

ผลของการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตินเซชันต่อสมบัติทางเคมี สมบัติกายภาพ
และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.)



นางสาวรพีพร ประสาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HEAT TREATMENT IN THE GELATINIZATION TEMPERATURE RANGE
ON CHEMICAL, PHYSICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF PIGEON PEA

Cajanus cajan (L.) STARCH



Miss Rapeeporn Prasat

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

ผลของการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาติโนเซชันต่อ
สมบัติทางเคมี สมบัติกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของ
สตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.)

โดย

นางสาวรพีพร ประสาท


สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

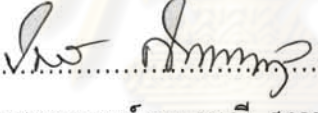
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

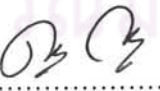

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชนิษฐา ธนานวงศ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ดริช กวักเพชญ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สุनीย์ โชตินีรนาท)

รพีพร ประสาท : ผลของการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาติโนเซชันต่อสมบัติทางเคมี สมบัติกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแสะ *Cajanus cajan* (L.) EFFECTS OF HEAT TREATMENT IN THE GELATINIZATION TEMPERATURE RANGE ON CHEMICAL, PHYSICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF PIGEON PEA *Cajanus cajan* (L.) STARCH อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 ผศ. ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาติโนเซชันต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแสะ *Cajanus cajan* (L.) การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแสะ พบว่า สตาร์ชถั่วมะแสะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุดคือ ร้อยละ 98.95 โดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ร้อยละ 0.64, 0.27, 0.10 และ 0.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช มีค่าสี L^* , a^* , b^* เท่ากับ 76.09, -0.61 และ +1.16 ตามลำดับ เม็ดสตาร์ชถั่วมะแสะมีรูปร่างกลมและรี มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ไมครอน และมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C สตาร์ชถั่วมะแสะมีความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 0.74 กรัม/น้ำ / กรัมสตาร์ชแห้ง ส่วนกำลังการพองตัว (กรัม / กรัมสตาร์ชแห้ง) และการละลาย (ร้อยละ) มีค่าเท่ากับ 2.41 และ 1.29 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเป็น 10.89 และ 10.84 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแสะด้วยเครื่อง RVA พบว่า มีค่า pasting temperature 81.28 องศาเซลเซียส peak viscosity, breakdown และ setback เท่ากับ 4,106.50, 1,082.50 และ 2,812.50 cP ตามลำดับ สตาร์ชถั่วมะแสะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชัน 70.95-83.95 องศาเซลเซียส และมีค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลาติโนเซชัน (ΔH_{gel}) เท่ากับ 12.97 J/g เจลของสตาร์ชถั่วมะแสะมีค่า G' มากกว่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าความเป็นของเหลว และมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยเท่ากับร้อยละ 8.35 ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของการดัดแปรโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาติโนเซชันต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแสะ โดยในการศึกษาใช้ตัวอย่างน้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 30 เวลาในการดัดแปร 24 ถึง 72 ชม. และอุณหภูมิในการดัดแปรในช่วง 70 ถึง 78 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดสตาร์ชทั้ง 15 ตัวอย่างมีปริมาณแอมิโลสลดลง จากการวัดค่าสี พบว่าเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร มีค่าสีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เม็ดสตาร์ชมีลักษณะสภาพพื้นผิวขรุขระ และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C ความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 1.38-1.87 (กรัม / กรัมสตาร์ชแห้ง) ส่วนกำลังการพองตัว (กรัม / กรัมสตาร์ชแห้ง) และการละลาย (ร้อยละ) มีค่าเท่ากับ 1.97 และ 2.23 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70°C และเพิ่มขึ้นเป็น 2.09 และ 11.92 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแสะที่ผ่านการดัดแปรแล้วพบว่าค่า peak viscosity, final viscosity, breakdown และ setback มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า pasting temperature เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร ΔH_{gel} มีแนวโน้มลดลง ขณะที่อุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชันมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร เจลสตาร์ชถั่วมะแสะมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' เมื่อผ่านการดัดแปรในช่วงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 24 ชม. ถึง 74 องศาเซลเซียส 72 ชม. แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดัดแปร เจลสตาร์ชถั่วมะแสะมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร สตาร์ชมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch) มากขึ้น

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่อนิสิต รพีพร ประสาท
 สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 ปีการศึกษา 2553.....

5172588023 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : PIGEON PEA STARCH / HYDROTHERMAL TREATMENT / FUNCTIONAL PROPERTIES

RAPEEPORN PRASAT : EFFECTS OF HEAT TREATMENT IN THE GELATINIZATION

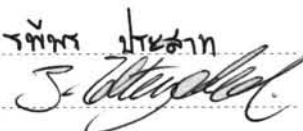
TEMPERATURE RANGE ON CHEMICAL, PHYSICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF PIGEON

PEA *Cajanus cajan* (L.) STARCH ADVISOR : ASST. PROF. JIRARAT TATTIYAKUL, Ph. D., 125 pp.

This research aimed to study the effects of heat treatment in the gelatinization temperature range on chemical, physical, and functional properties of pigeon pea starch *Cajanus cajan* (L). The experiment was divided into two parts. The first part was to study the chemical and physical properties of pigeon pea starch. The study showed that the main component of the pigeon pea starch was carbohydrate (98.95%). The starch also contained fiber (0.64%), fat (0.27%), ash (0.10%), protein (0.04%) on dry weight basis, and 64.61% amylose. The L^* , a^* and b^* of the starch equaled 76.09, -0.61 and +1.16 respectively. The pigeon pea starch granules were round and oval with smooth surface with the average size of 27.32 microns and the crystal structure was of type C. The starch water binding capacity was 0.74 g water / g dry starch. The swelling power (g / g starch dry) and solubility (%) was 2.41 and 1.29, respectively, at 70 °C and increased to 10.89 and 10.84 at 95 °C. From the RVA measurements, the starch pasted at 81.28 °C. The peak viscosity, breakdown and setback were 4,106.50, 1,082.50 and 2,812.50 cP, respectively. The temperature of gelatinization was 70.95-83.95 °C with ΔH_{gel} of 12.97 J/g. The gel of starch gave higher G' than G'' at all test frequencies. The amount of resistant starch was 8.35%. The second part was to study the effects of heat treatment in the gelatinization temperature range on chemical, physical, and functional properties. The study employed 30% starch dispersion for modification between 24 to 72 hours at 70 °C to 78 °C. The study showed that all modified starches had reduced amylose. The modified starches did not differ in color ($p > 0.05$). However, starch granules with rough surface and the crystal structure type C were unchanged. The water binding capacity was in the 1.38 to 1.87 (g / g dry starch) range. The swelling power (g / g dry starch) and solubility (%) were 1.97 and 2.23 at 70 °C and increased to 2.09 and 11.92 respectively at 95 °C. The starch paste showed lower peak viscosity, final viscosity, breakdown and setback and higher pasting temperature when the modification temperature and time increased. The ΔH_{gel} tended to decrease while the temperature and the time of gelatinization increased. Starch gel from the modified pigeon pea starch gave higher G' than G'' after modified at 70 °C for 24 hr upto 74 °C for 72 hr. At higher temperature of modification, the starch gel gave higher G'' than G' . An increase in temperature and time of modification caused an increase in the amount of resistant starch.

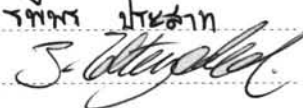
Department : Food Technology

Student's Signature

รพีพร ประสาท


Field of Study : Food Technology

Advisor's Signature



Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวรัตน์ ทัตติยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการทำวิจัย และตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชนิษฐา ธนानวงส์ อาจารย์ ดร. ดริษ กวักเพฑูร์ย์ และ ดร. สุณีย์ โชติไกรนาท 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 ซึ่งเป็นรากฐานอย่างดียิ่งในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ และเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณปณทริกา วิไลพล คุณทิมมพร 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
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 แบ่งถั่วมะแฮะ.....	3
2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพที่สำคัญของสตาร์ช.....	4
2.2.1 สมบัติทางเคมี.....	4
2.2.2 สมบัติทางกายภาพ.....	5
2.3 แป้งที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch).....	16
2.4 การดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น.....	17
2.4.1 สมบัติทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น.....	18
2.4.2 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น.....	18
3. วิธีการทดลอง.....	25
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	25
3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	26
3.3 ศึกษาผลของการดัดแปรต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	27

บทที่	หน้า
3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช ถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปร.....	28
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	29
4.1 สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	29
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	29
4.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	30
4.2 ผลของการตัดแปรโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตีในเซชันต่อสมบัติ ทางเคมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	38
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	89
ภาคผนวก ค.....	104
ภาคผนวก ง.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	กำลังการพองตัวของสตาร์ชพีชตระกูลถั่ว 8 ชนิดหลังผ่านการANN.....	19
2.2	การเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความหนืดของ African yam bean หลังผ่านการ ANN.....	21
2.3	สมบัติทางด้านความร้อนของสตาร์ชพีชตระกูลถั่ว 8 ชนิดหลังผ่านการดัดแปร...	23
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	29
4.2	สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ.....	35
4.3	สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช: น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC.....	37
4.4	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้ว.....	39
4.5	ปริมาณแอมิโลส (%) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	40
4.6	ค่าสี L*, a*, b* และค่าดัชนีความขาวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร...	41
4.7	ขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	51
4.8	ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	52
4.9	กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 95°Cของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	53
4.10	การละลายที่อุณหภูมิ 95°Cของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	53
4.11	สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่าค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	55
4.12	สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่า Breakdown (cP) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	55
4.13	สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่า Setback (cP) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	56
4.14	สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่า Pasting temperature (°C) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร.....	56
4.15	อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาคีโนเซนของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC)	58

ตารางที่		หน้า
4.16	อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC).....	58
4.17	อุณหภูมิล้นสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่ว มะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC).....	59
4.18	พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_{gel}) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC).....	59
4.19	ความสามารถในการทนย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (%RS).....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของแอมิโลส..... 4
2.2	โครงสร้างของแอมิโลเพกติน..... 5
2.3	การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม..... 6
2.4	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกตามการเกิดเลาติโนเซชันของแป้ง..... 7
2.5	การเกิดรีโทรเกรเดชัน..... 8
2.6	กลไกการคืนตัวของแป้ง..... 9
2.7	โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช..... 10
2.8	ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด..... 13
2.9	ช่วง Linear viscoelastic range..... 14
2.10	การเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชก่อนและหลังการดัดแปร..... 20
4.1	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร..... 30
4.2	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ..... 31
4.3	X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ..... 32
4.4	กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C..... 33
4.5	การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C..... 34
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 36
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ..... 36
4.8	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง..... 42
4.9	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง..... 43
4.10	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง..... 44
4.11	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง..... 45

รูปที่	หน้า	
4.12	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ ดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	46
4.13	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่าน การดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	47
4.14	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่าน การดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	47
4.15	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่าน การดัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	48
4.16	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่าน การดัดแปรที่อุณหภูมิ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	49
4.17	รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่าน การดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	49
ก.1	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส.....	77
ข.1	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....	89
ข.2	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	90
ข.3	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	91
ข.4	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	92
ข.5	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	93
ข.6	สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง.....	94

รูปที่	หน้า
ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ ดัดแปรแล้วที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้คุณสมบัติในการ ทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	95
ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ ดัดแปรแล้วที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้คุณสมบัติในการ ทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	96
ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ ดัดแปรแล้วที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้คุณสมบัติในการ ทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	97
ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการ ดัดแปรแล้วที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้คุณสมบัติในการ ทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C.....	98
ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัด แปรแล้วที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ใน การทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz.....	99
ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัด แปรแล้วที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ใน การทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz.....	100
ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัด แปรแล้วที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ใน การทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 76 °C 24 hr.....	101

รูปที่	หน้า
ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 76 °C 24 hr.....	102
ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 76 °C 24 hr.....	103



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ถั่วมะแสะมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cajanus cajan* เป็นไม้พุ่ม พบมากแถบพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย นิยมปลูกเพื่อปรับปรุงดิน ถั่วมะแสะมีแป้งอยู่มากกว่าร้อยละ 50 และมีโปรตีนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 20 (Oshodi and Ekperigin, 1989) จึงจัดได้ว่าเป็นแหล่งอาหารที่มีโปรตีนสูง และราคาถูกกว่าแหล่งโปรตีนจากแหล่งอื่นๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาสมบัติของถั่วมะแสะ พบว่า สตาร์ชถั่วมะแสะมีค่า peak viscosity และค่า final viscosity ค่อนข้างสูง และอยู่ในช่วงเดียวกันกับสตาร์ชที่นิยมนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด (ปุลนทริกา วิลโพล, 2553) จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการดัดแปรสตาร์ชถั่วมะแสะเพื่อให้มีคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้น งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการดัดแปรถั่วมะแสะโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (hydrothermal treatment) ซึ่งเป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพ โดยการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช หลังจากผ่านการดัดแปรแล้วชั้นผลึก (crystal layer) อาจเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้มีสัดส่วนผลึกเพิ่มสูงขึ้นหลังผ่านการดัดแปร จึงได้สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch) มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ

ปัจจุบันการเสริมใยอาหารลงในผลิตภัณฑ์อาหารได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากพบว่าการบริโภคอาหารที่มีเส้นใยต่ำจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคความดันโลหิตสูง (hypertension) โรคเบาหวาน (diabetes) และโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ (colon cancer) (Fu et al., 2008) โดยอาหารส่วนใหญ่จะมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อรับประทานอาหารจำพวกสตาร์ชเข้าไป สตาร์ชจะถูกย่อยเป็นโมโนแซ็กคาไรด์แล้วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในลำไส้เล็ก แต่สตาร์ชบางชนิดไม่สามารถถูกย่อยได้ ซึ่งเรียกสตาร์ชชนิดนี้ว่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย โดยสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยจะพบได้ในพืชที่ไม่ได้ผ่านการทำให้สุก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพืชตระกูลถั่วเป็นแหล่งของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Anonymous, 2009) สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยจัดเป็นใยอาหารกลุ่มหนึ่งซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหาร และเพิ่มปริมาณของอุจจาระ ช่วยให้ขับถ่ายเป็นประจำทุกวัน นอกจากนี้ การบริโภคสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยในปริมาณที่มากเพียงพอจะช่วยเพิ่มระดับกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acids) ที่ได้จากการหมักของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่ ซึ่งกรดไขมันสายสั้นส่งเสริมการสร้างเซลล์ที่ปกติและยับยั้งการสร้างเซลล์ที่ผิดปกติในลำไส้ใหญ่

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช ถั่วมะแฮะที่ดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อขยายการใช้ประโยชน์ สตาร์ชพืชตระกูลถั่วให้กว้างขวางยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 แป้งถั่วมะแฮะ

ถั่วมะแฮะเป็นพืชไม้พุ่มขนาดเล็ก มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Cajanus canja* (L) Millsp. ชื่อสามัญ Pigeon pea อยู่ในวงศ์ Leguminosae มีชื่ออื่นๆ ว่า ถั่วแฮะ, มะแฮะ, ถั่วแระ, ถั่วแม่ตาย, ถั่วแรด, มะแฮะต้น และ ถั่วแฮ่ สามารถเจริญเติบโตข้ามปี ได้ 2 - 3 ปี สูง 1 - 5 เมตร รูปทรงผ่นแปรตามลักษณะของพันธุ์ มีรากแก้วยังลึกในดิน ลักษณะใบเป็นใบรวมมีใบย่อย 3 ใบ รูปยาวรีคล้ายหอกปลายแหลม ขอบใบเรียบ มีขน ด้านบนสีเขียวเข้ม ส่วนด้านล่างของใบเป็นสีเงิน ดอกสีเหลืองหรือสีแดง (เต็ม สมิตินันท์, 2523; วุฒิ วุฒิธรรมเวช, 2540) ถั่วมะแฮะเพาะปลูกได้ทั่วไปในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนหรือกึ่งร้อน แต่พบว่าปลูกมากในประเทศอินเดียและขยายพื้นที่ปลูกไปยังทวีปแอฟริกาตะวันออกและแถบแคริบเบียน (Lawal, 2011) และถือว่าเป็นธัญพืชที่สำคัญในประเทศอินเดีย และพื้นที่ใกล้เคียง (Kaur and Sandhu, 2010) นอกจากนี้ถั่วมะแฮะยังมีคุณสมบัติต่างจากพืชชนิดอื่นคือ มีความทนทานต่อความแห้งแล้ง และทนทานต่อกระแสดมแรงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีระบบรากลึกจึงเหมาะที่จะปลูกในบริเวณแห้งแล้ง หรือบริเวณที่มีดินที่ไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์ เช่น แถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (วิเชียร วรพุทธพร, 2525) ในประเทศไทยพบมากที่ภาคเหนือ

มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์ถั่วมะแฮะโดยนักวิจัยหลายท่าน ได้แก่ นิรมล ล้อสุริยนต์ (2536) Oshodi และ Ekperigin (1989) Kaur, Sandhu และ Singh (2007) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าฟลาวอร์ถั่วมะแฮะมีโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรตอยู่ในช่วงร้อยละ 21.18-23.60, 0.93-3.41, 3.21-6.08, 1.09-4.03 และ 58.3-67.01 ตามลำดับ ถือได้ว่าถั่วมะแฮะเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญเพราะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งยังมีราคาถูกกว่าแหล่งคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ (Lawal, 2011) จากการศึกษาของ Hoover และ Zhou (2003) พบว่าการบริโภคอาหารจากถั่วหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อนหรือการทำอาหารแล้ว จะช่วยลดปริมาณสารต้านทางโภชนาการ จึงทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารที่มีประโยชน์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะโปรตีนและสารซ (Costa et al., 2006) นอกจากนี้ Anonymous, (2009) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณใยอาหาร และปริมาณแป้งที่ทนการย่อยหลังผ่านการทำให้สุกในถั่ว 4 ชนิด ได้แก่ pea, common bean, chickpea และ lentil พบว่าปริมาณใยอาหารที่ละลายและไม่ละลายน้ำยังคงมีอยู่หลังจากผ่านการทำให้สุกแต่มีปริมาณลดลง จึงเป็นแหล่งแป้ง

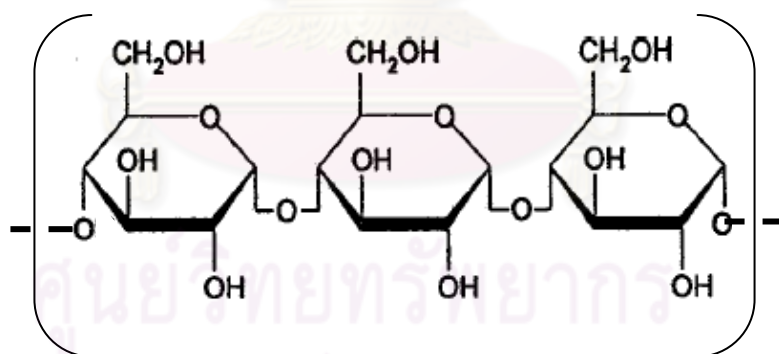
ที่ทนต่อการย่อยที่พบได้ในธรรมชาติถึงแม้จะพบในปริมาณเล็กน้อย ถั่วมะแฮะมีมากมายหลายพันธุ์โดยสตาโรซจากแต่ละแหล่ง จะมีลักษณะทางเคมีและลักษณะทางกายภาพเฉพาะตัว ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง ความสามารถในการจับน้ำ การพองตัว ความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ เป็นต้น เป็นเหตุให้สตาโรซแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกัน (Kaur and Sandhu, 2010)

2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพที่สำคัญของสตาโรซ

2.2.1 สมบัติทางเคมี

สตาโรซประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ แอมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นและแอมิโลเพกตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งวงตัวในแนวรัศมี สตาโรซจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของสตาโรซแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1, 4 (α -1, 4) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

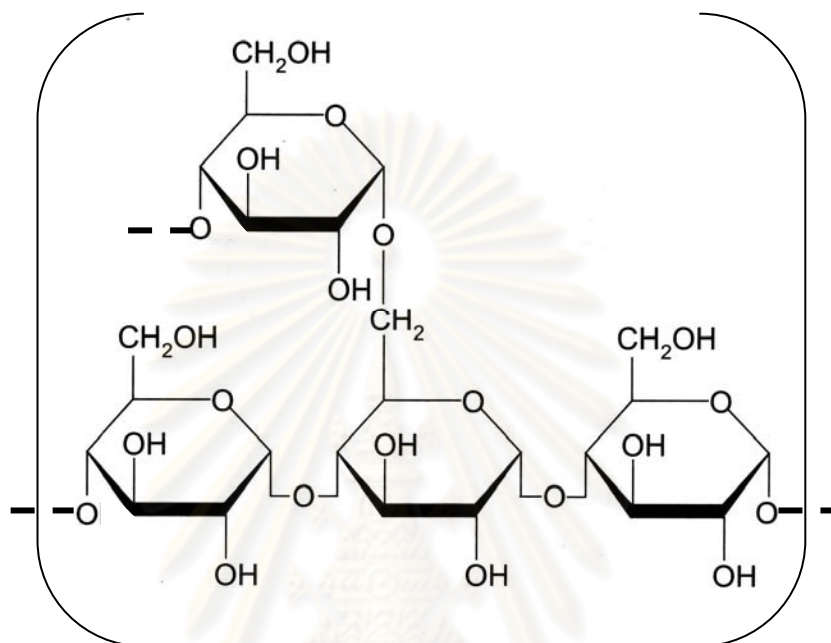


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งแอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 10 – 60 หน่วย (Degree of polymerization, DP = 10-60) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของแอมิโลเพกติน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแอมิโลเพกติน

ที่มา: กัลลาณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

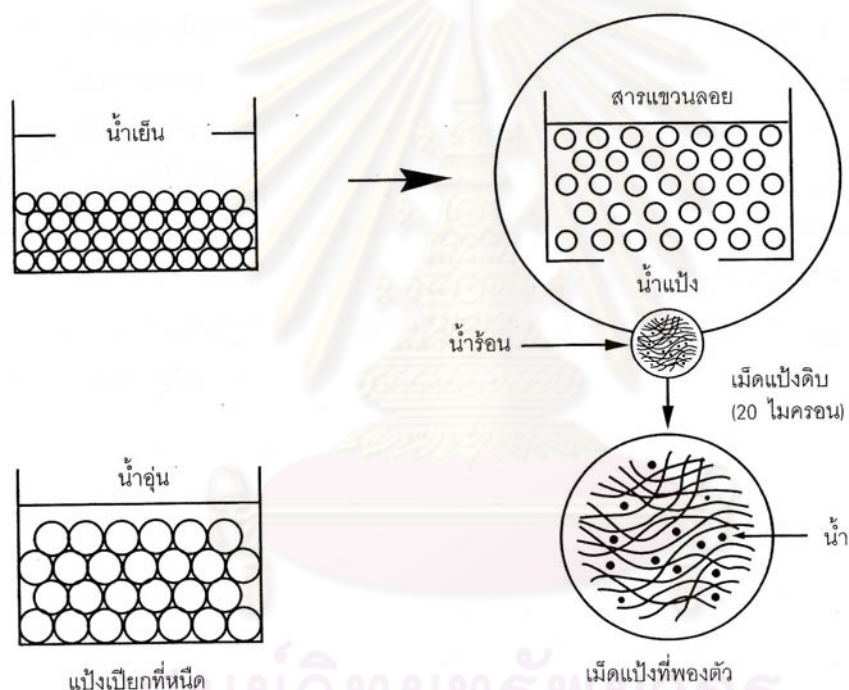
แอมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่า ของแอมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากแอมิโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อัตราส่วนของปริมาณแอมิโลสต่ออะมิโลเพกตินมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ความเหนียว และความใสของแป้งเปียกที่ได้หลังจากการเกิดเจล

2.2.2 สมบัติทางกายภาพ

2.2.2.1 เจลาติไนเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ใน

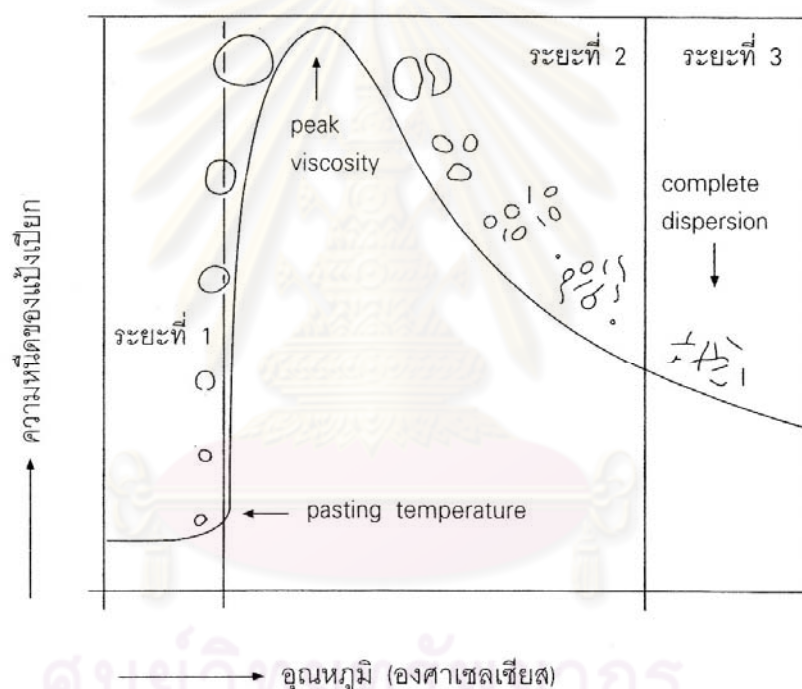
รูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้น ขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์ เรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

การเกิดเจลาตินไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ดังรูปที่ 2.4 คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและการเกิดพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารละลายแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิด

ของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่องแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำมากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสลงระนาบโพลารไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้ง จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้ จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยก ส่วนใสและหยดสารละลายไฮโอดินลง ในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็น จะเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ได้ดีกว่า (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



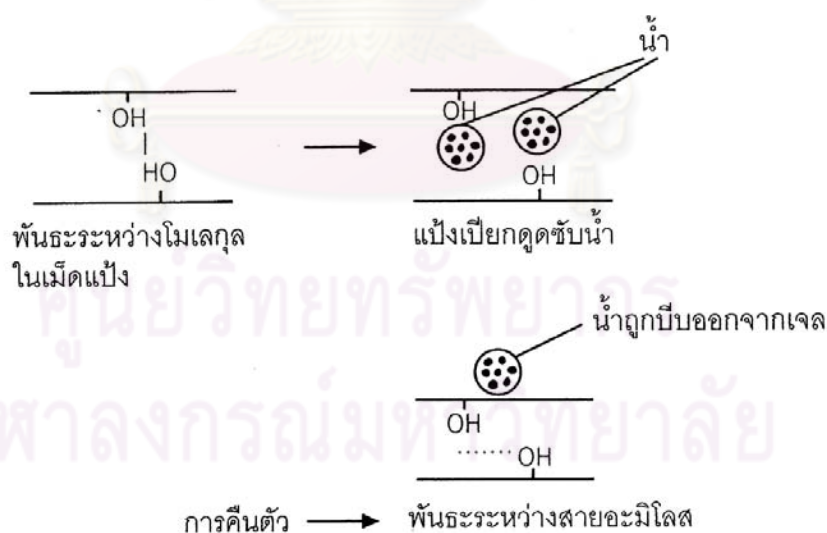
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกตามการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างเจลาตินในเซชันจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง นอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้ง

มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่าง ๆ มีลักษณะการเกิดเจลที่ต่างกันไป การเกิดเจลตาในเซชันไม่ได้เกิดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.2.2 รีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลตาในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลงเมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารรถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจลดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



รูปที่ 2.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมาจนเกิดเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงในกลไกการคืนตัวของแป้งรูปที่ 2.6 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ , 2550)



รูปที่ 2.6 กลไกการคืนตัวของแป้ง

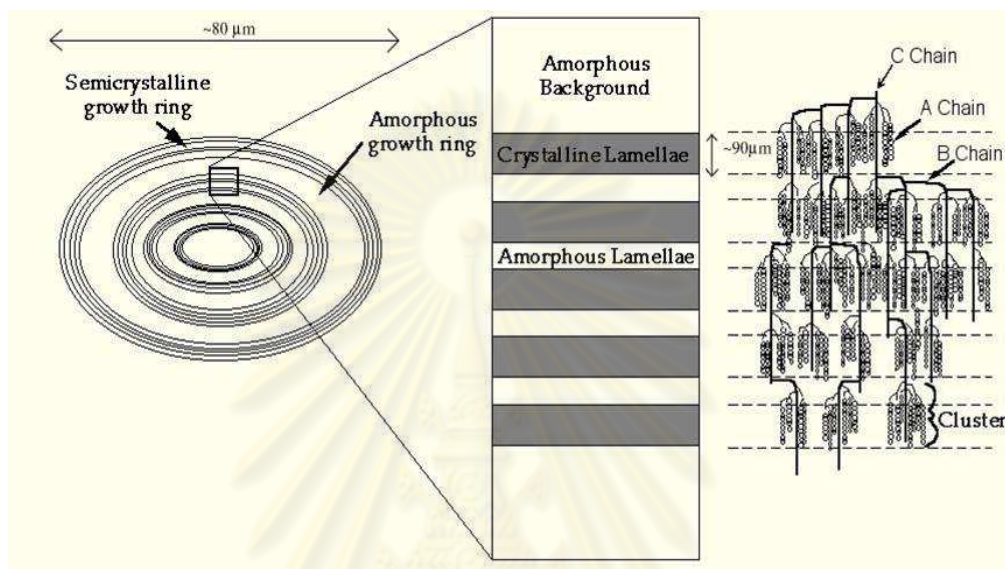
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550)

ปริมาณและขนาดแอมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณแอมิโลเพกตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของแอมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของแอมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้แอมิโลสที่คืนตัวกลับมามีการละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส แอมิโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.2.3 โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชแกรนูลประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินมาจัดเรียงตัวกัน ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน สตาร์ชแกรนูลจึงมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semicrystalline) ดังแสดงรูปที่ 2.7 ส่วนสายโซ่สั้นของแอมิโลเพกติน

จะเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก ส่วนออสัญฐานของสตาร์ชแกรนูลประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและสายโซ่ยาวของแอมิโลเพกติน (Farhat et al., 1999)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Jacobs และ Delcour (1998)

สตาร์ชแกรนูลมีรูปแบบของโครงสร้างผลึกเมื่อแบ่งตามชนิดของ X-ray diffraction ได้ 4 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวกันของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นจะมีโครงสร้างผลึกแบบ A เช่น สตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ ถ้ามีผลึกแบบหลวมๆ จะมีโครงสร้างผลึกแบบ B เช่น สตาร์ชจากพืชหัว ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันทั้งแบบ A และ B แสดงว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ C เช่น พืชตระกูลถั่ว และการที่แอมิโลสรวมตัวกับองค์ประกอบอื่นๆ จะเกิดโครงสร้างแบบ V เช่น แอมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน (amylase – lipid complex) (Farhat et al., 1999)

2.2.2.4 กำลังการพองตัว (Swelling power)

สตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำสตาร์ชเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน

พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ สตาร์ช แกรนูลเกิดการเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการ บิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในสตาร์ชแกรนูลจะเปลี่ยนไป (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาณหรือน้ำหนักของ สตาร์ชแกรนูลที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อสตาร์ชแกรนูลพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อ กำลังการพองตัว ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในสตาร์ช แกรนูล ปริมาณแอมิโลส และสิ่งเจือปนในสตาร์ชแกรนูลที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (Leach และคณะ, 1959)

2.2.2.5 สมบัติด้านความหนืด (Pasting properties)

ความหนืดเป็นสมบัติด้านทานการไหลของของเหลว ซึ่งในกรณีของแป้ง นั้น ถ้านำแป้งดิบผสมกับน้ำ โครงสร้างที่เป็นระเบียบของเม็ดแป้งในธรรมชาติจะทำให้เม็ดแป้งดูด ชีมน้ำได้อย่างจำกัด แต่เมื่อให้ความร้อน เม็ดแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างทำให้พอง ตัวมากขึ้น เป็นผลให้ปริมาตรของเม็ดแป้งในของเหลวเพิ่มมากขึ้น พร้อมกับบางส่วนของโมเลกุล แป้งหลุดออกมาจากเม็ดแป้ง จึงทำให้น้ำแป้งมีความต้านทานการไหลมากขึ้น กล่าวคือมีความ หนืดมากขึ้น ซึ่งความหนืดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกระบวนการเกิดเจลลาติโนเซชัน การเปลี่ยนแปลง ความหนืดของน้ำแป้งสามารถตรวจวัดได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ใน การวัดมีหลายชนิด ซึ่งแต่ ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดที่ต่างกัน เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบบรูค-ฟิลด์ (Brookfield viscometer) เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโลกราฟ (Brabender amylograph) เครื่อง แคนพิลลารี วิสโคมิเตอร์ (Capillary viscometer) และเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้น โดยเครื่อง RVA เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินความหนืดของตัวอย่างขณะที่ให้ความร้อน และขณะที่ทำให้เย็น คุณสมบัติพิเศษคือมีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำ ให้อุ่นและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว และสามารถรักษา อุณหภูมิให้คงที่ได้ เนื่องจากมีกลไก การส่งผ่านความร้อนที่ดี และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยในการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วย เครื่อง RVA สามารถอ่านค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. Peak time: เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็น นาที
2. Pasting temperature : อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือ มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

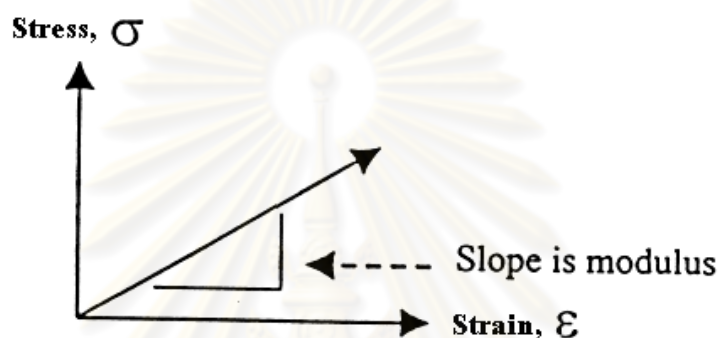
3. Peak temperature : อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
4. Peak viscosity : ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
5. Trough : ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็นRVU
6. Breakdown : ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
7. Final viscosity : ความหนืดสูงสุดเมื่อแป้งเย็นตัวลง มีหน่วยเป็น RVU
8. Setback from peak : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU
9. Setback from trough : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

การวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชโดยใช้ RVA เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจะดูดซับน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า pasting temperature เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดจะลดลง ต่อมาลดอุณหภูมิลงทำให้เกิดการรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.2.2.6 สมบัติทางการไหล (Rheological properties)

สมบัติทางการไหลมีความสำคัญในการใช้ศึกษาพฤติกรรมของสตาร์ชที่ผ่านการแปรรูป สมบัติการไหลของสตาร์ชขึ้นอยู่กับธรรมชาติและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสตาร์ช (Hoover and Sosulski, 1990) ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับรูปร่าง กำลังการพองตัวของแกรนูลสตาร์ช ซึ่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนรูป หรือสมบัติการไหลของวัตถุเมื่อวัตถุได้รับแรงกระทำภายนอกที่เรียกว่า ความเค้น (stress: σ) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะที่ถูกแรงมากระทำ ซึ่งเรียกว่า ความเครียด (strain: ϵ) การเปลี่ยนแปลงนี้อาจจะอยู่ในรูปของการยืดตัวหรือหดตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่มากระทำ เช่น แรงกด เป็นต้น

โมดูลัส คือ ความลาดชันเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียด (รูปที่ 2.8) ซึ่งค่าโมดูลัสเป็นค่าที่บ่งบอกความยืดหยุ่นของวัตถุ (elasticity) ตามกฎของ Hooke โดยทั่วไปวัตถุที่เป็นของแข็งจะมีสมบัติเป็น elastic เนื่องจากของแข็งเมื่อได้รับความเค้น จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ และหากความเค้นที่ให้แก่ของแข็งมีค่าน้อยกว่าค่า yield value รูปร่างของของแข็งจะสามารถกลับสู่สภาวะเดิมก่อนที่ได้รับความเค้นได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง ของแข็งที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้จะเรียกว่าเป็น Hookean solid

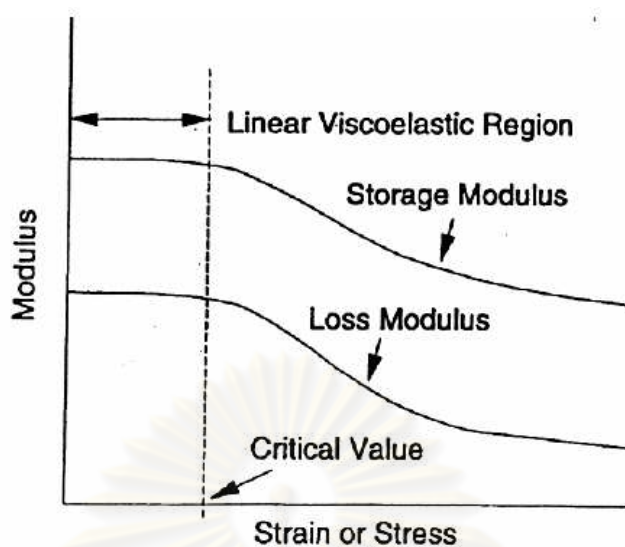


รูปที่ 2.8 โมดูลัสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ที่มา: Steffe (1992)

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

ในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะมีลักษณะที่เรียกว่า viscoelastic ซึ่งการแสดงพฤติกรรมของวัตถุพวก viscoelastic จะขึ้นอยู่กับสมบัติยืดหยุ่นและสมบัติที่เป็นลักษณะของของไหลที่มีอยู่ในวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของเวลาที่ใช้ในการทำให้วัตถุเสียรูป การวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุพวก viscoelastic จะทดสอบในช่วงที่เป็น linear viscoelastic range (รูปที่ 2.9) linear viscoelastic range คือ ช่วงที่วัตถุแสดงลักษณะยืดหยุ่น หรือวัตถุมีความสามารถในการคืนตัวกลับสู่สภาพเดิม หลังจากที่มีการถอนแรงที่ให้แก่วัตถุ นอกจากนี้ยังพบว่าเจลที่มีความแข็งแรง (strong gel) จะมีช่วง linear viscoelastic range กว้างกว่าเจลอ่อน (weak gel) (Steffe, 1992)



รูปที่ 2.9 ช่วง Linear viscoelastic range

ที่มา: Steffe (1992)

สตาร์ชเมื่อเกิดเจลาติไนเซชันแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ mechanical behavior ซึ่งเจลาจะแสดงลักษณะของ viscoelastic คือจะมีสมบัติที่เป็นทั้ง viscous และ elastic (Karim et al., 2000) โดยลักษณะของเจลาที่เป็น viscoelastic ดังกล่าว สามารถติดตามหรือตรวจสอบได้โดยการทดสอบสมบัติทางไหลของเจลา (rheological testing) dynamic oscillatory test เป็นการทดสอบสมบัติ viscoelastic ของเจลา โดยที่ไม่ทำให้โครงสร้างของเจลาถูกทำลายไป สามารถวิเคราะห์หาค่าต่าง 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 (γ_0) แสดงได้ดังนี้ (สมการ 2.1 และ 2.2) (Steffe, 1992)

$$G' = \frac{(\sigma_0) \cos \delta}{\gamma_0} \quad (2.1)$$

$$G'' = \frac{(\sigma_0) \sin \delta}{\gamma_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ σ_0 = Generated stress = $G' \gamma_0 \sin(\omega t) + G'' \gamma_0 \cos(\omega t)$

γ_0 = Strain amplitude

ω = 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) η^* (complex viscosity) และ $\tan(\delta)$ (loss tangent) ได้ ดังนี้ (สมการ 2.3, 2.4 และ 2.5)

$$G^* = \frac{(\sigma_0)}{\gamma_0} = \{(G')^2 + (G'')^2\}^{1/2} \quad (2.3)$$

$$\eta^* = \frac{G''}{\omega} \quad (2.4)$$

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad , 0 \leq \delta \leq \pi \quad (2.5)$$

2.2.2.7 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์

เอนไซม์สามารถย่อยสลายสตาร์ชที่เกิดเจลลิตีในเซชันได้ดีกว่าสตาร์ชดิบ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบจะถูกทำลายไปในสตาร์ชที่เกิดเจลลิตีในเซชันแล้ว ในการย่อยสตาร์ชดิบ เอนไซม์จะเข้าไปย่อยในส่วนที่อ่อนแอก่อนนั่นคือส่วนอสัณฐาน หลังจากนั้นถึงจะเข้าไปย่อยในส่วนที่แข็งแรงคือส่วนผลึก ความแตกต่างของความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชดิบขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ขนาดของสตาร์ชแกรนูล พื้นผิวของสตาร์ชแกรนูล ชนิดของโครงร่างผลึก อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสแบบแอมิโลเพกติน ปริมาณ amylose – lipid

complex ความเป็นผลึก การกระจายของพันธะ α -1, 6 glucosidic linkage ในส่วนที่เป็น
 อสังฐานและผลึกของแอมิโลเพกติน (Gunaratne and Hoover, 2002)

2.3 แป้งที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch)

จากการศึกษาของ Fu และคณะ (2008) สตาร์ชจะถูกย่อยเป็นโมโนแซ็กคาไรด์และถูกดูดซึม
 เข้าสู่ร่างกายในส่วนวิลลัส (villus) ของลำไส้เล็กแต่สตาร์ชบางชนิดไม่สามารถถูกย่อยได้ในลำไส้
 เล็กจึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร เรียกสตาร์ชชนิดนี้ว่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย โดย
 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยนี้ สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อย โดยโครงสร้างของ
 เซลล์พืชที่ห่อหุ้มเมล็ดสตาร์ชเอาไว้ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยสตาร์ชภายในโครงสร้างนั้น
 ได้ เช่นเมล็ดธัญพืชที่ผ่านการขัดสีบางส่วน หรือพบในผักและผลไม้ดิบที่เมล็ดสตาร์ชยังมีความ
 สมบูรณ์ ยังไม่ถูกย่อย เช่น ถั่วดิบ มันฝรั่งดิบ แต่ไม่ค่อยนำมาบริโภคโดยตรงเพราะต้องทำให้สุก
 ก่อน จึงพบในชีวิตประจำวันได้น้อย ส่วนใหญ่จะได้จากการดัดแปรแป้งโดยใช้วิธีการต่างๆ การใช้
 ความร้อนร่วมกับความชื้น (hydrothermal treatment) เป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพวิธีหนึ่งที่ได้
 ผลิตภัณฑ์เป็นสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย โดยสามารถนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อเป็นการเพิ่ม
 ทางเลือกที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค เนื่องจากมีส่วนช่วยชะลอการเพิ่มระดับน้ำตาล
 กลูโคสในเลือด ทำให้ช่วยปรับปรุงระบบขับถ่ายได้ดีขึ้น เป็นการช่วยควบคุมอาหารสำหรับคนที่
 ควบคุมน้ำหนัก ลดความเข้มข้นของคอเลสเตอรอล (cholesterol) และไตรกลีเซอไรด์
 (triglyceride) ในเลือด ทั้งยังช่วยให้วิตามินและเกลือแร่ดูดซึมได้ดีขึ้นและพบว่าการบริโภคอาหาร
 ที่มีเส้นใยต่ำจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน และโรคมะเร็งลำไส้
 ใหญ่) (Fu et al., 2008)

ปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้ สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย เป็นส่วนประกอบใน
 ผลิตภัณฑ์แทนการใช้เส้นใยอาหารจากแหล่งอื่น เนื่องจากสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยมีขนาดอนุภาค
 ที่เล็ก มีการอุ้มน้ำไม่มาก จึงสามารถใช้เป็นแหล่งใยอาหารสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ เช่น
 คุกกี้ ขนมปังกรอบ เป็นต้น เมื่อใช้สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยในอาหาร พบว่าไม่ทำให้เนื้อสัมผัสของ
 อาหารมีลักษณะหยาบเหมือนกรวดทราย และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติ จึงเหมาะสม
 ต่อกระบวนการผลิตและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์พวกขนมอบ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล
 ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.4 การดัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

การดัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (hydrothermal treatment) เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช โดยการใช้ความร้อนและความชื้นช่วยในการดัดแปร แต่ไม่ได้ทำให้เกิดเจลาติโนเซชัน สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีนี้จะมีโครงสร้างเม็ดสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง และเป็นการดัดแปรที่ใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม วิธีการดัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นแบ่งได้ 2 แบบ คือ Annealing (ANN) และ Heat moisture treatment (HMT) Jacobs และ Delcour (1998) กล่าวว่า การดัดแปรทั้ง 2 วิธี มีความเกี่ยวข้องกับระดับความชื้นของสตาร์ช อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำพรีทเมนต์ โดยมีความแตกต่างกันคือ ANN เป็นการดัดแปรที่ระดับปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 60 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) หรือที่ระดับร้อยละ 40-55 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) แต่ถ้าระดับความชื้นต่ำ คือน้อยกว่าร้อยละ 35 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) จัดเป็นการดัดแปรแบบ HMT โดยทั้ง 2 วิธี ถูกกำหนดให้ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาซทรานซิชัน (Glass transition temperature : Tg) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดสตาร์ช ต่อมา Collado และ Corke (1997) ได้อธิบายความหมายของ ANN ว่าเป็นการดัดแปรทางกายภาพของสตาร์ชในสภาวะที่มีความชื้นมากเกินพอ โดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการเกิดเจลาติโนเซชันแต่ HMT เป็นการทำให้สตาร์ชที่ถูกจำกัดปริมาณความชื้นในช่วง 18-27 เปอร์เซ็นต์ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีส่วนมากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชัน สำหรับในสภาวะปกติการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชจะขึ้นกับความชื้น และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือมีปริมาณความชื้นอย่างน้อยในระดับต่ำสุดที่ต้องใช้ และอุณหภูมิสูงถึงระดับที่กำหนด จึงสามารถเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าเจลาติโนเซชันได้ โดยอุณหภูมิที่ใช้จะแตกต่างกันตามชนิดของสตาร์ช

หลังจากผ่านดัดแปรด้วยวิธี ANN แล้ว ขั้นตอนถัดมา (amorphous) ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น ส่วนในชั้นผลึก (crystal) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น หรืออาจเกิดการพันเกลียวคู่เพิ่มขึ้น ร่วมกับการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ (Jacob, Eerlingen, Clauwaert and Delcour, 1995) โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของน้ำย่อยต่อสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรคือ เวลาที่ใช้ในการดัดแปร อุณหภูมิในการดัดแปร และความชื้นที่ใช้ในการดัดแปร ซึ่งทุกปัจจัยสามารถส่งผลต่อความสามารถในการย่อยของน้ำย่อยได้ (Hoover และ Zhou, 2003)

จากการศึกษาของ Jacob และคณะ (1998) พบว่าการทำ ANN ในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำ 1:2 ของสตาร์ชถั่วและสตาร์ชข้าวสาลี จะลดปฏิกิริยาการย่อยสตาร์ชในกลุ่มที่ถูกย่อยได้เร็วเมื่อ

ทดสอบด้วยเอนไซม์ porcine pancreatic alpha amylase การทำ ANN จึงเป็นการช่วยลดความสามารถในการย่อย ทำให้สตาร์ชย่อยได้ช้าลงและเมื่อทดสอบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทเกรเดชันของสตาร์ชที่ผ่านการย่อยไป 120 ชั่วโมง พบว่า DSC thermograms ของสตาร์ชถั่วและสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการทำ ANN จะให้พีคกว้างและมีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ต่ำกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร อย่างไรก็ตาม การทำ ANN ในอัตราส่วนแบ่งต่อน้ำ 1:2 สตาร์ชมีความทนต่อการย่อยมากขึ้นทั้งในสตาร์ชกลุ่มที่ย่อยได้เร็วและช้า

2.4.1 สมบัติทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

ไม่พบรายงานว่าการตัดแปรสตาร์ชโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป อาจเนื่องมาจากการตัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นมุ่งเน้นให้พอลิเมอร์ในส่วนอสัณฐาน ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลสให้เป็นระเบียบมากขึ้น ส่วนในชั้นผลึกอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ให้เหมาะสมมากขึ้น (Jacob et al., 1995) และมีสตาร์ชบางส่วนเกิดเจลาติไนเซชันไปแล้ว ทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลต่อสมบัติทางกายภาพได้ชัดเจนกว่า

2.4.2 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

2.4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

Adebowale และคณะ (2009) รายงานว่าเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในสตาร์ชแอฟริกัน African yam bean ที่ผ่านการตัดแปรที่อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำ (1:2) ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร มีปริมาณผลึก 20% ในขณะที่สตาร์ชที่ผ่านการตัดแปร มีปริมาณผลึก 27% โดยเป็นที่ยอมรับกันว่าแอมิโลเพกตินเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโครงสร้างผลึก ซึ่งความแตกต่างของผลึก อาจเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินในสตาร์ชแต่ละชนิด

2.4.2.2 การวิเคราะห์กำลังการพองตัว

Adebowale และคณะ (2009) รายงานว่าการพองตัวของสตาร์ชจะเกิดคู่กันกับการหายไปของลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช และเกิดก่อนการละลายจากการศึกษาของ Chung, Liu และ Hoover (2009) รายงานว่าสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรจะมีค่า

กำลังพองตัวของแป้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการลดลงนี้คือการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสายของแอมิโลสกับสายแอมิโลสด้วยกันเอง หรือระหว่างสายแอมิโลสกับสายแอมิโลเพกตินในระหว่างการดัดแปร และปริมาณ amylose – lipid complex ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานผลของ Hoover และ Vasanthan (1993) ที่พบว่ากำลังการพองตัวของเลนทิลหลังผ่านการดัดแปร มีค่าลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hoover และ Manuel (1996) ที่ศึกษาสตาร์ชพีชตระกูลถั่ว 5 ชนิด และพบว่าหลังผ่านการดัดแปร สตาร์ชถั่วทั้ง 5 ชนิดมีค่ากำลังพองตัวลดลง

ตารางที่ 2.1 กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมสตาร์ชแห้ง) ของสตาร์ชพีชตระกูลถั่ว 8 ชนิดหลังผ่านการดัดแปรแบบ annealing

	กำลังการพองตัว (g/g dry starch)	
	Native starch	Anneal starch
African yam bean Adebowale และคณะ (2009)	4.60	2.44
Pea and lentil Chung และคณะ (2009)a	14,16	11, 12
Pea and lentil Chung และคณะ (2009)b	14,16	10, 9
Green arrow pea	6.9	1.6
Black bean	28.2	19.1
Pinto bean	19.1	13.0
Express field pea	21.5	13.6
Eston lentil Hoover และ Manuel (1996)	27.5	18.5

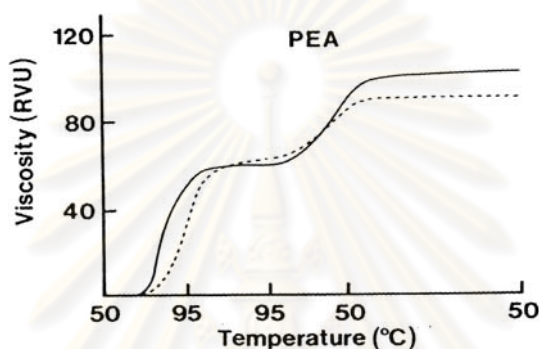
หมายเหตุ : Adebowale และคณะ (2009) ทำการดัดแปร ที่สตาร์ช:น้ำ (1:2) 24 hr. ที่ 50 °C

a คือ การแอนเนลที่ 15 °C , b คือ การดัดแปร ที่อุณหภูมิ 10 °C ที่ความชื้น 70% 24 hr.

Hoover และ Manuel (1996) ทำการดัดแปร ที่ความชื้น 75% 72 hr. ที่ 55 °C

2.4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืด

Jacobs และคณะ (1995) ศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากถั่วพี มัันฝรั่ง ข้าวสาลีและข้าว ที่ผ่านการตัดแปร ที่อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำ (1:2) เป็นเวลา 24 hr. ที่อุณหภูมิ 50 °C สำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและพี ที่ 45 °C สำหรับ สตาร์ชข้าวสาลีและที่ 55 °C สำหรับสตาร์ชข้าว ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าสตาร์ชพีมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้นสำหรับสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปร ความหนืดของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปร มีค่าลดลงและมีความหนืดสุดท้ายลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชถั่วก่อนและหลังการตัดแปร

ที่มา: Jacobs และคณะ (1995)

หมายเหตุ : ทำแอนนิลที่สตาร์ช:น้ำ (1:2) 24 hr.ที่ 50°C

: — หมายถึง สตาร์ชที่ไม่ได้ตัดแปร

: - - - หมายถึง สตาร์ชที่ตัดแปร

ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความขัดแย้งกับงานวิจัยของ Adebowale และคณะ (2009) ที่ศึกษา African yam bean พบว่าหลังการตัดแปร ค่า setback viscosity และ final viscosity มีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการตัดแปร เนื่องจากส่วนประกอบต่างๆ ของสตาร์ชถั่วชนิดนี้ เช่น เศษชิ้นส่วนที่หลุดจากการพองตัวของสตาร์ช โดยยังมีค่า (peak viscosity) ลดลงเช่นเดียวกันสืบเนื่องจากค่ากำลังการพองตัวที่ลดลงและค่า breakdown viscosity มีค่าลดลงเพราะหลังผ่านการตัดแปร องค์ประกอบภายในแกรนูลมีความคงทนต่อแรงเฉือนได้ดีขึ้น และมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากผ่านการตัดแปร โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อน เพราะการมีผลึกเพิ่มขึ้น และการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้มีโครงสร้างของพันธะที่เชื่อมกันภายในแกรนูลมีความแข็งแรงขึ้นต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเกิด

ความหนืด โดยแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความหนืดของ African yam bean หลังผ่านการดัดแปร ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางด้านความหนืดของ African yam bean starch หลังผ่านการดัดแปรแบบ annealing

	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)
Native starch	76.90	292.67	115.33	323.83	146.50
Annealed starch	75.15	277.75	107.50	361.67	191.67

ที่มา: Adebowale และคณะ(2009)

หมายเหตุ: ดัดแปรโดยใช้สตราร์ช:น้ำเท่ากับ 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่ 50°C

2.4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางการไหล

Hoover and Vasanthan (1993) รายงานสมบัติทางการไหลของสตราร์ชเลนทิลจากการทดลองแบบ Steady shear test พบว่าสตราร์ชเลนทิลหลังผ่านการแอนนีสมีรูปแบบการไหลแบบ shear thinning flow โดยดัชนีเนื้อสัมผัส (K) หลังผ่านการดัดแปรมีค่าลดลงสัมพันธ์กับค่ากำลังการพองตัวที่ลดลงของสตราร์ช รวมถึงความหนืดที่วิเคราะห์โดยใช้ Rapid Visco Analyzer (RVA) มีค่าลดลง โดยหลังผ่านการดัดแปรค่าดัชนีพฤติกรรมทางการไหล n เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังมีค่าน้อยกว่า 1 อยู่แสดงว่าหลังผ่านการดัดแปรสตราร์ชยังมีการไหลแบบ shear thinning flow

จากการสืบค้นเอกสารพบว่ายังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการไหลในแบบของ dynamic oscillatory test หรือ frequency sweep ของสตราร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น อย่างไรก็ตาม Eerlinger และคณะ (1997) รายงานสมบัติทางการไหลของสตราร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นในบางสภาวะเมื่อทดสอบแบบ dynamic oscillatory พบว่าสามารถเกิดเจลที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยสังเกตได้จากค่า G' ของสตราร์ชหลังการดัดแปรมีค่ามากกว่า G'' ก่อนการดัดแปร

2.4.2.5 สมบัติเชิงความร้อน

Chung และคณะ (2009) รายงานสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลแลติไนเซชันของสตราร์ชจากพีและเลนทิล พบว่าสตราร์ชที่ผ่านการดัดแปร ที่อุณหภูมิ 15 °C และ 10°C

โดยมีความชื้นร้อยละ 70 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีค่า ΔH_{gel} ลดลงเนื่องจากมีสัดส่วนสายโซ่แบบ A อยู่สูง โดยสายโซ่แบบ A มีค่า DP 6 -12 มีขนาดสายสั้นจึงมีความเสถียรสูง ดังนั้นจึงใช้พลังงานน้อยลงในการเกิดเจลลาติโนเซชัน มีข้อเสนอแนะว่าค่า ΔH_{gel} ของสตาร์ชเลนทิลและพีที่มีค่าลดลง อาจเกิดจากชั้นผลึกมีการรวมตัวกันอย่างหลวมๆ จึงทำให้มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันลดลง โดยหลังจากสตาร์ชเลนทิลและพีผ่านการดัดแปรแล้วยังมีรูปร่างของแกรนูลและมีสมบัติการมี birefringence เหมือนเดิม

Hoover และ Manuel (1996) รายงานสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชจากพีชตระกูลถั่ว 5 ชนิด ที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 75 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่ 50-70°C เมื่อทดสอบด้วย DSC พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และสตาร์ชดัดแปร เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 2.3 ค่า onset temperature (T_o), peak temperature (T_p) และ conclusion temperature (T_c) หลังผ่านการแอนนิลของพีชตระกูลถั่วมีค่าสูง บ่งบอกถึงการมีโครงสร้างของผลึกที่เพิ่มขึ้นและแข็งแรงขึ้น ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในการเกิดเจลลาติโนเซชันและมีช่วง $T_c - T_o$ ของอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันแคบลงเนื่องจากผลึกต่างๆมีความเสถียรขึ้นและมีค่า ΔH_{gel} สูงขึ้นด้วยเพราะโครงสร้างที่แข็งแรงในโมเลกุลสตาร์ชทำให้ทนความร้อนได้สูงขึ้นจึงต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลลาติโนเซชันเพิ่มสูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางด้านความร้อนของสตาร์ชพืชตระกูลถั่ว 8 ชนิด ก่อนและหลังผ่านการดัดแปร

		T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	ΔH_{gel} (J/g)	
Black bean ¹	Native	58.5 ± 0.5	67.0 ± 1.9	74.2 ± 1.5	15.7	8.4 ± 0.5	
	Modified	69.6 ± 0.8	74.0 ± 1.3	80.3 ± 1.7	10.7	12.2 ± 0.1	
Pinto bean ¹	Native	59.0 ± 0.5	68.0 ± 0.5	73.0 ± 1.2	14.0	9.2 ± 0.3	
	Modified	69.4 ± 0.0	73.5 ± 0.1	79.0 ± 0.2	9.6	9.6 ± 0.1	
Express field pea ¹	Native	58.7 ± 1.3	69.3 ± 2.1	72.0 ± 0.5	13.3	9.6 ± 0.6	
	Modified	64.6 ± 1.2	73.3 ± 0.2	76.2 ± 1.1	11.6	11.6 ± 0.2	
Eston lentil ¹	Native	58.6 ± 1.2	65.4 ± 1.9	70.9 ± 0.3	17.3	8.0 ± 0.4	
	Modified	66.9 ± 4.3	70.0 ± 2.9	74.9 ± 3.5	8.0	10.2 ± 0.2	
African yam bean ²	Native	70.10	75.06	80.96	10.88	5.40	
	Modified	70.83	74.53	79.98	9.15	8.90	
Pea ³	Native	53.5	59.8	66.9	13.40	9.7	
	Modified	65.2	67.5	71.0	5.80	12.2	
Pea and lentil ⁴	NP	59.1 ± 0.1	66.3 ± 0.1	80.1 ± 0.4	21.0 ± 0.4	14.1 ± 0.1	
	NL	63.1 ± 0.2	69.90 ± 1.0	83.40 ± 1.5	20.3 ± 1.7	13.5 ± 0.3	
	Modified ^a		67.5 ± 0.4	71.5 ± 0.1	84.2 ± 0.3	16.7 ± 0.1	14.0 ± 0.4
			71.8 ± 0.0	75.0 ± 0.1	86.8 ± 0.4	5.0 ± 0.0	13.5 ± 0.4
	Modified ^b		71.2 ± 0.2	74.6 ± 0.4	87.3 ± 0.5	16.2 ± 0.3	12.4 ± 0.3
			75.0 ± 0.9	78.4 ± 0.9	90.0 ± 0.9	15.0 ± 0.0	12.0 ± 0.7

ที่มา: ¹Hoover และ Manuel (1996)

²Adebowale และคณะ (2009)

³Jacobs และคณะ (1995)

⁴Chung และคณะ (2009)

หมายเหตุ: Hoover และ Manuel (1996) ทำการดัดแปร ที่ความชื้น 75% 24 hr. ที่ 50-70°C

Adebowale และคณะ (2009) และ Jacobs และคณะ (1995) ทำแอนนิลที่สตาร์ช:น้ำ (1:2) 24 hr. ที่ 50°C

^a คือ การดัดแปร ที่ อุณหภูมิ 15 °C , ^b คือ การดัดแปรที่อุณหภูมิ 10°C ที่ความชื้น 70% 24 hr

2.4.2.6 การวิเคราะห์ความสามารถการถูกย่อยด้วยเอนไซม์

Chung และคณะ (2009) รายงานความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชพีและเลนทิล หลังผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 15 °C และ 10°C โดยมีความชื้นร้อยละ 70 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ alpha amylase และ amyloglucosidase ของสตาร์ชดิบ มีค่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยลดลงหลังผ่านการเจลาติไนเซชันหรือการทำให้สุก แต่สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะยังคงมีค่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยอยู่ใกล้เคียงกับสตาร์ชดิบหลังผ่านการเจลาติไนเซชัน สืบเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้นในการดัดแปรส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวที่ลดลง ความสามารถของเอนไซม์ที่จะเข้าไปย่อยได้มีค่าลดลงทำให้มีค่า resistant starch คงอยู่สูงถึงร้อยละ 8 ถึง 10 หลังผ่านการดัดแปร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย คือ สตาร์ชถั่วมะแฮะ (pigeon pea starch) *Cajanus cajan* (L.) สายพันธุ์เมล็ดสีครีม จากจังหวัดน่าน สีเอาเปลือกถั่วมะแฮะออก แล้วนำไปสกัดสตาร์ช โดยแช่ถั่วมะแฮะในน้ำ 16 ชั่วโมง ที่ 5 °C อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถั่วต่อน้ำเท่ากับ 1:5 แล้วนำไปโม่เปียกด้วยเครื่อง stone mill แบบตั้ง 2 รอบ กรองน้ำแป้งผ่านตะแกรง 50 mesh เพื่อแยกกากทิ้ง นำส่วนตะกอนของแป้งมาปรับ pH เป็น 8.5 ด้วยสารละลาย 0.1 N NaOH แช่ในสารละลายต่างที่ 5 °C นาน 2 ชั่วโมง นำมาล้างด้วยน้ำ 2 ครั้ง แล้วปรับ pH ของสารแขวนลอยแป้งในน้ำสุดท้ายให้เป็น 7 ด้วย 1 N HCl ทิ้งไว้ให้แป้งตกตะกอนที่ 5 °C อบตะกอนแป้งในตู้อบลมร้อนที่ 45 °C จนแห้งใช้เวลา 15 ชั่วโมง แล้วอบตีให้ละเอียดด้วยเครื่อง stone mill แบบตั้งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh บรรจุแป้งที่ร่อนแล้วในถุงพลาสติกเก็บที่อุณหภูมิห้องรอการวิเคราะห์ต่อไป

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 ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.4 ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (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)

3.2.2.2 รูปร่าง และพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL รุ่น JSM-5800 LV, Japan) ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี 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 crystallographic pattern โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany) ดัดแปลงจากวิธีของ Zobel (1964) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

3.2.2.5 การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้เครื่อง Laser Diffraction Particle Size Analyzer (Beckman Coulter รุ่น LS 13 320, USA) (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 สมบัติด้านความหนืดโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (Newport Scientific รุ่น RVA-4, Australia) ดัดแปลงจากวิธีของ Norbert, Mintus และ Detmold (1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.15)

3.2.2.9 สมบัติด้านความร้อน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix, Germany) ดัดแปลงจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.16)

3.2.2.10 สมบัติทางการไหล โดยใช้เครื่อง Rheometer (Bohlin Instrument รุ่น CVOR 150, UK) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.17)

3.2.2.11 วิเคราะห์ความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ (Enzymatic digestibility) ตามวิธีของ Englyst และคณะ (1982) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.18)

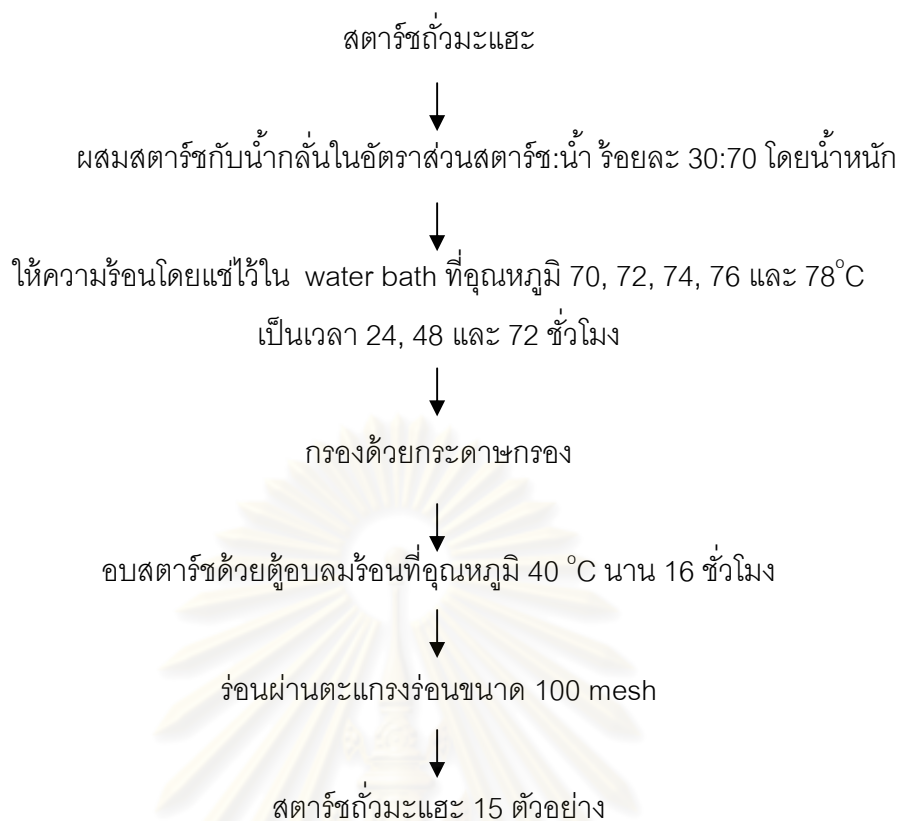
วิเคราะห์ 3 ซ้ำ (ยกเว้นการวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช และสมบัติด้านความร้อน วิเคราะห์ 2 ซ้ำ)

3.3 ศึกษาผลของการตัดแปรต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

3.3.1 การตัดแปรสตาร์ชโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตีไนเซชัน

การทดลองนี้ตัดแปรสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตีไนเซชัน (รูปที่ 3.1) โดยในการทดลองจะตั้งตัวอย่างให้มีน้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเท่ากับ ร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก คนให้เข้ากัน นำบีกเกอร์ที่บรรจุตัวอย่างแล้ว แช่ลงในอ่างน้ำพร้อมควบคุมอุณหภูมิที่ (70,72,74,76,78) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำสตาร์ชไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 16 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh จึงได้สตาร์ชถั่วมะแฮะตัดแปร 15 ตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 วิธีการดัดแปรสตาร์ชโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตีไนเซชัน

3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วตามวิธีในข้อ 3.2 วางแผนการทดลองแบบ 3×5 Factorial In Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DNMRT)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4.1) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก คือ ร้อยละ 98.95 โดยน้ำหนักแห้ง รองลงมา คือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ซึ่งพบในปริมาณร้อยละ 0.64, 0.27, 0.10 และ 0.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.61 ซึ่งจัดได้ว่าเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้ Kaur และ Sandhu (2010) รายงานว่าสตาร์ชพืชตระกูลถั่วที่ไม่ผ่านการดัดแปลงทางพันธุกรรมจะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 30-40 โดยปริมาณแอมิโลสที่ได้จากการทดลองนั้น มีค่าค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการเกิดสีกับไอโอดีนมีข้อจำกัด คือ โมเลกุลแอมิโลเพกตินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับแอมิโลส โดยสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลเพกตินสามารถดูดซับแสงได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลสที่สามารถดูดซับแสงได้ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ส่งผลให้การวัดค่าปริมาณแอมิโลสอาจมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Julaino, 1984) นอกจากนี้การวัดปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีเกิดสีกับไอโอดีน พบว่ามีผลการวิเคราะห์สูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากเกิดการรบกวนของ residual butanol ในสตาร์ชตัวอย่างที่มีอยู่ในขั้นตอนการทำให้สตาร์ชบริสุทธิ์ (Zhu et al., 2008)

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

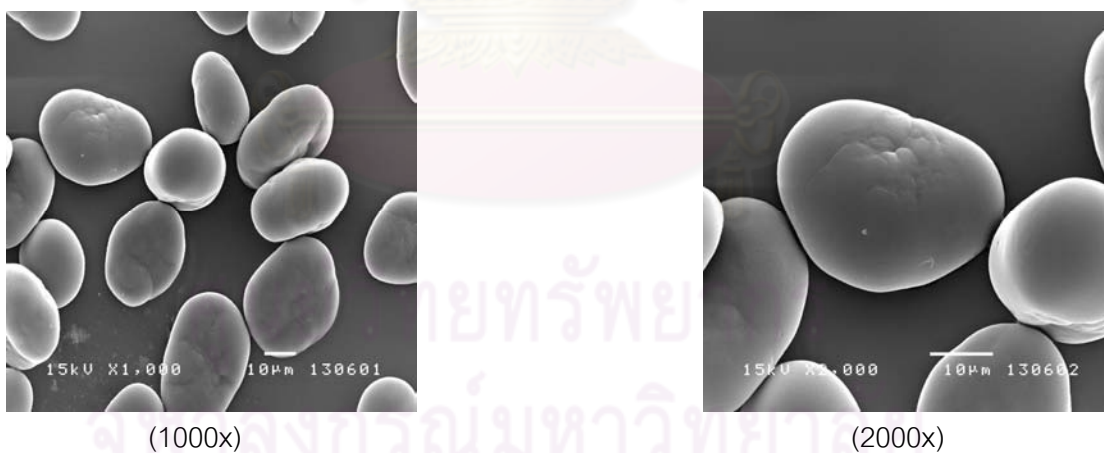
4.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.1.2.1 ค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า L^* (ความสว่าง) a^* (-สีแดง, + สีเขียว) และ b^* (-สีเหลือง, + สีนํ้าเงิน) เท่ากับ 76.09 ± 0.42 , -0.61 ± 0.10 และ 1.16 ± 0.06 ตามลำดับ ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะจะมีค่าความสว่างค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการสกัดสตาร์ชด้วยสารละลายต่างอ่อน ความเข้มข้น 0.1 N และการร่อนอาจทำให้ส่วนของโปรตีน เส้นใย และไขมันบางส่วนถูกกำจัดออกไป จึงเป็นการลดสิ่งปนเปื้อนในเม็ดสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

4.1.2.2 รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้กล้อง SEM (รูปที่ 4.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างรีเหมือนรูปไข่ สภาพพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าวซึ่งมีลักษณะเหมือนกับสตาร์ชถั่วส่วนใหญ่ (Kaur and Sandhu, 2010) แสดงให้เห็นว่าการสกัดโปรตีนด้วยสารละลายต่างอ่อนไม่ส่งผลให้รูปร่างของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป

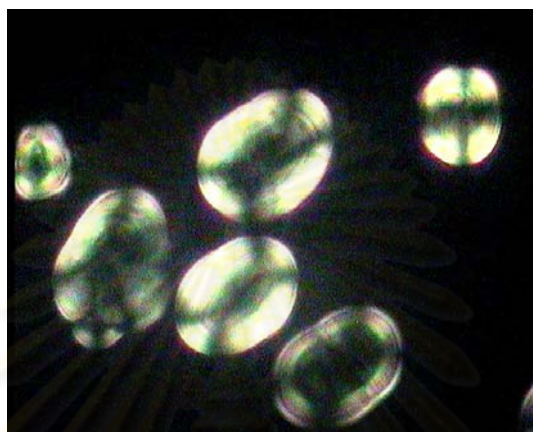


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร

4.1.2.3 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แสดงว่าการสร้างสายพอลิเมอร์ของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชและขยายออกตามแนวรัศมีของ

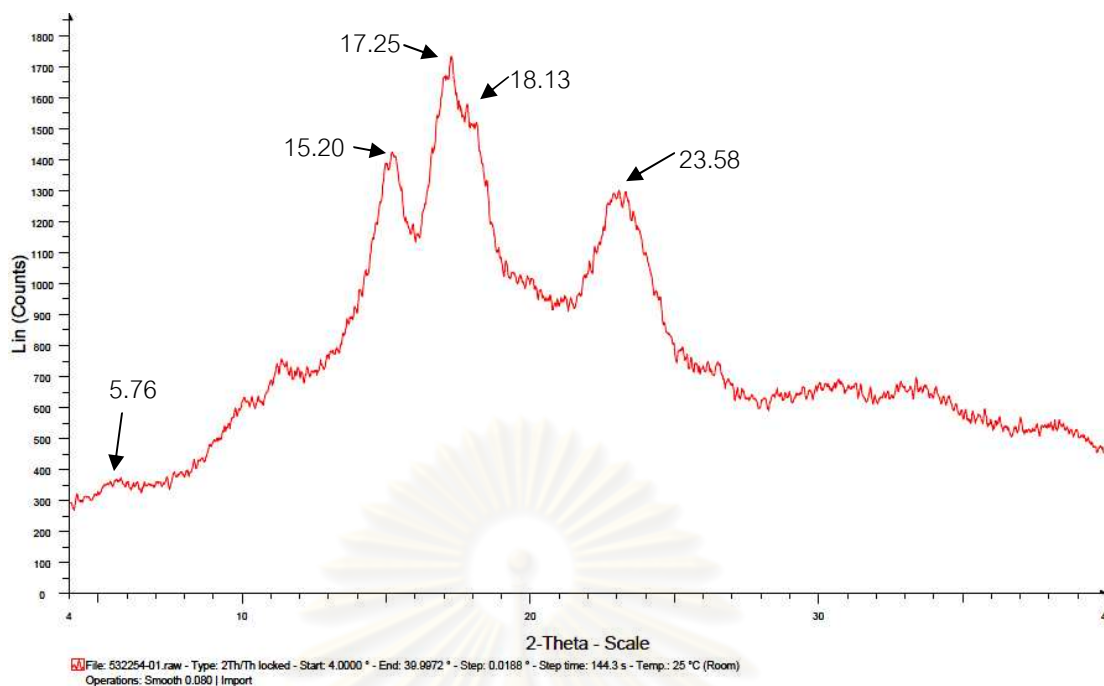
สตาร์ช การที่เม็ดสตาร์ชเกิด birefringence เมื่อบิกระนาบแสงโพลาไรซ์แสดงว่าเม็ดสตาร์ชมีสภาพเป็น semi-crystalline โดยส่วนที่เป็น birefringence เกิดจาก crystalline region ในเม็ดสตาร์ช (Gallant et al., 1997) และการเห็นลักษณะ birefringence ที่ชัดเจนนี้แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหาย จากการสกัดโปรตีนออกด้วยสารละลายต่างอ่อน โดยในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบไม่ได้ทำให้เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ช



รูปที่ 4.2 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.1.2.4 รูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

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 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kaur and Sandhu, 2010) ศึกษาารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่ามีพีค (peak) เกิดขึ้นที่ 5.6, 15, 17.2 และ 23.2 องศา เป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C เช่นเดียวกัน ซึ่งรูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชขึ้นอยู่กัแหล่งกำเนิดหรือสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโต โดยโครงสร้างผลึกแบบ C เป็นลักษณะโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเรียงตัวแบบหนาแน่น และโครงสร้างผลึกแบบ B ที่พบในสตาร์ชจากพืชหัว ซึ่งมีการเรียงตัวแบบหลวม ๆ (Donald, 2004)



รูปที่ 4.3 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร

4.1.2.5 ขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

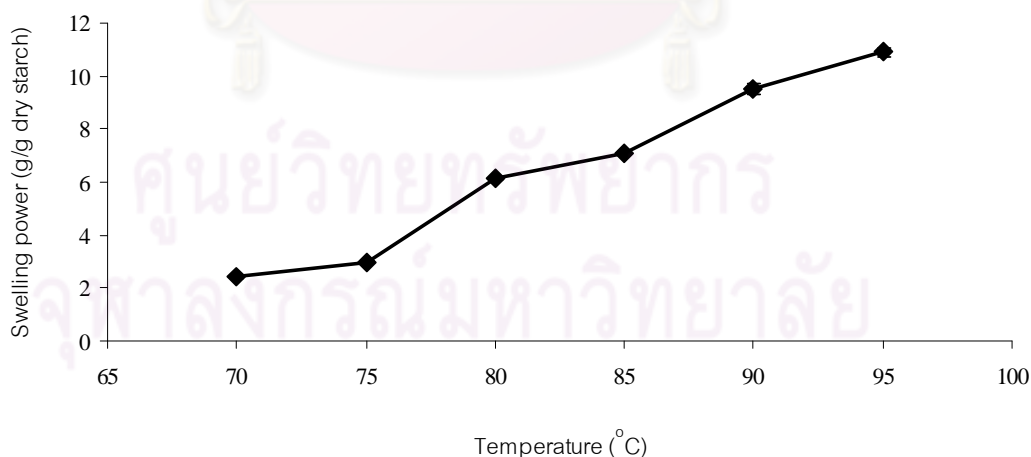
เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีขนาดอยู่ในช่วง 10.78 ถึง 43.67 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ± 0.01 ไมครอน ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะสามารถจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 25 ไมครอนขึ้นไป (Lindeboom et al., 2004) โดยขนาดของเม็ดสตาร์ชมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดสตาร์ช เช่น การเกิดเจลลิตีในเซชัน ความหนืด ความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ รูปแบบโครงสร้างผลึก และความสามารถในการละลาย (Kaur and Sandhu, 2010)

4.1.2.6 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

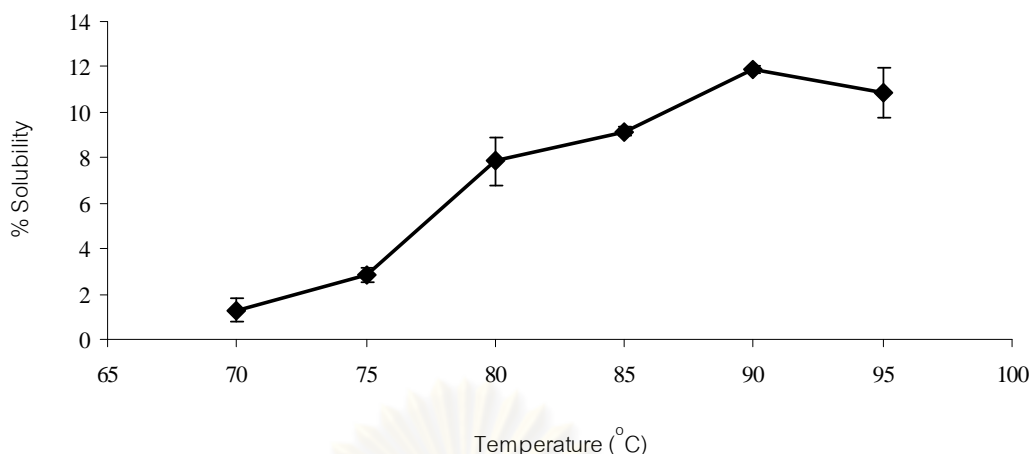
ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะ มีค่าเท่ากับ 0.74 ± 0.01 กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปสตาร์ชไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน เมื่อเติมน้ำลงในสตาร์ชและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (กล้าณรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปิยะจ่อมขวัญ, 2550)

4.1.2.7 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

การพองตัวของเม็ดสตาร์ชถือเป็นจุดเริ่มต้นของการทำลายโครงสร้างเม็ดสตาร์ช โดยการพองตัวทำให้เกิดการคลายโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง จึงเกิดความหนืดขึ้น โดยสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงเมื่อสตาร์ชสุกก็就会有ความหนืดที่สูงด้วย ส่วนการละลายจะมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น ทำให้แอมิโลส บางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้มีการละลายที่สูงขึ้นด้วย (Mondragón et al., 2006) จากการศึกษากำลังการพองตัวและการละลาย (รูปที่ 4.4 และ 4.5) พบว่า กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปทำพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (Hoover, 2001) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Kaur and Sandhy, 2010) ศึกษา กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการพองตัวและการละลายอยู่ในช่วง 12.6-13.1 กรัม/กรัม และร้อยละ 13.8-14.2 ตามลำดับ และอยู่ในช่วงเดียวกันกับสตาร์ชพืชตระกูลถั่ว ซึ่งมีค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายอยู่ในช่วง 11-12 กรัม/กรัม และร้อยละ 8-25 ตามลำดับ วัดค่าที่อุณหภูมิ 90°C



รูปที่ 4.4 กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปรช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C



รูปที่ 4.5 การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปรช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C

4.1.2.8 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่าง ๆ (กลั่นรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.2) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนสูงคือ 81.28 °C และมีความหนืดสูงสุด 4,106.5 cP ซึ่งคุณสมบัติความหนืดของสตาร์ชที่แสดงออกมามีผลมาจากเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวส่งผลให้เกิดการเบียดเสียดระหว่างเม็ดสตาร์ชด้วยกันเอง สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วง breakdown และ setback สูงแสดงถึงความสามารถในการทนต่อแรงกวนที่อุณหภูมิ 95 °C ได้ไม่ดี แต่มีแนวโน้มในการคืนตัว หรือเกิดรีโทรเกรเดชันสูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่า breakdown และ setback กับสตาร์ชจากถั่วชนิดอื่น เช่น สตาร์ชจากถั่ว African yam bean มีค่าเท่ากับ 115.33 และ 146.50 ตามลำดับ (Adebowale et al., 2009) จึงเห็นได้ว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงbreakdown และ setback สูงกว่า และ เนื่องจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสสูง ทั้งนี้เม็ดสตาร์ชมีรูปแบบการด้านการพองตัวคล้ายกับสตาร์ช cross-bonded และมีค่า setback สูง ทำให้ไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในอาหารแช่แข็งที่ต้องการอัตราการคืนตัวต่ำ (Kaur and Sandhy, 2010) หลังจากผ่านการทดสอบสมบัติทางด้านการเกิดเพสต์ด้วยเครื่อง RVA แล้ว พบว่า เจลของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีลักษณะเป็นเจลขุ่น และเป็นแบบ short gel ซึ่งเป็นลักษณะของสตาร์ชที่มีแอมิโลสในปริมาณสูง

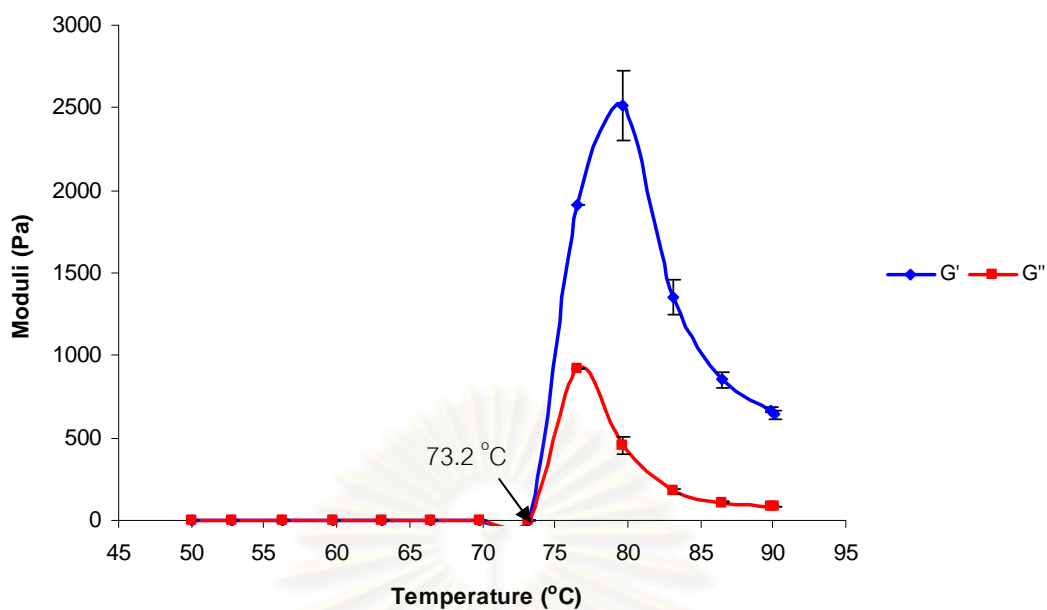
ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร

Pasting properties	ค่าที่ได้
Peak viscosity (cP)	4106.50 ± 3.54
Trough (cP)	3024.00 ± 11.31
Breakdown (cP)	1082.50 ± 7.78
Final viscosity (cP)	5836.50 ± 60.10
Setback (cP)	2812.50 ± 48.79
Pasting temperature (°C)	81.28 ± 0.53
Peak time (minute)	4.67 ± 0.00

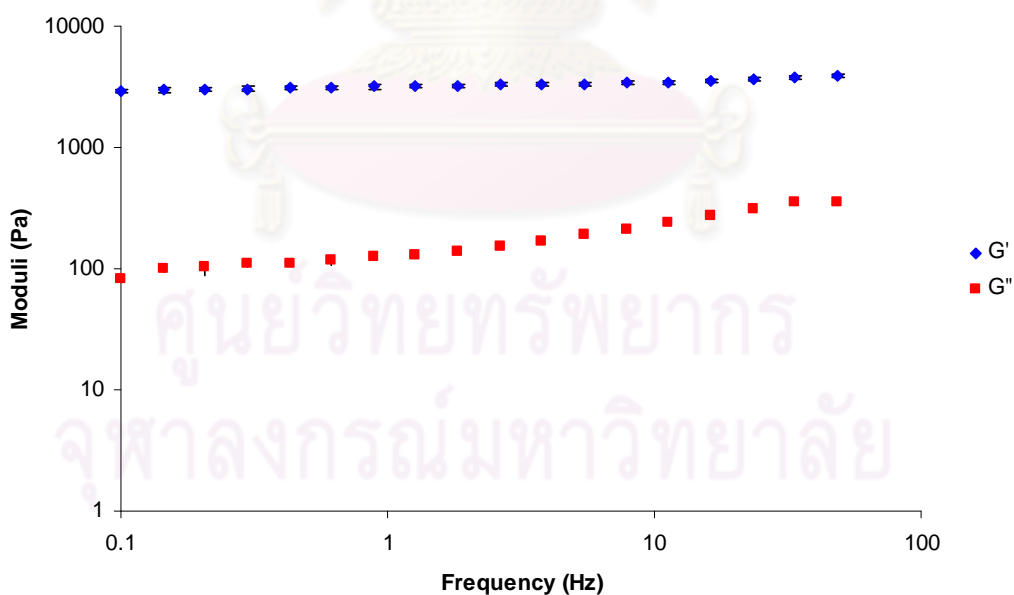
4.1.2.9 สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

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 เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น สตาร์ชถั่วมะแฮะเริ่มเกิดเจลาตีในเซชันที่อุณหภูมิ 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 and Meste, 2002)

จากนั้นนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะมาทดสอบ frequency sweep test โดยกำหนดสภาวะการทดสอบที่ 40 Pa stress อุณหภูมิ 25 °C และความถี่อยู่ในช่วง 0.1 Hz ถึง 100 Hz พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า G' มากกว่าค่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดลอง (รูปที่ 4.7) ซึ่งแสดงถึงเจลมีความแข็งแรงและคงทนต่อแรงกระทำ และมีลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะความเป็นของเหลว



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



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

4.1.2.10 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง DSC ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 95 °C ได้ค่า onset temperature (T_o), peak temperature (T_p), conclusion temperature (T_c), enthalpy of gelatinization (ΔH_{gel}) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาคติโนเซชัน (gelatinization temperature range; ($T_c - T_o$) เท่ากับ 70.95 ถึง 83.95 °C โดยช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาคติโนเซชัน จะบอกถึงคุณภาพและลักษณะที่ต่างกันของผลิตภัณฑ์แป้งแอมีโลเพกติน ดังนั้น การมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาคติโนเซชันที่กว้าง แสดงถึงการที่ผลิตภัณฑ์ไม่มีความสม่ำเสมอ (heterogeneity) เมื่อพิจารณาค่า T_o และค่า pasting temperature ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA พบว่า ค่า T_o ของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าต่ำกว่าค่า pasting temperature เนื่องจากค่า pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่สารละลายสตาร์ชเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด ในขณะที่ T_o วัดจากการเปลี่ยนแปลงด้านความร้อน (heat flux) นั่นคือ เมื่อสตาร์ชเริ่มเกิดเจล ต้องมีการดูดความร้อนเข้าไปในระบบโดยความหนืดอาจยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ค่า T_o ต่ำกว่าค่า pasting temperature (Jane et al., 1999) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลงานวิจัยของ Kaur และ Sandhu (2010) ซึ่งศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 2 สายพันธุ์ พบว่ามีค่า T_o และ T_c เท่ากับ 71.40 และ 83.90 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้ในการทดลองนี้ และมีค่า ΔH_{gel} อยู่ในระดับสูงเช่นเดียวกัน เนื่องจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมีสัดส่วนของผลิตภัณฑ์สูง จึงต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะระหว่างโมเลกุลในเม็ดสตาร์ชสูงเพื่อให้เกิดการเจลาคติโนเซชัน

ตารางที่ 4.3 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
ΔH_{gel} (J / g)	12.97 ± 0.13

4.1.2.11 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

ความสามารถของเอนไซม์อัลฟาอะมิเลสและอะมิโลกลูโคซิเดส ที่เข้าไปตัดพันธะ α -1, 4 glucosidic linkage ของสายแอมิโลสหรือสายตรงของแอมิโลเพกติน ในสภาวะที่สตาร์ชไม่เกิดเจลาตีโนเซชัน วัดในรูปของ resistant starch (%RS) พบว่าสตาร์ชจากถั่วมะแฮะมีค่า %RS ที่ระยะเวลาการย่อย 16 ชั่วโมง เท่ากับ 8.35% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chung และคณะ (2009) ที่ศึกษาสมบัติความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชพีและเลนทิลและพบว่ามีความค่า 9.1% และ 10% ตามลำดับ

4.2 ผลของการดัดแปรโดยใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาตีโนเซชันต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะหลังผ่านการดัดแปร (ตารางที่ 4.4) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วงร้อยละ 97.83 ถึง 99.22 โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณเส้นใยหยาบอยู่ในช่วงร้อยละ 0.24 ถึง 0.74 มีปริมาณไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.04 ถึง 0.33 มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.06 ถึง 0.16 และมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.04 ถึง 0.73 โดยน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้หลังผ่านการดัดแปรมีความชื้นคาร์โบไฮเดรต เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และไม่พบรายงานว่าการดัดแปรสตาร์ชโดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลาตีโนเซชันทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจเนื่องมาจากการดัดแปรวิธีนี้มุ่งเน้นให้พอลิเมอร์ในส่วนอสัณฐาน ภายในเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้เป็นระเบียบมากขึ้น (Jacob et al., 1995) ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความขัดแย้งกับงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีหลังผ่านการดัดแปรมีความเปลี่ยนแปลงไป โดยมีสมมุติฐานมาจากปริมาณแอมิโลสที่มีค่าลดลงหลังผ่านการดัดแปรส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

เวลาที่ใช้ในการดัดแปร สตาร์ช (ชม.)	อุณหภูมิที่ใช้ในการดัด แปร (°C)	ความชื้น (% wb)	คาร์โบไฮเดรต (% db)	เส้นใยหยาบ (% db)	โปรตีน (% db)	ไขมัน (% db)	เถ้า (% db)
สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร		12.96 ± 0.08	98.95 ± 0.02	0.64 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.27 ± 0.01	0.10 ± 0.01
24	70	11.16 ^{de} ± 0.11	99.22 ^a ± 0.12	0.33 ^e ± 0.02	0.30 ^{de} ± 0.04	0.04 ⁱ ± 0.00	0.07 ^h ± 0.01
	72	10.88 ^{fg} ± 0.11	99.11 ^{ab} ± 0.23	0.24 ⁱ ± 0.01	0.33 ^d ± 0.03	0.06 ⁱ ± 0.00	0.08 ^{gh} ± 0.00
	74	12.03 ^c ± 0.10	99.03 ^{ab} ± 0.11	0.29 ^f ± 0.02	0.28 ^{de} ± 0.02	0.17 ^c ± 0.01	0.09 ^{fg} ± 0.00
	76	10.03 ^h ± 0.11	98.97 ^{abcd} ± 0.31	0.29 ^f ± 0.01	0.32 ^d ± 0.02	0.12 ^f ± 0.01	0.09 ^{fg} ± 0.00
	78	10.71 ^{fg} ± 0.10	98.22 ^{cde} ± 0.23	0.26 ^h ± 0.00	0.24 ^e ± 0.02	0.10 ^h ± 0.00	0.96 ^a ± 0.04
48	70	11.52 ^d ± 0.12	98.40 ^{bcde} ± 1.08	0.32 ^e ± 0.01	0.29 ^{de} ± 0.04	0.23 ^a ± 0.02	0.10 ^{efg} ± 0.01
	72	10.57 ^g ± 0.10	99.07 ^{ab} ± 0.59	0.28 ^g ± 0.02	0.04 ^f ± 0.02	0.11 ^g ± 0.00	0.11 ^{ef} ± 0.01
	74	9.59 ⁱ ± 0.10	99.00 ^{abc} ± 0.17	0.29 ^f ± 0.00	0.28 ^{de} ± 0.02	0.20 ^b ± 0.01	0.12 ^{de} ± 0.01
	76	12.41 ^c ± 0.11	98.95 ^{abcd} ± 0.27	0.33 ^e ± 0.02	0.33 ^d ± 0.00	0.14 ^e ± 0.00	0.12 ^{cde} ± 0.01
	78	11.28 ^{de} ± 0.10	98.42 ^{abcde} ± 0.31	0.55 ^d ± 0.03	0.64 ^b ± 0.07	0.23 ^a ± 0.01	0.12 ^{cde} ± 0.01
72	70	11.14 ^{def} ± 0.10	97.83 ^e ± 0.19	0.33 ^e ± 0.01	0.34 ^d ± 0.02	0.12 ^f ± 0.00	0.14 ^{bcd} ± 0.01
	72	11.22 ^{de} ± 0.11	98.72 ^{abcd} ± 0.72	0.29 ^f ± 0.02	0.30 ^{de} ± 0.02	0.13 ^f ± 0.00	0.16 ^b ± 0.01
	74	12.89 ^b ± 0.13	98.46 ^{abcde} ± 0.23	0.59 ^c ± 0.04	0.58 ^c ± 0.02	0.33 ^a ± 0.02	0.14 ^{bcd} ± 0.00
	76	13.13 ^{ab} ± 0.11	98.19 ^{de} ± 0.16	0.74 ^a ± 0.05	0.73 ^a ± 0.03	0.16 ^d ± 0.00	0.15 ^{bc} ± 0.02
	78	13.48 ^a ± 0.12	98.37 ^{bcde} ± 0.06	0.67 ^b ± 0.03	0.65 ^b ± 0.02	0.16 ^d ± 0.00	0.12 ^{ef} ± 0.02

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสมมติเดียวกันมีตัวอักษรที่กำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

จากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4.1) พบว่าสตาร์ชมีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.61 และหลังผ่านการดัดแปรพบว่า เวลาและอุณหภูมิในการดัดแปรมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสในสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 70°C ถึง 78°C พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดัดแปร ปริมาณแอมิโลสมีค่าลดลง แสดงค่าดังตารางที่ 4.5 โดยมีสมมุติฐานมาจากการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช หลังจากผ่านการดัดแปรแล้วชั้นผลึกอาจเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้มีสัดส่วนผลึกเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งโมเลกุลของแอมิโลสเกิดการรวมตัวกับ lipid ได้เป็น amylose – lipid complex ปริมาณแอมิโลสที่วัดได้จึงมีค่าลดลง และในระหว่างการดัดแปรเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว โมเลกุลต่างๆจะหลุดออกมาออกเม็ดสตาร์ชได้ เช่น แอมิโลส สามารถรั่วซึมออกมาสู่พื้นที่รอบๆเม็ดสตาร์ชและละลายไปกับน้ำที่กรองแยกทิ้งจากตะกอนสตาร์ชในขั้นตอนการดัดแปร สตาร์ชจึงมีปริมาณแอมิโลสลดลงหลังการดัดแปร

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแอมิโลส (%) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร	64.61 ± 0.93	-	-	-
70	-	61.40 ^{abc} ± 0.90	58.59 ^{abc} ± 0.72	54.00 ^c ± 2.51
72	-	64.33 ^a ± 1.90	57.35 ^{abc} ± 0.17	61.90 ^{ab} ± 1.80
74	-	63.36 ^{ab} ± 2.94	61.71 ^{ab} ± 0.91	61.85 ^{ab} ± 0.80
76	-	59.75 ^{abc} ± 1.50	61.53 ^{ab} ± 2.35	45.17 ^d ± 13.64
78	-	36.77 ^e ± 2.09	59.88 ^{abc} ± 13.21	56.59 ^{bc} ± 2.73

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.3 ค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

จากการวัดค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง Chroma meter พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะหลังผ่านการดัดแปรที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ในทั้ง 5 อุณหภูมิคือที่ 70,72,74,76 และ 78°C (ตารางที่ 4.6) มีค่า L^* , a^* และ b^* เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงความร้อนที่ใช้ในการดัดแปรไม่ทำให้ค่าสีของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.6 ค่าสี L^* , a^* , b^* ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

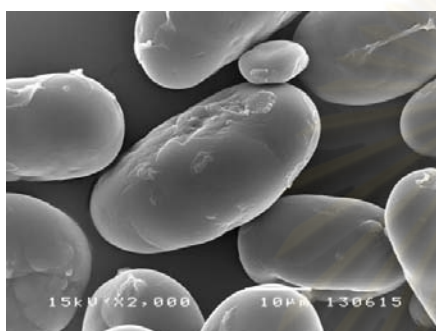
เวลาที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ช (ชม.)	อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปร (°C)	ค่าสี		
		L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}
24	70	75.71 ± 0.43	-0.49 ± 0.15	2.30 ± 0.49
	72	75.36 ± 0.15	-0.46 ± 0.17	2.02 ± 0.28
	74	75.31 ± 0.78	-0.39 ± 0.14	2.44 ± 0.47
	76	75.78 ± 0.53	-0.46 ± 0.13	1.99 ± 0.45
	78	75.20 ± 0.44	-0.41 ± 0.12	2.41 ± 0.17
48	70	75.60 ± 0.35	-0.49 ± 0.18	2.30 ± 0.51
	72	75.42 ± 0.28	-0.48 ± 0.16	2.03 ± 0.27
	74	75.59 ± 0.35	-0.41 ± 0.11	2.47 ± 0.51
	76	75.91 ± 0.50	-0.52 ± 0.08	2.02 ± 0.40
	78	75.34 ± 0.22	-0.37 ± 0.04	2.42 ± 0.18
72	70	75.75 ± 0.27	-0.52 ± 0.17	2.31 ± 0.51
	72	75.42 ± 0.27	-0.50 ± 0.13	2.03 ± 0.26
	74	75.88 ± 0.24	-0.44 ± 0.10	2.52 ± 0.50
	76	76.07 ± 0.65	-0.54 ± 0.05	2.04 ± 0.36
	78	75.63 ± 0.33	-0.36 ± 0.04	2.44 ± 0.21

หมายเหตุ: ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสมมติเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

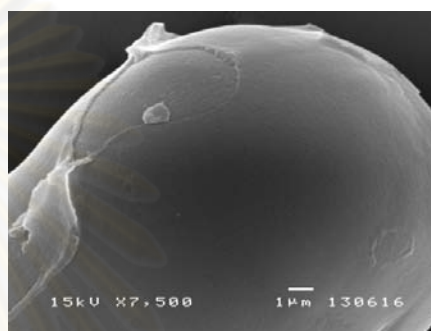
4.2.4 รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

จากการวิเคราะห์รูปร่าง และลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา

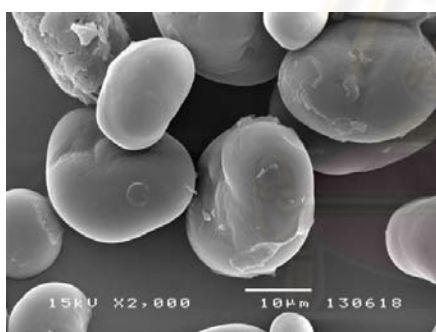
24, 48 และ 72 ชั่วโมง ยังมีเม็ดสตาร์ชรูปร่างกลมรีคล้ายเม็ดสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรแต่มีรอยถลอกและขรุขระเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการตัดแปรที่ 72 และ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เริ่มมีรอยถลอกและขรุขระบนผิวแกรนูลมากขึ้น แต่ยังมีรูปร่างเป็นทรงกลมอยู่ ตัวอย่างที่ผ่านการตัดแปรที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง มีรูปร่างแกรนูลบิดเบี้ยว ที่ 78 °C เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างบิดเบี้ยวและเสียหายมากที่สุดเนื่องมาจากขั้นตอนในการตัดแปรต้องแช่สตาร์ชไว้ในน้ำและให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวได้สูงและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเม็ดสตาร์ชบางส่วนจะเกิดการเจลาติไนเซชันไปแล้วทำให้เมื่อนำมาอบได้น้ำออกเม็ดสตาร์ชจึงมีลักษณะต่างไปจากเดิมมาก



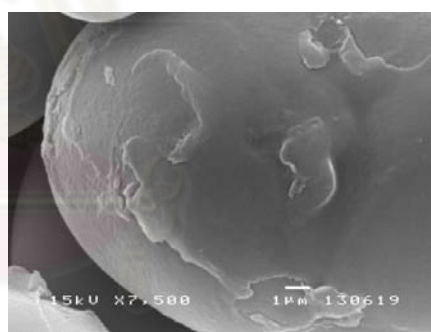
(1000x) 70°C 24 hr



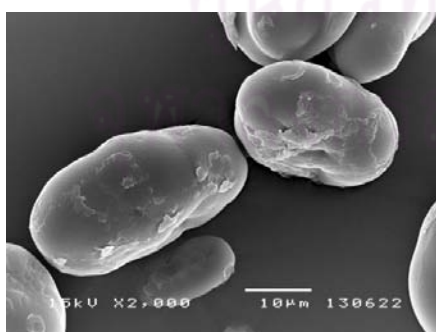
(2000x) 70°C 24 hr



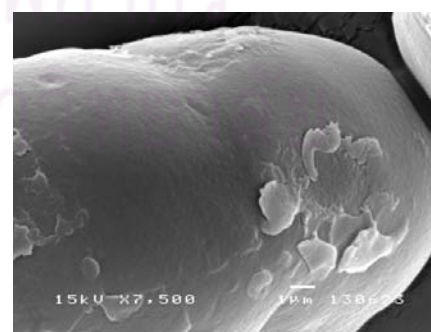
(1000x) 70°C 48 hr



(2000x) 70°C 48 hr

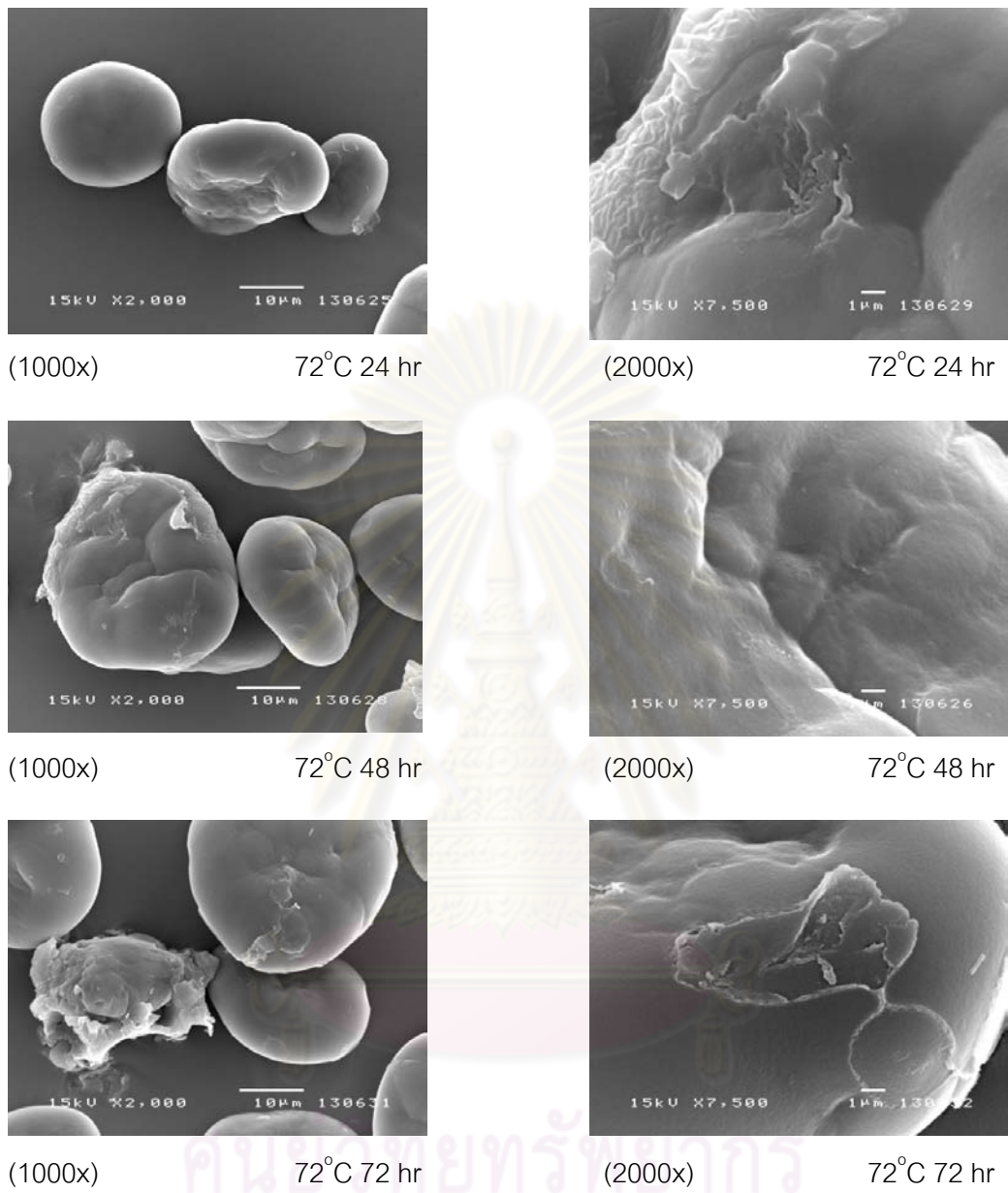


(1000x) 70°C 72 hr

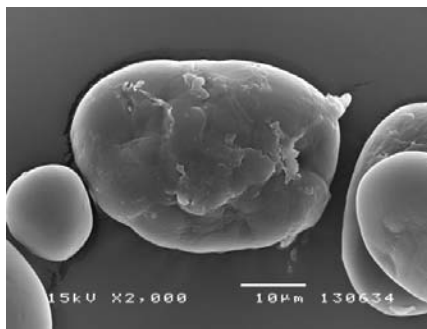


(2000x) 70°C 72 hr

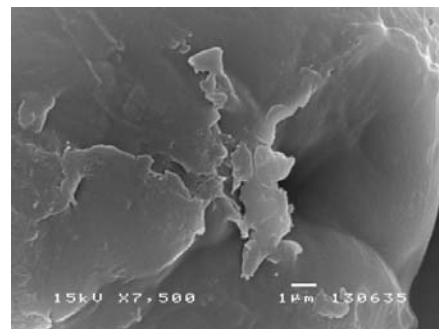
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



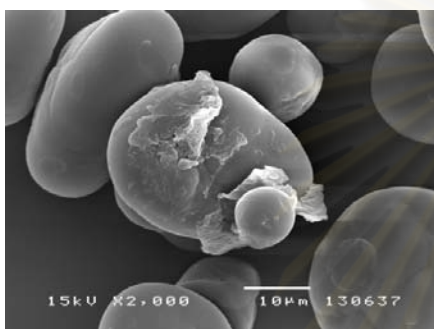
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร ที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



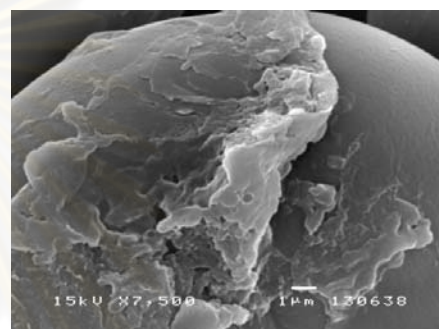
(1000x) 74°C 24 hr



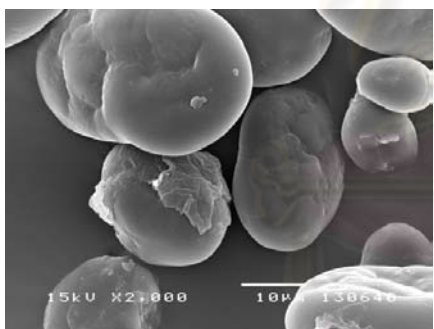
(2000x) 74°C 24 hr



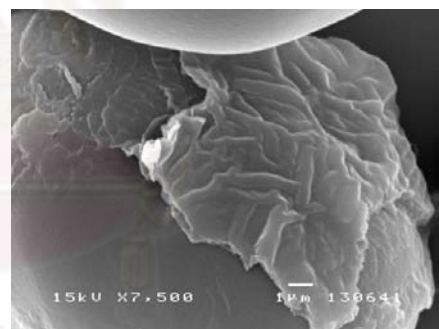
(1000x) 74°C 48 hr



(2000x) 74°C 48 hr

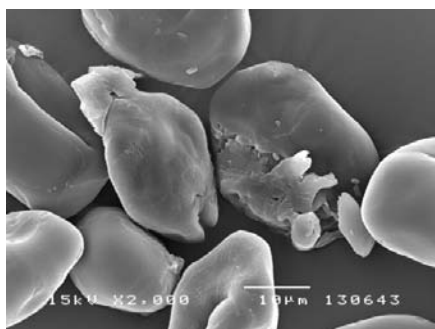


(1000x) 74°C 72 hr



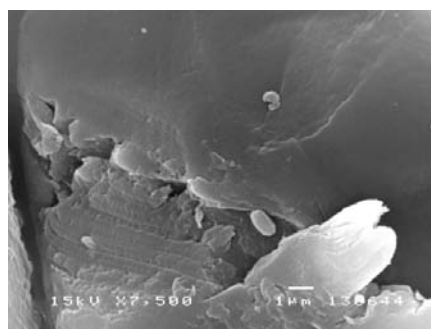
(2000x) 74°C 72 hr

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



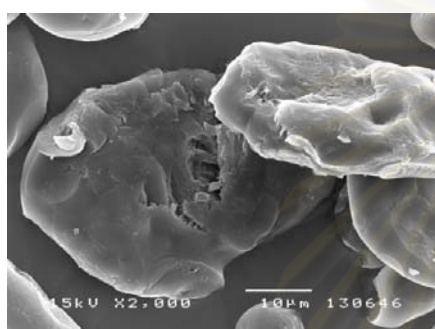
(1000x)

76°C 24 hr



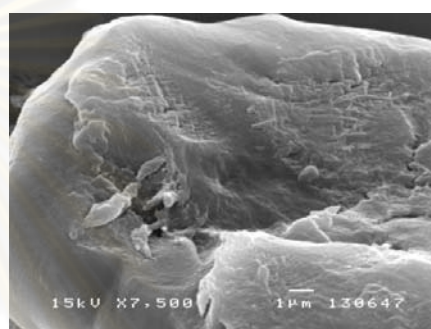
(2000x)

76°C 24 hr



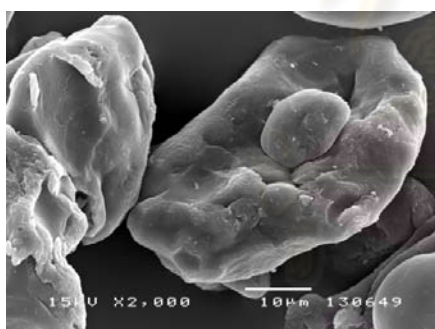
(1000x)

76°C 48 hr



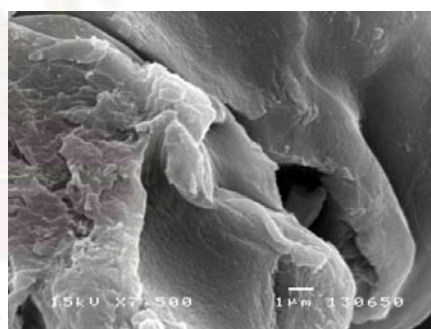
(2000x)

76°C 48 hr



(1000x)

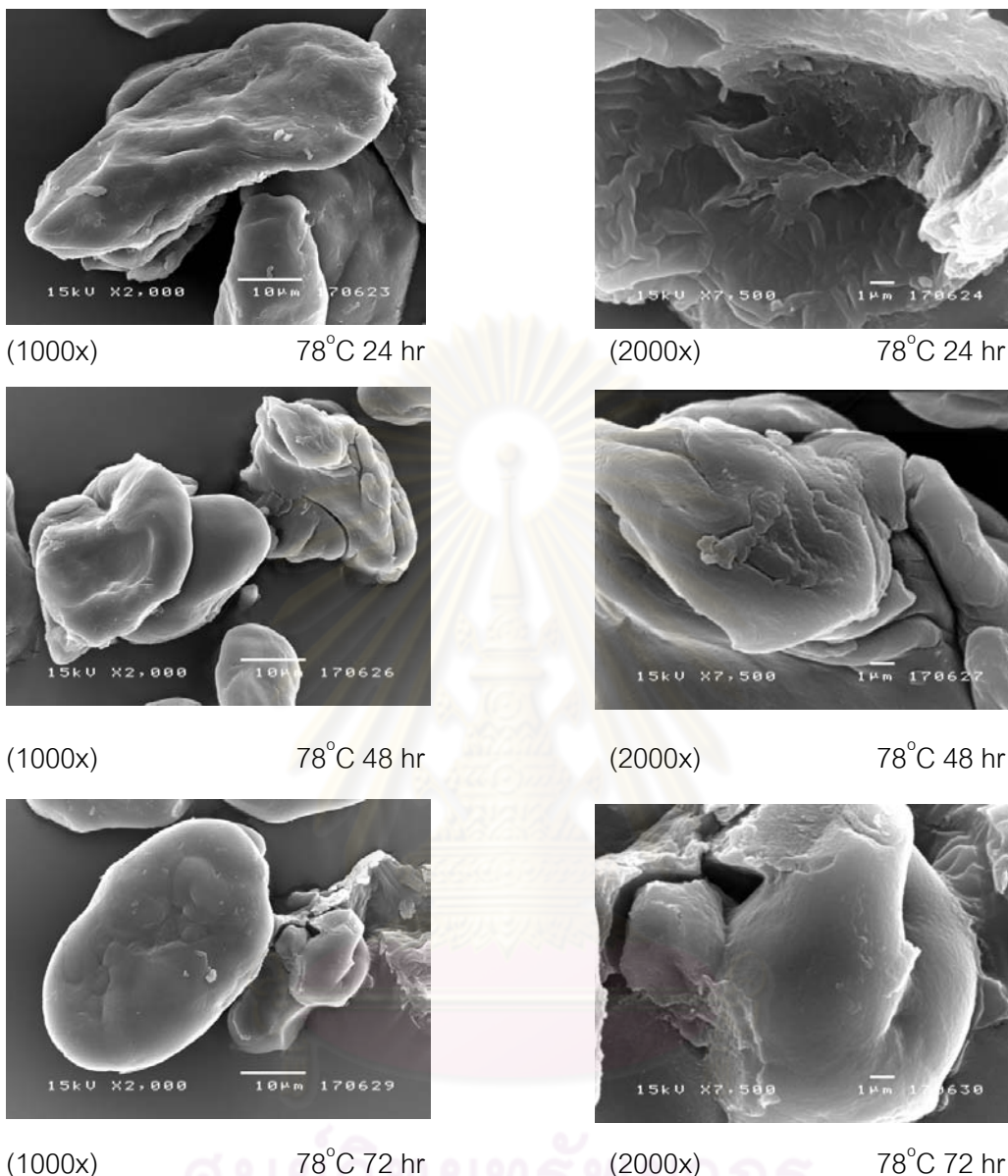
76°C 72 hr



(2000x)

76°C 72 hr

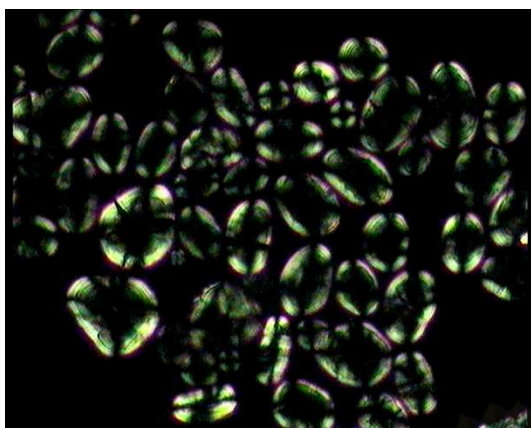
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเมื่อดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร ที่อุณหภูมิ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



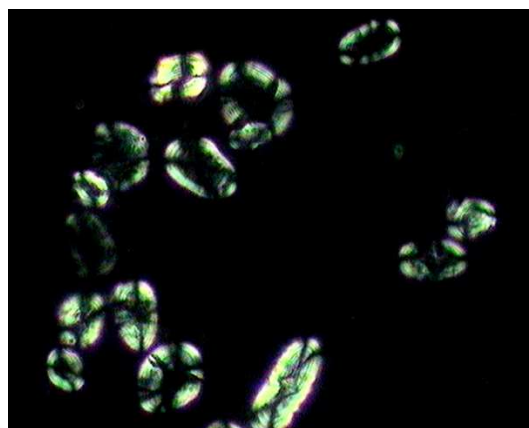
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

4.2.5 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

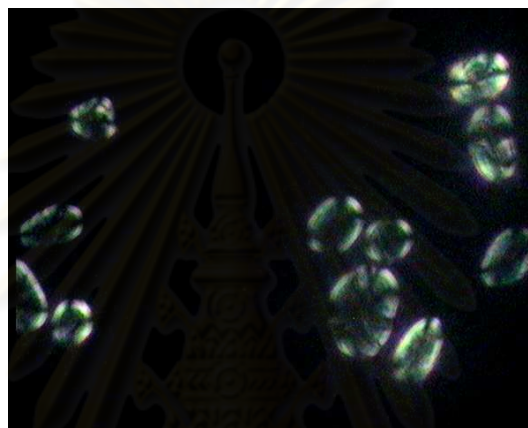
เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ยังคงมีรูปร่างกลม และรีคล้ายเมล็ดถั่ว มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) อยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แต่เมื่อดัดแปรที่อุณหภูมิ 76 และ 78 °C จะเห็นได้ว่าเม็ดสตาร์ชมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีเม็ดสตาร์ชบางส่วนเกิดการเจลาติไนซ์ไปแล้ว ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนซ์ไปแล้วไม่แสดงลักษณะ birefringence



70°C 24 hr

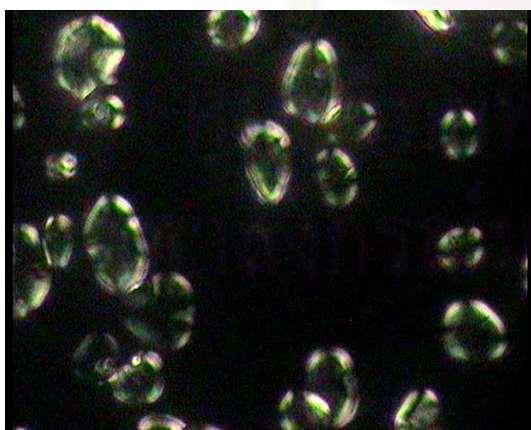


70°C 48 hr

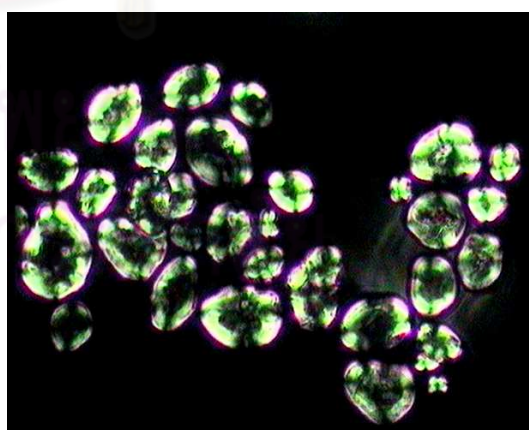


70°C 72 hr

รูปที่ 4.13 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชแก้วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

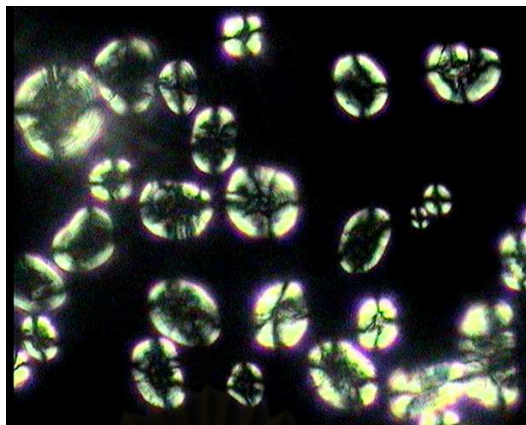


72°C 24 hr



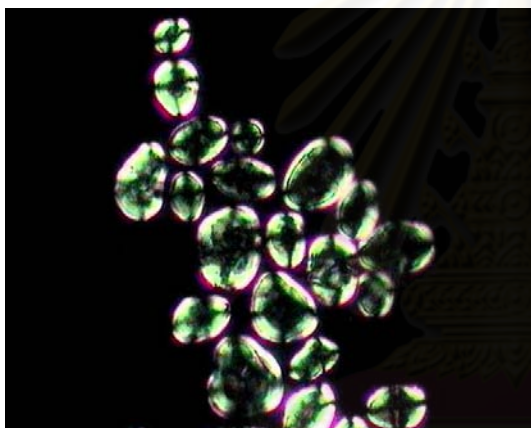
72°C 48 hr

รูปที่ 4.14 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชแก้วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

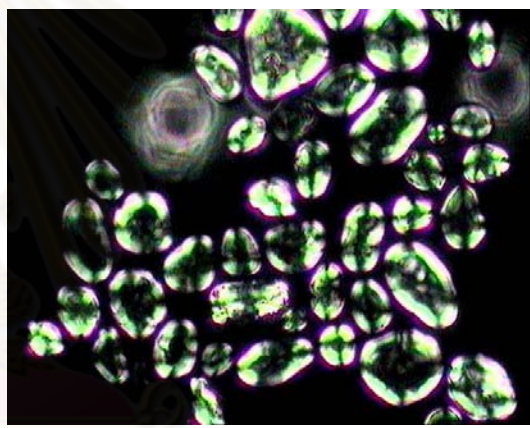


72°C 72 hr

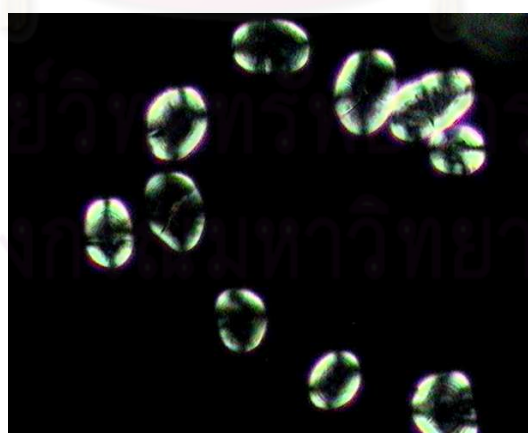
รูปที่ 4.14 (ต่อ) รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



74°C 24 hr

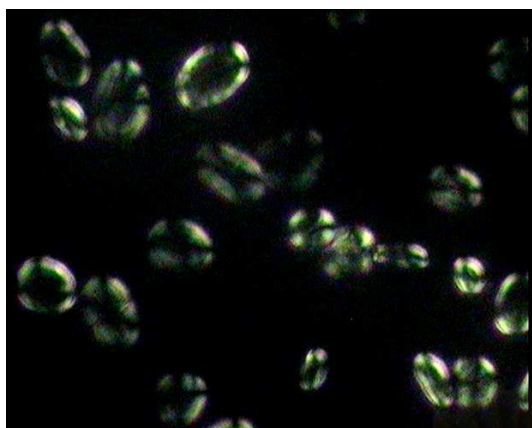


74°C 48 hr

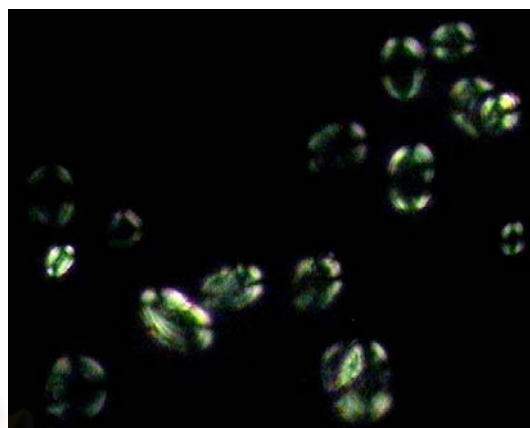


74°C 72 hr

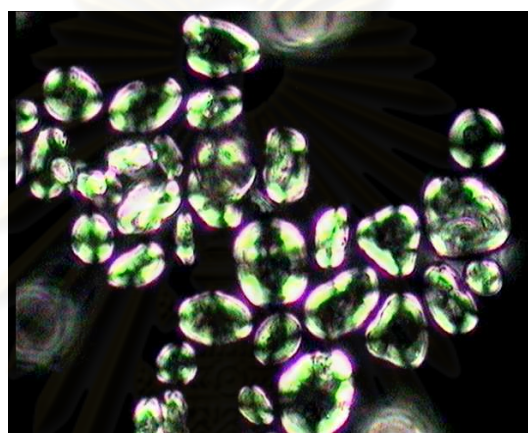
รูปที่ 4.15 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



76°C 24 hr

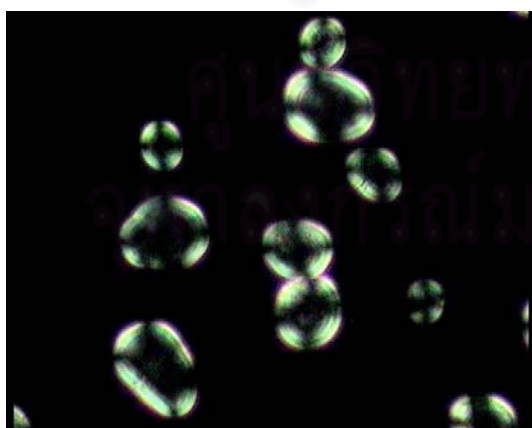


76°C 48 hr

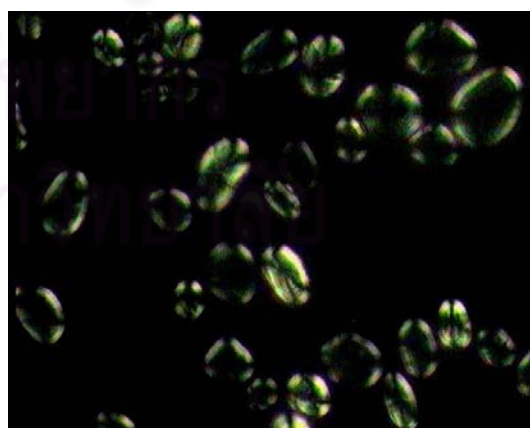


76°C 72 hr

รูปที่ 4.16 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชแก้วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

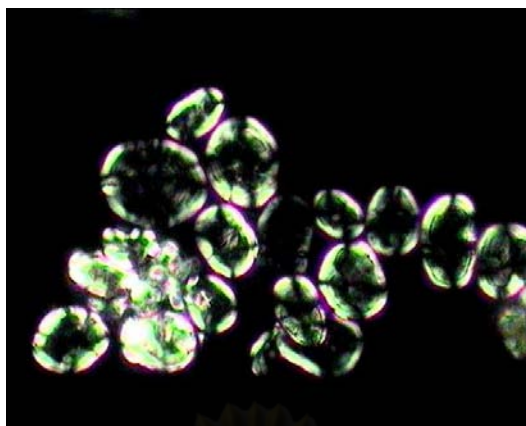


78°C 24 hr



78°C 48 hr

รูปที่ 4.17 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชแก้วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



78°C 72 hr

รูปที่ 4.17 (ต่อ) รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

4.2.6 รูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปร

จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรพบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 15 ตัวอย่าง มีรูปแบบ X-ray diffraction pattern ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ดังเดิมเหมือนสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร และมักพบโครงสร้างผลึกแบบ C ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว หลังผ่านการตัดแปรสตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 40 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoover และ Vasanthan (1993) ที่ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชเลนทิลที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 50°C นาน 0.5 – 72 ชั่วโมง พบว่า สตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบโครงสร้างผลึก และ Hoover และ Manuel (1996) ได้ศึกษา legume starch 5 ชนิด ที่ผ่านการตัดแปรแล้ว พบว่า สตาร์ชทั้ง 5 ชนิด ที่ผ่านการตัดแปรแล้วนั้น มีรูปแบบโครงสร้างผลึกไม่แตกต่างกับสตาร์ชที่ยังไม่ได้ผ่านการตัดแปรเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้สตาร์ชถั่วมะแฮะบางส่วนที่ถูกตัดแปรที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้นจะเกิดเจลาติไนเซชันไปแล้ว แต่สภาวะที่ใช้ในการตัดแปรมีผลให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันได้บางส่วนเท่านั้น จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกหลังการตัดแปร

4.2.7 ขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

ผลของการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร ในทุกสภาวะการทดลอง (ตารางที่ 4.7) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 29.61 ถึง 81.69 ไมครอน และมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 39.73 ± 13.86 ไมครอน โดยเมื่อเทียบกับสตาร์ชก่อนการดัดแปร มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ± 0.01 ไมครอน พบว่ามีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น เนื่องจากสตาร์ชบางส่วนเกิดการพองตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ประกอบกับเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างบิดเบี้ยว เนื่องจากจากขั้นตอนในการดัดแปรทำให้สตาร์ชบางส่วนเกิดการเจลาติไนเซชันไปแล้ว เม็ดสตาร์ชจึงมีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้นหลังผ่านการดัดแปร

ตารางที่ 4.7 ขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

เวลา (ชม.)	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)			
70	$29.85^j \pm 0.04$	$31.72^{gh} \pm 0.03$	$42.19^f \pm 0.26$
72	$29.61^j \pm 0.04$	$30.54^i \pm 0.05$	$50.25^c \pm 0.06$
74	$30.20^l \pm 0.05$	$31.65^h \pm 0.04$	$81.69^a \pm 0.28$
76	$31.68^h \pm 0.03$	$32.04^g \pm 0.01$	$53.55^b \pm 0.38$
78	$31.46^h \pm 0.02$	$43.65^e \pm 0.11$	$45.91^d \pm 0.55$

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.8 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

ผลของความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะหลังผ่านการดัดแปร มีค่าความสามารถในการจับน้ำอยู่ในช่วง 1.38 – 1.87 (กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง) (ตารางที่ 4.8) โดยเมื่อเทียบกับสตาร์ชก่อนการดัดแปร มีค่าความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 0.74 ± 0.01 (กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง) พบว่าสตาร์ชมีค่าความสามารถในการจับน้ำสูงขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเม็ดสตาร์ชดังที่เห็นจากภาพ SEM พบว่าเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยเฉพาะการดัดแปรที่ใช้อุณหภูมิสูงซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันไปบางส่วน ทำให้มีพื้นที่ให้น้ำเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น จึงมีค่าความสามารถในการจับน้ำเพิ่มมากขึ้นหลังผ่านการดัดแปร

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.)		
	24 ^{NS}	48 ^{NS}	72 ^{NS}
70 ^{NS}	1.38 ± .08	1.47 ± .04	1.52 ± .04
72 ^{NS}	1.53 ± .03	1.49 ± .03	1.77 ± .03
74 ^{NS}	1.75 ± .02	1.79 ± .03	1.86 ± .03
76 ^{NS}	1.55 ± .07	1.79 ± .02	1.86 ± 0.0
78 ^{NS}	1.67 ± .06	1.76 ± .06	1.75 ± 0.5

หมายเหตุ: NS หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.9 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

ผลของการศึกษากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 95°C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรในทุกการทดลองมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรพบว่ามีความกำลังการพองตัวลดลง แต่เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าค่าการพองตัวของสตาร์ชดัดแปรมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับค่าการละลายที่อุณหภูมิ 95°C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรพบว่ามีความการละลายลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากพอลิเมอร์ในชั้นผลึกเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่หลังผ่านการดัดแปร ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoover และ Vasanthan (1993) พบว่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชเลนทิลที่ผ่านการดัดแปรมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

ตารางที่ 4.9 กำลังการพองตัว (กรัม/กรัม) ที่อุณหภูมิ 95°C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรในทุกภาวะ

อุณหภูมิ (°C) \ เวลา (ชม.)	เวลา (ชม.)		
	24 ^{NS}	48 ^{NS}	72 ^{NS}
70 ^{ns}	2.05 ± 0.03	2.04 ± 0.03	2.03 ± 0.03
72 ^{ns}	2.04 ± 0.02	2.02 ± 0.01	2.03 ± 0.01
74 ^{ns}	2.04 ± 0.04	2.04 ± 0.02	2.03 ± 0.02
76 ^{ns}	2.04 ± 0.04	2.04 ± 0.03	2.04 ± 0.01
78 ^{ns}	1.98 ± 0.05	2.02 ± 0.01	2.06 ± 0.01

หมายเหตุ: NS หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.10 การละลาย (ร้อยละ) ที่อุณหภูมิ 95°C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรในทุกภาวะ

อุณหภูมิ (°C) \ เวลา (ชม.)	เวลา (ชม.)		
	24 ^{NS}	48 ^{NS}	72 ^{NS}
70 ^{ns}	7.15 ± 3.58	7.06 ± 3.50	6.89 ± 2.52
72 ^{ns}	7.06 ± 0.59	5.21 ± 0.97	5.13 ± 1.18
74 ^{ns}	7.20 ± 5.49	7.84 ± 2.56	6.74 ± 2.82
76 ^{ns}	8.24 ± 3.28	8.96 ± 2.68	8.49 ± 1.91
78 ^{ns}	8.44 ± 3.01	7.04 ± 0.92	8.97 ± 1.32

หมายเหตุ: NS หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.10 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

ผลการศึกษาด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร พบว่ามีค่า peak viscosity หรือความหนืดสูงสุดลดลงในทุกสภาวะการทดลองเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีค่าลดลงตามอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร เนื่องมาจากหลังผ่านการดัดแปร สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่ากำลังการพองตัวลดลง และสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เป็นเวลา 24,48 และ 72 ชั่วโมง มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงมากที่สุดเนื่องจากสตาร์ชบางส่วนเกิดเจลาติไนเซชันไปแล้ว ส่วนค่า breakdown และ setback ที่ต่ำลง แสดงถึงสตาร์ชถั่วมะแฮะส่วนใหญ่มีความสามารถในการทนต่อแรงกวนที่อุณหภูมิ 95°C ได้ดีขึ้นหลังผ่านการดัดแปร แต่มีแนวโน้มในการคืนตัวหรือเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำ และต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดเนื่องจากมีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoover และ Vasanthan (1993) ที่ศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชเลนทิล พบว่าหลังการดัดแปรสตาร์ชมีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ช คือ กำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ช แรงเสียดทานระหว่างเม็ดสตาร์ชขณะพองตัว และโครงสร้างผลึกของสตาร์ช (Kaur and Sandhu, 2010) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jacobs และคณะ (1995) ที่ศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากถั่วพี มัถน์ฝรั่ง ข้าวสาลีและข้าว ที่ผ่านการดัดแปรที่อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเท่ากับ 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ 50 °C สำหรับสตาร์ชมัถน์ฝรั่งและถั่วพี 45 °C สำหรับสตาร์ชข้าวสาลีและ 55 °C สำหรับสตาร์ชข้าว ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าสตาร์ชถั่วพีมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืดสูงขึ้นเมื่อผ่านการดัดแปร โดยความหนืดของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าลดลง

Adebowale และคณะ (2009) ศึกษาผลของการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนและความชื้นต่อ African yam bean พบว่าหลังการดัดแปรสตาร์ชมีค่า peak viscosity ลดลงเช่นเดียวกันสืบเนื่องจากกำลังการพองตัวที่ลดลงและ breakdown viscosity มีค่าลดลง เพราะหลังผ่านการดัดแปรองค์ประกอบภายในแกรนูลมีความคงทนต่อแรงเฉือนได้ดีขึ้น และมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากผ่านการดัดแปร โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนการมีผลึกเพิ่มขึ้นและการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้มีโครงสร้างของพันธะที่เชื่อมกันในแกรนูลมีความแข็งแรงขึ้นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดความหนืด

ตารางที่ 4.11 สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรร

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	4,106.50 ± 3.54	-	-	-
การตัดแปรร				
70	-	2,217.00 ^a ± 32.53	2,183.00 ^a ± 106.07	1,475.00 ^d ± 33.94
72	-	1,679.00 ^c ± 33.94	1,464.50 ^d ± 41.72	1,244.00 ^{fg} ± 9.90
74	-	2,019.00 ^b ± 138.59	1,364.00 ^{de} ± 15.56	1,476.00 ^d ± 42.43
76	-	1,280.50 ^{ef} ± 27.58	930.00 ^h ± 32.53	1,160.50 ^g ± 2.12
78	-	682.00 ⁱ ± 15.56	414.50 ^j ± 7.78	369.00 ^j ± 19.80

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.12 สมบัติด้านการเกิดเพสต์แสดงค่า Breakdown (cP) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรร

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	1,082.50 ± 7.78	-	-	-
การตัดแปรร				
70	-	190.50 ^{def} ± 2.12	215.00 ^{cd} ± 62.22	160.00 ^{ef} ± 16.97
72	-	312.50 ^a ± 3.53	298.00 ^{ab} ± 25.45	185.00 ^{def} ± 1.41
74	-	154.50 ^{fg} ± 34.65	261.50 ^{bc} ± 26.16	212.50 ^{cde} ± 26.16
76	-	164.50 ^{def} ± 12.02	150.00 ^{fg} ± 0.00	107.50 ^g ± 0.70
78	-	50.00 ^h ± 4.24	33.00 ^h ± 4.24	45.00 ^h ± 0.00

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.13 สมบัติด้านการเกิดเฟสที่แสดงค่า Setback (cP) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	2,812.50 ± 8.79	-	-	-
การดัดแปร				
70	-	1,209.50 ^a ± 27.57	1,193.00 ^a ± 46.67	962.50 ^e ± 12.02
72	-	1,120.50 ^b ± 0.70	1,069.50 ^c ± 28.99	853.00 ^f ± 29.70
74	-	1,234.00 ^a ± 43.84	1,015.00 ^d ± 9.89	1,011.50 ^{de} ± 23.33
76	-	849.00 ^f ± 21.21	614.50 ^g ± 0.70	537.00 ^h ± 0.00
78	-	406.00 ⁱ ± 7.07	266.50 ^j ± 9.19	298.50 ^j ± 3.53

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.13 สมบัติด้านการเกิดเฟสที่แสดงค่า Pasting temperature (°C) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	81.28 ± 0.53	-	-	-
การดัดแปร				
70	-	88.92 ⁱ ± 0.03	89.32 ^j ± 0.53	90.12 ^h ± 0.60
72	-	90.47 ^{gh} ± 0.03	91.42 ^f ± 0.03	92.15 ^e ± 0.07
74	-	90.95 ^{fg} ± 0.57	92.17 ^e ± 0.03	92.12 ^e ± 0.35
76	-	92.95 ^d ± 0.14	94.27 ^c ± 0.46	94.15 ^{abc} ± 0.56
78	-	94.55 ^{bc} ± 0.00	95.25 ^{ab} ± 0.07	95.42 ^a ± 0.03

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.11 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปร (ภาคผนวก ข.2 – ข.6) พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_0) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ดัดแปรในทุกสภาวะมีค่าสูงขึ้น โดยการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70°C เวลา 24,48 และ 72 ชั่วโมง T_0 มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงขึ้นทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ส่วนการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72,74,76 และ 78°C เวลา 24,48 และ 72 ชั่วโมง T_0 มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลสลดลงและโครงสร้างผลึกบางส่วนถูกทำลายไป ทำให้สตาร์ชบางส่วนเกิดเจลลิตีในเซชันไปแล้ว จึงใช้อุณหภูมิเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่พีคของเอนโดเทอร์ม (T_p) รวมทั้งอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วน ΔH_{gel} มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร โดยค่า T_0 , T_p และ T_c ของพีชตระกูลถั่วที่ผ่านการดัดแปรมีค่าสูงบ่งบอกถึงการมีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงขึ้นทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (Adebowale et al., 2009) ช่วง $T_c - T_0$ ของการเกิดเจลลิตีในเซชันแคบลง เนื่องจากผลึกมีความสม่ำเสมอ (homogeneous) มากขึ้น และสตาร์ชบางส่วนเกิดการเจลลิตีในเซชันไปแล้ว โครงสร้างผลึกบางส่วนถูกทำลายไปส่งผลให้มีค่า ΔH_{gel} ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่า pasting temperature ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดัดแปรที่อุณหภูมิและเวลาที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Jacobs และคณะ (1995) ที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อน ของถั่วพีพบว่าหลังการดัดแปรสตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น และ ΔH_{gel} มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน และสอดคล้องกับ Hoover และ Manuel (1996) ที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของ legume starch 5 ชนิดที่ผ่านการดัดแปรแล้ว พบว่า สตาร์ชทั้ง 5 ชนิด มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น และ ΔH_{gel} มีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะ ที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC)

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	70.95 ± 0.07	-	-	-
การตัดแปร				
70 ^{ns}	-	83.05 ^h ± 0.07	84.40 ^g ± 0.14	84.60 ^g ± 0.42
72	-	84.75 ^g ± 0.35	86.00 ^f ± 0.28	86.15 ^{ef} ± 0.35
74 ^{ns}	-	86.25 ^{ef} ± 0.07	86.20 ^{ef} ± 0.28	86.75 ^{de} ± 0.21
76 ^{ns}	-	87.45 ^{bc} ± 0.49	87.65 ^b ± 0.07	87.50 ^{bc} ± 0.00
78	-	86.95 ^{cd} ± 0.07	87.85 ^b ± 0.21	89.80 ^a ± 0.42

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะ ที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC)

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	77.20 ± 0.28	-	-	-
การตัดแปร				
70	-	86.75 ⁱ ± 0.07	87.60 ^h ± 0.14	88.05 ^{gh} ± 0.07
72	-	88.60 ^{fg} ± 0.14	89.60 ^e ± 0.28	89.55 ^e ± 0.21
74	-	88.80 ^f ± 0.00	89.95 ^e ± 0.07	90.85 ^d ± 1.06
76	-	91.80 ^c ± 0.28	92.30 ^{bc} ± 0.28	92.20 ^{bc} ± 0.00
78	-	92.70 ^{ab} ± 0.14	93.10 ^a ± 0.00	93.05 ^a ± 0.07

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.16 อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะ ที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC)

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	83.95 ± 0.07	-	-	-
การตัดแปร				
70 ^{ns}	-	94.05 ^{fg} ± 0.07	93.95 ^g ± 0.07	94.95 ^{def} ± 0.63
72 ^{ns}	-	94.25 ^{fg} ± 0.35	95.35 ^{cd} ± 0.35	95.25 ^{cde} ± 0.49
74 ^{ns}	-	94.30 ^{efg} ± 0.14	95.00 ^{def} ± 0.28	95.75 ^{bcd} ± 0.35
76 ^{ns}	-	96.15 ^{bc} ± 0.92	96.65 ^{ab} ± 0.49	97.30 ^a ± 0.00
78 ^{ns}	-	97.15 ^a ± 0.21	97.55 ^a ± 0.07	97.20 ^a ± 0.56

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.17 พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลในเซชัน (ΔH_{gel}) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะ ที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 (วิเคราะห์ด้วย DSC)

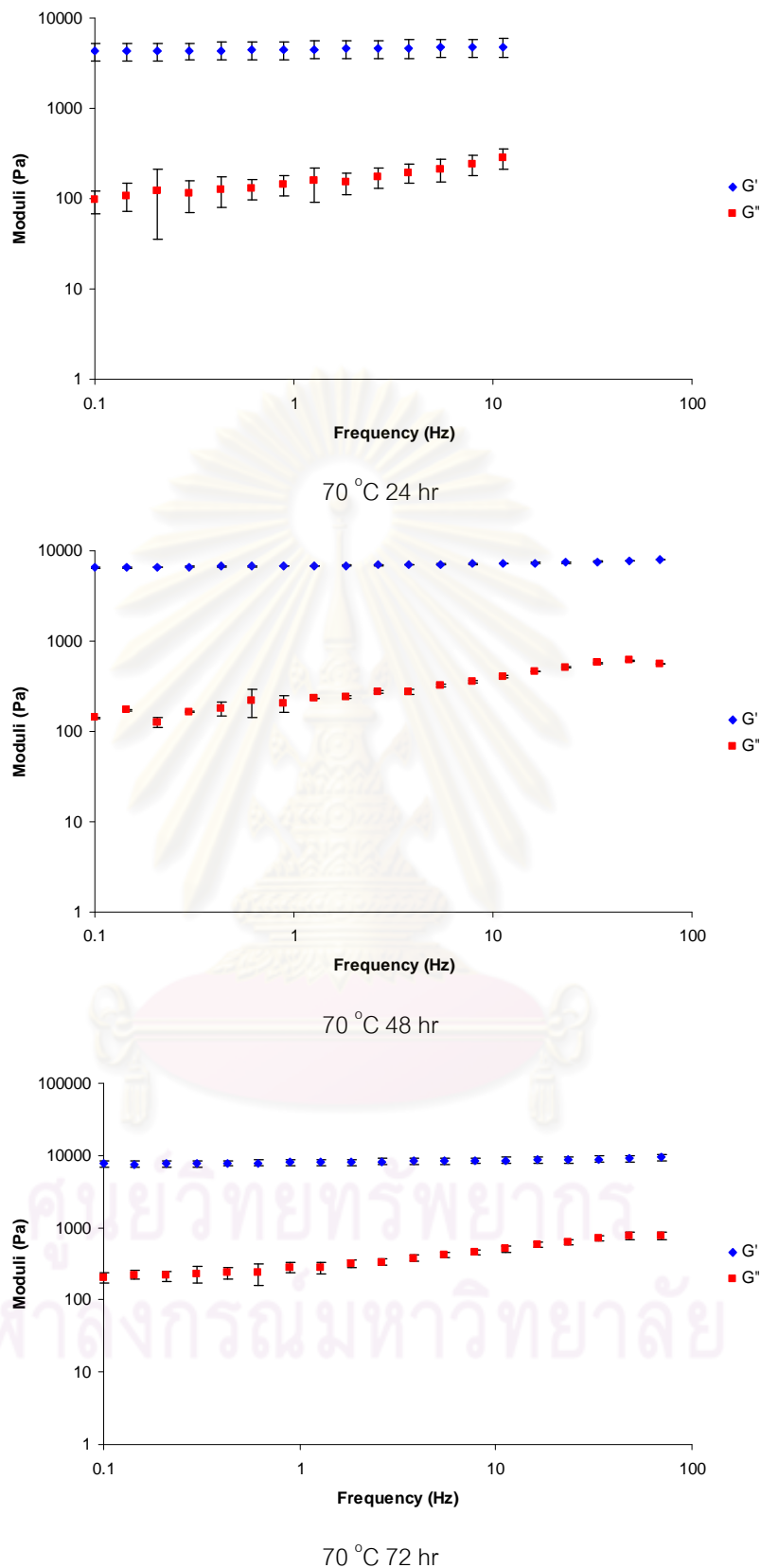
เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่าน	12.97 ± 0.13	-	-	-
การตัดแปร				
70	-	12.25 ^a ± 0.76	11.54 ^a ± 0.40	11.48 ^a ± 0.03
72	-	10.95 ^a ± 0.55	11.20 ^a ± 0.24	10.63 ^{ab} ± 0.86
74	-	11.40 ^a ± 0.38	11.90 ^a ± 0.06	8.56 ^{bc} ± 3.37
76	-	6.62 ^{cde} ± 1.16	5.92 ^{de} ± 0.87	5.12 ^{de} ± 0.00
78	-	4.54 ^e ± 0.04	5.79 ^{de} ± 0.16	7.32 ^{cd} ± 0.28

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.12 สมบัติด้านการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปร

จากการทดสอบ temperature sweep test ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปร (ภาคผนวก ข.7 – ข.11) พบว่า เมื่อตัดแปรที่ช่วงอุณหภูมิ 70 °C 24 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 74 °C 72 ชั่วโมง รูปแบบกราฟที่ได้มีค่า G' มากกว่าค่า G'' แสดงว่ามีสมบัติคล้ายเป็นของแข็ง (solid-like) แต่เมื่อตัดแปรที่ช่วงอุณหภูมิ 76 °C 24 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 78 °C 72 ชั่วโมง สตาร์ชมีค่า G'' มากกว่า G' แสดงว่ามีสมบัติคล้ายเป็นของเหลว (liquid-like)

เมื่อนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 15 ตัวอย่าง ที่ผ่านการทดสอบ temperature sweep test แล้ว มาทดสอบ frequency sweep test ต่อ พบว่า รูปแบบกราฟที่ได้มีลักษณะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ (ภาคผนวก ข.12 – ข.16) โดยสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรที่ช่วงอุณหภูมิ 70 °C 24 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 74 °C 48 ชั่วโมง มีค่า G' มากกว่าค่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดลอง โดยเห็นได้ชัดเจนจากตัวอย่างที่ผ่านการตัดแปรที่ 70 °C เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง (รูปที่ 4.18) มีค่า G' ที่คงที่ในทุกความถี่และมีค่าสูงกว่าค่า G'' อย่างมากในทุกความถี่ แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชที่ตัดแปรในสภาวะนี้มีความเป็นเจลที่ดี แข็งแรง ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะของของเหลวของตัวอย่าง แต่ที่ช่วงอุณหภูมิ 74 °C 72 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 78 °C 72 ชั่วโมง สตาร์ชมีค่า G'' มากกว่า G' แสดงว่ามีลักษณะของความเป็นของเหลวมากกว่าลักษณะของความเป็นของแข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการตัดแปรที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้สตาร์ชมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาคีโนเซชันสูงขึ้น ทำให้สตาร์ชเจลาคีโนเซชันได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้สตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิสูงไม่เกิดเจล และมีลักษณะของความเป็นของเหลว



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz

4.2.13 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์

จากการศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยของเอนไซม์ของสตาร์ชดังแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการตัดแปรสตาร์ชมีผลต่อความสามารถในการทนต่อการย่อยของเอนไซม์ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการตัดแปรสูงขึ้นมีค่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (RS) เพิ่มมากขึ้น ยกเว้นสภาวะการตัดแปรที่มีระดับความชื้นและอุณหภูมิสูง คือที่อุณหภูมิ 78 °C จะมีค่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากสตาร์ชที่การทดลองนั้นเกิดการเจลาติไนเซชันไปบางส่วนแล้ว จึงทำให้มีค่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยลดลง

ตารางที่ 4.18 ความสามารถในการทนย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (%RS)

เวลา (ชม.)	0	24	48	72
อุณหภูมิ (°C)				
สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปร	8.35± 0.13	-	-	-
70	-	10.53 ^e ± 0.99	10.18 ^{bc} ± 0.25	12.35 ^{ab} ± 1.00
72	-	12.66 ^e ± 0.75	13.12 ^a ± 0.25	14.03 ^a ± 0.06
74	-	15.40 ^d ± 0.15	14.37 ^a ± 0.52	15.32 ^g ± 0.15
76	-	15.37 ^d ± 0.15	14.70 ^a ± 1.10	15.40 ^f ± 0.15
78	-	5.10 ^{cd} ± 0.33	6.61 ^a ± 0.08	7.49 ^f ± 1.75

หมายเหตุ: a, b, c,... หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ตามลำดับ และมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช สตาร์ชถั่วมะแฮะมีสีขาวนวล มีค่าความสว่างค่อนข้างสูง เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรีเหมือนรูปไข่ สภาพพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก ร้าว มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ± 0.01 ไมครอน จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้ Wide Angle X-Ray Diffraction พบว่ามีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C มีค่าความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 0.74 ± 0.01 กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีแนวโน้มของค่าการพองตัวและการละลายเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเฟสพบว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนสูง คือ 81.28 °C มีค่าความร้อนสูงสุด ความคงทนต่อแรงเฉือนและการคืนตัวค่อนข้างสูง จากการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าในกระบวนการให้ความร้อน เจลสตาร์ชถั่วมะแฮะจะให้ค่า G' สูงกว่าค่า G'' และ G' มีค่าสูงกว่าค่า G'' ในทุกความถี่ของการทดลอง สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลในเซชันเท่ากับ 70.95 ถึง 83.95 °C และมีค่า ΔH_{gel} เท่ากับ 12.97 J/g เมื่อศึกษาความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์พบว่าสตาร์ชจากถั่วมะแฮะมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยเท่ากับร้อยละ 8.35

เมื่อดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิเจลในเซชัน โดยในการศึกษาจะใช้ตัวอย่างน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 30 เวลาในการดัดแปร 24 ถึง 72 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการดัดแปรในช่วง 70 ถึง 78 °C ผลการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สตาร์ชถั่วมะแฮะยังไม่เกิดเจลในเซชัน พบว่าเม็ดสตาร์ชดัดแปรมีสภาพพื้นผิวที่ขรุขระ มีลักษณะ birefringence คงอยู่ แต่ในสภาวะการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 ถึง 78 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สตาร์ชบางส่วนเริ่มเกิดเจลในเซชันแล้ว พบว่า ลักษณะ birefringence บางส่วนเริ่มหายไป แต่ทุกสภาวะในการดัดแปร สตาร์ชมีรูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C มีค่าสีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีขนาดอยู่ในช่วง 29.61 ถึง 81.69 ไมครอน มีค่าความสามารถในการจับน้ำอยู่ในช่วง $1.38 - 1.87$ (กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง) ปริมาณแอมิโลส และสมบัติด้านความร้อน ได้แก่ ΔH_{gel} มีแนวโน้มลดลง กำลังการพองตัว และการละลายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สมบัติด้านการเกิดเฟส ได้แก่ ค่าความร้อนสูงสุด ความคงทนต่อแรงเฉือนและการคืน

ตัวมีแนวโน้มลดลง มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดและการเปลี่ยนแปลงความร้อน ได้แก่ onset temperature มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการตัดแปรรูป เมื่อทดสอบสมบัติทางการไหล พบว่าในกระบวนการให้ความร้อน เจลสตาร์ชถั่วมะแฮะจะให้ค่า G' สูงกว่าค่า G'' เมื่อผ่านการตัดแปรรูปในช่วงอุณหภูมิ 70 °C 24 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 74 °C 72 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการตัดแปรรูปสูงขึ้น เจลสตาร์ชถั่วมะแฮะจะให้ค่า G' สูงกว่าค่า G'' และพบว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูปในช่วงอุณหภูมิ 70 °C 24 ชั่วโมง ถึงอุณหภูมิ 74 °C 48 ชั่วโมงแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะของเหลว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการตัดแปรรูปสูงขึ้น ตัวอย่างสตาร์ชจะมีลักษณะของความเป็นของเหลวมากกว่า ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (RS) เพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการตัดแปรรูป ยกเว้นสภาวะการตัดแปรรูปที่มีระดับความชื้นและอุณหภูมิสูง คือที่อุณหภูมิ 78 °C สตาร์ชมีค่าความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 70°C ถือเป็นการตัดแปรรูปแบบการใช้ความร้อนและความชื้น ส่วนผลการทดลองที่อุณหภูมิ 72 ถึง 78°C เนื่องมาจากสตาร์ชบางส่วนเกิดเจลาตินในเซชันไปแล้ว

จากสมบัติด้านต่างๆของสตาร์ชจากถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูป โดยเฉพาะการมีช่วง breakdown และ setback ที่ต่ำ แสดงถึงสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกวนและความร้อนได้ดี แต่มีการคืนตัวยากเหมาะกับอาหารประเภท ซุปหรือซอส เพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้ สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์แทนการใช้เส้นใยอาหารจากแหล่งอื่น เนื่องจากสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยไม่ทำให้เนื้อสัมผัสของอาหารมีลักษณะหยาบ และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติ จึงเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์พวกขนมอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เต็ม สมิตินันท์. 2523. ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย (ชื่อพฤกษศาสตร์-ชื่อพื้นเมือง). กรุงเทพมหานคร: กรมป่าไม้.
- นิรมล ล้อสุริยนต์. 2536. การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเข้าสำเร็จรูปชนิดแผ่นจากถั่วมะแฮะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปทุมทริกา วิไลพล. 2553. ผลของขนาดเมล็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วุฒิ วุฒิศรรมเวช. 2540. สารานุกรมสมุนไพร รวบรวมหลักเภสัชกรรมไทย. (ม.ป.ท.).
- วิเชียร วรพุทธิพร. 2525. ศึกษาการทำวุ้นเส้นและซ่าหริ่มจากแป้งถั่วมะแฮะพันธุ์ต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. 17thed. Association of Official Analysis Chemists. Washington, D.C.
- Adebowale, K.O., Henle, T., Schwarzenbolz, U., and Doert, T. 2009. Modification and properties of African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa* Hochst. Ex A. Rich) Harms starch I: Heat moisture treatments and annealing. Food Hydrocolloids 2323: 1947-1957.
- Anonymous. 2009. Resistant starch. Simplot Australia[Online]. Available from: <http://www.simplot.com.au/simplotcorporate/uploads/files/FactSheet-ResistantStarch.pdf>[2009, October 20]
- 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.

- Chung, H.J., Liu, Q., and Hoover, R. 2009. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. Carbohydrate Polymers 75: 436-447.
- Collado, L. S., and Corke, H. 1997. Properties of starch noodles as affected by sweet potato genotype. Cereal Chemistry 74 (2): 182-187.
- Costa, A., Queiroz-Monici, K. S., Machado Reis, S. M. P. and Oliveira, A. C. 2006. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. Food Chemistry 94: 327–330.
- 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.
- Erlingen, R. C., Jacobs, H., Block, K. and Delcour, J. A. 1997. Effects of hydrothermal treatments of the rheological properties of potato starch. Carbohydrate Research 297: 347-356.
- Englyst, H., Wiggins, H.L. and Cummins, J.H. (1982) Analyst, 107, 307-318.
- Farhat, I. A., Oguntona, T. and Neale, R. J. 1999. Characterisation of starches from west Africa yam. Journal Science food Agricultural 79 : 2105-2112.
- Fu, L., Tian, J., Sun, C., and Li, C. 2008. RVA and farinograph properties study on blends of resistant starch and wheat flour. Agricultural Sciences in China 7 (7): 812-822.
- 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.
- Gunaratne, A. and Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymers 49(4) : 425-437.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. Carbohydrate Polymers 45: 253-267.

- Hoover, R., and Manuel, H. 1996. The effect of annealing on the physical properties of legume starches. In G. R. Fenwick, G. Hedley, R. L. Richards, and S. Khokhar (Eds.), Agricultural and Food Quality: An Interdisciplinary Approach (pp.157-161). UK:Royal Society of Cambridge.
- Hoover, R. and Sosulski, F. W. 1990. Composition, structure, functionality, and chemical modification of legume starches: a review. Canadian Journal of Physiology Pharmacology 69: 79-92
- Hoover, R., and Vasanthan. 1993. The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. Food Biochemistry 17: 303-325.
- Hoover, R., and Zhou, Y. 2003. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes-a review. Carbohydrate Polymers 54: 401-417.
- Jacobs, H., and Delcour, J. A. 1998. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: a review. Journal of Agricultural and Food Chemistry 46 (8): 2895-2905.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Clauwaert, W., and Delcour, J. A. 1995. Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources. Cereal Chemistry 72(5): 480-487.
- Jacobs, H., Eerlingen, R. C., Spaepen, H., Grobet, P. J., and Delcour, J. A. 1998. Impact of annealing on the susceptibility of wheat, potato and pea starches to hydrolysis with pancreatin. Carbohydrate Research 305: 193-207.
- Jane, J., et al. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chemistry 76 (5): 629-637.
- 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.

- Karim, A. A., Norziah, M. H., and Seow, C. C. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. Food Chemistry 71: 511-517.
- Kaur, M., and Sandhu, K. S. 2010. In vitro digestibility, structural and functional properties of starch from pigeon pea (*Cajanus cajan*) cultivars grown in India. Food Research International 43: 263-268
- Kaur, M., Sandhu, K. S., and Singh, N. 2007. Comparative study of the functional, thermal and pasting properties of flours from different field pea (*Pisum sativum* L.) and pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) cultivars. Food Chemistry 104: 259-267.
- 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.
- Lawal, O. S. 2011. Hydroxypropylation of pigeon pea (*Cajanus cajan*) starch: Preparation, functional characterizations and enzymatic digestibility. Food Science and Technology 44: 771-778
- Leach, H. W., McCowen, L. D. and Schoch, T. J. 1959. Structure of the starch granule Swelling and solubility patterns of various starches. Cereal Chemistry 36: 534-544.
- 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.
- 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.).
- 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.
- Oshodi, A. A., and Ekperigin, M. M. 1989. Functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour. Food Chemistry 34: 1-5.

- Schoch, T. J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches. In R. L. Whistler, R. J. Smith & J. N. Bemiller (Eds.), *Method in Carbohydrates Chemistry*, Vol. VI, pp. 106-108. New York: Academic press.
- Steffe, J. F. 1992. Rheological Methods in Food Process Engineering. Michigan, USA: Freeman Press.
- Zhu, T., Jackson, D.S., Wehling, R. L., and Geera, B. 2008. Comparison of amylose determination methods and the development of a dual wavelength iodine binding technique. Cereal Chemistry 85: 51-58.
- 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.



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. เครื่องชั่งละเอียดตศนิยม 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. คำนวณหาค่าความชื้นจากสมการ

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

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. เครื่องชั่งละเอียดตศนิยม 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 ลงในฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ต่อเข้ากับปลาย condenser ของเครื่องกลั่น (distillation unit)
5. นำหลอดตัวอย่างที่ผ่านการย่อยต่อเข้ากับเครื่องกลั่น แล้วนำสายสีดำของเครื่องกลั่นจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำกลั่น ส่วนสายสีขาวจุ่มลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วตั้งโปรแกรม distillation โดย ดังนี้

NaOH	70	มิลลิลิตร
Time	8	นาที
6. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนียขึ้น แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริกในฟลาสก์ จะได้สารละลายสีเขียวเมื่อกลั่นครบตามกำหนดเวลา
7. ล้างส่วนปลายของ condenser ด้วยน้ำกลั่น ใสลงในฟลาสก์ที่รองรับสิ่งที่กลั่นได้
8. นำสารละลายที่กลั่นได้ในฟลาสก์ทั้งหมดมาไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 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 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.4 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15

อุปกรณ์

1. ครูชีเบล
2. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น W350, Germany)
3. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดชนิดนิยม 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. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Buchner funnel ที่รองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิลิตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์กรด ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส
4. นำกากมาละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำร้อน
5. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Bucher funnel ที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิลิตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์ต่าง
6. ล้างกากที่ได้ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร 2 ครั้ง
7. นำกากที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่
8. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักจะได้ตัวอย่างน้ำหนักก่อนเผา
9. นำตัวอย่างใส่ในครูชีเบลที่ผ่านการเผา 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.5 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. เครื่องชั่งละเอียดชนิดนิยม 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.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. เครื่องชั่งละเอียดชนิดนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

สารเคมี

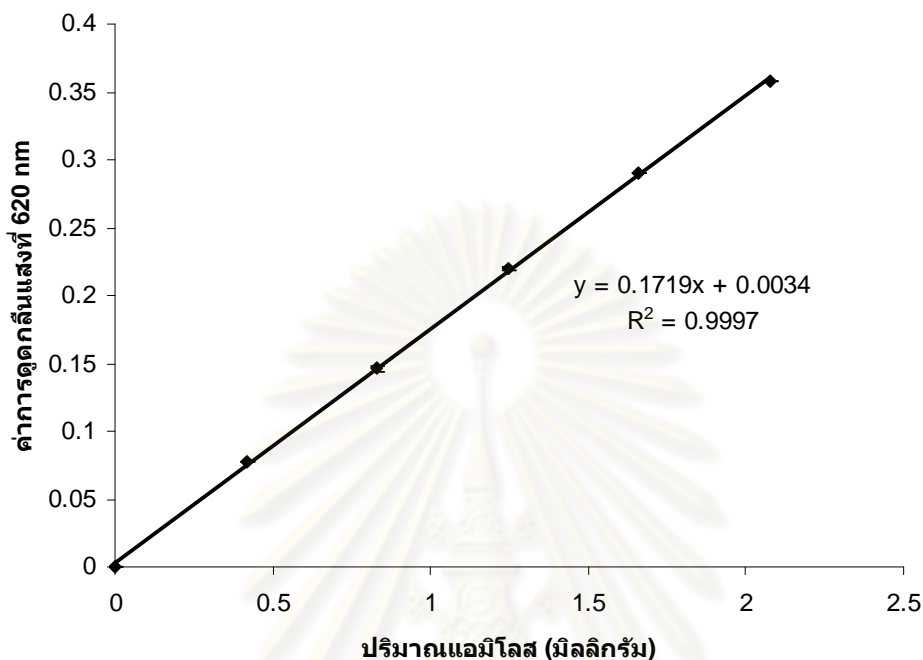
1. แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose type III: from potato) (บริษัท Sigma-ALDRICH, Germany)
2. สารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 N
3. เอทิลแอลกอฮอล์ 95%
4. สารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 N
5. สารละลายไอโอดีน เตรียมสารละลายไอโอดีน 0.20 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.00 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100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

วิธีทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง น้ำหนักแน่นอน 0.0400 กรัม ใส่ในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
2. เตรียม blank โดยเติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 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. ปิเปตสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 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 เติมสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 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. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. ต้มในอ่างน้ำเดือดนาน 5-10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. ชะน้ำแบ่งใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำกลั่นชะน้ำแบ่งออกมาให้ได้มากที่สุด) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
5. ปิเปตสารละลายจากข้อ 4 มา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 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) วัดค่าสีของตัวอย่างโดยนำหัววัดไปสัมผัสกับตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่าง

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. นำตัวอย่างแป้งติดบน stub โดยใช้เทปกาวสองหน้าหรือกาว
2. ฉาบด้วยทองหนา 20-30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง ion sputter โดยใช้เทคนิค Hammer V Sputter Coater
3. บันทึกภาพโครงสร้างของตัวอย่างด้วย SEM ควบคุมที่ 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. เตรียมสารละลายยกลีเซอรินและน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วหยดลงบนสไลด์ 1-2 หยด
2. นำตัวอย่างสตาร์ชมาละลายกับสารละลายข้อ 1 บนสไลด์ให้ได้ความหนาแน่นของเม็ดสตาร์ชพอดีกับการถ่ายภาพ
3. ปรับระยะภาพโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำสุดแล้วเห็นภาพชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 400 เท่า
4. ปรับเลนส์สไลด์ให้ได้องค์ประกอบของภาพที่ต้องการ และปรับความคมชัดของภาพโดยดูที่กล้องถ่ายภาพ
5. ตั้งระบบการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายภาพเป็นแบบอัตโนมัติ และปรับเป็นแบบไม่ใช้ flash
6. นำฟิล์มโพลาไรซ์วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ และนำแผ่นฟิล์มอีก 1 แผ่น วางปิดบนสไลด์หรือกั้นระหว่างสไลด์กับอุปกรณ์ถ่ายภาพ
7. หมุนแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์ที่วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงให้ได้สีของพื้นภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช
8. ปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์

ก.11 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช 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. นำตัวอย่างสตาร์ชโรยบน sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสตาร์ชเรียงตัวอัดกันแน่น
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 2θ , 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 A°	Intensity*	2θ	d-spacing A°	Intensity*	2θ	d-spacing A°	Intensity*	2θ
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 (1964)

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 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮด้วยเครื่อง 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. เตรียมตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 2-5 กรัม ใส่ลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง และประกอบเข้ากับตัวเครื่อง
3. ประมวลผลโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หาขนาดอนุภาคสตาร์ชที่มีมากที่สุด และสร้างกราฟกระจายตัวของอนุภาคเม็ดสตาร์ช

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. ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 1 กรัม ใส่หลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนัก
2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร
3. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และกวนเป็นระยะ ทุก ๆ 5 นาที
4. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ $5,000 \times g$ เป็นเวลา 20 นาที
5. เทน้ำทิ้ง และคว่ำหลอดทิ้งไว้ 10 นาที

6. ชั่งน้ำหนักสตาร์ชที่ได้
7. คำนวณหาความสามารถในการจับน้ำ (กรัม น้ำ / กรัม ตัวอย่าง) ตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการจับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชหลังการทดลอง} - \text{น้ำหนักสตาร์ชเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักสตาร์ชเริ่มต้น}}$$

ก.14 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility) ดัดแปลงจากวิธีของ 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 (Mettert 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 โดยใช้แท่งแก้ววนทุก 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. คำนวณหา กำลังการพองตัว และการละลายของสตาร์ชตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย (\% solubility)} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่ละลายน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักสารแห้ง (กรัม)}}$$

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

ก.15 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer ดัดแปลงจากวิธีของ 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 ไว้นาน 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 ± 0.1 มิลลิลิตร (สำหรับแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 14) ใส่ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can)

4. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 3.00 ± 0.01 กรัม ใส่ลงใน can ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว น้ำหนักตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง โดยทั่วไปแนะนำตามตารางที่ ก.3

5. ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาแรง ๆ และตั้งขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างแรง ๆ ประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับกันเป็นก้อนที่ผิวหน้าหรือติดที่ใบพัดกวน 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

ก.16 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันด้วยเครื่อง 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. ปิดฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องปิดฝา เก็บ pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นตัวอย่างภายใน pan เข้าสู่ภาวะสมดุล ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
4. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (panเปล่า) ให้เครื่อง scan ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 95 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที และใช้ indium ในการ calibrate
5. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเกิดการเกิดเจลลิตีในเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของเอนโดเทอร์ม (peak temperature, T_p หน่วย °C) อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c หน่วย °C) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างเกิดการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy of gelatinization, ΔH หน่วย J/g)

ก.17 การวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของสตาร์ชด้วยเครื่อง 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 เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง ตามโปรแกรมของ temperature sweep test

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

ก.18 ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชดิบ ดัดแปลงจากวิธีของ Englyst และคณะ (1982)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RF, U
2. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer, Thermo Spectronic รุ่น Genesys 10 UV, USA)
3. อ่างน้ำแบบเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ (water bath shaker)

เตรียมสารรีเอเจนต์

1. ชุดการทดสอบ Resistant starch assay procedure (บริษัท Megazyme, Ireland)
2. 0.1 M sodium maleate buffer pH 6
3. 1.2 M sodium acetate buffer pH 3.8
4. 1.2 M sodium acetate buffer pH 4.5
5. สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 M
6. เอทิลแอลกอฮอล์ 99%
7. สารละลาย GOPOD เตรียมได้จาก 1 M potassium phosphate buffer ผสมกับ เอนไซม์ glucose oxidase และเอนไซม์ peroxidase

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม เติม amylase ปริมาตร 4.0 มิลลิลิตรแล้วเติม amyloglucosidase ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร
2. ผสมให้เข้ากัน นอกจากนั้นยังต้องทำ blank enzyme (คือการละลายสตาร์ชจากข้อ 1 แต่ไม่เติมเอนไซม์)
3. ปิดปากหลอดทดลองด้วยแผ่น parafilm ให้แน่น และนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างที่ 16 ชั่วโมง
4. หยุดปฏิกิริยาโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ 99% ปริมาตร 4.0 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง นำหลอดที่เก็บตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 10 นาที
5. เทส่วนใสที่เติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 50% ปริมาตร 8.0 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง นำหลอดที่เก็บตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

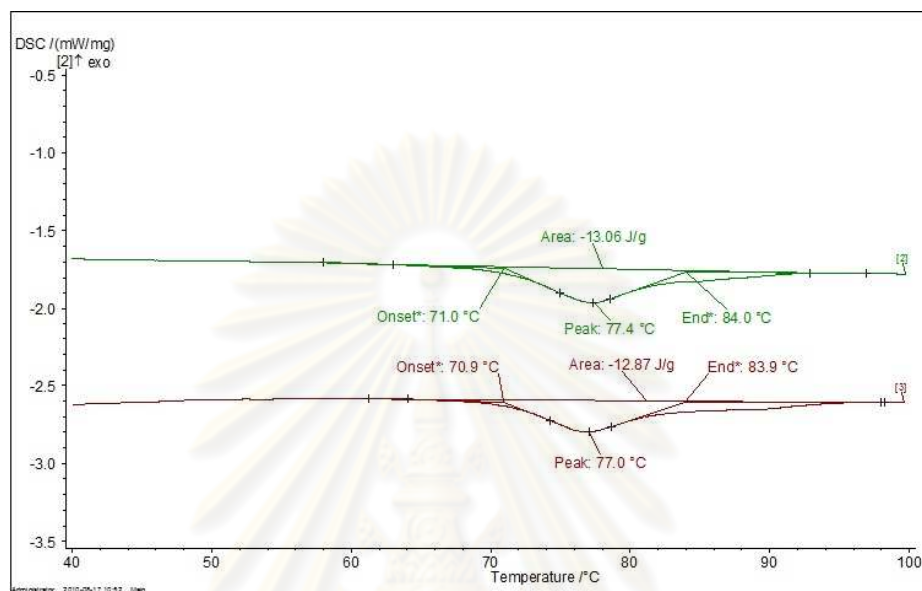
6. เทส่วนผสมที่เติมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 M ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร พร้อมกับใส่ magnetic bar และแช่หลอดทดลองไว้ในน้ำแข็งบน magnetic stirrer เป็นเวลา 20 นาที
7. เติม sodium acetate buffer pH 3.8 ปริมาตร 8.0 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ amyloglucosidase ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
8. เมื่อครบตามเวลานำหลอดที่เก็บตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 10 นาที
9. ปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 0.1 มิลลิลิตร เติม GOPOD ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตรนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที
10. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
11. คำนวณหาค่าร้อยละ resistant starch ดังนี้

$$\% \text{resistant starch} = \Delta E \times FW \times 9.27$$

เมื่อ ΔE	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงของ blank
F	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงของ D-glucose
W	คือ	น้ำหนักแห้งของตัวอย่างสตาร์ช

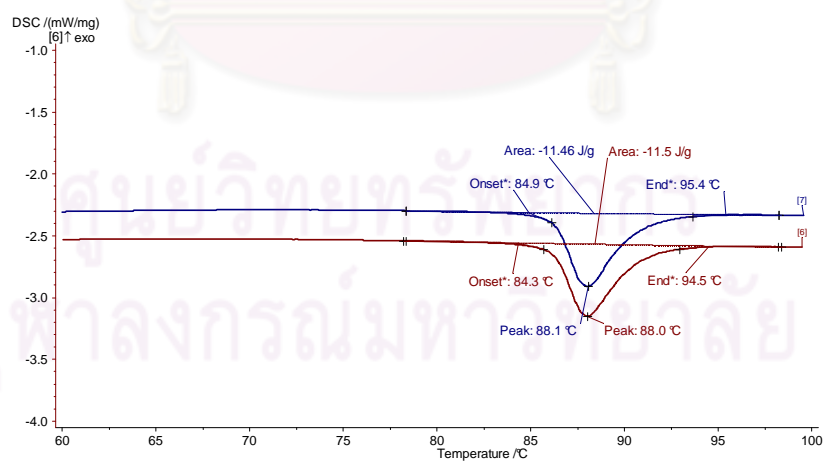
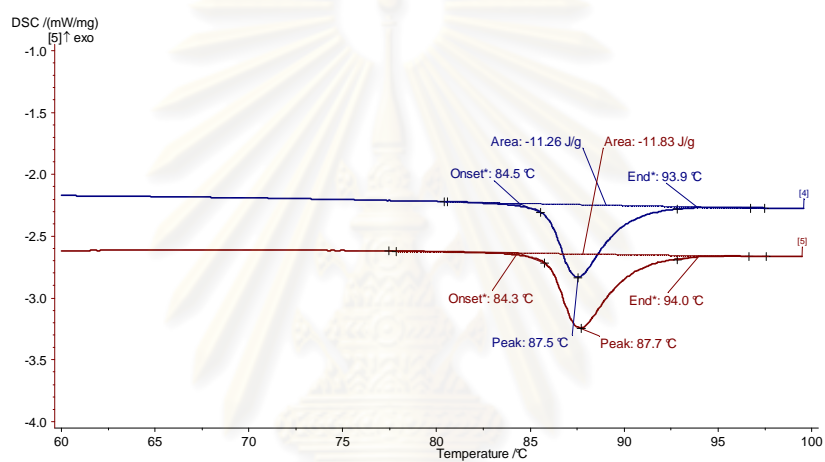
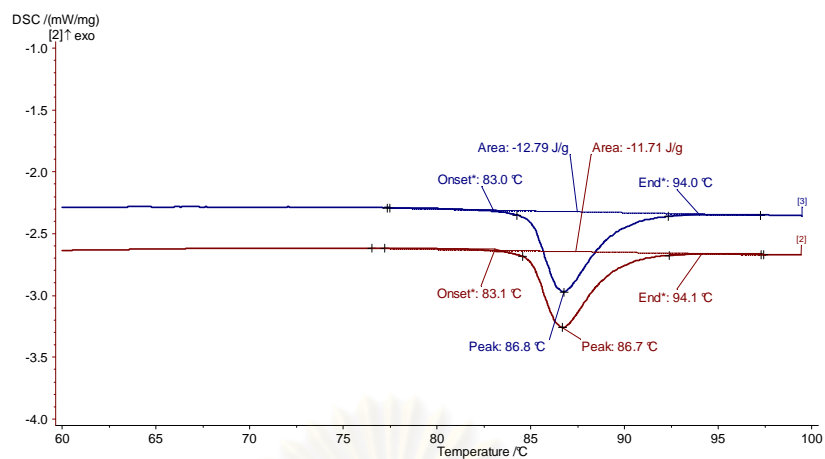
ภาคผนวก ข

รายละเอียดรูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม

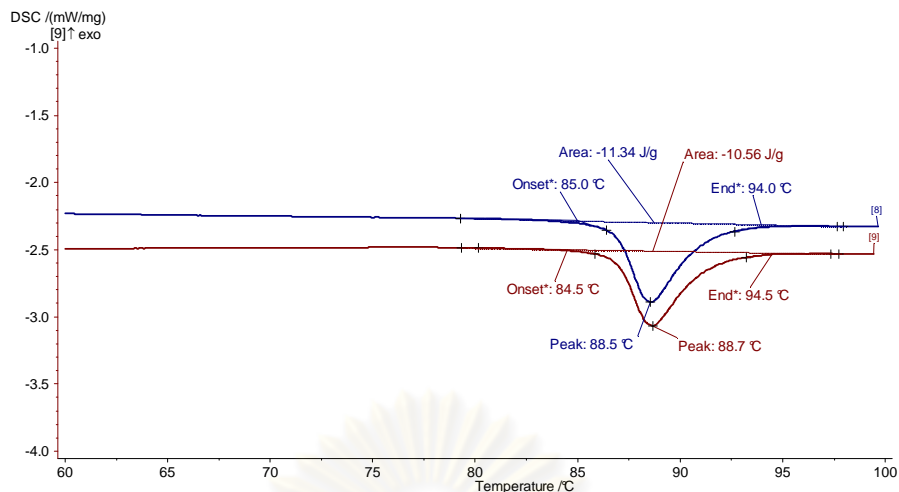


รูปที่ ข.1 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ไม่ผ่านการดัดแปร

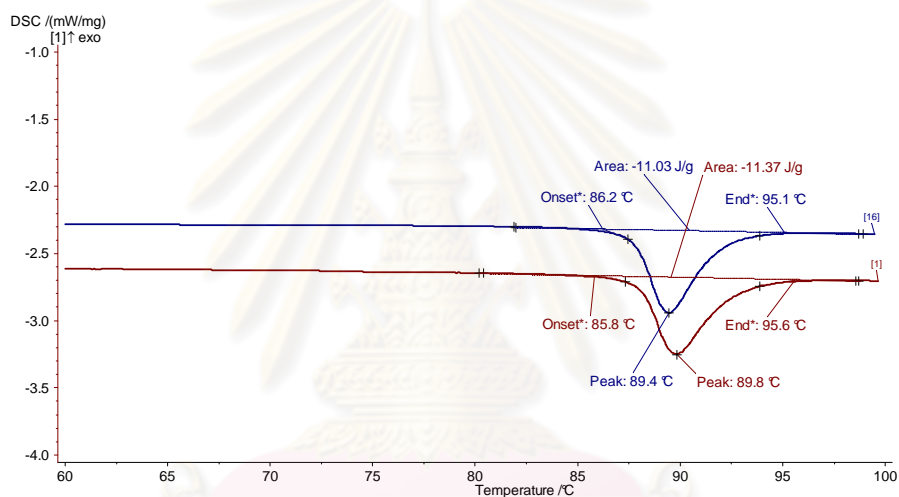
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



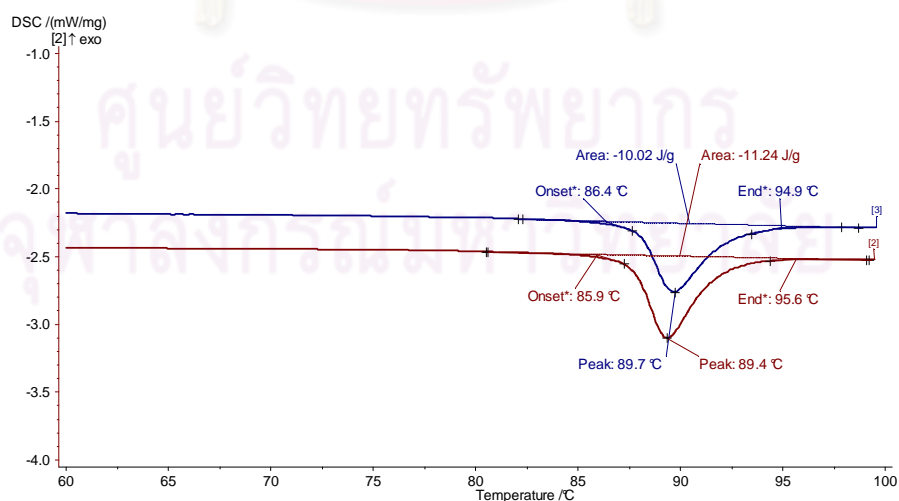
รูปที่ ข.2 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



72 °C 24 hr

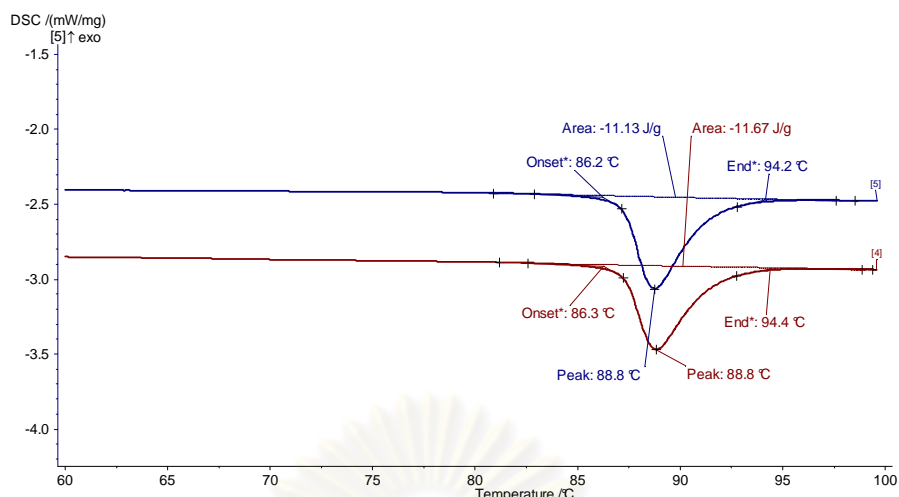


72 °C 48 hr

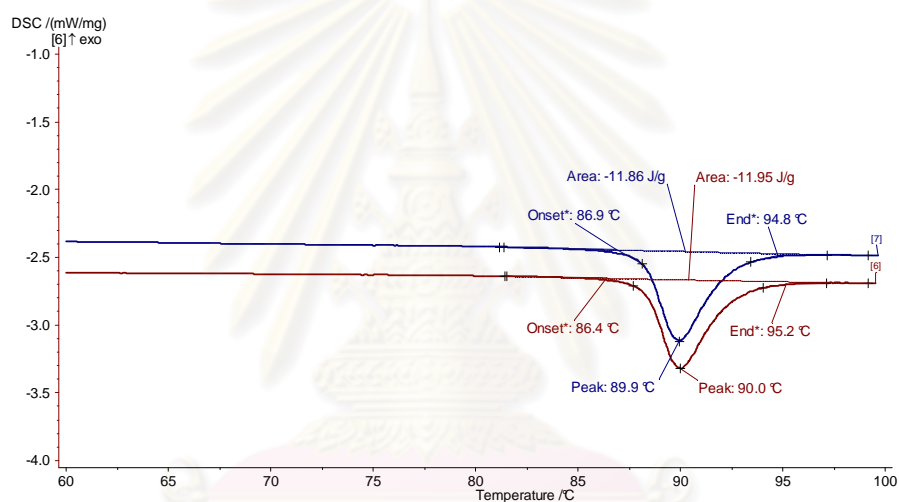


72 °C 72 hr

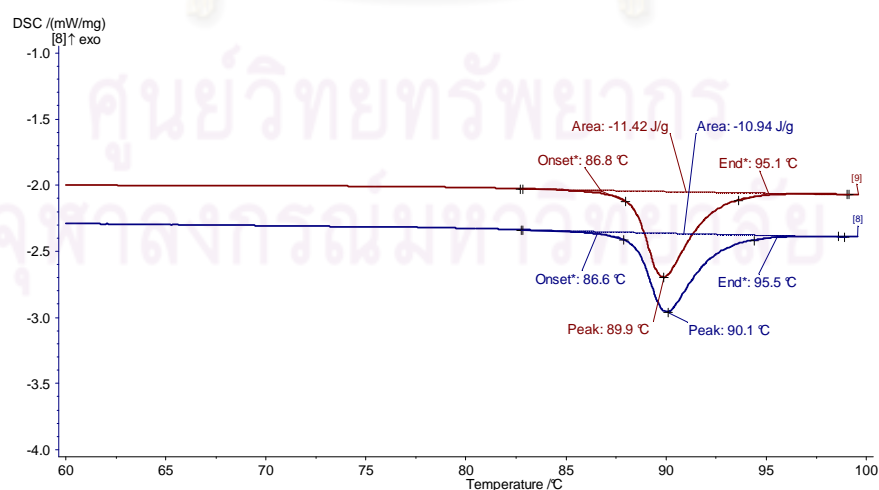
รูปที่ ข.3 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



74 °C 24 hr

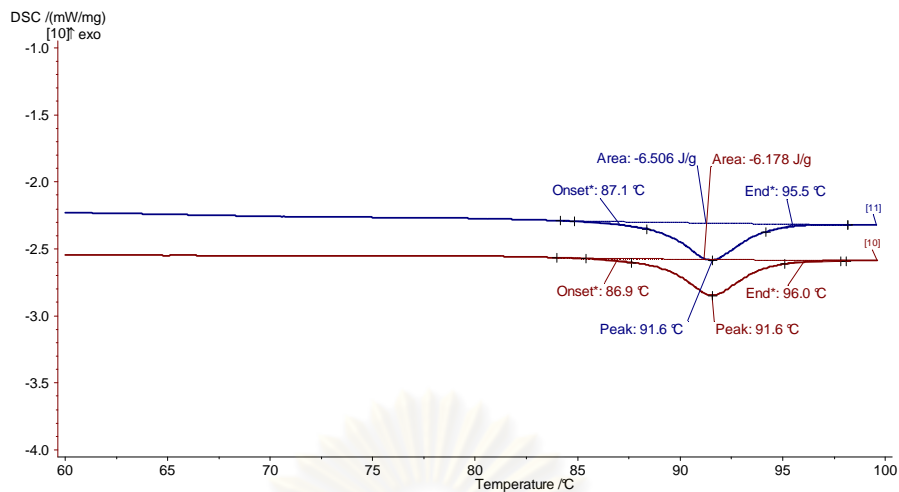


74 °C 48 hr

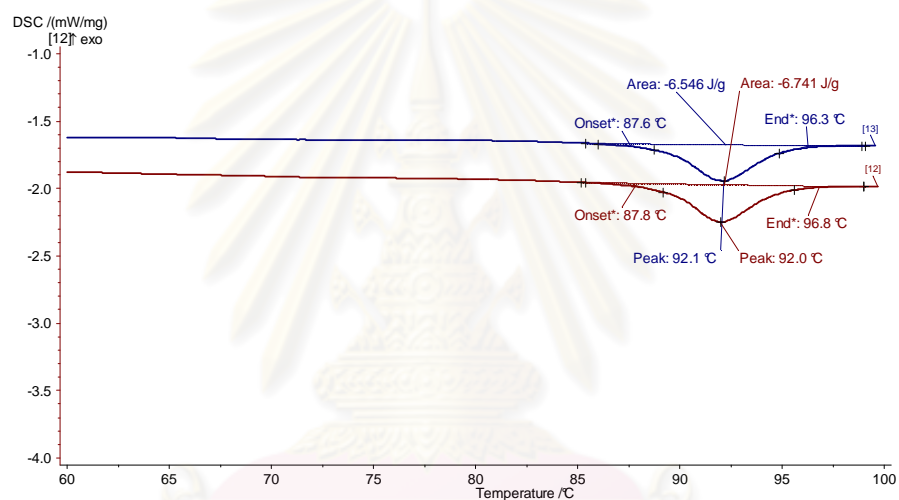


74 °C 72 hr

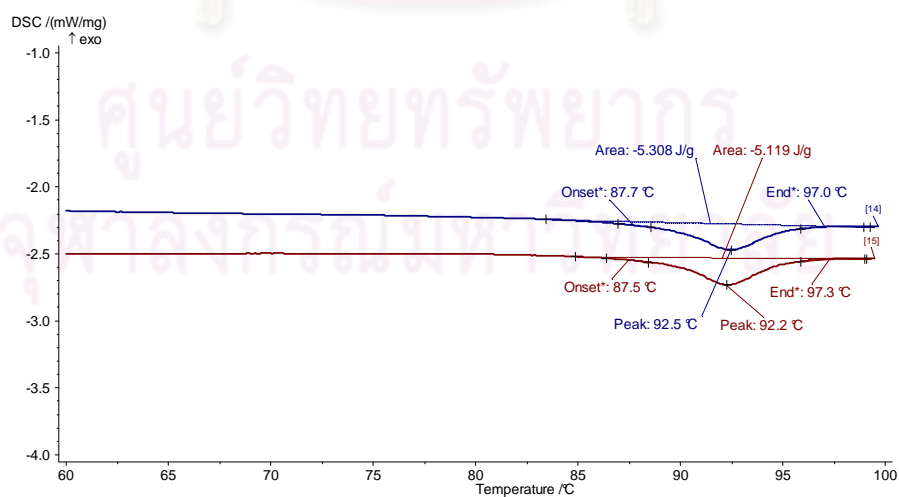
รูปที่ ข.4 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



76 °C 24 hr

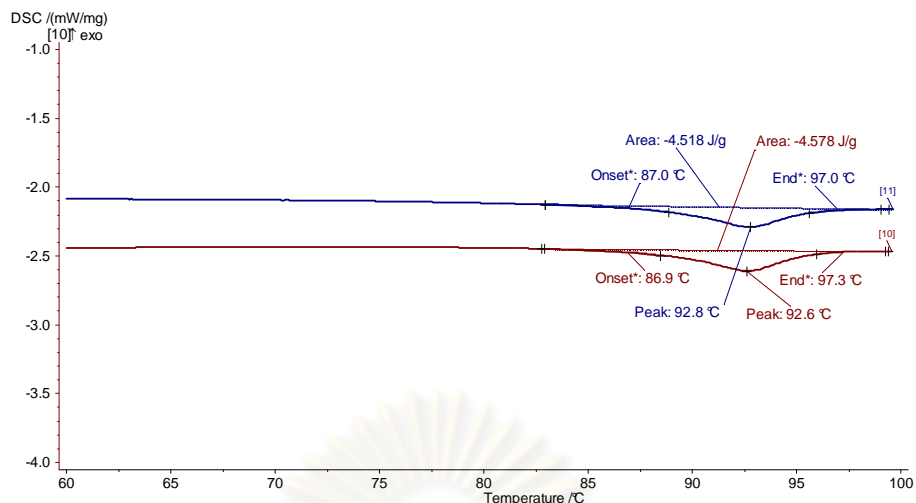


76 °C 48 hr

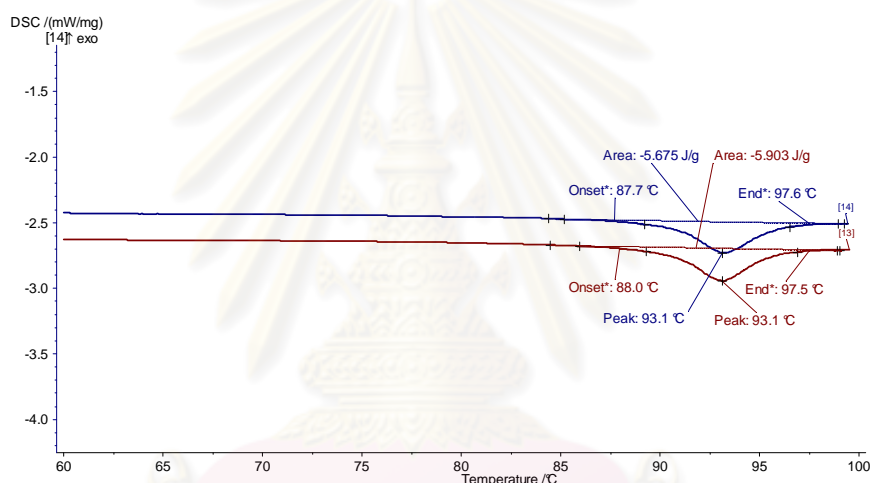


76 °C 72 hr

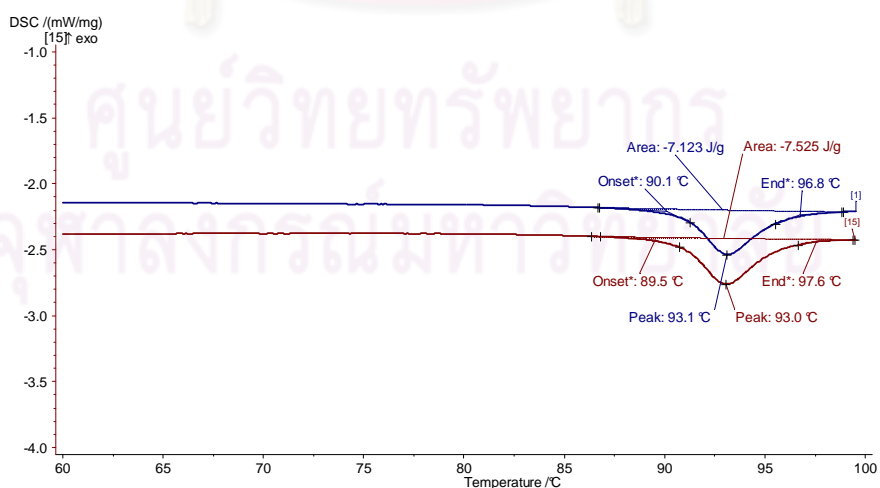
รูปที่ ๑.5 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



78 °C 24 hr

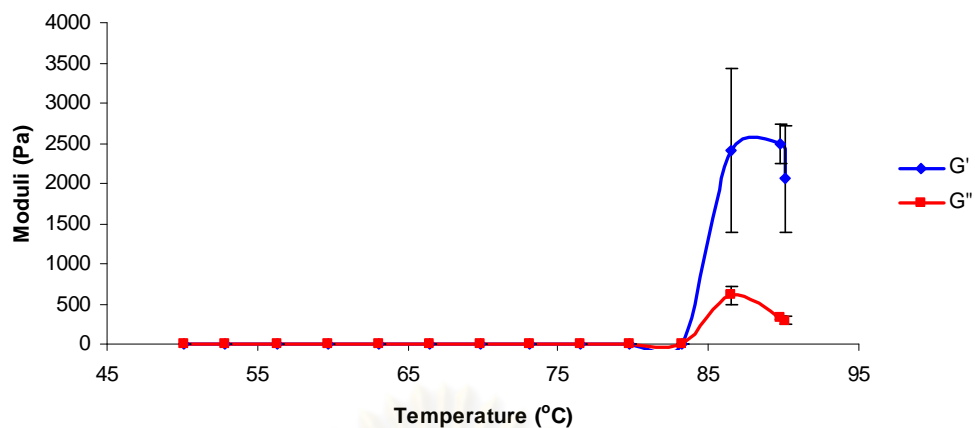


78 °C 48 hr

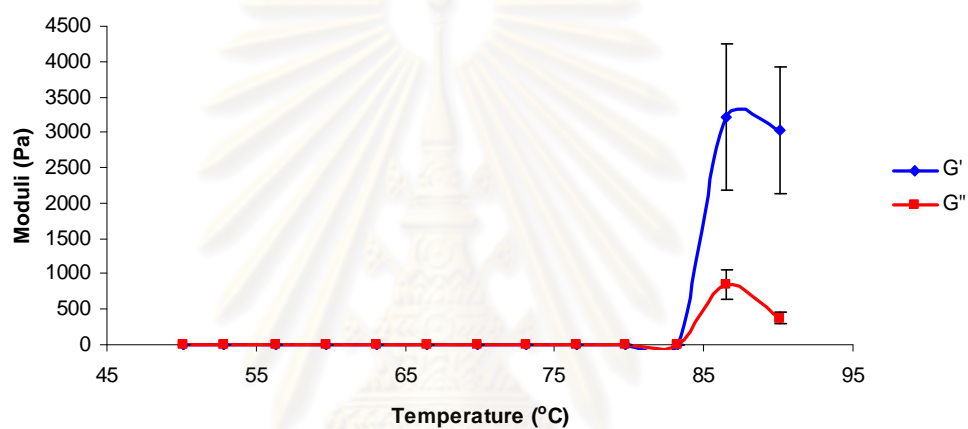


78 °C 72 hr

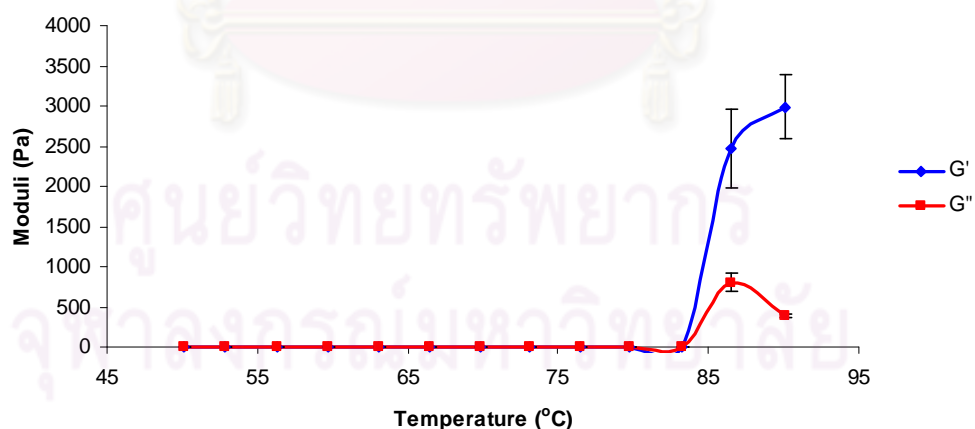
รูปที่ ข.6 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง



70 °C 24 hr

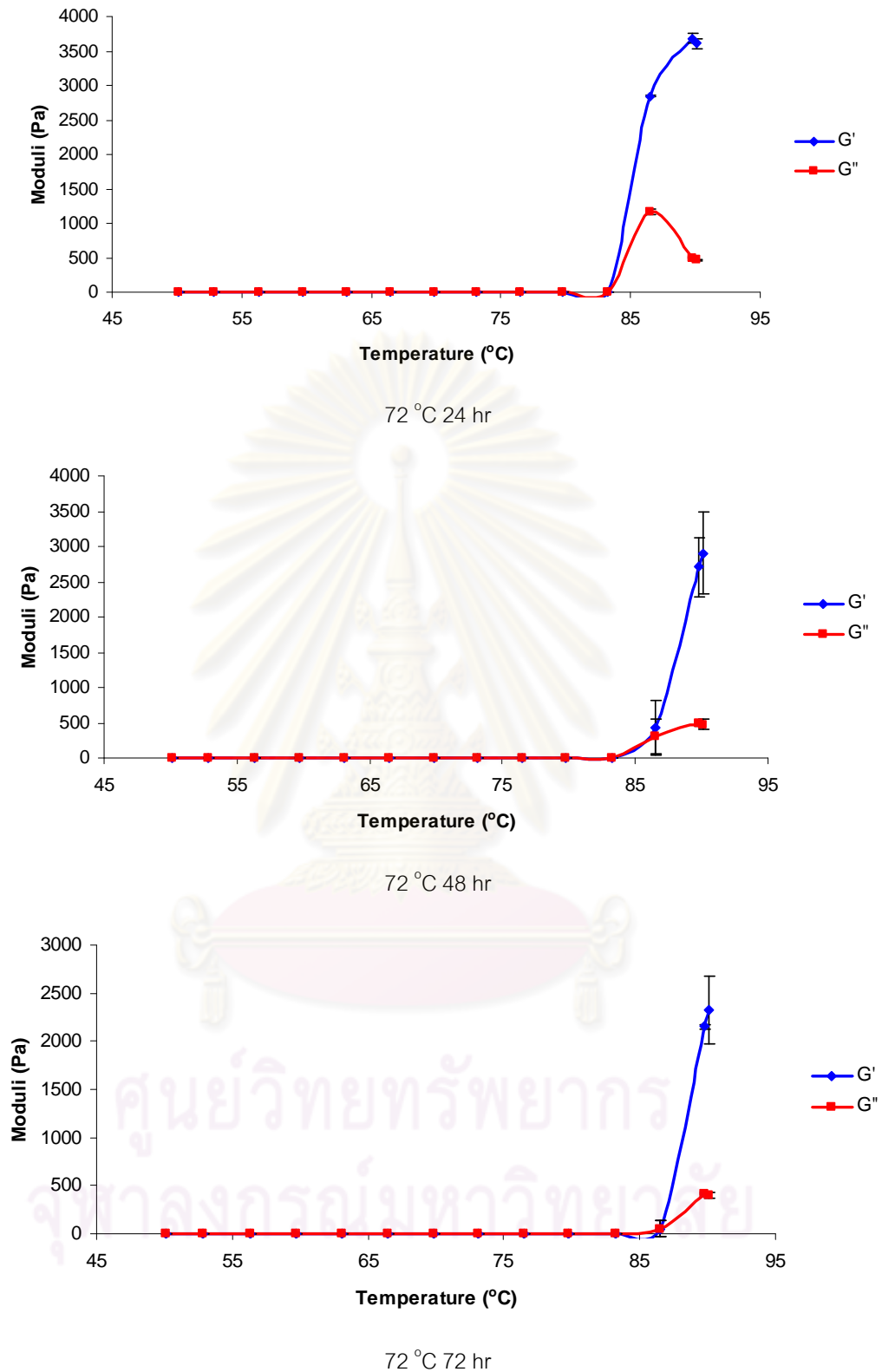


70 °C 48 hr

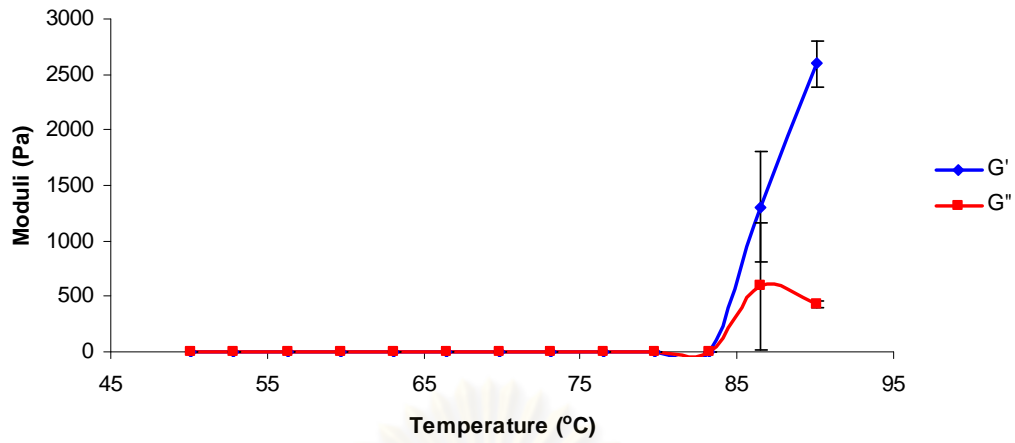


70 °C 72 hr

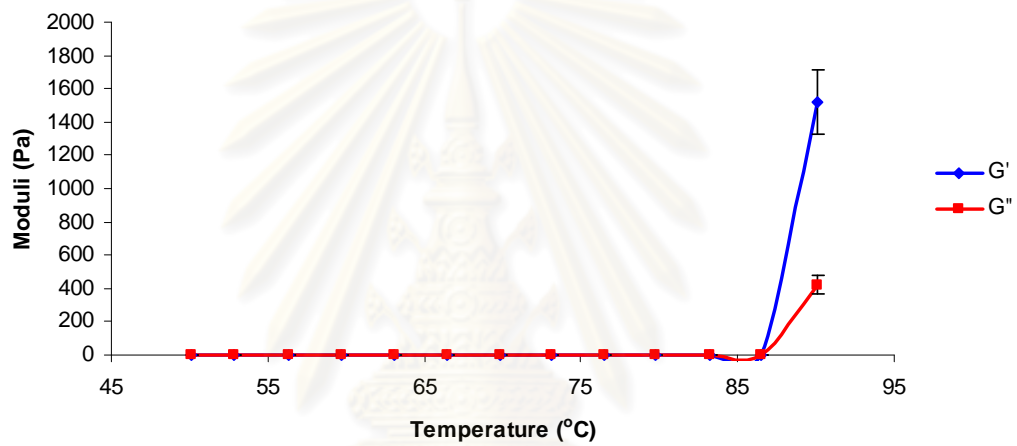
รูปที่ ๗.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 70 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C



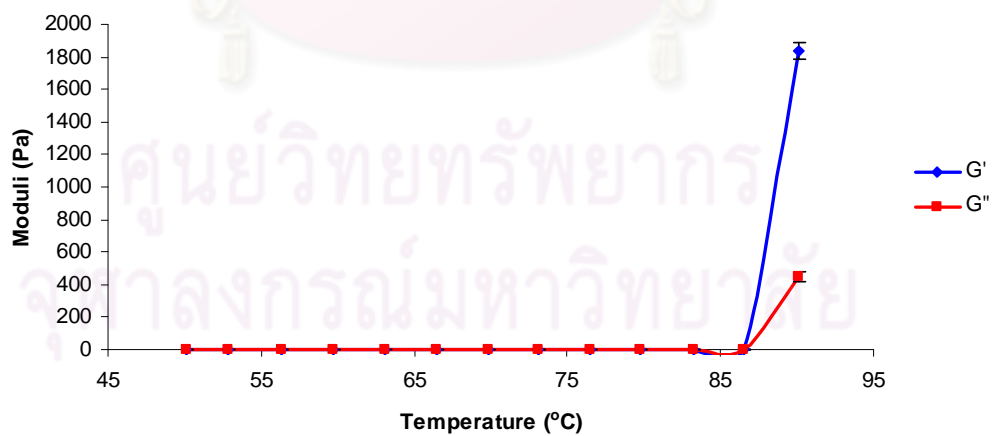
รูปที่ ๗.๘ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ช-เจลลีนที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C



74 °C 24 hr

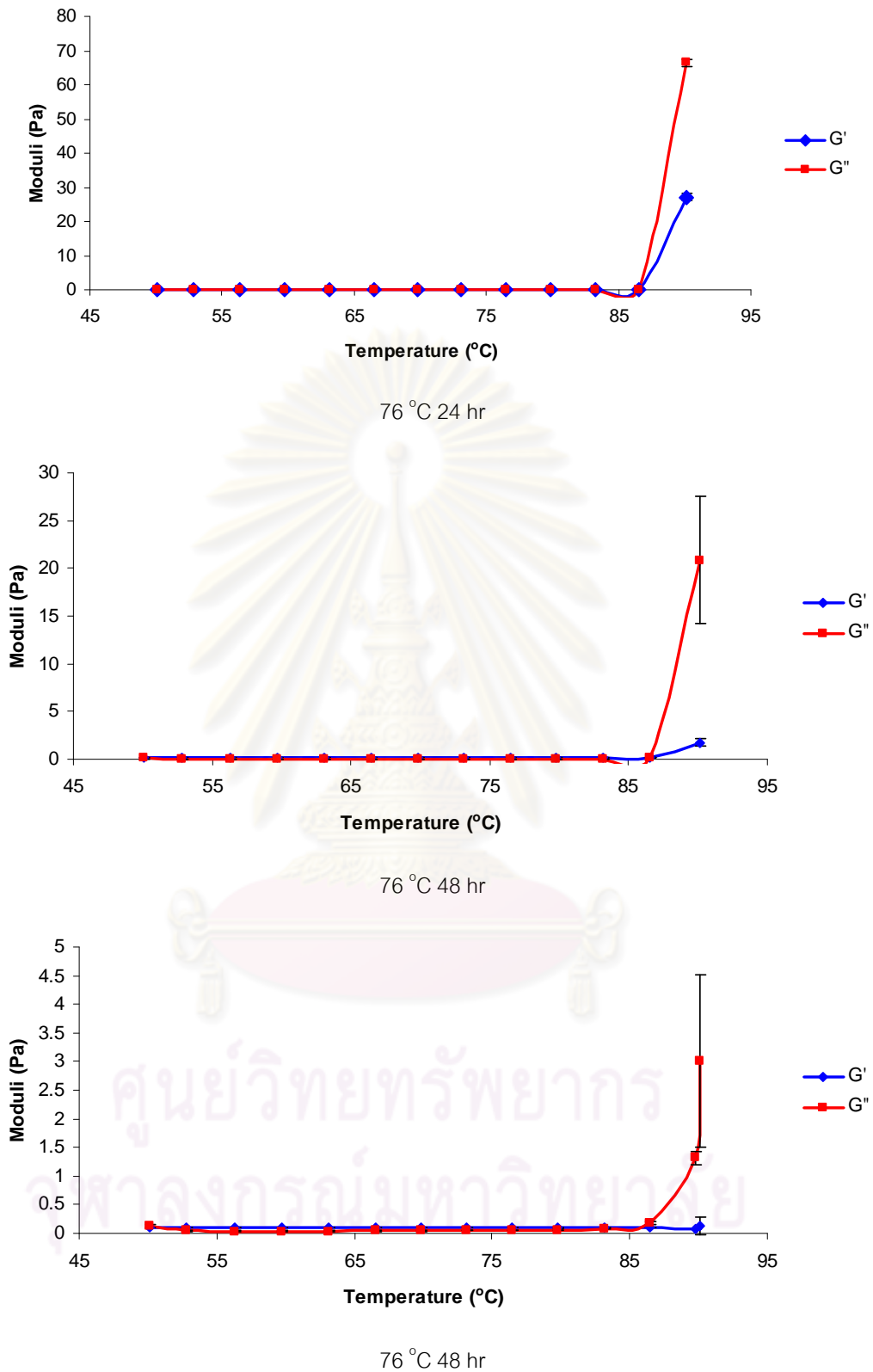


74 °C 48 hr

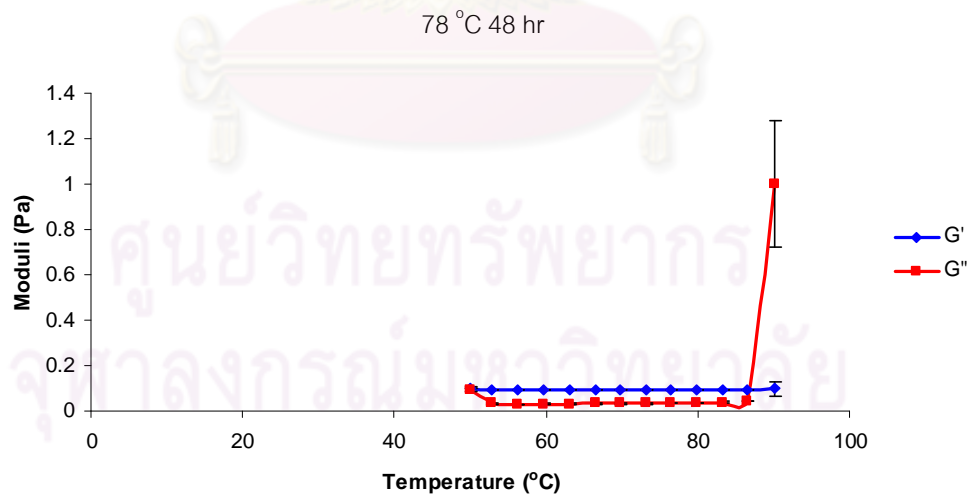
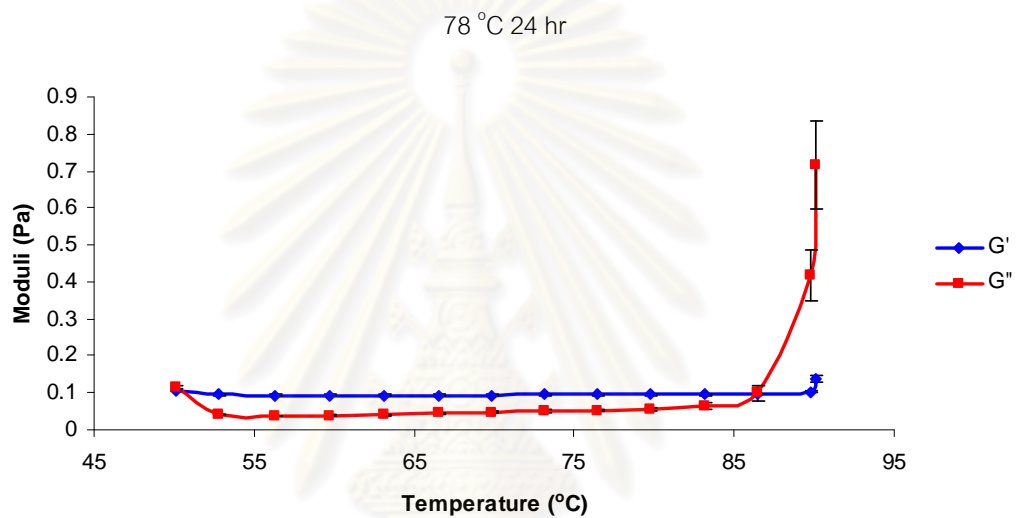
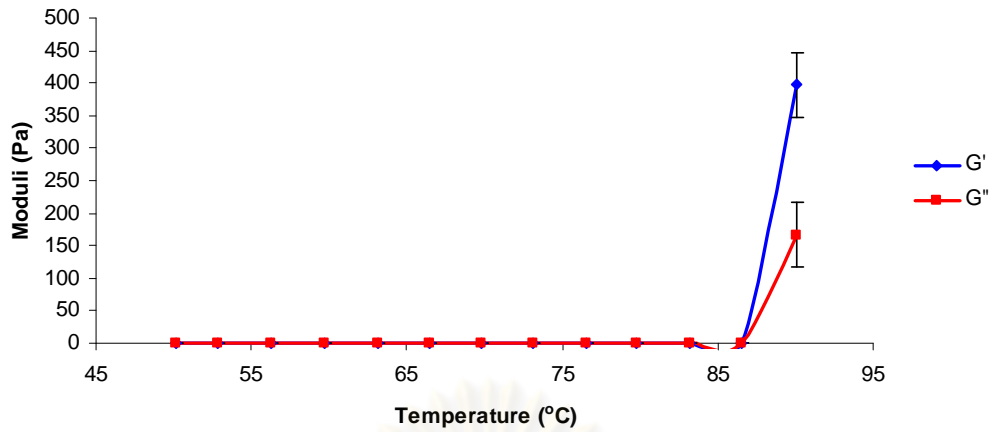


74 °C 72 hr

รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C

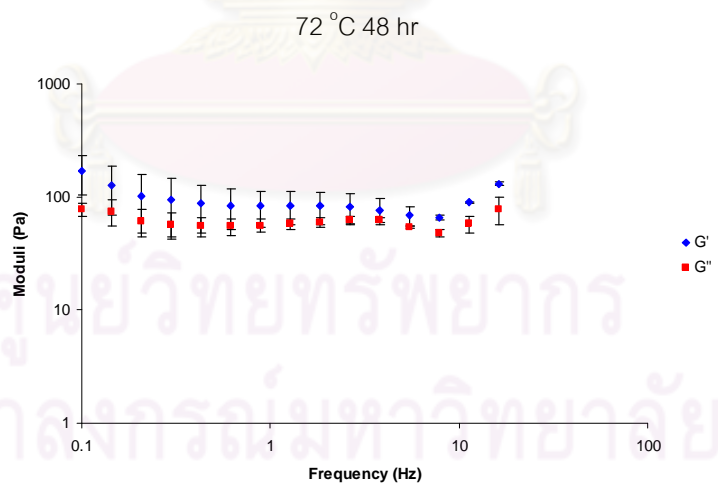
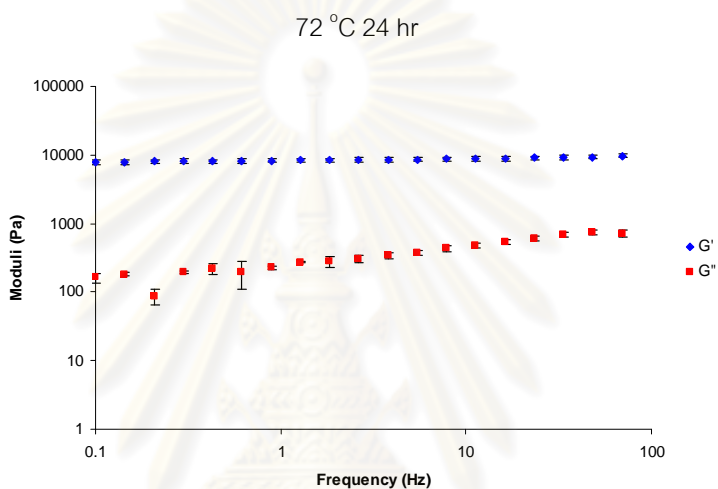
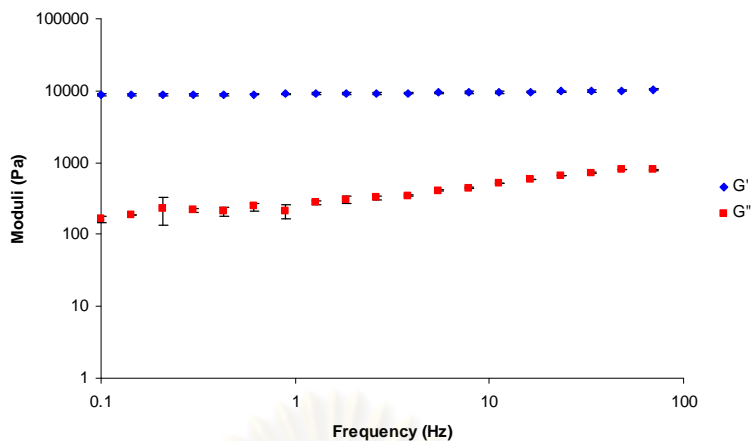


รูปที่ ๑.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชกัวมะแสะที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้วที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C



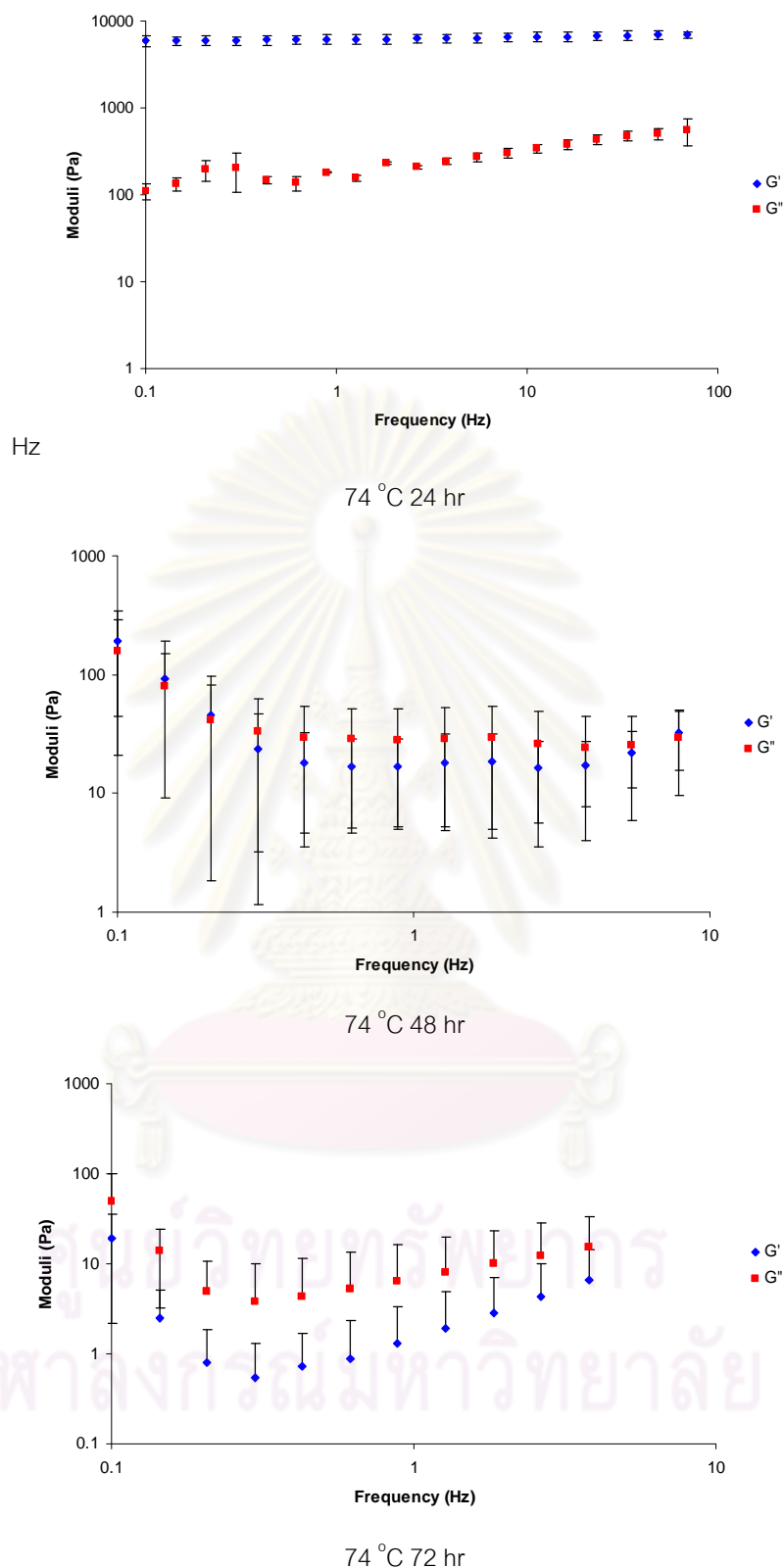
78 °C 72 hr

รูปที่ ๑.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C

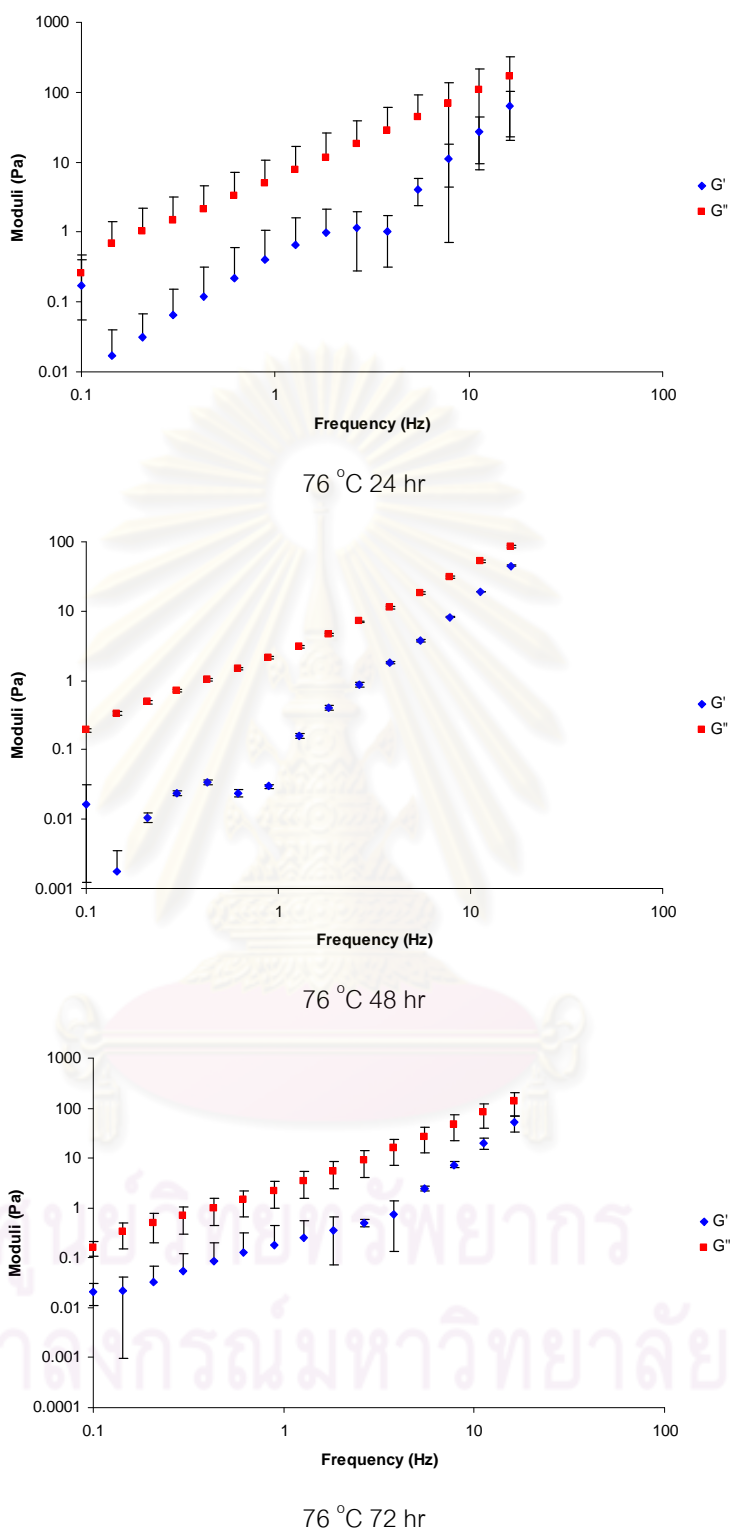


72 °C 72 hr

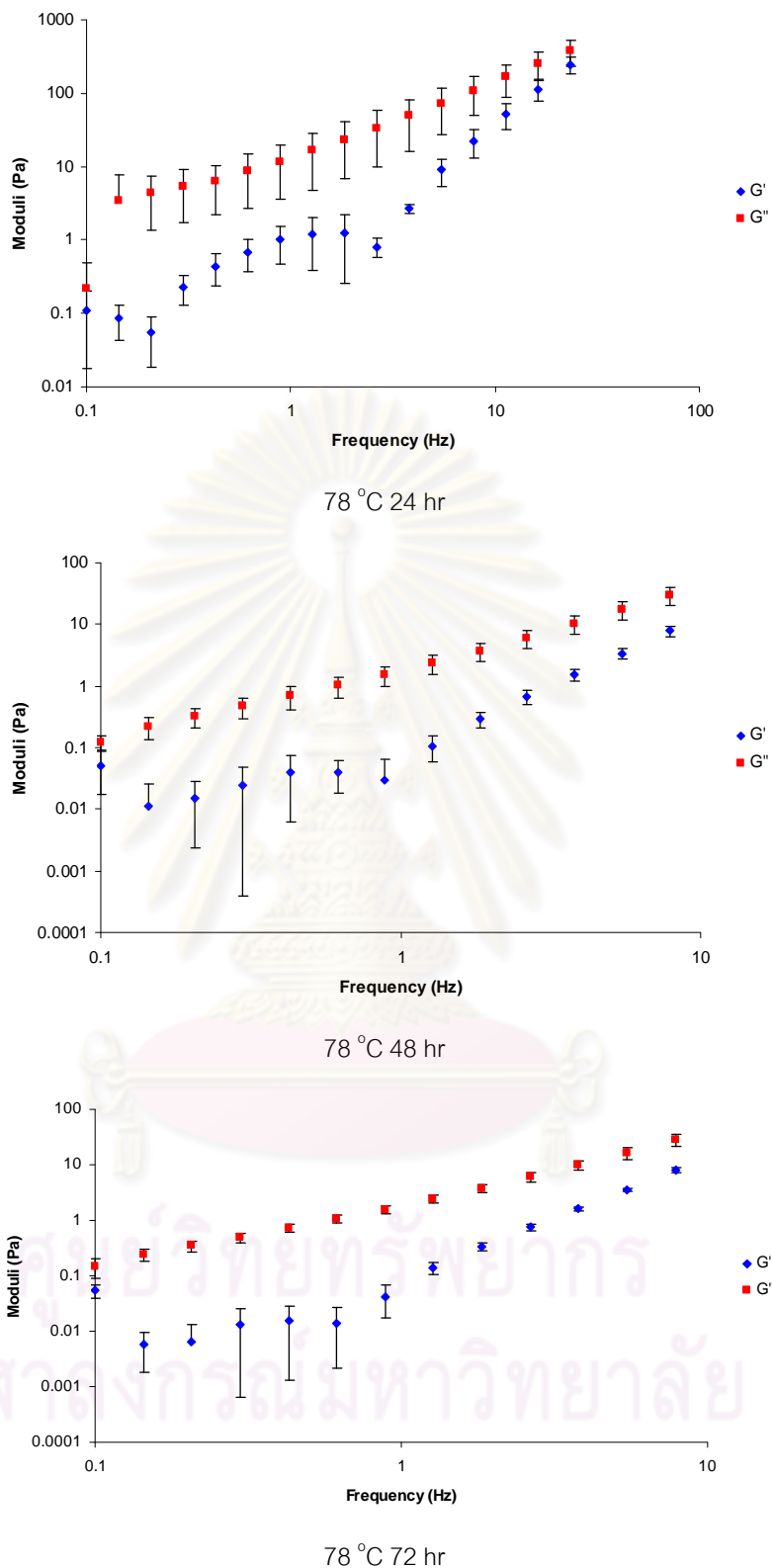
รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 72 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz



รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 74 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 76 °C 24 hr.



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรแล้วที่ 76 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 76 °C 24 hr.



รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชดัดแปลงแล้วที่ 78 °C เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz

ภาคผนวก ค

รายละเอียดข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ยังไม่ได้ผ่านการดัดแปร

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 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 24 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.56	15.87	414	23.3
9.82	9.00	659	37.1
10.12	8.74	672	37.8
11.12	7.95	775	43.6
11.46	7.72	786	44.2
11.72	7.54	762	42.8
12.14	7.28	784	44.1
12.49	7.08	775	43.6
15.02	5.89	1,486	83.6
15.26	5.80	1,476	83.0
16.88	5.25	1,683	94.6
17.19	5.16	1,778	100.0
17.42	5.09	1,734	97.5
17.87	4.96	1,618	91.0
18.24	4.86	1,537	86.5
20.08	4.42	1,060	59.6
20.94	4.24	1,025	57.7
21.50	4.13	1,034	58.2
22.85	3.89	1,384	77.9
23.05	3.85	1,391	78.3
26.44	3.37	783	44.0
28.46	3.13	684	38.5
29.08	3.07	716	40.3
29.47	3.03	722	40.6
30.02	2.97	729	41.0
33.13	2.70	716	40.3
38.36	2.34	590	33.2

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.54	15.9410	401	22.6
5.69	15.5249	403	22.7
10.12	8.7336	686	38.6
11.39	7.7658	803	45.2
15.15	5.8436	1,541	86.8
15.29	5.7906	1,517	85.4
17.10	5.1802	1,777	100.0
17.25	5.1372	1,774	99.8
17.40	5.0933	1,752	98.6
17.96	4.9340	1,638	92.2
18.11	4.8935	1,627	91.6
19.64	4.5166	1,093	61.5
23.11	3.8459	1,382	77.8
26.16	3.4032	764	43.0
30.68	2.9120	710	40.0
33.98	2.6364	704	39.6
38.03	2.3479	567	31.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 72 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.69	15.5235	398	22.9
10.08	8.7669	641	36.9
11.34	7.7971	776	44.6
11.73	7.5370	748	43.0
13.87	6.3779	933	53.7
15.13	5.8518	1,480	85.1
17.04	5.1979	1,739	100.0
17.31	5.1201	1,731	99.5
17.59	5.0372	1,598	91.9
17.85	4.9646	1,582	90.9
18.04	4.9135	1,552	89.2
22.90	3.8809	1,331	76.5
23.05	3.8548	1,350	77.6
23.18	3.8334	1,370	78.7
25.77	3.4540	767	44.1
26.11	3.4100	752	43.2
26.72	3.3332	747	43.0
30.32	2.9456	719	41.4
31.33	2.8527	696	40.0
32.77	2.7303	708	40.7
33.56	2.6682	714	41.1
38.22	2.3531	570	32.7

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72°C เวลา 24 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.63	15.6890	402	22.9
10.03	8.8108	655	37.3
11.51	7.6832	774	44.1
15.14	5.8458	1,489	84.9
16.03	5.5237	1,183	67.4
17.21	5.1494	1,754	100.0
17.59	5.0379	1,632	93.0
17.90	4.9522	1,623	92.5
18.08	4.9014	1,609	91.7
19.92	4.4536	1,070	61.0
20.23	4.3863	1,059	60.4
22.95	3.8718	1,387	79.0
23.33	3.8094	1,356	77.3
26.19	3.3994	771	43.9
26.47	3.3651	764	43.6
30.46	2.9319	743	42.4
33.43	2.6785	700	39.9
38.33	2.3465	575	32.8

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.43	16.2553	365	20.7
10.06	8.7824	639	36.3
10.44	8.4689	664	37.7
11.36	7.7824	780	44.3
15.20	5.8251	1,515	86.1
16.84	5.2597	1,648	93.7
17.10	5.1824	1,758	99.9
17.28	5.1279	1,759	100.0
17.79	4.9831	1,637	93.1
19.50	4.5476	1,110	63.1
20.01	4.4333	1,066	60.6
21.28	4.1714	1,035	58.8
22.62	3.9279	1,292	73.4
22.94	3.8739	1,373	78.1
23.20	3.8301	1,376	78.2
26.34	3.3815	761	43.3
27.61	3.2281	682	38.8
30.52	2.9266	730	41.5
33.47	2.6754	712	40.5
35.62	2.5182	618	35.2
37.05	2.4243	586	33.3
38.35	2.3455	608	34.5

ตารางที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 72 °C เวลา 72 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.63	15.6760	444	25.2
7.15	12.3454	439	24.9
10.24	8.6295	699	39.6
11.35	7.7902	793	45.0
11.53	7.6710	799	45.3
15.15	5.8432	1,527	86.6
17.12	5.1747	1,751	99.3
17.25	5.1355	1,763	100.0
17.89	4.9546	1,623	92.1
20.03	4.4285	1,071	60.8
22.53	3.9441	1,251	70.9
22.85	3.8890	1,368	77.6
22.99	3.8650	1,381	78.3
23.26	3.8212	1,363	77.3
23.69	3.7526	1,266	71.8
26.34	3.3813	761	43.2
30.84	2.8969	709	40.2
33.20	2.6961	699	39.6
38.27	2.3499	547	31.0

ตารางที่ ค.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เวลา 24 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.32	16.6111	379	20.2
5.75	15.3681	395	21.1
10.08	8.7653	667	35.6
11.32	7.8098	811	43.3
13.84	6.3932	977	52.2
15.09	5.8657	1,586	84.7
15.24	5.8083	1,583	84.5
17.04	5.1986	1,772	94.6
17.19	5.1547	1,854	99.0
17.29	5.1253	1,873	100.0
18.06	4.9075	1,717	91.7
20.08	4.4194	1,128	60.2
22.64	3.9239	1,323	70.6
23.05	3.8558	1,433	76.5
23.25	3.8226	1,397	74.6
23.45	3.7905	1,335	71.3
23.67	3.7564	1,291	69.0
26.45	3.3671	770	41.1
26.73	3.3325	739	39.5
29.17	3.0589	704	37.6
30.31	2.9462	743	39.7
33.48	2.6743	712	38.0
38.40	2.3424	596	31.8

ตารางที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 74 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.58	15.8281	325	19.8
7.56	11.6890	366	22.3
10.27	8.6080	585	35.6
11.34	7.7962	703	42.8
15.21	5.8197	1,424	86.7
17.05	5.1960	1,629	99.2
17.19	5.1529	1,627	99.0
17.35	5.1079	1,643	100.0
17.82	4.9747	1,512	92.0
17.99	4.9270	1,496	91.1
18.20	4.8697	1,470	89.5
20.01	4.4339	987	60.1
21.27	4.1738	926	56.4
23.03	3.8587	1,248	76.0
23.30	3.8154	1,256	76.5
25.07	3.5487	764	46.5
26.55	3.3546	692	42.2
28.67	3.1117	631	38.4
30.18	2.9588	649	39.5
30.51	2.9277	651	39.6
32.90	2.7200	646	39.3
37.84	2.3757	549	33.4
38.31	2.3476	530	32.3

ตารางที่ ค.10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ
74 °C เวลา 72 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
6.04	14.6119	379	21.8
9.82	9.0033	634	36.4
11.32	7.8090	759	43.6
15.15	5.8430	1,483	85.2
17.10	5.1800	1,741	100.0
17.95	4.9380	1,601	92.0
20.04	4.4275	1,034	59.4
22.51	3.9475	1,221	70.1
22.82	3.8935	1,371	78.8
22.96	3.8703	1,374	78.9
23.79	3.7368	1,225	70.4
26.54	3.3556	760	43.7
27.12	3.2855	712	40.9
30.22	2.9549	704	40.4
33.90	2.6419	706	40.6
38.34	2.3456	569	32.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.11 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ
76 °C เวลา 24 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.73	15.4232	408	23.1
10.03	8.8117	666	37.8
10.34	8.5470	673	38.2
11.35	7.7923	789	44.8
15.04	5.8850	1,520	86.2
15.32	5.7802	1,468	83.3
17.12	5.1759	1,762	100.0
17.25	5.1363	1,728	98.0
17.91	4.9484	1,650	93.6
19.65	4.5132	1,081	61.3
22.94	3.8742	1,360	77.2
23.11	3.8462	1,376	78.1
25.96	3.4295	770	43.7
26.56	3.3531	743	42.1
30.47	2.9315	709	40.2
33.45	2.6768	674	38.2
38.59	2.3312	542	30.7
39.45	2.2821	548	31.1

ตารางที่ ค.12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 76 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.47	16.1553	358	20.0
10.06	8.7861	616	34.4
11.40	7.7584	751	41.9
15.17	5.8356	1,529	85.3
17.04	5.1982	1,769	98.8
17.28	5.1289	1,791	100.0
17.61	5.0311	1,679	93.7
17.84	4.9672	1,646	91.9
18.04	4.9139	1,648	92.0
19.67	4.5096	1,139	63.6
22.80	3.8970	1,337	74.6
22.97	3.8685	1,342	74.9
23.37	3.8034	1,309	73.1
23.95	3.7128	1,160	64.8
26.25	3.3923	742	41.4
30.68	2.9119	704	39.3
33.41	2.6798	685	38.2
38.01	2.3654	560	31.3

ตารางที่ ค.13 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ
70 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.81	15.2116	353	20.8
10.29	8.5915	619	36.5
11.64	7.5976	745	43.9
14.95	5.9211	1,427	84.1
15.15	5.8423	1,439	84.9
17.03	5.2013	1,679	99.0
17.18	5.1580	1,696	100.0
17.63	5.0273	1,610	94.9
18.04	4.9143	1,596	94.1
19.89	4.4597	1,123	66.2
22.88	3.8840	1,289	76.0
26.26	3.3916	740	43.7
30.11	2.9658	685	40.4
33.56	2.6681	645	38.0
37.87	2.3741	543	32.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.14 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เวลา 24 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
9.40	9.4042	584	36.8
11.25	7.8587	756	47.7
12.05	7.3382	781	49.3
14.93	5.9308	1,311	82.7
15.17	5.8374	1,383	87.3
15.27	5.7978	1,377	86.9
17.03	5.2029	1,585	100.0
17.24	5.1401	1,566	98.8
17.95	4.9377	1,501	94.7
19.96	4.4438	1,119	70.6
22.41	3.9633	1,169	73.8
22.66	3.9212	1,232	77.8
23.09	3.8496	1,246	78.6
23.31	3.8130	1,210	76.3
23.72	3.7485	1,115	70.3
26.62	3.3458	733	46.3
28.78	3.0998	645	40.7
30.07	2.9691	670	42.3
33.64	2.6623	637	40.2
37.07	2.4232	547	34.5

ตารางที่ ค.15 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เวลา 48 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.75	15.3613	413	24.8
10.16	8.7022	654	39.2
11.07	7.9828	765	45.8
11.36	7.7799	788	47.2
14.98	5.9094	1,396	83.6
15.22	5.8157	1,401	83.9
17.29	5.1250	1,669	100.0
17.89	4.9540	1,525	91.4
19.57	4.5331	1,118	67.0
19.94	4.4487	1,097	65.7
22.17	4.0063	1,123	67.3
22.56	3.9377	1,214	72.7
22.88	3.8836	1,274	76.3
23.03	3.8591	1,277	76.5
23.26	3.8218	1,285	77.0
23.46	3.7884	1,225	73.4
24.53	3.6256	931	55.8
26.47	3.3645	782	46.9
29.17	3.0590	673	40.3
30.39	2.9390	682	40.9
33.73	2.6555	666	39.9
38.37	2.3442	547	32.8

ตารางที่ ค.16 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 78 °C เวลา 72 ชั่วโมง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.70	15.4819	378	21.6
10.04	8.8051	638	36.4
11.42	7.7448	781	44.5
11.99	7.3741	761	43.4
15.09	5.8659	1,474	84.1
15.31	5.7818	1,443	82.3
17.10	5.1817	1,753	100.0
17.27	5.1317	1,733	98.9
18.00	4.9239	1,622	92.5
18.24	4.8604	1,538	87.8
19.11	4.6410	1,171	66.8
19.96	4.4457	1,110	63.3
22.74	3.9078	1,315	75.0
23.00	3.8645	1,389	79.2
23.18	3.8336	1,346	76.8
23.36	3.8043	1,325	75.6
25.70	3.4635	770	43.9
26.06	3.4166	747	42.6
31.30	2.8554	703	40.1
33.52	2.6715	684	39.0
38.39	2.3431	560	32.0

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.4)

SOV	df	MS					
		ความชื้น	คาร์โบไฮเดรต	เส้นใยหยาบ	ไขมัน	เถ้า	โปรตีน
เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	9.20*	1.45*	0.23*	0.03*	0.09*	0.24*
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	1.46*	0.59*	0.07*	0.02*	0.15*	0.12*
AXB	8	3.59*	0.27	0.46*	0.00*	0.16*	0.07*
error	30	0.62	0.17	1.67×10^{-5}	9.23×10^{-6}	0.00	0.00

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแอมิโลสถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.5)

SOV	Df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	59.64*
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	198.79*
AXB	8	213.44*
error	30	15.41

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีของถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (สำหรับ ตารางที่ 4.6)

SOV	df	MS		
		L*	a*	b*
เวลาที่ใช้ตัดแปร (A)	2	0.29	0.03	0.004
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปร (B)	4	0.44	0.30	0.42
AXB	8	0.45	0.002	0.001
error	30	0.14	0.016	0.155

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าขนาดและการกระจายขนาดของสตาร์ช ถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.7)

SOV	Df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปร (A)	2	2568.82*
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปร (B)	4	228.88*
AXB	8	300.63*
error	30	0.04

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ช ถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว

SOV	Df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปร (A)	2	0.06
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปร (B)	4	0.16
AXB	8	0.01
error	30	0.31

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ๖.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของถั่วที่อุณหภูมิ 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.8)

SOV	df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปร (A)	2	0.00
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปร (B)	4	0.00
AXB	8	0.00
error	30	0.00

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ๖.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายที่อุณหภูมิ 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.9)

SOV	df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปร (A)	2	12.15
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปร (B)	4	1.01
AXB	8	3.65
error	30	7.49

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ ที่ผ่านการดัดแปรแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.10 - 4.13)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
Peak viscosity	เวลาที่ใช้ดัดแปร (A)	2	489295.60*
	อุณหภูมิที่ใช้ดัดแปร (B)	4	1865812.97*
	AXB	8	80413.76*
	error	15	2677.17
Breakdown	เวลาที่ใช้ดัดแปร (A)	2	6320.70*
	อุณหภูมิที่ใช้ดัดแปร (B)	4	42046.45*
	AXB	8	3147.20*
	error	15	505.17
Final viscosity	เวลาที่ใช้ดัดแปร (A)	2	1054847.50*
	อุณหภูมิที่ใช้ดัดแปร (B)	4	4084882.38*
	AXB	8	127833.71*
	error	15	4670.43
Set back	เวลาที่ใช้ดัดแปร (A)	2	134651.23*
	อุณหภูมิที่ใช้ดัดแปร (B)	4	700809.25*
	AXB	8	9945.65*
	error	15	531.20
Pasting temperature	เวลาที่ใช้ดัดแปร (A)	2	4.999*
	อุณหภูมิที่ใช้ดัดแปร (B)	4	30.141*
	AXB	8	0.166
	error	15	0.105

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.14 - 4.17)

ลักษณะทดสอบ	SOV	df	MS
Onset temperature	เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	3.61*
	อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	14.80*
	AXB	8	0.82*
	error	15	0.12
Peak temperature	เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	2.35*
	อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	27.27*
	AXB	8	0.26*
	error	15	0.11
Conclusion temperature	เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	2.01*
	อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	8.66*
	AXB	8	0.23*
	error	15	0.17
Enthalpy of gelatinization	เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	0.99*
	อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	48.37*
	AXB	8	2.57*
	error	15	1.02

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถทนต่อการย่อยของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการตัดแปรรูปแล้ว (สำหรับตารางที่ 4.18)

SOV	df	MS
เวลาที่ใช้ตัดแปรรูป (A)	2	97.04*
อุณหภูมิที่ใช้ตัดแปรรูป (B)	4	13.40*
AXB	8	31.39*
error	30	0.50

* หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรพีพร ประสาท เกิดวันที่ 29 เมษายน 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551

ผลงานวิจัย

เสนอผลงานเรื่อง ผลของการอบอ่อนต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ *Cajanus cajan* (L.) (Effects of annealing on chemical, physical and functional properties of pigeon pea *Cajanus cajan* (L.) starch) ในการประชุมทางวิชาการ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 14 -15 มีนาคม 2554 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย