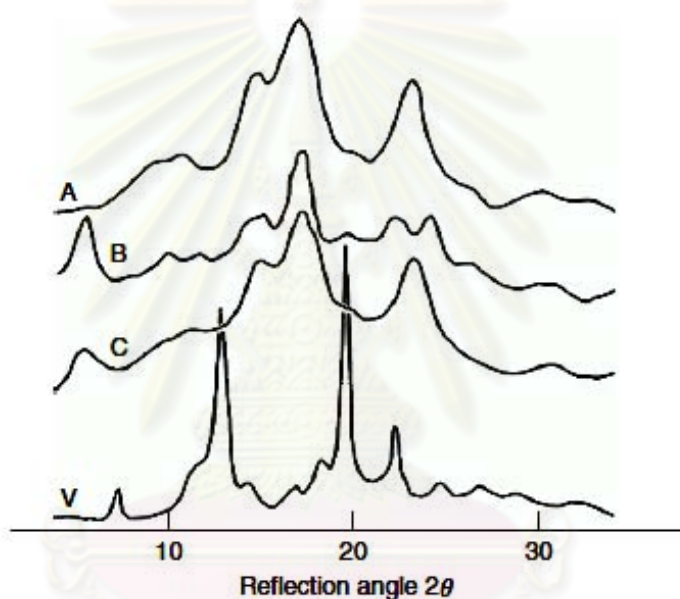
### 2.3.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

#### 2.3.2.1 ลักษณะของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชส่วนใหญ่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันไปตามชนิดของสตาร์ช (Oates, 1997) การตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่รวดเร็วและง่ายที่สุด สามารถตรวจสอบลักษณะต่างๆ ได้ เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ช และลักษณะไฮลัม (hilum) รวมทั้งตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่สภาวะต่างๆ และการปนเปื้อนของสตาร์ชอีกชนิดหนึ่งได้ การตรวจสอบลักษณะเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ สามารถทำได้ทั้งภายใต้แสงปกติ (normal light) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถดูโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้ เนื่องจากมีกำลังขยายไม่เพียงพอ การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) สามารถตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้อย่างละเอียด เนื่องจากมีกำลังขยายมากกว่าหลายร้อยเท่า ซึ่งสามารถดูพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีรอยแตกหรือรอยร้าวของเม็ดสตาร์ชได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

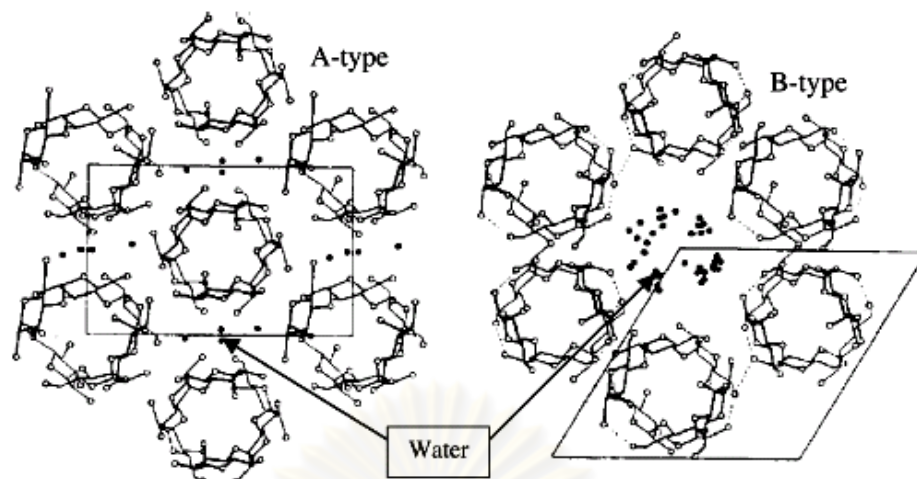
โครงสร้างสตาร์ชมีลักษณะเป็นโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ชสามารถจัดเรียงตัวกัน ทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) สามารถตรวจสอบโครงสร้างผลึกเม็ดสตาร์ชด้วยวิธี Wide Angle X-ray Diffraction ได้ โดยสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบของรังสีเอกซ์ที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสตาร์ชโดยทั่วไปสามารถแบ่ง

โครงสร้างผลึกได้ 4 แบบ (Buléon และคณะ, 1998) คือ ผลึกแบบ A เป็นการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบหนาแน่นมาก มีน้ำ 8 โมเลกุล ในโครงสร้าง พบในสตาร์ชจากธัญพืช ผลึกแบบ B มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างอย่างหลวม ๆ มีน้ำ 36 โมเลกุล ในโครงสร้าง พบในสตาร์ชจากพืชหัว ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ A และ B แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ผลึกแบบ C จะมีการจัดเรียงตัวแบบผสมกันระหว่างแบบ A และแบบ B กล่าวคือมีพีคที่ 5.73, 15.30, 17.30, 18.30 และ 23.50 พบในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และอีกรูปแบบหนึ่งคือ ผลึกแบบ V เกิดจากแอมิโลสรวมตัวกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น แอมิโลสรวมตัวกับไขมันเป็น amylose-lipid complex เกิดโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ช้า



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A B C และ V  
ที่มา: Zobel (1988b)

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 รูปแบบ unit cells ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B

ที่มา: Tester, Karkalas และ Qi (2004)

### 2.3.2.2 กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility)

แอมิโลสและแอมิโลเพกตินจะเรียงตัวขนานกันตามแนวรัศมีภายในเม็ดสตาร์ช และแต่ละสายดึงดูกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสของแต่ละสายที่อยู่ใกล้ ๆ กัน ทำให้มีลักษณะคล้ายร่างแห ดังนั้นสตาร์ชดิบไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตีไนเซชัน โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวได้น้อยมากจนไม่สามารถสังเกตได้ (Kerr, 1950) เมื่อสารละลายสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตีไนเซชันในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอและมีการกวนตลอดเวลา จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นให้แก่เม็ดสตาร์ช (Lii, Tsai และ Tseng, 1996) ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ส่งผลให้สายของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินคลายออกจากกัน หมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสแต่ละสายเป็นอิสระ โมเลกุลของน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยาด้วยได้ เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำตลอดเวลาที่ได้รับความร้อน เป็นผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเป็นหลายเท่าของขนาดเดิม และมีแอมิโลสละลายออกมาในน้ำที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เม็ดสตาร์ช (Bowers, 1992) การละลาย ความหนืด และความใสของสารละลายสตาร์ชเพิ่มขึ้น birefringence ของเม็ดสตาร์ชจะหายไปเนื่องจากชั้นผลึกถูกทำลาย กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ส่วนความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่แยกออกด้วยการปั่นเหวี่ยง นอกจากนี้ยังพบว่าการละลายและการพองตัวมี

ความสัมพันธ์กัน โดยทั่วไปพบว่าเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น จะเกิดรอยแตกบนเม็ดสตาร์ช ทำให้แอมิโลสหลุดออกมานอกเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้การละลายสูงขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

ปัจจัยที่มีผลต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ขนาดเม็ดสตาร์ช ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช เช่น อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน จำนวนกิ่งก้านสาขา รวมถึงการจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในแอมิโลเพกติน สิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน โปรตีน ฟอสฟอรัส ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว เป็นต้น (Leach, McCowen และ Schoch, 1959)

### 2.3.2.3 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช (Starch granule growth kinetics)

การศึกษาจลนศาสตร์การขยายขนาดเม็ดสตาร์ชเพื่อนำข้อมูลมาช่วยในการพิจารณาการเกิดเจลาตินในเซชัน ในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอและอุณหภูมิคงที่ การเกิดเจลาตินในเซชันสามารถอธิบายได้ด้วย pseudo-first order reaction กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 ช่วง แต่ช่วงสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้สมการ first order kinetic model (สมการที่ 2.1) (Lund และ Wirakartaksumah, 1984)

$$\frac{d[UG]}{dt} = -K_r[UG] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $K_r$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

$[UG]$  คือ ปริมาณสตาร์ชที่ยังไม่เกิดการเจลาตินในเซชัน

ภายใต้กระบวนการการเกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิคงที่ ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นจากขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชดิบ ( $D_0$ ) จนถึงขนาดเฉลี่ยที่อิ่มตัว (equilibrium mean diameter,  $D_{eT}$ ) ก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะเริ่มแตกออก การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช ( $X$ ) ที่เวลาใด ๆ ( $t$ ) สามารถแสดงดังสมการที่ (2.2) (Okechukwu และ Rao, 1996a: 1996b)

$$X = \frac{D_t - D_0}{D_{eT} - D_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $D_t$  คือ ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชที่เวลาใด ๆ

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $K_r$ ) หาได้จากการแทนที่ [UG] ในสมการ (2.1) ด้วย  $1-X$  แล้วอินทิเกรต (integrate) จะได้สมการดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\ln \left[ \frac{D_{eT} - D_t}{D_{eT} - D_0} \right] = -K_r t \quad (2.3)$$

เมื่อสร้างกราฟลอการิทึม (logarithm) ของ  $(D_{eT} - D_t / D_{eT} - D_0)$  กับเวลาแล้ว จะสามารถหาค่าอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช ( $K_r$ ) ได้

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) (สมการที่ 2.4)

$$K_r = K_{rT} \exp(-E_a / RT) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $K_{rT}$  คือ ค่าคงที่ ( $\text{min}^{-1}$ )

$E_a$  คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ( $\text{kJ mole}^{-1}$ )

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) มีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ J mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อสร้างกราฟระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิ ( $1/T, \text{K}^{-1}$ ) กับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $K_r$ ) จะทำให้ทราบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตีในเซชัน

#### 2.3.2.4 ความหนืด

โดยทั่วไปสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $50^\circ\text{C}$  แต่ดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัดและพองตัวได้เล็กน้อย การพองตัวของเม็ดสตาร์ชในช่วงแรกสามารถผันกลับได้ถ้าทำให้แห้ง (Phillips และ Williams, 2000) เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำได้ในปริมาณมากขึ้น และพองตัวจนมีขนาดใหญ่กว่าเดิมหลายเท่า และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เม็ดสตาร์ชจะเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่ผันกลับไม่ได้ ซึ่งเรียกว่าเกิดเจลลิตีในเซชัน ซึ่งในขั้นนี้เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และสูญเสีย birefringence เนื่องจากโครงสร้างผลึกถูกทำลายไป โมเลกุลของสารต่าง ๆ ในเม็ดสตาร์ชที่ละลายน้ำได้เริ่มซึมออกมา เป็นผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ความหนืดจึงเริ่ม

เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Sanders, 1996) ซึ่งโมเลกุลของแอมิโลสที่หลุดออกมาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายสตาร์ช (Kokini, Shiuh และ Chedid, 1992)

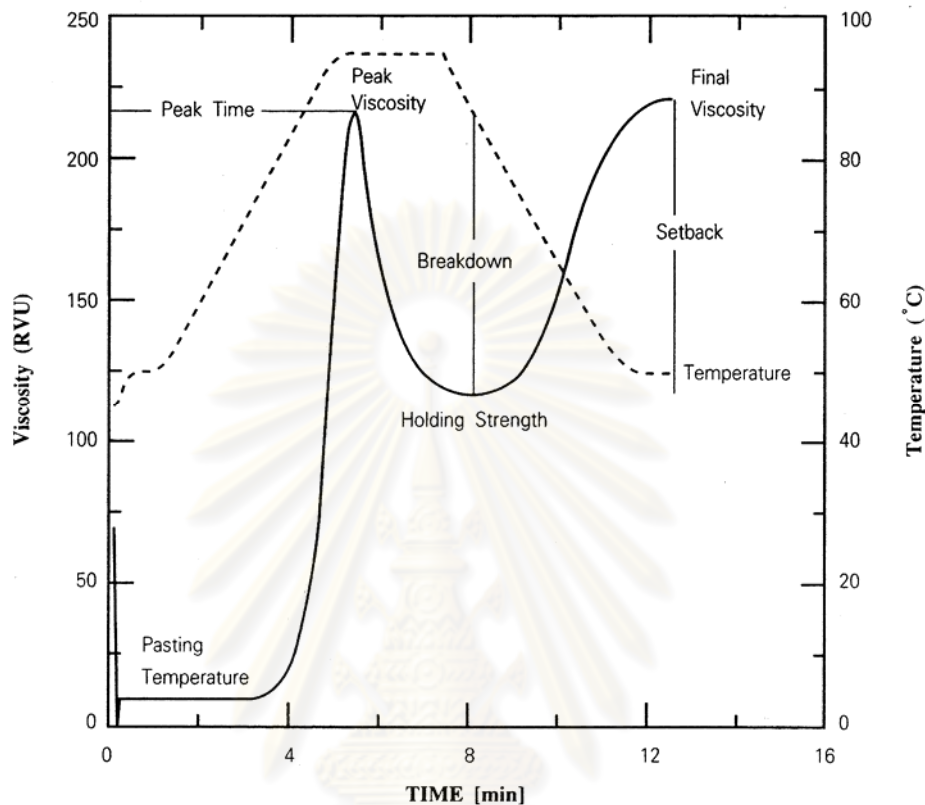
การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายสตาร์ชสามารถตรวจวัดได้หลายวิธี และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดที่ต่างกัน เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield viscometer Brabender amylograph Capillary viscometer และ Rapid visco analyzer (RVA) ซึ่ง RVA เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้วัดความหนืดของสตาร์ช (Phillips และ Williams, 2000) ข้อดีของเครื่อง RVA คือ สามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ รักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ทำให้ได้กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting curve) ภายในเวลาประมาณ 13 นาที เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนได้ดี และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ศึกษาการเกิดเจลลิตินในเซชัน และรีโทรเกรเดชันได้อีกด้วย (Phillips และ Williams, 2000) ตัวอย่างกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดแสดงดังรูปที่ 2.8 ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสตาร์ช สมบัติทางกายภาพและเคมีของเม็ดสตาร์ช เช่น ขนาดของเม็ดสตาร์ช การกระจายตัวของขนาดของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกติน และปริมาณแร่ธาตุ (Singh และคณะ, 2003)

ค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด มีดังนี้ (Newport scientific, 2007)

1. Pasting temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็น °C
2. Peak temperature คือ อุณหภูมิเกิดความหนืดสูงสุด หรืออุณหภูมิที่เกิดพีค มีหน่วยเป็น °C
3. Peak time คือ เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด หรือเวลาที่เกิดพีคของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
4. Peak viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือ cP
5. Breakdown คือ ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือ cP
6. Final viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU หรือ cP
7. Setback from peak คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือ cP



8. Setback from trough คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือ cP



รูปที่ 2.8 ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จากเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

ที่มา: Newport scientific (2007)

### 2.3.2.5 การเกิดเจลลิตินเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลลิตินเซชันเป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว และการดูดซึมน้ำของเม็ดสตาร์ชในขณะที่ได้รับความร้อน ซึ่งสารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น สตาร์ชแต่ละชนิดมีการเกิดเจลลิตินเซชันที่แตกต่างกัน อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินเซชันของสตาร์ชแต่ละชนิดไม่เท่ากัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) การเกิดเจลลิตินเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช โดยการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอ โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลง (Kaletune และ Breslaure, 2003) เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว แร่งยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลในโครงสร้าง

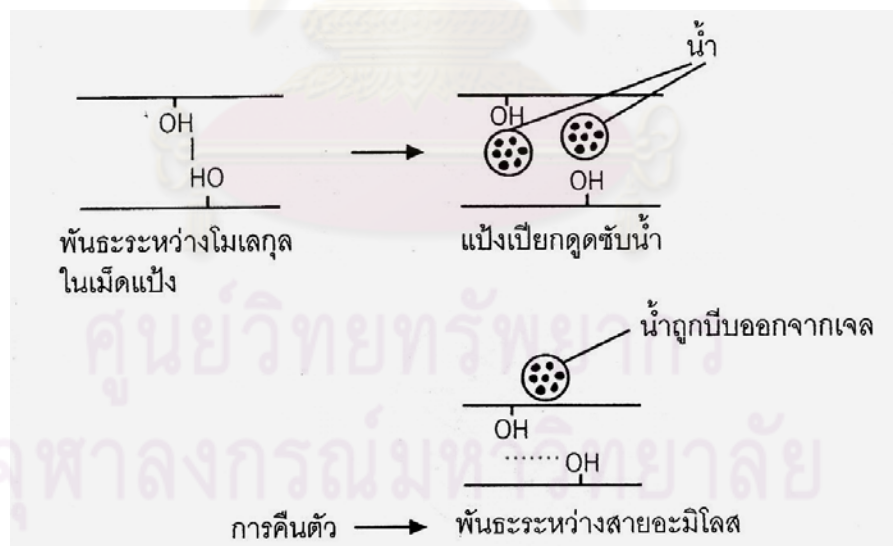
ผลึกอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปในส่วนโครงสร้างผลึก ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชสลายไป เกิดเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ พร้อมกับโมเลกุลแอมิโลสที่แพร่ออกมาจากเม็ดสตาร์ช (Whistler และ BeMiller, 1999) เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดเจลลิตินในเซชันที่บริเวณไฮลัมในบริเวณส่วนอสัณฐาน เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีพันธะไฮโดรเจนอ่อนแอ ส่วนโครงสร้างผลึกเป็นตัวขัดขวางการเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช (Kim และคณะ, 1995) ปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตินในเซชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลลิตินในเซชัน ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ปริมาณแอมิโลส ความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช ปริมาณโปรตีนและไขมัน (Hamaker และ Griffin, 1990) วิธีการสกัดสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช วิธีที่ใช้ศึกษาการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Kim และคณะ, 1995) โครงสร้างของโมเลกุลแอมิโลเพกติน ปริมาณฟอสฟอรัส อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกติน (Tester, 1997) เป็นต้น

การเกิดเจลลิตินในเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 8 ถึง 12 °C (Schoch และ Mayward, 1968) การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลิตินในเซชันอาจสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยการใช้ Kofler hot stage microscope (Maaruf และคณะ, 2001) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัตถุในรูปของฟังก์ชันกับอุณหภูมิ หลักการทำงานของเครื่อง DSC คือ วัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้กับตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิง (reference) ส่วนใหญ่แล้วตัวอย่างอ้างอิงจะเป็นภาชนะใส่ตัวอย่าง (pan) เปล่า เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างต้องดูดหรือคายพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เครื่องจะวัดพลังงานที่ตัวอย่างดูดหรือคายออกมา (enthalpy:  $\Delta H$ ) ลักษณะของเส้นกราฟความร้อน (thermogram) สามารถบ่งบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูด (endothermic) หรือคายความร้อน (exothermic) (Karim, Norziah และ Seow, 2000) ค่าที่ได้จากการวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC มีดังนี้ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset temperature:  $T_o$ ) อุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลิตินในเซชันสูงสุด (peak temperature:  $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (conclusion temperature:  $T_c$ ) และเอนทัลปี (enthalpy:  $\Delta H$ )

### 2.3.2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะกระจายตัวออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่แขวนลอยอยู่นั้นไม่เสถียร เพื่อให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น โมเลกุลเหล่านี้จึงพยายามจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล (Hoseney, 1998; Sasaki, Yasui และ Matsuki, 2000) โดยการพันกันเป็นเกลียวคู่ (double-helix) สายเกลียวคู่สามารถรวมตัวกันจนเป็นโครงร่างผลึกสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถกักน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) (Smith, 1979) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์การเกิดรีโทรเกรเดชันและ syneresis จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Fruton และ Simmonds (1958)

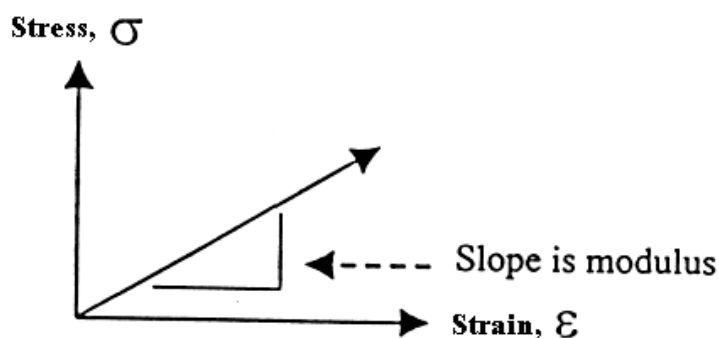
ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช เป็นต้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2549)

ปริมาณและขนาดของแอมิโลสมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกตินสูง อัตราในการเกิดรีโทรเกรเดชันจะสูงสุด (การละลายต่ำสุด) เมื่อ DP ของแอมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจะลดลงเมื่อโมเลกุลของแอมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้แอมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C แอมิโลเพกตินมีผลทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันแตกต่างกัน (Swinkels, 1985)

### 2.3.2.7 สมบัติทางการไหล (Rheology properties)

สมบัติทางการไหล (Rheology properties) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนรูปหรือสมบัติการไหลของวัตถุเมื่อวัตถุได้รับแรงกระทำภายนอกที่เรียกว่า ความเค้น (stress:  $\sigma$ ) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะที่ถูกแรงมากระทำ ซึ่งเรียกว่า ความเครียด (strain:  $\epsilon$ ) การเปลี่ยนแปลงนี้อาจจะอยู่ในรูปของการยืดตัวหรือหดตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่มากระทำ เช่น แรงกด เป็นต้น

โมดูลัส คือ ความลาดชันเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียด (รูปที่ 2.10) ซึ่งค่าโมดูลัสเป็นค่าที่บ่งบอกความยืดหยุ่นของวัตถุ (elasticity) ตามกฎของ Hooke โดยทั่วไปวัตถุที่เป็นของแข็งจะมีสมบัติเป็น elastic เนื่องจากของแข็งเมื่อได้รับความเค้น จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ และหากความเค้นที่ให้แก่ของแข็งมีค่าน้อยกว่าค่า yield value รูปร่างของของแข็งจะสามารถกลับสู่สภาวะเดิมก่อนที่ได้รับความเค้นได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง ของแข็งที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้จะเรียกว่าเป็น Hookean solid

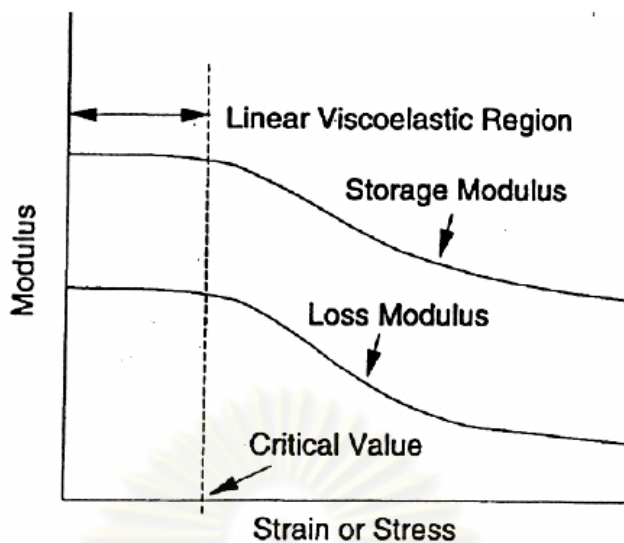


รูปที่ 2.10 โมดูลัสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  
ที่มา: Steffe (1992)

ในวัตถุที่เป็นของแข็งมักจะมีพฤติกรรมตามกฎของ Hooke ในช่วงที่มีการให้ค่าความเค้นต่ำ แต่มีค่าความเครียดสูง วัตถุจะมีการเบี่ยงเบนจากกฎของ Hooke โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่จะมีลักษณะที่เรียกว่า viscoelastic

Viscoelastic คือ วัตถุที่มีทั้งสมบัติที่แสดงลักษณะของของไหล (viscous) และสมบัติแบบยืดหยุ่นของของแข็ง (elastic) ซึ่งเมื่อมีแรงเฉือน (shear stress) มากจะทำต่อวัตถุดังกล่าวที่ระดับความเครียดหนึ่ง แล้วถอนแรงเฉือนออกทันที วัตถุพวก viscoelastic จะไม่คืนตัวกลับสภาพเดิม ณ จุดเริ่มต้นที่ยังไม่มีแรงเค้นเฉือนมากกระทำทันทีเหมือนลักษณะการยืดหยุ่นของของแข็ง แต่จะค่อย ๆ คืนตัวกลับมา

การแสดงพฤติกรรมของวัตถุพวก viscoelastic จะขึ้นอยู่กับสมบัติยืดหยุ่นและสมบัติที่เป็นลักษณะของของไหลที่มีอยู่ในวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของเวลาที่ใช้ในการทำให้วัตถุเสียรูป การวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุพวก viscoelastic จะทดสอบในช่วงที่เป็น linear viscoelastic range (รูปที่ 2.11) linear viscoelastic range คือ ช่วงที่วัตถุแสดงลักษณะยืดหยุ่น หรือวัตถุมีความสามารถในการคืนตัวกลับสู่สภาพเดิม หลังจากที่มีการถอนแรงที่ให้แก่วัตถุ นอกจากนี้ยังพบว่าเจลที่มีความแข็งแรง (strong gel) จะมีช่วง linear viscoelastic range กว้างกว่าเจลอ่อน (weak gel) (Steffe, 1992)



รูปที่ 2.11 ช่วง Linear viscoelastic range

ที่มา: Steffe (1992)

สตาร์ชเมื่อเกิดเจลาตินในเซชันเป็นเจลแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ mechanical behavior ซึ่งเจลจะแสดงลักษณะของ viscoelastic คือจะมีสมบัติที่เป็นทั้ง viscous และ elastic (Karim และคณะ, 2000) ลักษณะของเจลที่เป็น viscoelastic ดังกล่าว สามารถติดตามหรือตรวจสอบได้โดยการทดสอบสมบัติทางกาวไหลของเจล (rheological testing) dynamic oscillatory test เป็นการทดสอบสมบัติ viscoelastic ของเจล โดยที่ไม่ทำให้โครงสร้างของเจลถูกทำลายไป สามารถวิเคราะห์ผลได้โดยสังเกตจากค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$G'$  (storage modulus) แสดงถึงลักษณะที่เป็น solid หรือ elastic ซึ่งวัดในรูปของพลังงานที่ถูกสะสมอยู่ในวัตถุนั้น ๆ ต่อ 1 รอบ ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation)

$G''$  (loss modulus) แสดงถึงลักษณะที่เป็น liquid หรือ viscous ซึ่งวัดในรูปของพลังงานที่สูญเสียไป (ในรูปของความร้อน) ของวัตถุนั้น ๆ ของ 1 รอบ ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือ strain ( $\gamma_0$ ) แสดงได้ดังนี้ (สมการ 2.5 และ 2.6) (Steffe, 1992)

$$G' = \frac{(\sigma_0) \cos \delta}{\gamma_0} \quad (2.5)$$

$$G'' = \frac{(\sigma_0) \sin \delta}{\gamma_0} \quad (2.6)$$

โดย  $\sigma_0 =$  Generated stress =  $G' \gamma_0 \sin(\omega t) + G'' \gamma_0 \cos(\omega t)$

$\gamma_0 =$  Strain amplitude

$\omega =$  Angular frequency

$t =$  time

วัตถุที่มีค่า  $G'$  มากกว่า  $G''$  จะมีสมบัติคล้ายเป็นของแข็ง (solid-like) ซึ่งถ้ามีการเสียรูปจะมีลักษณะของความยืดหยุ่นและสามารถคืนรูปได้ แต่ถ้าวัตถุนั้นมีค่า  $G''$  มากกว่า  $G'$  วัตถุจะมีสมบัติคล้ายเป็นของเหลว (liquid-like) ค่าของ  $G'$  และ  $G''$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ความเข้มข้น อุณหภูมิ และความเค้น แต่ถ้าค่าของความเค้นอยู่ในช่วง linear viscoelastic range ค่า  $G'$  และ  $G''$  จะไม่ขึ้นกับความเค้น นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สมบัติ viscoelastic ของเจลได้จากค่า  $G^*$  (complex modulus)  $\eta^*$  (complex viscosity) และ  $\tan(\delta)$  (loss tangent) ได้ ดังนี้ (สมการ 2.7, 2.8 และ 2.9)

$$G^* = \frac{(\sigma_0)}{\gamma_0} = \{(G')^2 + (G'')^2\}^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\eta^* = \frac{G''}{\omega} \quad (2.8)$$

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad , 0 \leq \delta \leq \pi \quad (2.9)$$

## 2.4 ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

สตาร์ชที่มีอยู่ในธรรมชาติจะมีลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดทางพฤกษศาสตร์ และมีขนาดแตกต่างกันไป ตั้งแต่สตาร์ชที่มีขนาดเล็กมาก ได้แก่ สตาร์ชจากข้าวเจ้า ข้าวไร้ต จนกระทั่งสตาร์ชที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ ได้แก่ สตาร์ชจากมันฝรั่ง และสตาร์ชจากกล้วย ซึ่งขนาดของเม็ดสตาร์ชจะมีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของสตาร์ช ได้แก่ องค์ประกอบของสตาร์ช กระบวนการเกิดเจลลิตีในเซชัน กำลังการพองตัวและการละลาย อัตราส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน รวมไปถึงน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของสตาร์ชอีกด้วย (Lindeboom,

Chang และ Tyler, 2004) Madsen และ Christensen (1996) พบว่า ความหนืดของเพสต์สตาร์ช ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของเม็ดสตาร์ช เช่น ขนาดเฉลี่ยและการกระจายของขนาด เม็ดสตาร์ช อัตราส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน และปริมาณเกลือ เป็นต้น

Tang และคณะ (2001) แยกสตาร์ชบาร์เลย์ออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ (18.4 ไมครอน) ขนาดกลาง (12.3 ไมครอน) และขนาดเล็ก (2.2 ไมครอน) และศึกษาสมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชทั้ง 3 ขนาด พบว่า ค่า onset temperature ( $T_o$ ) ของเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่จะมีค่าสูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดกลางและขนาดเล็ก ส่วนค่า conclusion temperature ( $T_c$ ) ของเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่และขนาดกลาง และค่า enthalpy of gelatinization ของเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดกลางและขนาดเล็ก และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Tang, Watanabe และ Mitsunaga (2002) ที่ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช normal barley และ waxy barley 3 ขนาด พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง

Singh และ Kaur (2004) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก (5-20 ไมครอน) ขนาดกลาง (25-40 ไมครอน) และขนาดใหญ่ (40-85 ไมครอน) ที่ได้จากการแยกสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่า สตาร์ชมันฝรั่งที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งขนาดใหญ่จะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่า แต่มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่และขนาดกลางจะมีลักษณะรูปร่างของเม็ดแบ่งเป็นรูปวงรี หรือรูปเหลี่ยมคล้ายลูกบาศก์ ในขณะที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเป็นรูปทรงกลม หรือวงรี ในการศึกษาช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน พบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันจะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ส่วนค่า enthalpy of gelatinization จะมีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ในการวิเคราะห์ตัวแปรของลักษณะทางการไหล เช่น  $G'$ ,  $G''$  จะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

Noda และคณะ (2005) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันฝรั่ง 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ (39.9-43.7 ไมครอน) ขนาดเล็ก (20.3-23.4 ไมครอน) และขนาดเล็กมาก (13.2-14.0 ไมครอน) พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง ขนาดของเม็ดสตาร์ชไม่ได้มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณแอมิโลส และสมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันที่ศึกษาโดยใช้เครื่อง DSC และพบว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่า peak viscosity และค่า breakdown ต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ แต่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีค่า peak temperature สูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่

Huang และคณะ (2007) ได้ศึกษาสมบัติของสตาร์ช 3 ชนิด คือ yellow pea, cowpea และ chickpea โดยแยกสตาร์ชออกเป็น 3 ขนาด พบว่า ขนาดของเม็ดสตาร์ชจะมีผลต่อพฤติกรรม



ทางการเกิดเพสต์และการพองตัว โดยที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีกำลังการพองตัว และ peak viscosity สูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่

ผลของการศึกษาขนาดของเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ เช่น Chen, Schols และ Voragen (2003b) พบว่า เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันเทศที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะมีคุณภาพดีกว่าก๋วยเตี๋ยวที่ทำจากสตาร์ชที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ ซึ่งเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำมาจากเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะมีความยาวของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ยาวกว่า มีความโปร่งแสงมากกว่า และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำจากเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้มี ความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Huang และ Lai (2010) ที่ได้ศึกษาสตาร์ชในกลุ่มธัญพืชที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชต่าง ๆ กัน โดยนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ white salted noodles ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า ขนาดของเม็ดสตาร์ชเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางการไหลของโดเส้นก๋วยเตี๋ยว ทั้งนี้โดที่ทำจากเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะสามารถดูดซับน้ำได้เป็นจำนวนมากในระหว่างการเตรียมโด และเม็ดสตาร์ชจะเกิดการจับตัวกันแน่นภายในร่างแหกลูเตน

นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีก เช่น Lindeboom และคณะ (2004) กล่าวว่า สตาร์ชที่มีขนาดเล็กและมีช่วงการกระจายของขนาดที่แคบสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระดาษพิมพ์ และแผ่นพลาสติกได้ดี นอกจากนี้ยังเป็นตัว binder และ carrier ของส่วนประกอบในเครื่องสำอางได้ดีอีกด้วย ส่วนสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะเหมาะกับการใช้เป็นตัวเคลือบอย่างหนา 1 ชั้น และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย คือ สตาร์ชถั่วมะแฮะ (pigeon pea starch) *Cajanus cajan* (L.) สายพันธุ์เมล็ดสีครีม จากจังหวัดน่าน ซึ่งวิธีที่ใช้สกัดสตาร์ชถั่วมะแฮะดัดแปลงมาจาก Agunbiade และ Longe (1999) โดยเริ่มจากแช่ถั่วมะแฮะทั้งเปลือกในน้ำ 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5 °C อัตราส่วนของถั่วมะแฮะแห้งต่อน้ำเท่ากับ 1:3 (w/w) จากนั้นเทน้ำทิ้ง แล้วนำไปล้างน้ำซึ่งใช้อัตราส่วนของถั่วมะแฮะต่อน้ำเท่ากับ 1:1 (w/w) เทน้ำทิ้งแล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C นาน 15 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัดเป็นสตาร์ชธรรมชาติ (native starch) โดยนำถั่วมะแฮะที่ผ่านกระบวนการข้างต้นไปสีเอาเปลือกออก ล้างน้ำ 2 ครั้ง แล้วแช่ถั่วมะแฮะในน้ำนาน 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5 °C อัตราส่วนของถั่วมะแฮะแห้งต่อน้ำเท่ากับ 1:3 (w/w) เทน้ำทิ้ง แล้วล้างด้วยน้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นผสมถั่วมะแฮะแห้งกับน้ำในอัตราส่วน 1:5 (w/w) นำไปโม่เปียกด้วยเครื่อง stone mill แบบ vertical 2 รอบ นำน้ำแป้งกรองผ่านตะแกรง 50 mesh เพื่อแยกกากทิ้งไป เก็บส่วนที่กรองได้ไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้แป้งตกตะกอน แล้วเทน้ำที่แยกชั้นทิ้งไป นำตะกอนแป้งมาปรับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N แล้วแช่ไว้ในสารละลายต่างที่อุณหภูมิ 5 °C นาน 2 ชั่วโมง เมื่อแป้งตกตะกอนให้เทส่วนที่เป็นของเหลวทิ้ง นำส่วนที่เป็นตะกอนมาล้างน้ำ 2 ครั้ง ซึ่งใช้อัตราส่วนของตะกอนแป้งต่อน้ำเท่ากับ 1:1 (w/w) แล้วปรับความเป็นกรดต่างของสารแขวนลอยแป้งในน้ำล้างสุดท้ายให้เท่ากับ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N จากนั้นทิ้งแป้งให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 5 °C นำตะกอนแป้งที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่ 45 °C นาน 15 ชั่วโมง แล้วอบให้ละเอียดด้วยเครื่อง stone mill แบบ vertical แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh บรรจุสตาร์ชที่ร่อนแล้วลงในถุงซิปลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ซิลิกาเจล (silica gel) เป็นสารดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

3.2.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.1.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.1.3 ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.4 ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.1.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต คำนวณจากผลต่าง โดยนำองค์ประกอบอื่น ๆ หักออกจาก 100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.1.7 ปริมาณแอมิโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1971) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

#### วิเคราะห์ 3 ซ้ำ

#### 3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

3.2.2.1 ค่าสี (L, a, b) โดยใช้เครื่อง Chroma meter (Minolta รุ่น CR-300 series, Japan) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8) และหาค่าดัชนีความขาว (white index) จากสมการ (3.1) (Chen, Lu และ Lii, 1999)

$$\text{ค่าดัชนีความขาว} = 100 - \sqrt{(100-L)^2 + a^2 + b^2} \quad (3.1)$$

3.2.2.2 รูปร่าง และพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL รุ่น JSM-5800 LV, Japan) ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

3.2.2.3 ลักษณะ Birefringence โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น CH30RF200, Japan) และแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์บิตระนาบแสง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

3.2.2.4 รูปแบบของโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช และวิเคราะห์ pattern โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany) ดัดแปลงจากวิธีของ Zobel (1964a) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

3.2.2.5 ขนาด และการกระจายขนาดของสตาร์ชแก้วมะแฮะโดยใช้เครื่อง Multi-wavelength Particle Size Analyzer with Tornado (Dry Powder Module) System (Beckman Coulter รุ่น LS 13 320, USA) ตามวิธีของ Beckman coulter (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12)

3.2.2.6 ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ดัดแปลงจากวิธีของ Medcalf และ Gilles (1965) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13)

3.2.2.7 กำลังการพองตัว และการละลาย ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch (1964) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.14)

3.2.2.8 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช (Starch granule growth kinetics) ดัดแปลงจากวิธีของ Tattiyakul (1997) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.15)

3.2.2.9 สมบัติด้านความหนืดโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (Newport Scientific รุ่น RVA-4, Australia) ดัดแปลงจากวิธีของ Norbert, Mintus และ Detmold (1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.16)

3.2.2.10 สมบัติด้านความร้อน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix, Germany) ดัดแปลงจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.17)

3.2.2.11 สมบัติทางการไหล โดยใช้เครื่อง Rheometer (Bohlin Instrument รุ่น CVOR 150, UK) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.18)

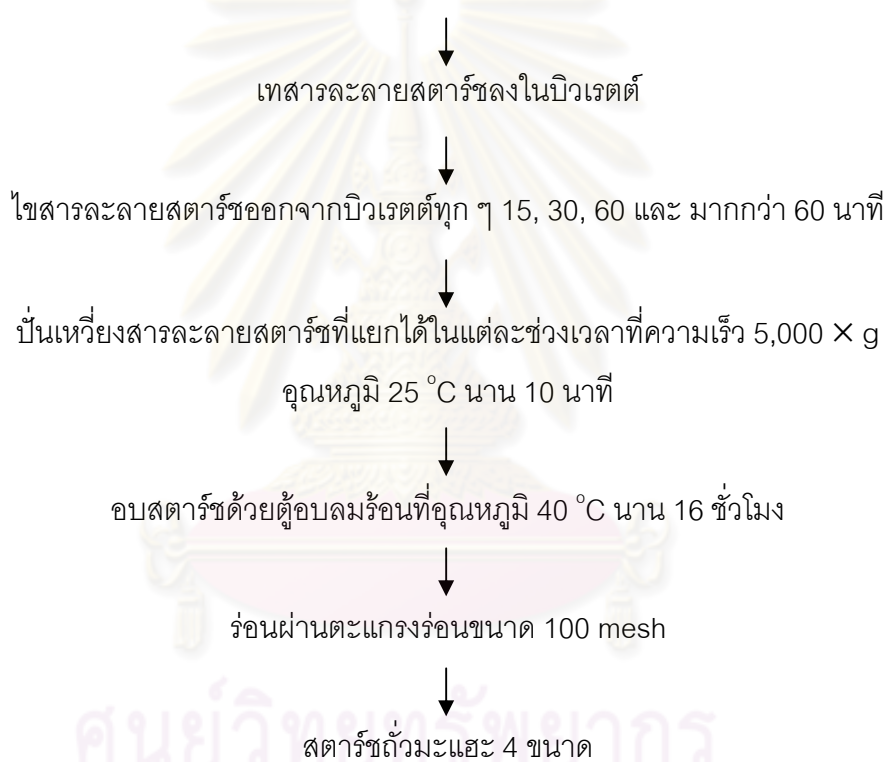
### วิเคราะห์ 3 ซ้ำ

## 3.2.3 การศึกษาผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

จำแนกขนาดของเม็ดสตาร์ชออกเป็น 4 ขนาด โดยดัดแปลงจากวิธีของ Bhunia และ Ghangrekar (2007) (รูปที่ 3.1) ซึ่งเป็นวิธีการแยกขนาดเม็ดสตาร์ชโดยอาศัยความแตกต่างของเวลาการตกตะกอนในน้ำ โดยการเตรียมสารละลายสตาร์ชในอัตราส่วนสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:25 (w/v) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายสตาร์ชที่เตรียมแล้วลงในบิวเรตซ์ขนาด 50

มิลลิลิตร จับเวลาในการตกตะกอน แล้วไซสารละลายสตาร์ชออกจากบิวเรตต์ทุก ๆ 15, 30, 60 และมากกว่า 60 นาที นำสารละลายสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลาไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi RF, USA) ที่ความเร็ว  $5,000 \times g$  นาน 10 นาที อบสตาร์ชให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Heraeus รุ่น ST 5042, Germany) ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  นาน 16 ชั่วโมง แล้วร่อนสตาร์ชที่ได้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เก็บสตาร์ชที่ร่อนแล้วทิ้ง 4 ขนาด ลงในถุงซิปปลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

ผสมสตาร์ชกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:25 (w/v) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร



**รูปที่ 3.1** วิธีการจำแนกขนาดสตาร์ชถั่วมะแฮะออกเป็น 4 ขนาด

ที่มา: ดัดแปลงจากวิธีของ Bhunia และ Ghangrekar (2007)

3.2.3.1 วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1.7

3.2.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง  
3 ซ้ำ วิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test  
(DNMRT) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4.1) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุด คือ ร้อยละ 98.95 โดยน้ำหนักแห้ง รองลงมา คือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ร้อยละ 0.64, 0.27, 0.10 และ 0.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะจัดได้ว่าเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐบันจาบ ประเทศอินเดีย ที่วิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไอโอดีน พบว่ามีปริมาณแอมิโลสเท่ากับร้อยละ 28.40 (Sandhu และ Lim, 2008) ปริมาณแอมิโลสที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีนนั้นมีข้อจำกัด กล่าวคือ โมเลกุลแอมิโลเพกตินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับกับแอมิโลส ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลเพกตินสามารถดูดซับแสงได้ที่ความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลส ส่งผลให้การวัดค่าปริมาณแอมิโลสอาจมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Julaino, 1984) และอาจเนื่องมาจากสารมาตรฐานแอมิโลสที่ใช้ในการทดลองคือแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง type 3 ซึ่งทำให้วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสได้มากกว่าความเป็นจริง

#### ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
ความชื้น (% wb)	12.96 ± 0.08
คาร์โบไฮเดรต (% db)	98.95 ± 0.02
เส้นใยหยาบ (% db)	0.64 ± 0.01
ไขมัน (% db)	0.27 ± 0.01
เถ้า (% db)	0.10 ± 0.01
โปรตีน (% db)	0.04 ± 0.00
แอมิโลส (% of starch)	64.61 ± 0.93

#### 4.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

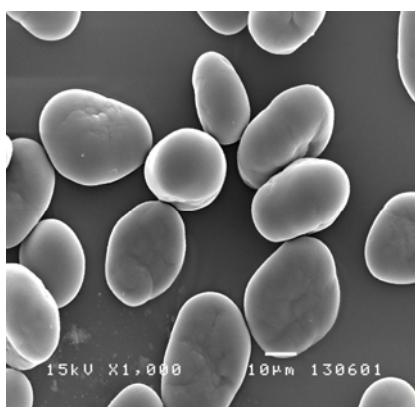
##### 4.1.2.1 ค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการวัดค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง Chroma meter พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า L (ความสว่าง) a (+ สีแดง, - สีเขียว) และ b (+ สีเหลือง, - สีน้ำเงิน) เท่ากับ  $76.09 \pm 0.42$ ,  $-0.61 \pm 0.10$  และ  $1.16 \pm 0.06$  ตามลำดับ และมีค่าดัชนีความขาวเท่ากับ  $76.05 \pm 0.42$  ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะตามธรรมชาติจะมีสีขาวนวล และมีค่าความสว่างค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการสกัดสตาร์ชด้วยสารละลายต่างอ่อนและการร่อนอาจทำให้ส่วนของโปรตีน เส้นใย และไขมันบางส่วนถูกกำจัดออกไป จึงเป็นการลดสิ่งปนเปื้อนในเม็ดสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

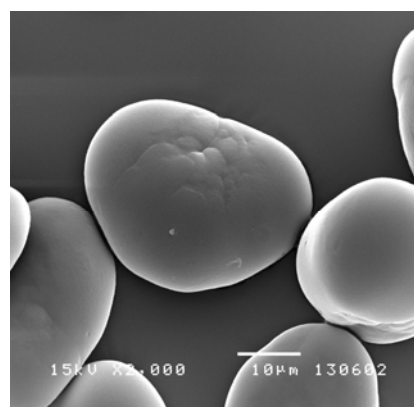
##### 4.1.2.2 รูปร่าง ลักษณะพื้นผิว ลักษณะ birefringence รูปแบบโครงสร้างผลึก ขนาด และการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้กล้อง SEM (รูปที่ 4.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรี มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ และเม็ดสตาร์ชยังคงมีความสมบูรณ์





(1000x)

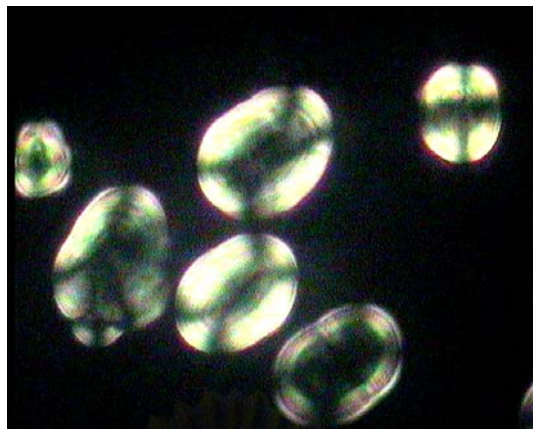


(2000x)

#### รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ

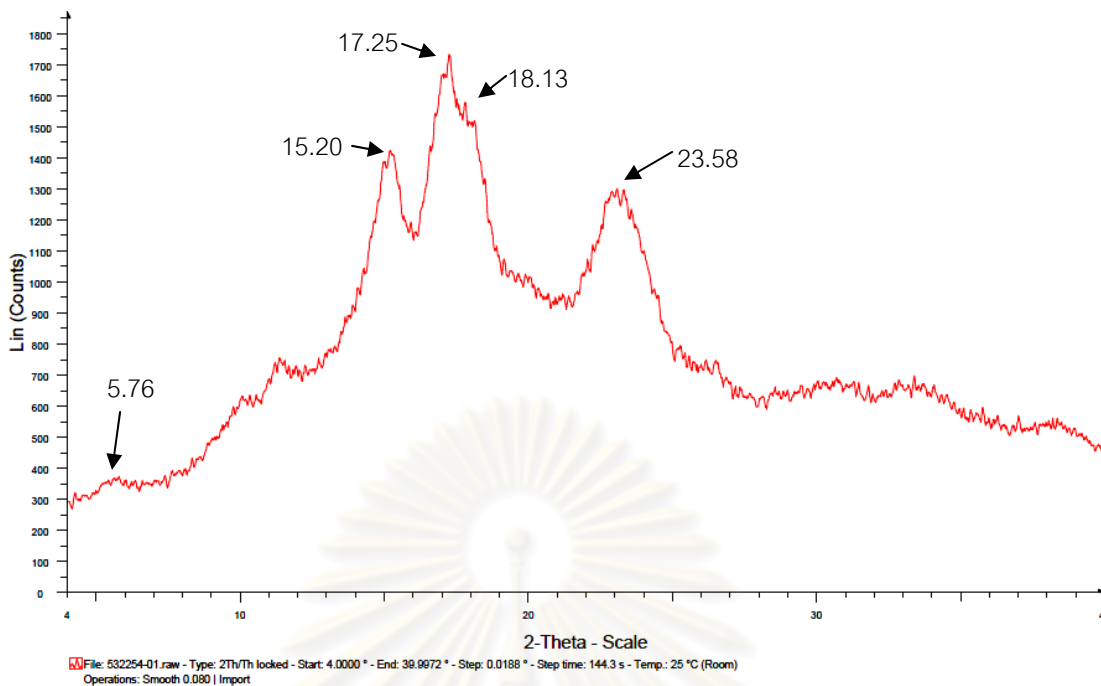
จากการวิเคราะห์รูปร่างของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (รูปที่ 4.2) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรีคล้ายเมล็ดถั่ว เช่นเดียวกับเม็ดสตาร์ชของถั่วเขียว (Liu และ Shen, 2007) และจากการวิเคราะห์ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่า มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แสดงว่าการสร้างสายพอลิเมอร์ของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชและขยายออกตามแนวรัศมีของสตาร์ช และการเห็นลักษณะ birefringence ที่ชัดเจนนี้เป็นการชี้ให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหาย กล่าวคือ จากการสกัดโปรตีนออกด้วยสารละลายต่างอ่อนนั้นไม่ทำให้เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ช ส่วนการที่เม็ดสตาร์ชเกิด birefringence เมื่อปิดระนาบแสงโพลาไรซ์แสดงว่าเม็ดสตาร์ชมีสภาพเป็น semi-crystalline โดยส่วนที่เป็น birefringence เกิดจาก crystalline region ในเม็ดสตาร์ช (Gallant, Bouchaet และ Baldwin, 1997)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 4.2** รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้ Wide Angle X-Ray Diffraction พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีพีค (peak) เกิดขึ้นที่ 5.76, 15.20, 17.25, 18.13 และ 23.58 องศา (รูปที่ 4.3) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว โดยเป็นลักษณะโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเรียงตัวแบบหนาแน่น และโครงสร้างผลึกแบบ B ที่พบในสตาร์ชจากพืชหัว ซึ่งมีการเรียงตัวแบบหลวม ๆ (Donald, 2004) และมี degree of crystallinity เท่ากับ 39.84% ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ที่พบว่า degree of crystallinity ของสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐบิโนจาบ ประเทศอินเดียมีค่าเท่ากับ 33.40%



รูปที่ 4.3 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชั้วมะแฮะ

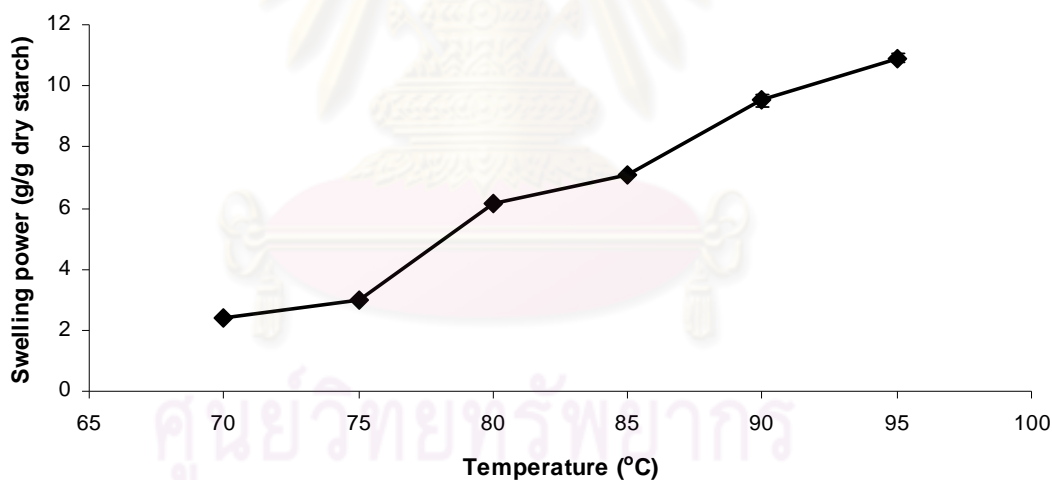
จากการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชั้วด้วยเครื่อง Multi-wavelength Particle Size Analyzer with Tornado (Dry Powder Module) System (รูปที่ ข.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชั้วมะแฮะมีขนาดอยู่ในช่วง 10.78 ถึง 43.67 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $27.32 \pm 0.01$  ไมครอน ซึ่งสตาร์ชั้วมะแฮะสามารถจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชั้วที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 25 ไมครอนขึ้นไป (Lindeboom และคณะ, 2004)

#### 4.1.2.3 ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ของสตาร์ชั้วมะแฮะ

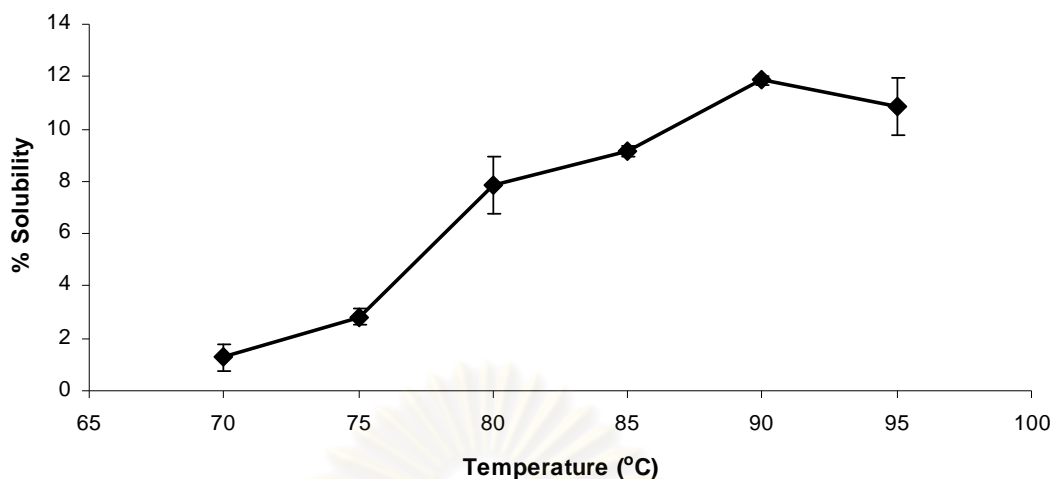
โดยทั่วไปสตาร์ชั้วไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิต์ในเซชัน เมื่อเติมน้ำลงในสตาร์ชั้วและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชั้วจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) จากการศึกษาค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชั้วมะแฮะ พบว่า มีค่าความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ  $0.74 \pm 0.01$  กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชั้วแห้ง ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ผลการทดลองที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยกับผลการทดลองของ Sandhu และ Lim (2008) ที่พบว่าสตาร์ชั้วมะแฮะจากรัฐปีนจาบ ประเทศอินเดีย ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสเท่ากับร้อยละ 28.40 มีความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 1.04 กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชั้วแห้ง

#### 4.1.2.4 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

กำลังการพองตัวสามารถบ่งบอกความหนืดของสตาร์ชสุกได้ โดยสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงเมื่อสตาร์ชสุกก็จะมีความหนืดที่สูงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง จึงเกิดความหนืดขึ้น ส่วนการละลายจะมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น ทำให้แอมิโลสบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้มีการละลายที่สูงขึ้นด้วย (Mondragón และคณะ, 2006) จากการศึกษากำลังการพองตัวและการละลาย (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่า กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปทำพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวมากขึ้นก็จะส่งผลให้โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (Hoover, 2001)



รูปที่ 4.4 กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C



รูปที่ 4.5 การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C

#### 4.1.2.5 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (Starch granule growth kinetics)

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.2) พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีอัตราการพองตัวที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tattiyakul (1997) ที่ได้ศึกษาจลนศาสตร์การขยายขนาดของสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 2.6 % พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy,  $E_a$ ) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตีในเซชันในช่วงอุณหภูมิ 69 °C ถึง 79 °C เท่ากับ  $343.76 \text{ kJ mole}^{-1}$

ตารางที่ 4.2 อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า  $E_a$

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช		$E_a$ (kJ mole <sup>-1</sup> )
	$K_r$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	
69	0.0008 ± 0.0000	0.6558 – 0.7861	343.76 ± 6.67
74	0.0054 ± 0.0000	0.8863 – 0.9149	
79	0.0237 ± 0.0025	0.9519 – 0.9676	

พลังงานก่อกัมมันต์คือ ระดับพลังงานขั้นต่ำที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ (ดวงกมล ณ ระนอง, 2551) ดาวฤกษ์ต่างชนิดกันจะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยดาวฤกษ์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ได้แก่ ดาวฤกษ์จากข้าวโพดและข้าว มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันต่ำกว่าดาวฤกษ์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ B ได้แก่ ดาวฤกษ์จากมันฝรั่งและมันสำปะหลัง ส่วนดาวฤกษ์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ได้แก่ ดาวฤกษ์จากถั่วมะแฮะและ cowpea ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกผสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A และ B จะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันอยู่ระหว่างค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันของดาวฤกษ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B นั้นเอง และจากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของดาวฤกษ์มันฝรั่งในช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาคีโนเซชันต่างกันจะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันของดาวฤกษ์ชนิดใดก็ตาม ควรที่จะเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาคีโนเซชันเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า  $E_a$  ของดาวฤกษ์ชนิดต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีโนเซชัน

ชนิดของดาวฤกษ์	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$E_a$ ( $\text{kJ mole}^{-1}$ )	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	ที่มา
ข้าวโพด	70-85	62.00	Particle size analysis	Okechukwu และ Rao (1996a)
ข้าวโพด	70-90	76.00	Alkali solubility	Cabrera และคณะ (1984)
Cowpea	67-86	233.60	Particle size analysis	Okechukwu และ Rao (1996b)
Cowpea	73-85	198.00	Thermal scanning rigidity monitor	Okechukwu และคณะ (1991)
มันฝรั่ง	60-63	963.00	Viscometry	Kubota และคณะ (1979)
มันฝรั่ง	< 67.5	821.00	DSC	Pravisan, Califano และ Calvedo (1985)
	> 67.5	244.00	DSC	
ข้าว	70-85	59.00	Viscometry	Kubota และคณะ (1979)
ข้าว	< 100	80.00	Parallel plate plastometers	Suzuki และคณะ (1976)
มันสำปะหลัง	61-70	395.60	Particle size analysis	Tattiyakul (1997)
ถั่วมะแฮะ	69-79	343.76	Particle size analysis	ในงานวิจัยนี้

#### 4.1.2.6 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่าง ๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.4) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูง คือ  $81.28^{\circ}\text{C}$  มีความหนืดสูงสุด  $4,106.5$  cP มีช่วง breakdown ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทนต่อแรงกวนที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ  $1,082.5$  cP และมีค่า setback ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มในการคืนตัวหรือเกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ  $2,812.5$  cP เจลของสตาร์ชถั่วมะแฮะหลังจากผ่านการทดสอบสมบัติทางด้านการเกิดเพสต์ด้วยเครื่อง RVA แล้ว พบว่า มีลักษณะเป็นเจลขุ่น และเป็นแบบ short gel เนื่องจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสสูง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังการพองตัวกับค่า pasting temperature จะเห็นได้ว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ  $75$  ถึง  $90^{\circ}\text{C}$  และค่า pasting temperature ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเช่นกัน

ตารางที่ 4.4 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

Pasting properties*	ค่าที่ได้
Peak viscosity (cP)	$4,106.50 \pm 3.54$
Trough (cP)	$3,024.00 \pm 11.31$
Breakdown (cP)	$1,082.50 \pm 7.78$
Final viscosity (cP)	$5,836.50 \pm 60.10$
Setback (cP)	$2,812.50 \pm 48.79$
Pasting temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$81.28 \pm 0.53$
Peak time (minute)	$4.67 \pm 0.00$

หมายเหตุ: \* ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยสตาร์ช 3 กรัม และน้ำ 25 กรัม

#### 4.1.2.7 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง DSC ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $30$  ถึง  $95^{\circ}\text{C}$  ได้ค่า onset temperature ( $T_o$ ), peak temperature ( $T_p$ ), conclusion temperature ( $T_c$ ), enthalpy of gelatinization ( $\Delta H$ ) และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติเนชัน ( $\Delta T$ ) ดังตารางที่ 4.5 พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติเน-

เซชัน (gelatinization temperature range;  $T_c - T_o$ ) เท่ากับ 70.95 ถึง 83.95 °C เมื่อพิจารณาว่า  $T_o$  และค่า pasting temperature ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA พบว่า ค่า  $T_o$  ของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าต่ำกว่าค่า pasting temperature เนื่องจากค่า pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่สารละลายสตาร์ชเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อเม็ดสตาร์ชเริ่มดูดน้ำและพองตัวได้ในระดับหนึ่ง ในขณะที่  $T_o$  วัดจากการเปลี่ยนแปลงด้านความร้อน (heat flux) นั่นคือ เมื่อสตาร์ชเริ่มเกิดเจลต้องมีการดูดความร้อนเข้าไปในระบบโดยความหนืดอาจยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ค่า  $T_o$  ต่ำกว่าค่า pasting temperature (Jane และคณะ, 1999)

**ตารางที่ 4.5** สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

สมบัติด้านความร้อน	ค่าที่ได้
$T_o$ (°C)	70.95 ± 0.07
$T_p$ (°C)	77.20 ± 0.28
$T_c$ (°C)	83.95 ± 0.07
$\Delta H$ (J / g)	12.97 ± 0.13
$\Delta T$ (°C)	13.00 ± 0.00

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ซึ่งศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐปันจาบ ประเทศอินเดีย (ตารางที่ 4.6) พบว่า ค่า  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  และ  $\Delta H$  ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าผลการทดลองของ Sandhu และ Lim (2008) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่า ทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากกว่า โดยอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันจะบ่งบอกถึงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกเม็ดสตาร์ช โดยสตาร์ชที่มีอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูง แสดงว่ามีความเป็นผลึกมากหรือมีโครงสร้างที่คงทนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันได้มากกว่า (Barichello และคณะ, 1990)

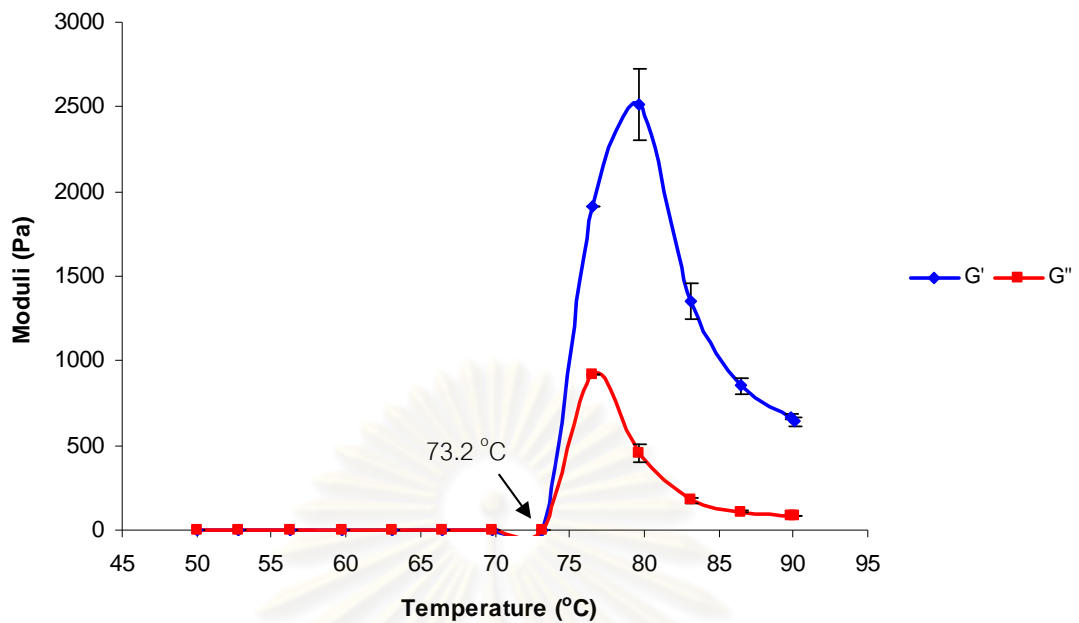


ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

	ปริมาณ แอมิโลส (%)	Degree of crystallinity (%)	อัตราส่วน สตาร์ช:น้ำ (w/w)	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
งานวิจัยนี้	64.61	39.84	1:2.3	70.95	77.20	83.95	12.97
Sandhu และ Lim (2008)	28.40	33.40	1:2.3	69.30	75.50	80.60	7.20

#### 4.1.2.8 สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

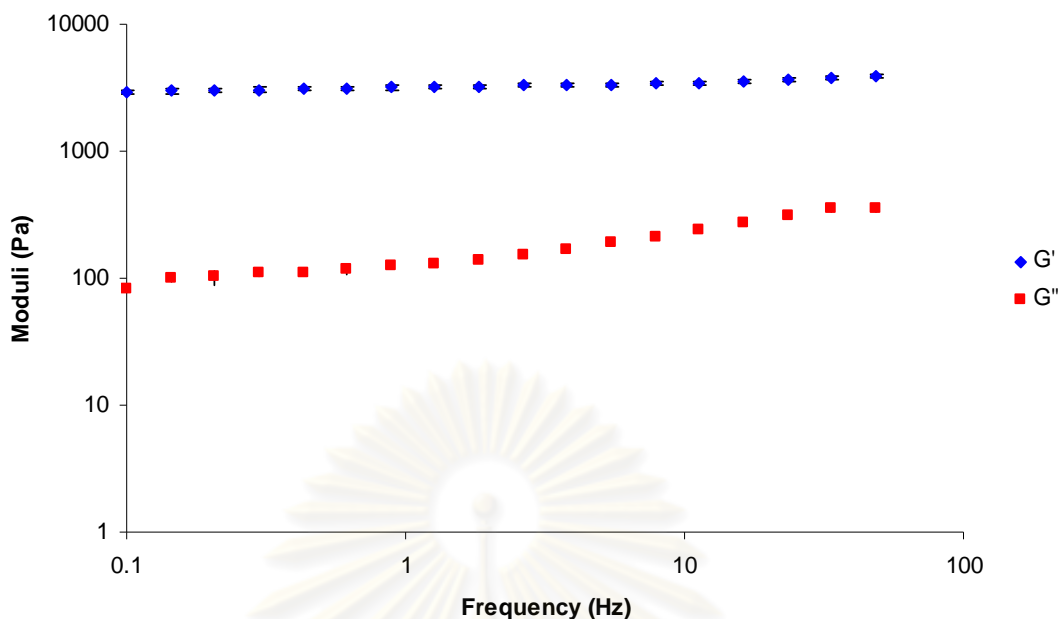
จากการทดสอบ temperature sweep test ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 (w/w) ซึ่งกำหนดค่า Linear viscoelastic range ที่ 40 Pa stress และความถี่ที่ 1 Hz (รูปที่ 4.6) พบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ช ค่า elastic modulus ( $G'$ ) และ viscous modulus ( $G''$ ) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารละลายสตาร์ชไปสู่สภาพที่เรียกว่า sol (Tsai, Li และ Lii, 1997) สตาร์ชถั่วมะแฮะเริ่มเกิดเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ 73.2 °C ซึ่งค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 79.7 °C และ 76.5 °C ตามลำดับ และเมื่อให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพีคสูงสุด เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเต็มที่และแตกออก โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ส่งผลให้ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าลดลง (Chiotelli และ Meste, 2002)



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ ตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C

จากนั้นนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการทดสอบ temperature sweep test แล้ว มาทดสอบ frequency sweep test ต่อ โดยกำหนดสภาวะการทดสอบที่ 40 Pa stress อุณหภูมิ 25 °C และความถี่อยู่ในช่วง 0.1 Hz ถึง 100 Hz พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า G' มากกว่าค่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดลอง (รูปที่ 4.7) ซึ่งแสดงถึงเจลมีความแข็งแรงและคงทน ต่อแรงกระทำ และเป็นการชี้ให้เห็นว่าเจลมีลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะความเป็นของเหลว

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบ ตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz

## 4.2 ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

### 4.2.1 ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.7) พบว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chen และคณะ (2003b) ที่ศึกษาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันฝรั่ง 1 สายพันธุ์ และสตาร์ชมันเทศ 2 สายพันธุ์ จากประเทศเนเธอร์แลนด์ แล้วแยกขนาดออกเป็น 3, 2 และ 2 ขนาด ตามลำดับ พบว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้ศึกษาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันฝรั่ง 4 สายพันธุ์ จากรัฐปันจาบ ประเทศอินเดีย ที่ผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด พบว่า ปริมาณแอมิโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น

**ตารางที่ 4.7** ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชและปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตัวอย่าง	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	ปริมาณแอมิโลส (%)
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	28.13 <sup>a</sup> ± 0.09	65.50 <sup>a</sup> ± 1.11
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	26.99 <sup>b</sup> ± 0.22	63.44 <sup>a</sup> ± 0.15
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	24.50 <sup>c</sup> ± 0.02	61.07 <sup>b</sup> ± 1.92
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที	20.49 <sup>d</sup> ± 0.07	60.63 <sup>b</sup> ± 0.12

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.2.2 ขนาด และการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ ข.2) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที มีขนาดเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 28.13, 26.99, 24.50 และ 20.49 ไมครอน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) และปริมาณของสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลาแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณของสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลา

ตัวอย่าง	ปริมาณสตาร์ชที่แยกได้ (%)
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	45.17 ± 2.11
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	26.38 ± 1.77
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	14.24 ± 1.33
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที	2.46 ± 0.85
การสูญเสีย (% loss)	11.75 ± 3.56
รวม	100.00

#### 4.2.3 ค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวัดค่าสีและค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.9) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที มีค่า L, a, b และค่าดัชนีความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที มีค่าความสว่างมากที่สุด ส่วนเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าดัชนีความขาวน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าเม็ดสตาร์ชทั้ง 4 ขนาด มีค่าสีที่แตกต่างกัน แต่ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างด้วยตาเปล่าได้

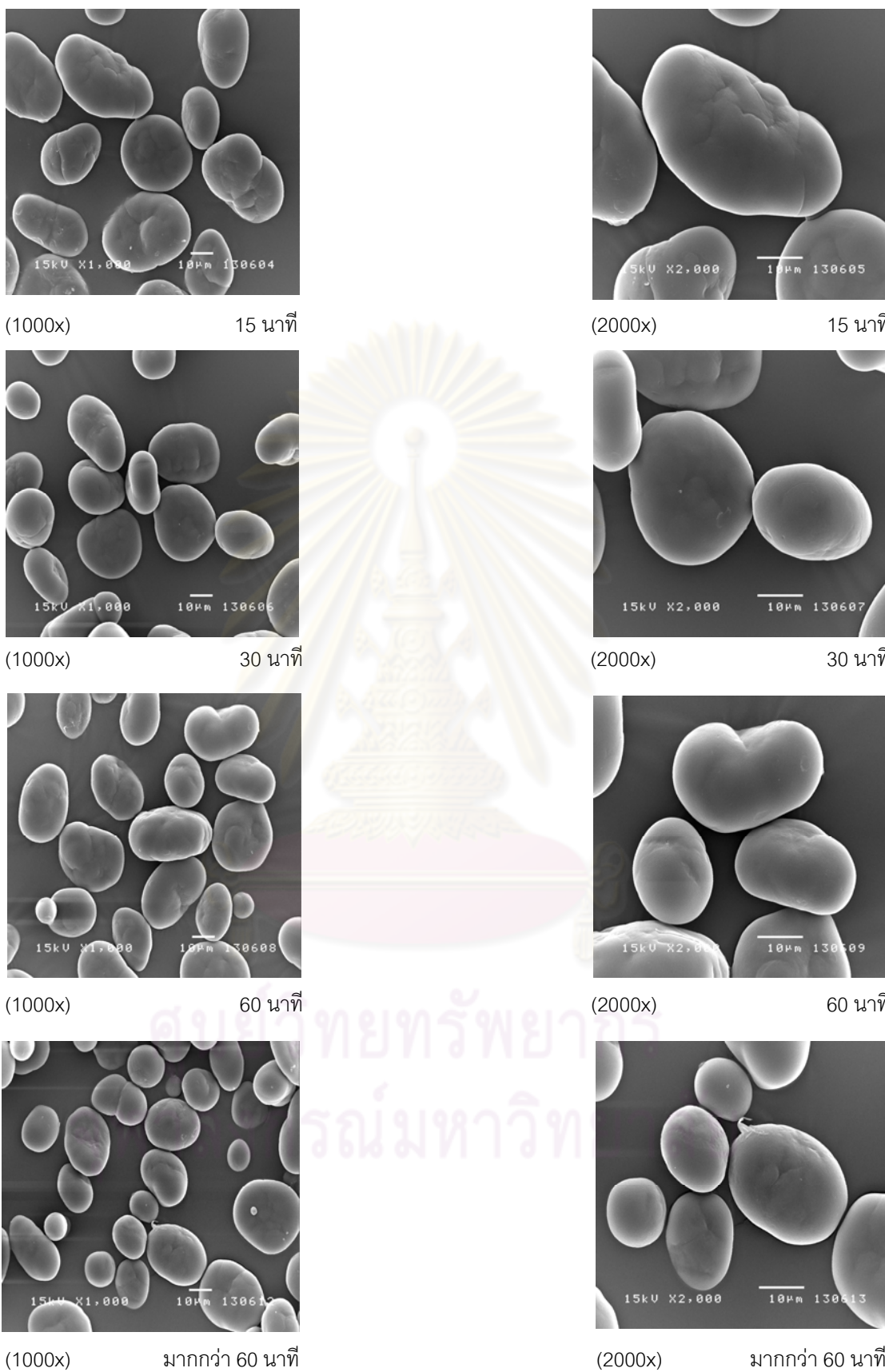
ตารางที่ 4.9 ค่าสี L, a, b และค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตัวอย่างสตาร์ชที่ ตกตะกอนที่เวลา	ค่าสี			ค่าดัชนีความขาว
	L	a	b	
15 นาที	76.43 <sup>c</sup> ± 0.09	-0.66 <sup>a</sup> ± 0.03	1.14 <sup>a</sup> ± 0.08	76.52 <sup>b</sup> ± 0.54
30 นาที	77.56 <sup>a</sup> ± 0.04	-0.78 <sup>b</sup> ± 0.06	1.07 <sup>b</sup> ± 0.04	77.52 <sup>a</sup> ± 0.04
60 นาที	77.32 <sup>b</sup> ± 0.02	-0.79 <sup>b</sup> ± 0.02	0.93 <sup>c</sup> ± 0.02	77.29 <sup>a</sup> ± 0.02
มากกว่า 60 นาที	77.29 <sup>b</sup> ± 0.05	-0.62 <sup>a</sup> ± 0.03	0.88 <sup>d</sup> ± 0.01	77.27 <sup>a</sup> ± 0.05

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสมมติเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.2.4 รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

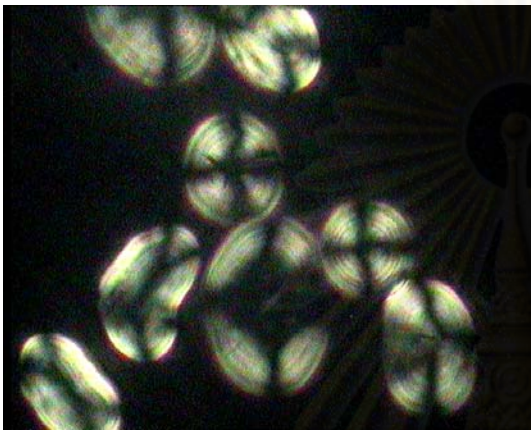
จากการศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วโดยใช้เครื่อง SEM (รูปที่ 4.8) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีรูปร่างและลักษณะพื้นผิวไม่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างกลมและรี และมีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเมล็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่แยกที่เวลาต่าง ๆ

#### 4.2.5 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

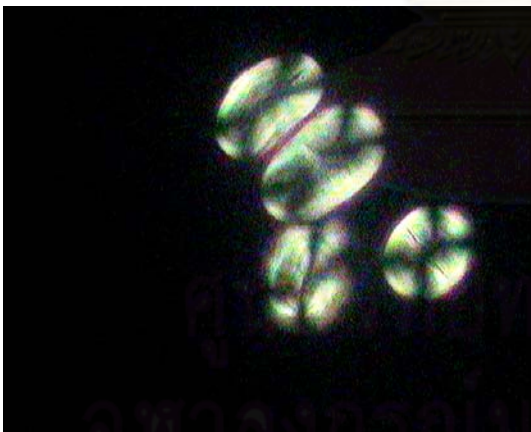
จากการวิเคราะห์รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ 4.9) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีรูปร่างกลม และรีคล้ายเม็ดถั่ว มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) อยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช



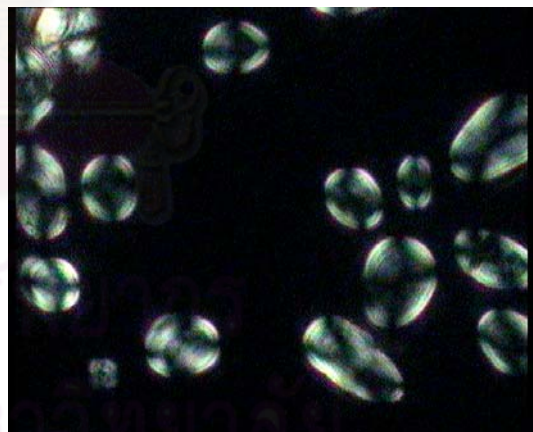
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที



สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที



สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที

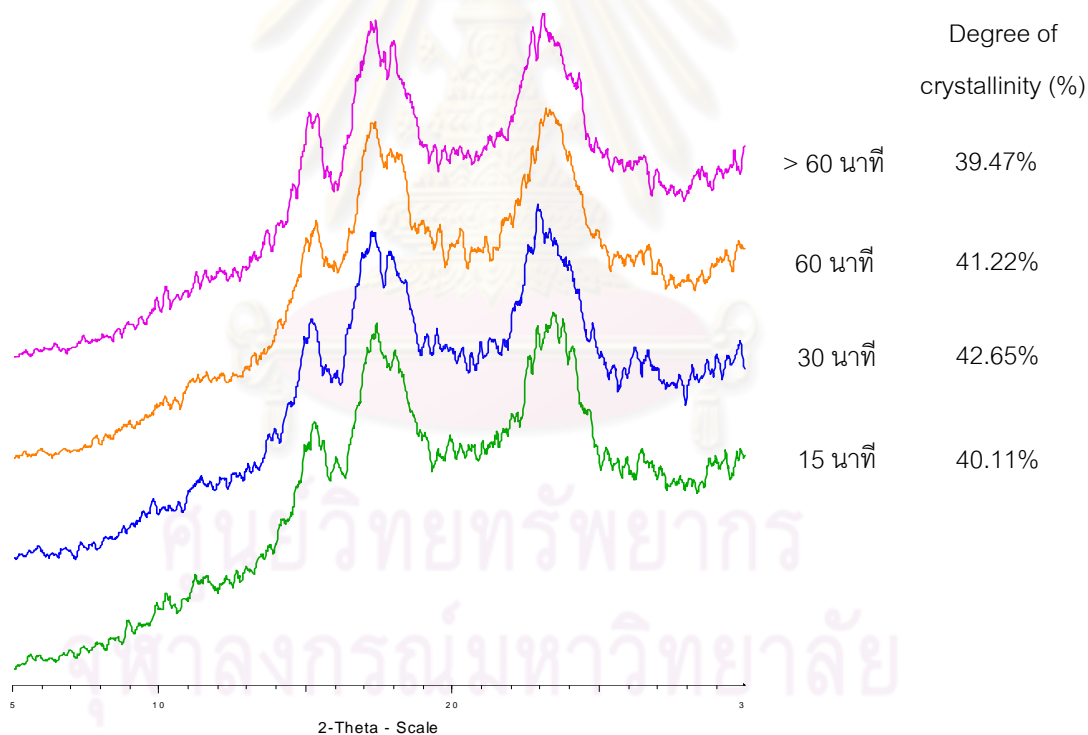


สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที

รูปที่ 4.9 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

#### 4.2.6 รูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ 4.10) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีรูปแบบ X-ray diffraction pattern ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang และคณะ (2002) ที่ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของ normal และ waxy barley starch จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด พบว่า เม็ดสตาร์ชของ normal และ waxy barley starch ทั้ง 3 ขนาด มีรูปแบบ X-ray diffraction pattern ไม่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากธัญพืช และในการวิเคราะห์ degree of crystallinity ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที พบว่า มีค่าเท่ากับ 40.11%, 42.65%, 41.22% และ 39.47% ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว



#### 4.2.7 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่สูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ซึ่งแอมิโลสที่มีอยู่ในปริมาณมากกว่านี้จะจับกันเกิดพันธะที่แข็งแรงภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช จึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการจับน้ำที่ลดลง (Chen, Schols และ Voragen, 2003a) และอาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กสามารถจับน้ำได้มากกว่านั่นเอง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wootton และ Bamunuarachchi (1978) ที่พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำของ maize starch มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2001) ที่พบว่า waxy barley starch ที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กมีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ เช่นเดียวกันกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง

ตารางที่ 4.10 ค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา	ค่าความสามารถในการจับน้ำ (กรัม/กรัมสตาร์ชแห้ง)
15 นาที	$0.64^d \pm 0.00$
30 นาที	$0.67^c \pm 0.00$
60 นาที	$0.69^b \pm 0.00$
มากกว่า 60 นาที	$0.72^a \pm 0.00$

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.2.8 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่า กำลังการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อค่ากำลังการพองตัวและการละลาย พบว่า ค่ากำลังการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ส่วนค่า

การละลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น (รูปที่ ข.3 และ ข.4) เนื่องจากปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่สูงกว่า จึงมีความสามารถในการจับน้ำที่ต่ำกว่า ส่งผลให้กำลังการพองตัวมีค่าต่ำกว่า (Kerr และคณะ, 2000) แต่มีค่าการละลายมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2002) ที่พบว่ากำลังการพองตัวของ normal และ waxy barley starch มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Huang และคณะ (2007) ที่พบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ช yellow pea, chickpea และ cowpea มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้ทำการทดลองหาค่ากำลังการพองตัว และการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว พบว่า กำลังการพองตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ส่วนการละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชที่	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมสตาร์ชแห้ง)					
		70 °C	75 °C <sup>ns</sup>	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C
สตาร์ชที่ยังไม่ได้ ผ่านการแยกขนาด	27.32 ± 0.01	2.41 ± 0.04	3.00 ± 0.00	6.12 ± 0.03	7.09 ± 0.01	9.52 ± 0.21	10.89 ± 0.15
15 นาที	28.13 <sup>a</sup> ± 0.09	2.10 <sup>b</sup> ± 0.30	2.97 ± 0.03	5.53 <sup>b</sup> ± 0.01	8.38 <sup>c</sup> ± 0.32	9.20 <sup>c</sup> ± 0.14	10.64 <sup>b</sup> ± 0.09
30 นาที	26.99 <sup>b</sup> ± 0.22	2.40 <sup>ab</sup> ± 0.07	3.01 ± 0.04	5.56 <sup>b</sup> ± 0.12	8.60 <sup>bc</sup> ± 0.33	9.25 <sup>c</sup> ± 0.04	10.99 <sup>a</sup> ± 0.01
60 นาที	24.50 <sup>c</sup> ± 0.02	2.40 <sup>ab</sup> ± 0.01	3.19 ± 0.21	6.19 <sup>a</sup> ± 0.19	9.34 <sup>ab</sup> ± 0.55	9.57 <sup>b</sup> ± 0.11	11.19 <sup>a</sup> ± 0.24
> 60 นาที	20.49 <sup>d</sup> ± 0.07	2.56 <sup>a</sup> ± 0.13	3.21 ± 0.13	6.35 <sup>a</sup> ± 0.35	9.39 <sup>a</sup> ± 0.32	9.80 <sup>a</sup> ± 0.06	11.23 <sup>a</sup> ± 0.00

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

ตารางที่ 4.12 การละลายที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชที่	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	การละลาย (%)					
		70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C
สตาร์ชที่ยังไม่ได้ ผ่านการแยกขนาด	27.32 ± 0.01	1.29 ± 0.52	2.83 ± 0.33	7.84 ± 1.08	9.15 ± 0.19	11.86 ± 0.16	10.84 ± 1.20
15 นาที	28.13 <sup>a</sup> ± 0.09	2.66 <sup>a</sup> ± 0.11	5.15 <sup>a</sup> ± 0.33	9.70 <sup>a</sup> ± 0.06	11.12 <sup>a</sup> ± 0.15	11.52 <sup>a</sup> ± 0.18	12.28 <sup>a</sup> ± 0.02
30 นาที	26.99 <sup>b</sup> ± 0.22	1.64 <sup>b</sup> ± 0.44	4.06 <sup>b</sup> ± 0.60	9.08 <sup>b</sup> ± 0.01	10.29 <sup>b</sup> ± 0.20	11.34 <sup>ab</sup> ± 0.07	10.95 <sup>b</sup> ± 0.01
60 นาที	24.50 <sup>c</sup> ± 0.02	1.25 <sup>b</sup> ± 0.03	2.38 <sup>c</sup> ± 0.20	8.80 <sup>c</sup> ± 0.14	10.22 <sup>b</sup> ± 0.43	11.21 <sup>b</sup> ± 0.07	10.79 <sup>b</sup> ± 0.46
> 60 นาที	20.49 <sup>d</sup> ± 0.07	1.23 <sup>b</sup> ± 0.02	1.58 <sup>d</sup> ± 0.04	7.21 <sup>d</sup> ± 0.06	9.79 <sup>b</sup> ± 0.60	11.17 <sup>b</sup> ± 0.16	9.75 <sup>c</sup> ± 0.49

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสมมติเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.2.9 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.13) พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที 60 นาที และมากกว่า 60 นาที นั้น อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นไม่ได้มีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชอย่างชัดเจน ซึ่งสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลาติโนเซชันมากที่สุด แสดงถึงอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชค่อนข้างมาก นั่นคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะทำให้อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมากนั่นเอง ส่วนสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที และ 60 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลาติโนเซชันค่อนข้างต่ำ แสดงถึงอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็ตาม และจากผลการทดลองที่พบว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลาติโนเซชันมากที่สุดนั้น อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบที่สูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลาอื่น ๆ ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานจำนวนมากกว่าในการเกิดเจลาติโนเซชัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Freitas และคณะ (2004) ที่ได้ศึกษาจลนศาสตร์การเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเสา (*Dioscorea alata*) และสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าสตาร์ชมันเสามีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ทำให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเสามีค่าสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง

**ตารางที่ 4.13** อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า  $E_a$

ตัวอย่างสตาร์ชที่ ตกตะกอนที่เวลา	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช		$E_a$ ( $\text{kJ mole}^{-1}$ )
		$(K_p)$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$	
15 นาที	69	$0.0023 \pm 0.0000$	$0.9416 - 0.9445$	$162.89 \pm 1.80$
	74	$0.0037 \pm 0.0001$	$0.9637 - 0.9810$	
	79	$0.0117 \pm 0.0002$	$0.9163 - 0.9421$	
30 นาที	69	$0.0023 \pm 0.0001$	$0.9848 - 0.9898$	$9.96 \pm 4.50$
	74	$0.0033 \pm 0.0001$	$0.9423 - 0.9887$	
	79	$0.0024 \pm 0.0003$	$0.7238 - 0.9386$	
60 นาที	69	$0.0007 \pm 0.0000$	$0.8877 - 0.8966$	$21.23 \pm 12.04$
	74	$0.0004 \pm 0.0000$	$0.9237 - 0.9285$	
	79	$0.0008 \pm 0.0002$	$0.6162 - 0.9490$	
มากกว่า 60 นาที	69	$0.0044 \pm 0.0000$	$0.8583 - 0.9062$	-
	74	$-0.0102 \pm 0.0006$	$0.7881 - 0.8308$	
	79	$-0.0265 \pm 0.0012$	$0.7146 - 0.7700$	

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่สามารถหาค่าได้

#### 4.2.9 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกันจะมีค่า peak viscosity, trough, final viscosity, setback และ pasting temperature แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.14 แต่มีค่า breakdown และ peak time แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยจะเห็นได้ว่าคุณค่า pasting temperature หรืออุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง แสดงให้เห็นถึงเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้นเพราะโมเลกุลแอมิโลสละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัว (Ghiasi, Varriano-Marston และ Hosney, 1982) ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก อาจทำให้โมเลกุลแอมิโลสละลายออกมามากกว่า จึงทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นมากกว่าด้วย นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เมื่อได้รับความร้อนจะ

คูดน้ำและเกิดการขยายขนาดเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการเปื่อยเสียดกับเม็ดสตาร์ชข้างเคียงได้มากกว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของเพสต์เพิ่มขึ้นสูงมากกว่า ดังนั้นจึงเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้เร็วกว่านั่นเอง ซึ่งเหตุผลดังกล่าวข้างต้นนี้จึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีค่า peak viscosity หรือค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก และการที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีค่า peak viscosity ต่ำที่สุดนั้น อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีแอมิโลสในปริมาณที่ต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ การที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชง่ายต่อการแตกออกเมื่อได้รับความร้อน (Hermansson และ Svegmak, 1996) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Noda และคณะ (2005) ที่พบว่าค่า peak viscosity ของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง และเมื่อพิจารณาค่า setback พบว่า ค่า setback มีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น แสดงว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดเมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตีในเซชัน และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกก็จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะหลุดออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อลดอุณหภูมิให้สตาร์ชเย็นตัวลง โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดร่างแหสามมิติ มีความหนืดและความคงตัวมากขึ้น ทำให้เกิดลักษณะเป็นเจล (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ดังนั้นจากการทดลองที่พบว่า เม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่านั้น อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสมากกว่า เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและแตกออก ก็จะมีปริมาณแอมิโลสหลุดออกมาได้มากกว่า จึงเกิดเจลได้ดีกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Collado และ Corke (1997) ที่พบว่าแอมิโลสในปริมาณที่สูงจะทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า setback มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่า trough และ final viscosity มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น

**ตารางที่ 4.14** สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่ระดับความเข้มข้น 12% (w/w)

ค่าที่ได้จาก เครื่อง RVA	ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา			
	15 นาที	30 นาที	60 นาที	> 60 นาที
Peak viscosity (cP)	4,147.50 <sup>a</sup> ± 17.68	4,072.50 <sup>b</sup> ± 14.85	4,154.00 <sup>a</sup> ± 4.24	3,322.00 <sup>c</sup> ± 31.11
Trough (cP)	3,150.50 <sup>a</sup> ± 38.89	3,096.50 <sup>a</sup> ± 28.99	3,094.00 <sup>a</sup> ± 7.07	2,290.00 <sup>b</sup> ± 4.24
Breakdown (cP) <sup>ns</sup>	997.00 ± 56.57	976.00 ± 43.84	1,060.00 ± 11.31	1,032.00 ± 35.36
Final viscosity (cP)	6,184.00 <sup>a</sup> ± 63.64	6,084.00 <sup>ab</sup> ± 19.80	6,003.50 <sup>b</sup> ± 38.89	4,186.50 <sup>c</sup> ± 43.13
Setback (cP)	3,033.50 <sup>a</sup> ± 24.75	2,987.50 <sup>ab</sup> ± 48.79	2,909.50 <sup>b</sup> ± 45.96	1,896.50 <sup>c</sup> ± 47.38
Pasting temperature (°C)	80.80 <sup>b</sup> ± 0.00	81.70 <sup>a</sup> ± 0.00	81.66 <sup>a</sup> ± 0.04	82.06 <sup>a</sup> ± 0.53
Peak time (minute) <sup>ns</sup>	4.73 ± 0.00	4.73 ± 0.00	4.77 ± 0.05	4.77 ± 0.05

หมายเหตุ: a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

#### 4.2.10 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกันจะมีค่า conclusion temperature ( $T_c$ ), enthalpy of gelatinization ( $\Delta H$ ) และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta T$ ) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 แต่มีค่า onset temperature ( $T_o$ ) และ peak temperature ( $T_p$ ) แตกต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยพบว่าค่า enthalpy of gelatinization หรือพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันจะมีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบที่สูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากกว่า จึงต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้เกิดเจล ส่งผลให้ค่า enthalpy of gelatinization มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย Sasaki และคณะ (2000) ได้อธิบายว่าค่า  $\Delta H$  อาจมีความสัมพันธ์กับปริมาณของส่วนผลึกของแอมิโลเพกตินด้วย เนื่องจาก  $\Delta H$  คือพลังงานที่ใช้ในการหลอมโครงสร้างผลึกในการเกิดเจล ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการหลอมโครงสร้างผลึกส่วนที่เป็นแอมิโลเพกตินสูงกว่าแอมิโลส ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่อาจมีแอมิโลเพกตินสูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยด้านอื่น ๆ ได้อีก เช่น การกระจายตัวของความยาวสายโซ่ของแอมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ขนาดของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2001) ที่ได้แยกขนาด waxy barley



starch ออกเป็นขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก พบว่า ค่า enthalpy of gelatinization มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้แยกขนาดสตาร์ชมันฝรั่งออกเป็น 3 ขนาด พบว่าค่า enthalpy of gelatinization มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลงเช่นกัน และเมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชัน พบว่า ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีช่วงกว้างกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กอาจมีส่วนของโครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ชที่มีความเสถียรแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันมีช่วงที่ค่อนข้างกว้าง (Hoover, Li และ Senanayake, 1997) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang และคณะ (2001) ที่ได้แยกขนาดของ normal barley starch จากประเทศญี่ปุ่นออกเป็น 3 ขนาด แล้วพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันจะมีช่วงกว้างขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Tang, Mitsunaga และ Kawamura (2004) ที่ได้แยกขนาดของ waxy และ normal barley starch จากประเทศญี่ปุ่นออกเป็น 3 ขนาด แล้วพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันจะมีช่วงกว้างขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง

**ตารางที่ 4.15** สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

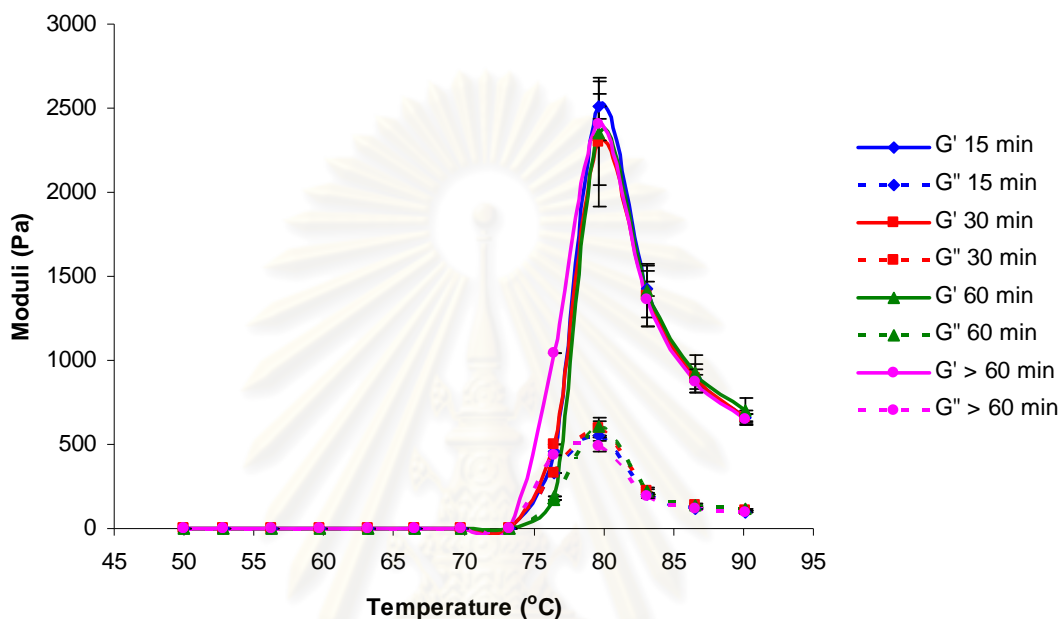
ค่าที่ได้จาก เครื่อง DSC	ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา			
	15 นาที	30 นาที	60 นาที	> 60 นาที
$T_o$ (°C) <sup>ns</sup>	71.20 ± 0.14	71.45 ± 0.07	71.10 ± 0.42	70.35 ± 0.49
$T_p$ (°C) <sup>ns</sup>	77.30 ± 0.00	77.45 ± 0.07	77.05 ± 0.49	77.75 ± 0.21
$T_c$ (°C)	83.05 <sup>b</sup> ± 0.07	83.30 <sup>b</sup> ± 0.14	83.10 <sup>b</sup> ± 0.00	84.30 <sup>a</sup> ± 0.42
$\Delta H$ (J / g)	14.41 <sup>a</sup> ± 0.78	14.44 <sup>a</sup> ± 0.18	13.90 <sup>a</sup> ± 0.05	11.75 <sup>b</sup> ± 0.32
$\Delta T$ (°C)	11.85 <sup>a</sup> ± 0.21	11.85 <sup>a</sup> ± 0.07	12.00 <sup>a</sup> ± 0.42	13.95 <sup>b</sup> ± 0.92

หมายเหตุ: a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

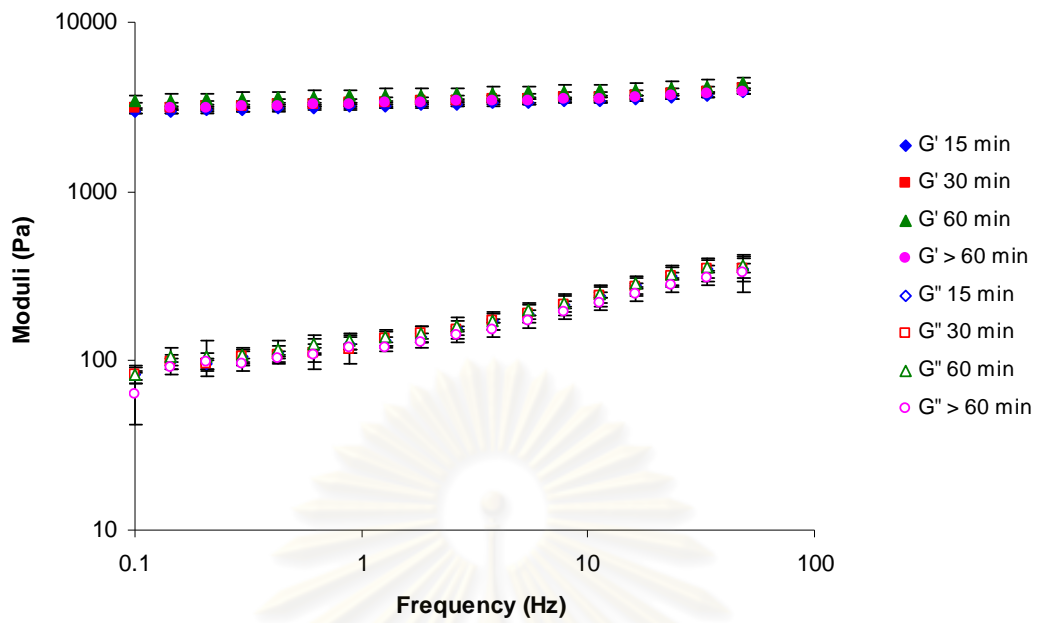
#### 4.2.11 สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการทดสอบ temperature sweep test ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกัน (รูปที่ 4.11) พบว่า รูปแบบกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสตาร์ชทั้ง 4 ขนาด มีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชันเท่ากับ  $73.2^{\circ}\text{C}$  ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ  $79.7^{\circ}\text{C}$



**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่  $50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $90^{\circ}\text{C}$

จากนั้นนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด ที่ผ่านการทดสอบ temperature sweep test แล้ว มาทดสอบ frequency sweep test ต่อ (รูปที่ 4.12) ซึ่งพบว่า รูปแบบกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีค่า  $G'$  มากกว่าค่า  $G''$  ที่ทุกความถี่ของการทดลอง ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะของเหลวของตัวอย่าง จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการทดสอบสมบัติทางการไหลด้วยเครื่อง rheometer ไม่สามารถแยกความแตกต่างของสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด ได้ ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลเอมิโลสที่ละลายออกมาในเฟสต่อเนื่องอาจมีปริมาณไม่แตกต่างกันมากพอที่จะส่งผลให้สมบัติทางการไหลแตกต่างกันเมื่อทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

สตาร์ชถั่วมะแฮะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ตามลำดับ มีปริมาณแอมิโลสสูงถึงร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช สตาร์ชถั่วมะแฮะตามธรรมชาติมีสีขาวนวล และมีค่าความสว่างค่อนข้างสูง เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรีคล้ายเมล็ดถั่ว มีสภาพพื้นผิวที่เรียบ มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน โดยเม็ดสตาร์ชมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ไมครอน มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C และมี degree of crystallinity เท่ากับ 39.84% มีความสามารถในการจับน้ำค่อนข้างต่ำ กำลังการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช ด้วยวิธี particle size analyzer พบว่าอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลาติไนเซชันในช่วงอุณหภูมิ 69 °C ถึง 79 °C เท่ากับ 343.76 kJ mole<sup>-1</sup> เมื่อศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดค่อนข้างสูงถึง 81.28 °C มีความคงทนต่อแรงเฉือนและความร้อนได้ปานกลาง มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าการคืนตัวค่อนข้างสูง อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชถั่วมะแฮะอยู่ในช่วง 70.95 ถึง 83.95 °C และมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 12.97 J/g จากการทดสอบสมบัติทางการไหล พบว่าในกระบวนการให้ความร้อน เจลสตาร์ชถั่วมะแฮะจะให้ค่า G' สูงกว่าค่า G'' และเมื่อมีการให้ความถี่หรือแรงเค้นแก่เจลสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่าค่า G' มีค่าสูงกว่าค่า G'' ในทุกความถี่ของการทดลอง

เมื่อจำแนกขนาดของเม็ดสตาร์ชออกเป็น 4 ขนาด ซึ่งใช้วิธีการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของเวลาในการตกตะกอนในน้ำที่เวลา 15 นาที 30 นาที 60 นาที และมากกว่า 60 นาที เม็ดสตาร์ชที่ได้มีขนาดเฉลี่ยต่างกัน โดยมีขนาดเท่ากับ 28.13, 26.99, 24.50 และ 20.49 ตามลำดับ ซึ่งเม็ดสตาร์ชทั้ง 4 ขนาดที่จำแนกได้ มีรูปร่างกลมและรีคล้ายเมล็ดถั่ว มีสภาพพื้นผิวที่เรียบ มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ C และมีค่าสีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที 60 นาที และมากกว่า 60 นาที นั้น พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้มีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช ขนาดของเม็ดสตาร์ชมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช โดยปริมาณแอมิโลส การ

ละลาย สมบัติด้านการเกิดเพสต์ ได้แก่ trough, final viscosity, setback และสมบัติด้านความร้อน ได้แก่  $\Delta H$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น ส่วนความสามารถในการจับน้ำ กำลังการพองตัว สมบัติด้านการเกิดเพสต์ ได้แก่ pasting temperature และสมบัติด้านความร้อน ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง และในการวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด พบว่าลักษณะทางการไหลของสตาร์ชทั้ง 4 ขนาด มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาการนำสตาร์ชถั่วมะแฮะไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในรูปของสารเพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ (thickening agent) เนื่องจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า peak viscosity และค่า final viscosity ค่อนข้างสูง และอยู่ในช่วงเดียวกับสตาร์ชที่นิยมนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด ซึ่งสตาร์ชที่นิยมนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดมีค่า peak viscosity อยู่ในช่วง 4,959 ถึง 14,746 cP และมีค่า final viscosity อยู่ในช่วง 4,237 ถึง 4,939 cP (Jiménez-Hernández, Salazar-Montoya และ Ramos-Ramírez, 2007)

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กฤษฎา สัมพันธ์รักษ์. 2531. พืชไร่. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.
- แก้วตา ธัมอิน. ม.ป.ป. ถั่วมะแฮะ พืชที่มีค่ามากกว่าบำรุงดิน [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.food4change.in.th> [31 ตุลาคม 2551].
- ดวงกมล ณ ระนอง. 2551. พื้นฐาน วิศวกรรมปฏิบัติการและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อักษรสยามการพิมพ์.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2549. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.
- มอก. 948-2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งถั่วเขียว. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.
- วิเชียร วรพุทธพร. 2525. ศึกษาการทำวุ้นเส้นและทำหริ่มจากแป้งถั่วมะแฮะพันธุ์ต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

### ภาษาอังกฤษ

- Agunbiade, S. O., and Longe, O. G. 1999. The physico-functional characteristics of starches from cowpea (*Vigna unguiculata*), pigeon pea (*Cajanus cajan*) and yambean (*Sphenostylis stenocarpa*). Food Chemistry 65: 469-474.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. 17<sup>th</sup>ed. Association of Official Analysis Chemists. Washington, D.C.
- Barichello, V., Yada, R. Y., Coffin, R. H., and Stanley, D. W. 1990. Low temperature sweetening in susceptible and resistant potatoes: starch structure and composition. Journal of Food Science 54: 1054-1059.

- Bhunja, P., and Ghangrekar, M. M. 2007. Required minimum granule size in UASB reactor and characteristics variation with size. Bioresource Technology 98: 994-999.
- Bowers, J. 1992. Food Theory and Applications. New York: Macmillian publishing company.
- Bul on, A., Colonna, P., Planchot, V., and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. International Journal of Biological Macromolecules 23: 85-112.
- Cabrera, E., Pineda, J. C., Duran de Bazua, C., Segurajauregui, J. S., and Vernon, E. J. 1984. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during corn nixtamalization. In B. M. McKenna (ed.). Engineering and Food, vol. 1. London: Elsevier Applied Science Publishers, pp. 117-123.
- Chen, J. J., Lu, S., and Lii, C. Y. 1999. Effect of milling methods on the physicochemical characteristic of waxy rice in Taiwan. Cereal Chemistry 76 (5): 796-799.
- Chen, Z., Schols, H. A., and Voragen, A. G. J. 2003a. Physicochemical properties of starches obtained from three varieties of Chinese sweet potatoes. Journal of Food Science 68 (2): 431-437.
- Chen, Z., Schols, H. A., and Voragen, A. G. J. 2003b. Starch granule size strongly determines starch noodle processing and noodle quality. Journal of Food Science 68 (5): 1584-1589.
- Chiotelli, E., and Meste, M. L. 2002. Effect of small and large wheat starch granules on thermomechanical behavior of starch. Cereal Chemistry 79: 286-293.
- Collado, L. S., and Corke, H. 1997. Properties of starch noodles as affected by sweet potato genotype. Cereal Chemistry 74 (2): 182-187.
- Donald, A. M. 2004. Understanding starch structure and functionality. In A. C. Eliasson (ed.). Starch in food: Structure, function and applications. Boca Raton, USA: CRC Press, pp. 156-184.
- Freitas, R. A., Paulaa, R. C., Feitosaa, J. P. A., Rochaa, S., and Sierakowskic, M. -R. 2004. Amylose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Dioscorea alata*) and cassava (*Manihot utilissima*) starches. Carbohydrate Polymers 55: 3-8.

- Fruton, J.S., and Simmonds, S. 1958. General Biochemistry. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- Gallant, D. J., Bouchaet, B., and Baldwin, P. M. 1997. Microscopy of starch: Evidence of a new level of granule organization. Carbohydrate Polymers 32: 177-191.
- Ghiasi, K., Varriano-Marston, K., and Hosney, R. C. 1982. Gelatinization of wheat starch. II Starch–surfactant interaction. Cereal Chemistry 59: 86.
- Hamaker, R. B. and Griffin, V. K. 1990. Changing the viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. Cereal Chemistry 67: 261-264.
- Hermansson, A. M., and Svegmak, K. 1996. Developments in understanding of starch Functionality. Trends in Food Science and Technology 7: 345-353.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. Carbohydrate Research 14: 398-342.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. Carbohydrate Polymers 45: 253-267.
- Hoover, R., Li, Y. X., Hynes, G., and Senanayake, N. 1997. Physicochemical characterization of mung bean starch. Food Hydrocolloids 11: 401–408.
- Hosney, R. C. 1998. Principles of cereal science and technology. 2<sup>nd</sup> ed, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists.
- Huang, J., Schols, H. A., Jin, Z., Sulmann, E., Voragen, A. G. J. 2007. Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea, cowpea and chickpea starches after modification with acetic anhydride and vinyl acetate. Carbohydrate Polymers 67: 11-20.
- Huang, Y. C., and Lai, H. M. 2010. Noodle quality affected by different cereal starches. Journal of Food Engineering 97: 135-143.
- Jane, J., Chen, Y. Y., Lee, L. F., McPhetson, A. E., Wong, K. S., Radosavljevic, M., and Kasemsuwan, T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chemistry 76 (5): 629-637.



- Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J. A., and Ramos-Ramírez, E. G. 2007. Physical chemical and microscopic characterization of a new starch from chayote (*Sechium edule*) tuber and its comparison with potato and maize starch. Carbohydrate Polymers 68: 679-686.
- Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. Cereal Science Today 16 (10): 334-360.
- Juliano, B. O. 1984. Rice starch: Production, properties and uses. In R. L. Whistler, J. N. Bemiller, and E. F. Paschell (eds.). Starch Chemistry and Technology. Orlando, USA: Academic Press, pp. 507-528.
- Kaletune, G., and Breslauer, K. J. 2003. Characterization of Cereals and Flour. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Karim, A. A., Norziah, M. H., and Seow, C. C. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. Food Chemistry 71: 511-517.
- Kerr, R. W. 1950. Chemistry and Industry of Starch. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Academic Press.
- Kerr, W. L., Ward, C. D. W., McWatters, K. H., and Resurreccion, A. V. A. 2000. Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour. Cereal Chemistry 77 (2): 213-219.
- Kim, Y. S., Wiesenborn, D. P., Orr, P. H., and Grant, L. A. 1995. Screening potato starch for novel properties using differential scanning calorimetry. Journal of Food Science 60 (5): 1060-1065.
- Kokini, L. J., Shih, L., and Chedid, L. L. 1992. Effect of starch structure on starch rheological properties. Food Technology 46: 124-139.
- Kubota, K., Hosakawa, Y., Suzuki, K., and Hosaka, H. 1979. Studies on the gelatinization rate of rice and potato starches. Journal of Food Science 44: 1394-1397.
- Kugimiya, M., Donovan, J. W., and Wong, R. Y. 1980. Phase transitions of amylose-lipid complex in starches: A colorimetric study. Starch/Stärke 32: 265.
- Leach, H. W., McCowen, L. D., and Schoch, T. J. 1959. Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility pattern of various starches. Cereal Chemistry 36: 534-544.

- Lii, C. Y., Tsai, M. L., and Tseng, K. H. 1996. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. Cereal Chemistry 73: 415-420.
- Lindeboom, N., Chang, P. R., and Tyler, R. T. 2004. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. Starch/Stärke 56: 89-99.
- Liu, W., and Shen, Q. 2007. Studies on the physicochemical properties of mung bean starch from sour lipid processing and centrifugation. Journal of Food Engineering 79: 358-363.
- Lund, D., and Wirakartakusumah, M. 1984. A model for starch gelatinization phenomena. In B. M. McKenna (ed). Engineering and Food, vol. 1. New York: Elsevier/Applied Science Publishers, pp. 425-432.
- Maaruf, G. A., Che-Man, Y. B., Asbi, B. A., Junainah, A. H., and Kenedy, J. F. 2001. Effect of water content on the gelatinization temperature of sago starch. Carbohydrate Polymers 46: 331-337.
- Madsen, M. H., and Christensen, D. H. 1996. Changes in viscosity properties of potato starch during growth. Starch/Stärke 48: 245-249.
- Medcalf, D. G., and Gilles, K. A. 1965. Wheat starches I. Comparison of physicochemicals properties. Cereal Chemistry 42: 558-568.
- Mondragón, M., Mendoza-Martínez, A.M., Bello-Pérez, L.A., and Peña, J.L. 2006. Viscoelastic behavior of nixtamalized maize starch gels. Carbohydrate Polymers 65: 314-320.
- Newport scientific. (2007). Rapid visco analyzer series 4 (RVA-4) installation and operation manual. (n.p.).
- Noda, T., Takigawa, S., Matsuura-Endo, C., Kim, S. J., Hashimoto, N., Yamauchi, I., and Takeda, Y. 2005. Physicochemical properties and amylopectin structures of large, small, and extremely small potato starch granules. Carbohydrate Polymers 60: 245-251.
- Norbert, U. H., Mintus, T., and Detmold, D. W. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with Rapid Visco Analyzer. Starch/Stärke 47: 123-126.
- Oates, C. G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. Trends in Food Science and Technology 8: 375-382.

- Okechukwu, P. E., and Rao, M. A. 1996a. Kinetics of corn starch granule swelling in excess water. Presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Gums and Stabilizers for the Food Industry, Wrexham, Wales, July 10-14.
- Okechukwu, P. E., and Rao, M. A. 1996b. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. Starch/Stärke 48 (2): 43-47.
- Okechukwu, P. E., and Rao, M. A., Ngoddy, P. O., and McWatters, K. H. 1991. Journal of Food Science 56: 1311-1315. Cited in Okechukwu, P. E., and Rao, M. A. 1996. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. Starch/Stärke 48 (2): 43-47.
- Oshodi, A. A., and Ekperigin, M. M. 1989. Functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour. Food Chemistry 34: 1-5.
- Phillips, O. G., and Williams, P. A. 2000. Handbook of Hydrocolloids. New York: Woodhead Publish Limited.
- Pravisani, C. I., Califano, A. N., and Calvedo, A. 1985. Journal of Food Science 50: 657-663. Cited in Okechukwu, P. E., and Rao, M. A. 1996. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. Starch/Stärke 48 (2): 43-47.
- Sanders, J. P. M. 1996. Starch manufacturing in the world. Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology, January 22-26 and February 19-23. AIT center, Bangkok.
- Sandhu, K. S., and Lim, S. T. 2008. Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. Carbohydrate Polymers 71: 245-252.
- Sasaki, T., Yasui, T., and Matsuki, J. 2000. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation, and pasting properties of starches from waxy and nonwaxy wheat and their F1 seeds. Cereal Chemistry 77 (1): 58-63.
- Schoch, T. J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches. In R. L. Whistler, R. J. Smith, and J. N. Bemiller (eds.). Method in Carbohydrates Chemistry, Vol. VI. New York: Academic press, pp. 106-108.
- Schoch, T. J., and Maywald, E. C. 1968. Preparation and properties of various legume starches. Cereal Chemistry 45: 564-573.

- Singh, N., Kaur, L. 2004. Morphological, thermal, rheological and retrogradation properties of potato starch fractions varying in granule size. Journal of the Science of Food and Agriculture 84: 1241-1252.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., and Gill, B. S. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Food Chemistry 81: 219-231.
- Smith, R. J. 1979. Food Carbohydrate. Wesport, Connecticut: The AVI Publishing Co.
- Steffe, J. F. 1992. Rheological Methods in Food Process Engineering. Michigan, USA: Freeman Press.
- Swinkels, J. J. M. 1985. Composition and properties of commercial native starches. Starch/Stärke 37: 1-5.
- Suzuki, K., Kubota, K., Domichi, M., and Hosaka, H. 1976. Kinetic studies of cooking of rice. Journal of Food Science 41: 1150-1156.
- Tang, H., Ando, H., Watanabe, K., Takeda, Y., and Mitsunaga, T. 2001. Physicochemical properties and structure of large, medium and small granule starches in fractions of normal barley endosperm. Carbohydrate Research 330: 241-248.
- Tang, H., Mitsunaga, T., and Kawamura, Y. 2004. Relationship between functionality and structure in barley starches. Carbohydrate Polymers 57: 145-152.
- Tang, H., Watanabe, K., and Mitsunaga, T. 2002. Structure and functionality of large, medium and small granule starches in normal and waxy barley endosperms. Carbohydrate Polymers 49: 217-224.
- Tattiyakul, J. 1997. Studies on Granule Growth Kinetics and Characteristics of Tapioca Starch Dispersion During Gelatinization Using Particle Size Analysis and Rheological Methods. Master' s Thesis, Department of Food Engineering, Graduate School, Cornell University.
- Tester, R. F. 1997. Influence of growth conditions of barley starch properties. International Journal of Biological Macromolecules 21: 37-45.
- Tester, R. F., Karkalas, J., and Qi, X. 2004. Starch-composition, fine structure and Architecture. Journal of Cereal Science 39: 151-165.

- Tsai, M., Li, C., and Lii, C. 1997. Effect of granular structures on the pasting behaviors of starches. Cereal Chemistry 74 (6): 750-757.
- Whistler, R. L., and BeMiller, J. N. 1999. Carbohydrate Chemistry for Food Scientists. 2<sup>nd</sup> ed. Minnesota, USA: Eagan Press.
- Wootton, M., and Bamunuarachchi, A. 1978. Water binding capacity of commercial produced native and modified starches. Starch/Stärke 33: 159-161.
- Zobel, H. F. 1964a. X-ray analysis of granular starches. In R. L. Whistler, R. L. Smith, J. N. Bemiller, and M. L. Wolform (eds.). Methods in Carbohydrate Chemistry, Vol. IV. New York: Academic Press, pp. 109.
- Zobel, H. F. 1988b. Starch crystal transformations and their industrial importance. Starch/Stärke 40: 1-7.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์

#### ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03

##### อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น W350, Germany)
2. ถ้วยอะลูมิเนียม
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
4. โถดูดความชื้น (desiccator)

##### วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมซึ่งอบแห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
2. นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิ  $130 \pm 3^{\circ}\text{C}$  โดยเปิดฝาไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
3. ปิดฝาภาชนะในขณะที่ยังอยู่ในตู้อบ แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาความชื้นจากสมการ

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

#### ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22

##### อุปกรณ์

1. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
2. Buchi scrubber (รุ่น B-414, Switzerland)
3. เครื่องกลั่นหาปริมาณไนโตรเจน (VELP scientific รุ่น UDK 127, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

##### สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (A.R. grade)
2. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.5 M
3. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.1 M

4. สารละลายกรดบอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 4 % (w/v)
5. สารเร่งปฏิกิริยา (selenium reagent mixture) (A.R. grade)
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 45% (w/v)
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลายเมธิลเรด 1 กรัม ในเมทานอล 100

มิลลิลิตร

### วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.25-1.00 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ใน Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างไปย่อยด้วยเครื่อง Buchi Digestion Unit โดยใช้ความร้อนเบอร์ 8 แล้วปิดฝาด้านบนที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดไอน้ำ (scrubber) ย่อยตัวอย่างจนส่วนผสมในหลอดย่อยกลายเป็นสีน้ำตาลใส และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เทสารละลายกรดบอริกปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ต่อเข้ากลับลลาย condenser ของเครื่องกลั่น (distillation unit)
5. นำหลอดตัวอย่างที่ผ่านการย่อยต่อเข้ากลับลายเครื่องกลั่น แล้วนำสายสีดำของเครื่องกลั่นจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำกลั่น ส่วนสายสีขาวจุ่มลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วตั้งโปรแกรม distillation โดย ดังนี้
 

NaOH	70	มิลลิลิตร
Time	8	นาที
6. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนียขึ้น แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริกในพลาสติก จะได้สารละลายสีเขียวเมื่อกลั่นครบตามกำหนดเวลา
7. ล้างส่วนปลายของ condenser ด้วยน้ำกลั่น ใส่ลงในพลาสติกที่รองรับสิ่งที่กลั่นได้
8. นำสารละลายที่กลั่นได้ในพลาสติกทั้งหมดมาไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน ความเข้มข้น 0.5 M จนถึงจุดยุติ (end point) เป็นสีม่วงแดง
9. ทำ blank โดยเติมน้ำกลั่นปริมาตร 2 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง และวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง
10. คำนวณหาปริมาณโปรตีน



$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} \times 5.7$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต blank

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

### ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05

#### อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
2. ครุชีเบิล (Crusible)
3. Hot plate
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
5. โถดูดความชื้น

#### วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 3-5 กรัม ใส่ในครุชีเบิลที่เผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
2. นำตัวอย่างไปเผาโดยใช้ hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งตัวอย่างหมดควัน
3. นำตัวอย่างไปเผาต่อในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 °C จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว หรือน้ำหนักคงที่
4. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักเถ้าที่ได้และคำนวณหาปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

### ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13

#### อุปกรณ์

1. Soxhlet (Gerhardt รุ่น HC61, Germany)
2. เครื่อง evaporator (Eyela รุ่น SB-651, Japan)

**วิธีทดลอง**

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน 2 กรัม ห่อด้วยกระดาษ Whatman No.1 ใส่ใน thimble
2. ใส่ thimble ซึ่งมีตัวอย่างบรรจุอยู่ในขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักแน่นอน
3. เติม Petroleum ether ซึ่งใช้เป็นตัวสกัด 250 มิลลิลิตร ลงในขวดสกัด
4. สกัดไขมันเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง โดยปรับความร้อนให้หยดของตัวทำละลายกลั่นจากคอนเดนเซอร์มีอัตรา 300-360 หยดต่อนาที
5. ระเหยส่วนของ Petroleum ether ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้ แล้วอบขวดสกัดที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที หรือจนน้ำหนักคงที่
6. ทำให้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักขวดสกัด

$$\text{ไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

**ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15****อุปกรณ์**

1. เครื่องเปิด
2. ตู้อบลมร้อน (Mettert รุ่น W350, Germany)
3. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
5. โถดูดความชื้น

**สารเคมี**

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (A.R. Grade) ความเข้มข้น 1.25% (v/v)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. Grade) ความเข้มข้น 1.25% (w/v)
3. เอทิลแอลกอฮอล์ 95%

**วิธีทดลอง**

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำร้อน

3. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วย Buchner funnel ที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์กรด ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส

4. นำกากมาย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิตร ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำร้อน

5. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วย Buchner funnel ที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์ต่าง

6. ล้างกากที่ได้ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 25 มิลลิตร 2 ครั้ง

7. นำกากที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่

8. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักจะได้ตัวอย่างน้ำหนักก่อนเผา

9. นำตัวอย่างใส่ในครุชีเบลที่ผ่านการเผา และทราบน้ำหนักที่แน่นอน

10. เผาตัวอย่างบน hot plate จนหมดควัน ก่อนนำเข้าเตาเผาที่ 550 องศาเซลเซียส จนได้เป็นเถ้าสีขาว

11. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา นำมาคำนวณหาปริมาณเส้นใย

ปริมาณเส้นใยหยาบ (%) =

$$\frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)}] \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการหาไขมัน (กรัม)}}$$

#### ก.6 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

##### วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\%db)} = 100 - \%(\text{โปรตีน} + \text{เถ้า} + \text{เส้นใยหยาบ} + \text{ไขมัน})$$

#### ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1971)

##### อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer, Thermo Spectronic รุ่น Genesys 10 UV, USA)

2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

### สารเคมี

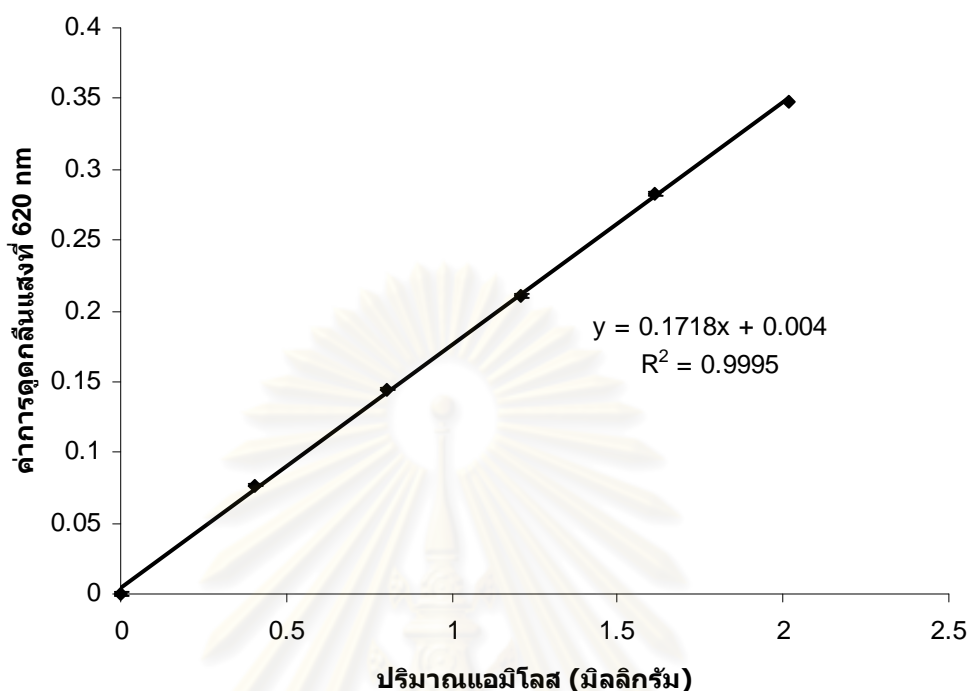
1. แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose type III: from potato) (บริษัท Sigma-ALDRICH, Germany)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 N
3. เอทิลแอลกอฮอล์ 95%
4. สารละลายกรดแอสซิติค ความเข้มข้น 1 N
5. สารละลายไอโอดีน เตรียมสารละลายไอโอดีน 0.20 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.00 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

### วิธีทดลอง

#### การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง น้ำหนักแน่นอน 0.0400 กรัม ใส่ในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร และเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
2. เตรียม blank โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร และเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. ให้ความร้อนกับสารละลายในข้อ 1 และ 2 ในอ่างน้ำเดือด 5-10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. ชะสารละลายแอมิโลสในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำกลั่นชะสารละลายแอมิโลส ออกมาให้ได้มากที่สุด) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
5. ปิเปตสารละลายจากข้อ 4 ปริมาตร 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร 5 ขวด
6. ปิเปตสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรทั้ง 5 ใบ ตามลำดับ
7. เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที
8. ชะ blank ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นปิเปตสารละลายมา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที
9. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank

10. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณแอมิโลส ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

#### การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างสตาร์ชซึ่งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh แล้วประมาณ 100 มิลลิกรัม ใส่ในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร และเอธิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. ต้มในอ่างน้ำเดือดนาน 5-10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. ชะน้ำแบ่งใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำกลั่นชะน้ำแบ่งออกมาให้ได้มากที่สุด) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
5. บีบสารละลายจากข้อ 4 มา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นบีบสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 1 N มา 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
7. จากค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ นำไปอ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณแอมิโลส ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (กรัม)} \times 100 \times 20}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)}}$$

#### ก.8 การวัดค่าสี (L, a, b) โดยใช้เครื่อง Chroma meter

##### อุปกรณ์

เครื่องวัดสี (Minolta Chroma Meter รุ่น CR 300 series, Japan)

##### วิธีทดลอง

1. เปิดเครื่องทิ้งไว้ 15 นาที แล้ว calibrate เครื่องวัดสี
2. ตั้งเครื่องให้วัดค่า L (ความสว่าง) +a (ค่าสีแดง) +b (ค่าสีเหลือง) วัดค่าสีของตัวอย่าง

โดยนำหัววัดไปสัมผัสกับตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่าง

#### ก.9 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) (ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

##### อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL รุ่น JSM-5800 LV, Japan)
2. เครื่องฉาบทอง (ion sputter) (Balzers Union รุ่น SCD 040, Liechtenstein)

##### วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างแบ่งติดบน stub โดยใช้เทปกาวสองหน้าหรือกาว
2. ฉาบด้วยทองหนา 20-30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง ion sputter โดยใช้เทคนิค Hammer V Sputter Coater
3. บันทึกภาพโครงสร้างของตัวอย่างด้วย SEM ความดันที่ 20 kV ใช้กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า
4. วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากภาพที่บันทึกได้

#### ก.10 ลักษณะ birefringence โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (microscope)

##### อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น CH30RF200, Japan)
2. แผ่นฟิล์มโพลาไรซ์
3. อุปกรณ์ถ่ายภาพแบบดิจิทัล

### วิธีทดลอง

1. เตรียมสารละลายยาลึโซอีนและน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วหยดลงบนสไลด์ 1-2 หยด
2. นำตัวอย่างสสารขมาละลายกับสารละลายข้อ 1 บนสไลด์ให้ได้ความหนาแน่นของเม็ดสสารขพอดี้กับการถ่ายภาพ
3. ปรับระยะภาพโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำสุดแล้วเห็นภาพชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 400 เท่า
4. ปรับเลื่อนสไลด์ให้ได้องค์ประกอบของภาพที่ต้องการ และปรับความคมชัดของภาพโดยดูที่กล้องถ่ายภาพ
5. ตั้งระบบการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายภาพเป็นแบบอัตโนมัติ และปรับเป็นแบบไม่ใช้ flash
6. นำฟิล์มโพลาไรซ์วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ และนำแผ่นฟิล์มอีก 1 แผ่น วางปิดบนสไลด์หรือกั้นระหว่างสไลด์กับอุปกรณ์ถ่ายภาพ
7. หมุนแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์ที่วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงให้ได้สีของพื้นภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะ birefringence ของเม็ดสสารข
8. ปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสสารขภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์

ก.11 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดสสารข และวิเคราะห์ pattern โดยใช้เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ดัดแปลงจากวิธีของ Zobel (1964a)

### อุปกรณ์

เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany)

### วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างสสารขโรยบน sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสสารขเรียงตัวอัดกันแน่น
2. นำ sample plate ใส่เข้าเครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ที่ช่อง sample holder แล้วเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาที
3. วัดค่าในช่วงมุมที่ต้องการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

Target	:	Cu	
Voltage	:	40	kV
Current	:	40	mA
Start Angle	:	4	degree

Stop angle	:	40	degree
Increment	:	0.02	degree/step
Scan speed	:	0.3	sec/step
Detector	:	VANTEC-1 Detector (Super speed detector)	

4. วิเคราะห์ X-ray Diffraction pattern โดยเทียบค่า  $2\theta$ , d-spacing และ Intensity ที่ได้รับลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เป็น pattern มาตรฐาน ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A, B และ C

Starch X-ray diffraction								
A type			B type			C type		
d-spacing	Intensity*	$2\theta$	d-spacing	Intensity*	$2\theta$	d-spacing	Intensity	$2\theta$
$A^\circ$			$A^\circ$			$A^\circ$	*	
8.72	w-	10.1	<u>15.80</u>	m	5.59	<u>15.40</u>	w	5.73
7.70	w-	11.5	8.90	w-	9.93	8.82	w-	10.00
<u>5.78</u>	s	15.3	7.84	w-	11.10	7.65	w-	11.50
<u>5.17</u>	s	17.1	6.14	m	14.40	<u>5.78</u>	s	15.30
<u>4.86</u>	s-	18.2	<u>5.16</u>	s	17.20	<u>5.12</u>	s	17.30
4.37	m	20.3	4.54	w+	19.50	<u>4.85</u>	m	18.30
<u>3.78</u>	s	23.5	<u>4.00</u>	m	22.20	4.35	w-	20.40
3.30	w+	27.0	<u>3.70</u>	m-	24.00	<u>3.78</u>	m+	23.50
2.88	w	31.0	3.38	w	26.30	3.32	w	26.80
			2.60	w	34.40			

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

ที่มา: Zobel (1964a)

5. คำนวณหาค่า degree of crystallinity ดังนี้

$$\text{Degree of crystallinity (\%)} = \frac{A_c}{A_t} \times 100$$

เมื่อ  $A_c$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของส่วนผลึก (พื้นที่ใต้พีค)

$A_t$  คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดที่วัดจาก baseline



ก.12 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของสสารขี้ถั่วและด้วยเครื่อง Multi-wavelength Particle Size Analyzer with Tornado (Dry Powder Module) System ตามวิธีของ Beckman Coulter

#### อุปกรณ์

เครื่อง Multi-wavelength Particle Size Analyzer with Tornado (Dry Powder Module) System (Beckman Coulter รุ่น LS 13 320, USA)

#### วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องทิ้งไว้ 15 นาที
2. เตรียมตัวอย่างสสารประมาณ 2-5 กรัม ใส่ลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง และประกอบเข้ากับตัวเครื่อง
3. ประมวลผลโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หาขนาดอนุภาคสสารที่มีมากที่สุด และสร้างกราฟกระจายตัวของอนุภาคเม็ดสสาร

ก.13 ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ดัดแปลงจากวิธีของ Medcalf และ Gilles (1965)

#### อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RF, USA)
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

#### วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างสสารที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 1 กรัม ใส่หลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนัก
2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร
3. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และกวนเป็นระยะ ทุก ๆ 5 นาที
4. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 × g เป็นเวลา 20 นาที
5. เทน้ำทิ้ง และคว่ำหลอดทิ้งไว้ 10 นาที
6. ชั่งน้ำหนักสสารที่ได้
7. คำนวณหาความสามารถในการจับน้ำ (กรัม น้ำ / กรัมตัวอย่าง) ตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการจับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักสสารหลังการทดลอง} - \text{น้ำหนักสสารเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักสสารเริ่มต้น}}$$

#### ก.14 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility) ดัดแปลงจากวิธี ของ Schoch (1964)

##### อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RF, USA)
2. อ่างน้ำพร้อมส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Bath circulator with water bath, Thermo Scientific รุ่น NESLAB EX 10, USA.)
3. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น W 350, Germany)

##### วิธีทดลอง

1. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร อบให้แห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator
2. ชั่งน้ำหนักแห้งของสตาร์ช 0.5000 กรัม ใส่ในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำกลั่นลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง 15 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
3. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่บรรจุตัวอย่างแล้ว แช่ลงในอ่างน้ำพร้อมส่วนควบคุมอุณหภูมิที่ 70, 75, 80, 85, 90 และ 95 °C
4. ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แท่งแก้วกวนทุก ๆ 5 นาที
5. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงมาเช็ดด้านนอกที่เปียกน้ำให้แห้งสนิท
6. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 6,000 × g อุณหภูมิ 4 °C นาน 20 นาที
7. แยกส่วนในออกจากตะกอน โดยใช้ปิเปตดูดส่วนใสออกมาใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว พยายามดูดส่วนใสออกให้มากที่สุด (ระวังอย่าให้ตะกอนสตาร์ชติดมาด้วย)
8. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่บรรจุตะกอนสตาร์ชไปชั่งน้ำหนัก
9. นำส่วนใสในภาชนะไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อระเหยน้ำออก จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักสตาร์ชที่ละลายน้ำ
10. คำนวณหากำลังการพองตัว และการละลายของสตาร์ชตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย (\% solubility)} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่ละลายน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว (swelling power)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนสตาร์ช (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง (กรัม)} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

ก.15 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช (Starch granule growth kinetics)  
ดัดแปลงจากวิธีของ Tattiyakul (1997)

**อุปกรณ์**

1. เครื่อง magnetic stirrer (Framo-Gerätetechnik รุ่น M 21/1, Germany)
2. magnetic bar ขนาด  $0.8 \times 4.4$  cm.
3. ภาชนะอะลูมิเนียม
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. เครื่อง Laser particle size analyzer (Malvern รุ่น Mastersizer S, UK)

**วิธีทดลอง**

1. ชั่งสตาร์ช 4 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงไป คนให้เข้ากัน

2. วัดอุณหภูมิของสารละลายสตาร์ชในบีกเกอร์ ( $T_s$ )

3. เทสารละลายสตาร์ชลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุน้ำร้อนปริมาตร 140 มิลลิลิตร ที่มีอุณหภูมิ  $T_w$  โดยคำนวณหาค่า  $T_w$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$40 T_s + 140 T_w = 180 T_p$$

4. นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3 วางลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิที่วางอยู่บนบนเครื่อง magnetic stirrer และมีอุณหภูมิเป็น  $T_p$  ซึ่ง  $T_p$  ที่ใช้ในการทดลองคือ 69, 74 และ 79 °C

5. ปรับความเร็วเครื่อง magnetic stirrer ให้มีความเร็วระดับ 5 ( $\text{min}^{-1} \times 100$ ) กวนสารละลายสตาร์ชอย่างต่อเนื่อง

6. เก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 5, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 และ 210 นาที โดยใช้ปิเปตดูดสารละลายสตาร์ชมา 10 มิลลิลิตร ซึ่งตัวอย่างที่ถูกเก็บขึ้นมาที่เวลาต่าง ๆ จะต้องแช่ในอ่างน้ำแข็งนาน 1 นาที เพื่อหยุดการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช

7. นำตัวอย่างมาวัดขนาดด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer

8. สร้างกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ ขนาด (ไมครอน)

9. สร้างกราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ  $\ln [(D_{eT}-D_t) / (D_{eT}-D_0)]$  เพื่อหาอัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช ( $K_p$ )

เมื่อ  $D_{eT}$  คือ ขนาดของเม็ดสตาร์ชที่อิ่มตัว (equilibrium mean diameter)

$D_0$  คือ ขนาดของเม็ดสตาร์ชดิบ

$D_t$  คือ ขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เวลาใด ๆ

10. สร้างกราฟระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิ (เคลวิน) กับอัตราการขยายขนาดเม็ดสตาร์ช ( $K_p$ ) เพื่อหาค่า Activation energy ( $E_a$ )

## ก.16 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer ดัดแปลง จากวิธีของ Norbert และคณะ (1995)

### อุปกรณ์

1. เครื่อง RVA (Newport Scientific รุ่น 4D, Australia) พร้อมถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can) และใบพัด (paddle)
2. คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่อง RVA
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น AB204, Switzerland)

### วิธีทดลอง

1. เปิดเครื่อง RVA ให้นาน 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่อง
2. ปรับสภาวะการทำงานของเครื่อง RVA โดยใช้ temperature profile: STD 1 ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 Temperature profile STD 1

เวลา (นาที.วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)
0.00	50	960
0.10	50	160
1.00	50	160
4.42	95	160
7.12	95	160
11.00	50	160
13.00	50	160

ที่มา: Newport scientific (2007)

3. ตวงน้ำกลั่นปริมาตร  $25.00 \pm 0.1$  มิลลิลิตร (สำหรับแบ่งที่มีความชื้นร้อยละ 14) ใส่ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can)
4. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช  $3.00 \pm 0.01$  กรัม ใส่ลงใน can ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว น้ำหนักตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง โดยทั่วไปแนะนำตามตารางที่ ก.3
5. ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาแรง ๆ และตั้งขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างแรง ๆ ประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับกันเป็นก้อนที่ผิวน้ำหรือติดที่ใบพัดกวน ให้ทำซ้ำอีกครั้ง

6. นำภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ใส่ใบพัดไว้แล้วสอดเข้าไปในเครื่อง RVA กดมอเตอร์เพื่อให้เครื่อง RVA ทำงาน เสร็จแล้วนำถ้วยบรรจุตัวอย่างออกมา เครื่อง RVA จะรายงานการวิเคราะห์เป็นค่าต่าง ๆ ดังนี้

- 6.1 เวลาที่เกิด peak ของความหนืด (peak time) มีหน่วยเป็นนาที
- 6.2 อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) มีหน่วยเป็น °C
- 6.3 อุณหภูมิที่เกิด peak (peak temperature) มีหน่วยเป็น °C
- 6.4 ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) มีหน่วยเป็น cP
- 6.5 ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (final viscosity) มีหน่วยเป็น cP
- 6.6 ความหนืดต่ำสุด (trough) มีหน่วยเป็น cP
- 6.7 ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุด trough (setback from trough) มีหน่วยเป็น cP

### ตารางที่ ก.3 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA

ชนิดตัวอย่าง	จำนวน (กรัม)
เมล็ดพืชทั้งหมด (บดรวมเปลือก)	4.00
แป้ง (flour)	3.50
สตาร์ชปกติ (native starch)	
จากธรรมชาติชนิดไม่มียาง (non-waxy cereal)	3.00
จากธรรมชาติชนิดมียาง (waxy cereal)	3.00
มันฝรั่ง	2.00 <sup>1</sup>
มันสำปะหลัง	2.50
สตาร์ชดัดแปร (modified starch)	
Acid modified	2.00-4.00 <sup>2</sup>
Oxidised	2.00-4.00 <sup>2</sup>
Substitued	2.50
Cross-linked	2.50

<sup>1</sup> ใช้ 1.2 กรัม ถ้าเป็นสตาร์ชที่ไม่ได้ผลิตมาเพื่อวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์

<sup>2</sup> จำนวนที่ใช้ขึ้นอยู่กับ degree of modification

ก.17 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Kim และคณะ (1995)

**อุปกรณ์**

1. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix, Germany)
2. เครื่องมือสำหรับปิดผนึก DSC pan (climber)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น Explorer, Switzerland)

**วิธีทดลอง**

1. เปิดเครื่อง DSC ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่ออุ่นเครื่อง
2. ชั่งตัวอย่างที่ทราบความชื้นประมาณ 3 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน volatile aluminium pan หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงใน pan โดยคิดเป็นอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเท่ากับ ร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก
3. ปิดผนึกฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก เก็บ pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นตัวอย่างภายใน pan เข้าสู่ภาวะสมดุล ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
4. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า) ให้เครื่อง scan ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 95 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที และใช้ indium ในการ calibrate
5. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกาเกิดเจลลาติโนเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset temperature,  $T_o$  หน่วย °C) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (peak temperature,  $T_p$  หน่วย °C) อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (conclusion temperature,  $T_c$  หน่วย °C) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลลาติโนเซชัน (enthalpy of gelatinization,  $\Delta H$  หน่วย J/g)

ก.18 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rheometer

**อุปกรณ์**

1. เครื่อง rheometer พร้อมชุด geometry (Bohlin Instrument รุ่น CVOR 150, UK)
2. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม rheometer

## วิธีทดลอง

1. เตรียมสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 (w/w) โดยน้ำหนักแห้ง ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

2. ประกอบส่วน fixed lower plate กับตัวเครื่อง Bohlin Rheometer โดยต่อสายที่มาจากเครื่อง cooler และช่องสำหรับน้ำเข้าที่ฐานของ fixed lower plate โดยต่อสายสีส้มเข้ากับช่องน้ำเข้าสีส้ม และสายสีดำเข้ากับช่องน้ำเข้าสีดำ

3. เปิดปั๊มลม เปิดวาล์วลมตัวที่ 1 ให้มีความดันลมอยู่ที่ 4 บาร์ และวาล์วลมตัวที่ 2 ให้มีความดันลมอยู่ที่ 3 บาร์

4. เปิดเครื่อง Bohlin rheometer ใส่ geometry (parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร) เข้ากับตัวเครื่อง

5. กดปุ่ม zero เพื่อตั้ง auto zero แล้วกดปุ่ม gap โดยตั้งค่าไว้ที่ 500 ไมโครเมตร

6. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม Bohlin rheometer เลือก mode oscillation

### 6.1 Temperature sweep test

stress 40 Pa

frequency 1 Hz

อุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 90 °C

50 °C – 90 °C 4 นาที

90 °C – 50 °C 3 นาที

### 6.2 Amplitude sweep test

frequency 1 Hz

minimum strain 1%

maximum strain 200%

isothermal 25 °C

### 6.3 Frequency sweep test

stress 40 Pa

minimum frequency 0.1 Hz

maximum frequency 100 Hz

isothermal 25 °C

7. load ตัวอย่างสารละลายสตาร์ชที่เตรียมไว้ในข้อ 1 ลงบน plate ของเครื่อง และปรับให้ geometry อยู่ในระดับ gap size ที่ตั้งไว้ แล้วปิดฝาครอบเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในตัวอย่าง

8. กดปุ่ม start ที่หน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่องตามโปรแกรมของ temperature sweep test

9. ทำการทดลองต่อโดยเปลี่ยนโปรแกรมจาก temperature sweep test เป็น frequency sweep test โดยไม่ต้องเปลี่ยนตัวอย่าง กดปุ่มที่หน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง ตามโปรแกรมของ frequency sweep test

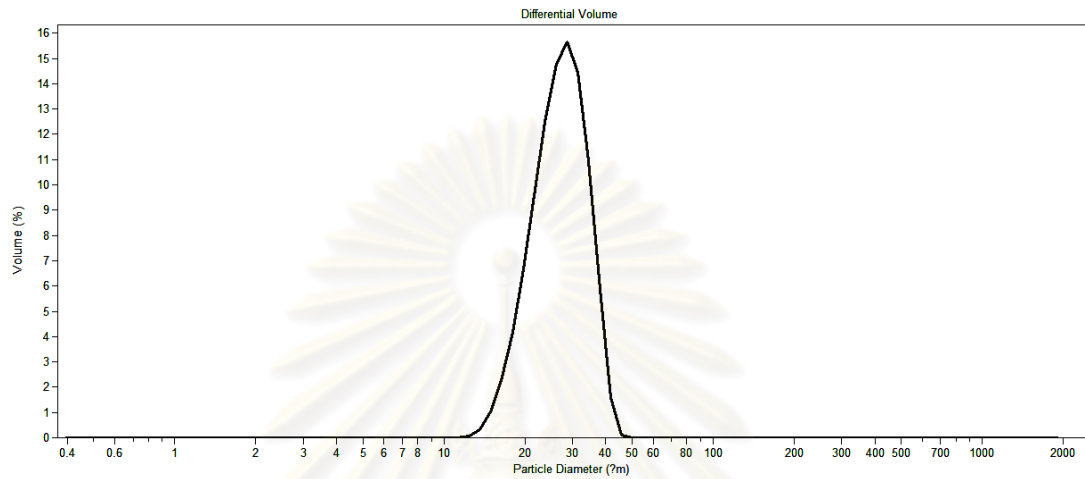


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

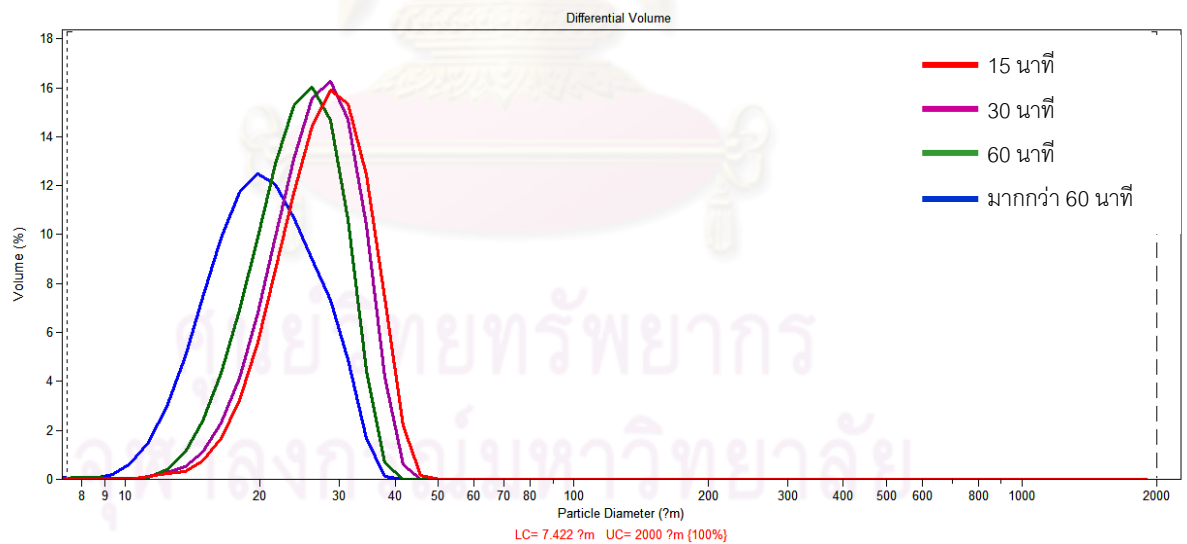


## ภาคผนวก ข

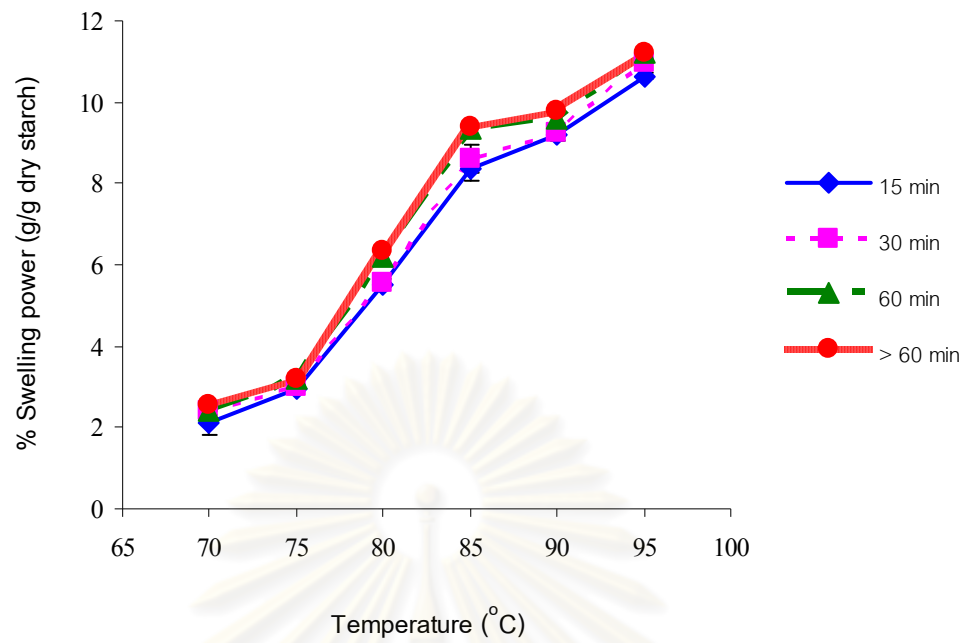
## รายละเอียดรูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม



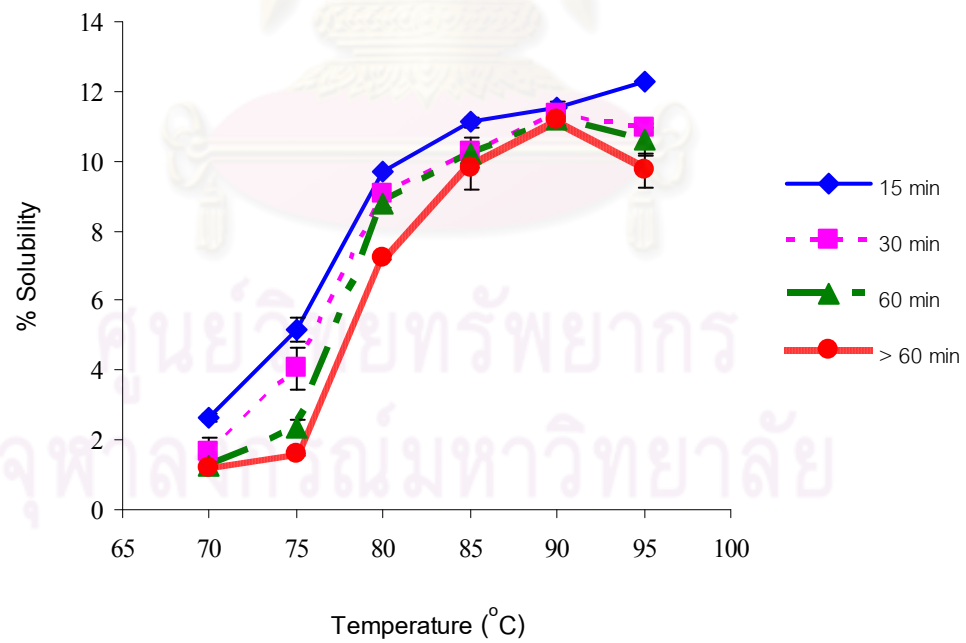
รูปที่ ข.1 ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชถั่วมะแฮะ



รูปที่ ข.2 ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว



รูปที่ ๓.๓ กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C



รูปที่ ๓.๔ การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C

## ภาคผนวก ค

## รายละเอียดข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาโรลที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งยังไม่ผ่านการแยกขนาด

Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.7634	15.3220	373	21.4
10.0629	8.7831	635	36.4
11.3383	7.7978	757	43.5
14.9660	5.9148	1,394	80.0
15.1984	5.8249	1,432	82.2
17.0447	5.1979	1,674	96.1
17.2487	5.1369	1,742	100.0
17.8050	4.9776	1,582	90.8
18.1325	4.8884	1,527	87.7
19.9013	4.4578	1,029	59.0
22.9087	3.8789	1,297	74.4
23.0864	3.8495	1,302	74.7
23.3165	3.8120	1,302	74.7
23.5785	3.7702	1,236	70.9
25.2855	3.5194	796	45.7
26.5270	3.3575	747	42.9
30.7278	2.9074	691	39.7
33.4297	2.6783	698	40.1
38.4037	2.3421	561	32.2

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารซัลโฟนัมและที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที

Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.7647	15.3186	356	19.8
10.1946	8.6700	623	34.6
11.1625	7.9202	749	41.6
15.1629	5.8385	1,520	84.4
15.4329	5.7369	1,446	80.3
16.8005	5.2729	1,665	92.5
16.9891	5.2148	1,759	97.7
17.2726	5.1298	1,801	100.0
17.8853	4.9554	1,650	91.6
18.2291	4.8627	1,539	85.5
19.4343	4.5638	1,087	60.4
19.8364	4.4722	1,072	59.5
22.9166	3.8776	1,353	75.1
23.3934	3.7996	1,324	73.5
23.8004	3.7356	1,212	67.3
26.1881	3.4001	751	41.7
30.6895	2.9109	721	40.0
33.1508	2.7002	715	39.7
38.3760	2.3437	590	32.7

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารซัลโฟนัมที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที

Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.2435	16.8402	378	21.3
5.5987	15.7723	405	22.8
9.2767	9.5257	555	31.3
10.1657	8.6945	660	37.3
11.2654	7.8482	798	45.1
15.1696	5.8359	1,460	82.4
16.9761	5.2187	1,728	97.5
17.1199	5.1752	1,772	100.0
17.2704	5.1305	1,752	98.9
17.8343	4.9695	1,572	88.7
20.1811	4.3966	1,034	58.4
21.6078	4.1094	1,013	57.2
21.9440	4.0472	1,076	60.7
22.0560	4.0269	1,092	61.6
22.8548	3.8879	1,320	74.5
23.1832	3.8336	1,355	76.5
26.5030	3.3604	750	42.3
30.1943	2.9575	723	40.8
33.2971	2.6887	709	40.0
33.9930	2.6352	698	39.4
38.2525	2.3510	583	32.9

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารซัลโฟนัมที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที

Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.7239	15.4276	389	21.9
10.2872	8.5921	661	37.3
11.2439	7.8631	791	44.6
15.1615	5.8390	1,491	84.1
17.1937	5.1532	1,772	100.0
17.7964	4.9800	1,635	92.3
18.0165	4.9196	1,591	89.8
18.1513	4.8834	1,561	88.1
19.8053	4.4792	1,036	58.5
22.9027	3.8799	1,347	76.0
23.2241	3.8269	1,367	77.2
23.4263	3.7944	1,316	74.3
23.7840	3.7381	1,229	69.4
26.2207	3.3960	767	43.3
30.7073	2.9093	717	40.5
33.1094	2.7035	712	40.2
34.5795	2.5918	677	38.2
38.3445	2.3455	584	33.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารซัลโฟนัมที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที

Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.9548	14.8299	364	20.4
10.2136	8.6539	638	35.8
11.3229	7.8084	751	42.1
13.6637	6.4755	940	52.7
15.1842	5.8303	1,485	83.2
17.0422	5.1986	1,771	99.3
17.1745	5.1589	1,783	100.0
17.3661	5.1024	1,725	96.7
17.7966	4.9799	1,619	90.8
18.2454	4.8584	1,521	85.3
22.7609	3.9038	1,278	71.7
22.9570	3.8708	1,311	73.5
23.1517	3.8387	1,309	73.4
23.3405	3.8081	1,286	72.1
26.6395	3.3435	738	41.4
30.3159	2.9459	695	39.0
33.3165	2.6871	682	38.2
38.4822	2.3375	552	30.9
39.1145	2.3011	544	30.5

**ตารางที่ ค.6** อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตัวอย่าง สตาร์ช	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช					
		ซ้ำที่ 1		ซ้ำที่ 2		ซ้ำที่ 3	
		$K_r$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$K_r$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$K_r$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$
สตาร์ชที่ยัง ไม่ได้ผ่านการ แยกขนาด	69	0.0008	0.7861	0.0007	0.6558	0.0008	0.7223
	74	0.0053	0.8863	0.0054	0.9149	0.0054	0.8997
	79	0.0231	0.9519	0.0216	0.9676	0.0264	0.9664
สตาร์ชที่ ตกตะกอนที่ เวลา 15 นาที	69	0.0023	0.9445	0.0023	0.9424	0.0023	0.9416
	74	0.0036	0.9637	0.0038	0.9668	0.0038	0.9810
	79	0.0115	0.9174	0.0118	0.9163	0.0119	0.9421
สตาร์ชที่ ตกตะกอนที่ เวลา 30 นาที	69	0.0024	0.9880	0.0024	0.9848	0.0022	0.9898
	74	0.0033	0.9423	0.0034	0.9887	0.0032	0.9655
	79	0.0021	0.9098	0.0027	0.7238	0.0023	0.9386
สตาร์ชที่ ตกตะกอนที่ เวลา 60 นาที	69	0.0007	0.8966	0.0007	0.8877	0.0007	0.8947
	74	0.0004	0.9282	0.0004	0.9285	0.0004	0.9237
	79	0.0008	0.9490	0.0006	0.6162	0.0010	0.9021
สตาร์ชที่ ตกตะกอนที่ เวลา >60 นาที	69	0.0044	0.8583	0.0045	0.8764	0.0044	0.9062
	74	-0.0105	0.8150	-0.0095	0.7881	-0.0106	0.8308
	79	-0.0267	0.7146	-0.0276	0.7700	-0.0253	0.7353

**ตารางที่ ค.7** พลังงานก่อกัมมันต์ ( $E_a$ ) ที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

ตัวอย่าง	พลังงานก่อกัมมันต์ ( $E_a$ ) (kJ mole <sup>-1</sup> )		
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3
สตาร์ชที่ยังไม่ได้ผ่านการแยกขนาด	337.06	343.83	350.39
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	160.87	163.49	164.33
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	13.00	12.08	4.79
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	12.77	15.90	35.02
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที	-	-	-

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่สามารถหาค่าได้



## ภาคผนวก ง

## ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสในสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.7)

SOV	df	MS
ปริมาณแอมิโลส	3	15.31*
Error	8	1.24

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.7)

SOV	df	MS
ขนาดเม็ดสตาร์ช	3	22.87*
Error	4	0.02

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีและค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.9)

## ค่าสี

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
ค่าสี	L	3	2.22*
	Error	32	0.00
a		3	0.06*
	Error	32	0.00
b		3	0.13*
	Error	32	0.00

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ค่าดัชนีความขาว

SOV	df	MS
ค่าดัชนีความขาว	3	1.72*
Error	32	0.07

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

**ตารางที่ ๓.4** การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.10)

SOV	df	MS
ความสามารถในการจับน้ำ	3	0.00*
Error	7	$1.56 \times 10^{-5}$

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

**ตารางที่ ๓.5** การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.11)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
กำลังการพองตัว	70 °C	3	0.11*
	Error	8	0.28
	75 °C	3	0.05
	Error	8	0.02
	80 °C	3	0.53*
	Error	8	0.04
	85 °C	3	0.80*
	Error	8	0.15
	90 °C	3	0.24*
	Error	8	0.01
	95 °C	3	0.22*
	Error	8	0.02

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

**ตารางที่ ๓.6** การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.12)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
การละลาย	70 °C	3	7.82*
	Error	8	0.13
	75 °C	3	1.35*
	Error	8	0.05
	80 °C	3	3.38*
	Error	8	0.01
	85 °C	3	0.92*
	Error	8	0.15
	90 °C	3	0.08*
	Error	8	0.02
	95 °C	3	3.26*
	Error	8	0.11

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ง.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.14)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติด้านการเกิดเพสต์	Peak viscosity	3	32,4872.33*
	Error	4	379.75
Trough		3	34,0572.17*
	Error	4	605.25
Breakdown		3	2,768.50
	Error	4	1,625.00
Final viscosity		3	1,823,510.33*
	Error	4	1,953.75
Set back		3	588,799.17*
	Error	4	1,837.50
Peak time		3	0.00
	Error	4	0.00
Pasting temperature		3	0.58*
	Error	4	0.07

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.15)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติด้านความร้อน	Onset temperature	3	0.45
	Error	4	0.11
	Peak temperature	3	0.17
	Error	4	0.07
	Conclusion temperature	3	0.69*
	Error	4	0.05
	Enthalpy of gelatinization	3	3.26*
	Error	4	0.19

หมายเหตุ: \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปทุมทริกา วิไลพล เกิดวันที่ 6 ธันวาคม 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551

### ผลงานวิจัย

เสนอผลงานเรื่อง ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ (Effects of granule size on physico-chemical and functional properties of pigeon pea starch) ในการประชุมทางวิชาการ นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 29-31 กรกฎาคม 2553 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย