

ผลของการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้าม
ต่อคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว

โดย
นายณัฐ ไซตจิรัฐติกาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF MODIFICATIONS BY ACID-THINNING OXIDATION AND
CROSS-LINKING ON THE PROPERTIES OF MUNGBEAN STARCH

By

Natt Chotjiratthitikan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Food Technology

Graduate School

SILAPAKORN UNIVERSITY

2007

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติวิทยานิพนธ์เรื่อง “ผลของการดัดแปรโดยการ
ย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว” เสนอโดย นายณัฐ
โชติจิรัฐติกาล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ชินะดังกูร)

คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา เพ็ญโรจน์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร)

...../...../.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยงค์ เตชะไพโรจน์)

...../...../.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

...../...../.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต)

...../...../.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา เพ็ญโรจน์)

...../...../.....

46403203 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : สตาร์ชถั่วเขียว / การดัดแปร / การย่อยด้วยกรด / ออกซิเดชัน / การเชื่อมข้าม

นักวิจัย : ชาติจิรัฐติกาล : ผลของการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย, ผศ.ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต และ ผศ.ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์. 159 หน้า.

แม้ว่าสตาร์ชถั่วเขียวจะมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหาร แต่ยังคงขาดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ จึงได้ทำการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวด้วยวิธีการทางเคมีที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ การย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้าม แล้วนำสตาร์ชดัดแปรที่ได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีการทางเคมีดังกล่าว จะพบร้อยละการบวมบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช แต่ขนาด และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง สตาร์ชถั่วเขียวยังคงมีรูปร่างหลายแบบตั้งแต่ทรงกลม กลมรี ไปจนถึงรูปคล้ายไต ค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีแดง (a^*) จะลดลงหลังการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด และออกซิเดชัน แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเชื่อมข้าม ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มหลังการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด และเชื่อมข้าม แต่จะลดลงเมื่อผ่านวิธีออกซิเดชัน การย่อยด้วยกรด และออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีนร้อยละ 1.0 และ 1.5 ส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น ส่วนการเชื่อมข้ามให้ผลในทางตรงข้าม ลักษณะโครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชถั่วเขียวเป็นแบบ A การย่อยด้วยกรด และออกซิเดชัน ทำให้สตาร์ชมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลการตรวจสอบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer พบว่าค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อระดับของการดัดแปรเพิ่มขึ้น แต่ค่าเบรกดาว์น และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์คุณสมบัติในการเกิดเจลลิตีในเซชันโดยการให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่าการดัดแปรทั้ง 3 วิธีส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้น แต่ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันมีแนวโน้มที่จะลดลง การย่อยด้วยกรด และออกซิเดชันมีแนวโน้มทำให้ค่าอุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายเพิ่มขึ้น ในขณะที่พลังงาน เอนทัลปีในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชที่ผ่านการย่อยด้วยกรดเพิ่มขึ้น กำลังการพองตัวของสตาร์ชที่ดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดและการเชื่อมข้ามมีแนวโน้มที่จะลดลง ส่วนค่าการละลายมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดและออกซิเดชัน แต่จะลดลงเมื่อสตาร์ชผ่านการเชื่อมข้าม การแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้นหลังผ่านการดัดแปร ในขณะที่ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการย่อยด้วยกรดต่ำและมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้น

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

46403203 : MAJOR ; FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD : MUNGBEAN STARCH / MODIFICATION / ACID-THINNING / OXIDATION / CROSS-LINKING

NATT CHOTJIRATTHITIKAN : EFFECT OF MODIFICATIONS BY ACID-THINNING OXIDATION AND CROSS-LINKING ON THE PROPERTIES OF MUNGBEAN STARCH,

THESIS ADVISORS : ASST. PROF. EKAPHAN KEOWMANEECHAI, Ph.D., ASST. PROF. SUCHED SAMUHASANEETOO, Ph.D., AND ASST. PROF. PARINDA PENROJ, Ph.D. 159 pp.

Although mungbean starch is important to the food industry, there is a lack of research studies on modifications of the starch to improve its properties for appropriate application. Therefore, in this study, mungbean starch was modified by chemical methods, including acid-thinning, oxidation and cross-linking. It was found that the modifications caused the starch granules to be hydrolyzed at their surfaces, but did not alter the granule morphology. Starch granules were round, oval and kidney-like in shape with various sizes. The whiteness (L^*) tended to be increased. The redness (a^*) was reduced after acid-thinning and oxidation, but increased following cross-linking. The yellowness (b^*) was increased after acid-thinning and cross-linking, but reduced following oxidation. Amylose content was increased after acid-thinning and oxidation at 1.0 and 1.5 % active chlorine, whereas the content was reduced after cross-linking. The X-ray diffraction pattern of native mungbean starch was A type. The patterns of the modified derivatives were similar to the native. Acid-thinning and oxidation had slightly higher degrees of crystallinity. Rapid Visco Analyzer revealed that pasting characteristics of starch, such as peak viscosity tended to be decreased, while breakdown and pasting temperature tended to be increased. The analysis of thermal properties by Differential Scanning Calorimeter showed that the modifications increased onset temperature, but tended to decrease gelatinization temperature ranges. Acid-thinning and oxidation tended to increase peak and end temperature of gelatinization. Enthalpy of gelatinization was increased after acid-thinning. Swelling power tended to be decreased after acid-thinning and cross-linking. Solubility tended to be increased after acid-thinning and oxidation, but reduced following cross-linking. Syneresis increased after the modifications. Gel strength increased at a low degree of acid-thinning and decreased with increased degree of the modifications.

Department of Food Technology Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2007

Student's signature.....

Thesis Advisors' signature 1. 2. 3.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และเสนอแนะแนวทางในการทำงานวิจัยตลอดมา ทั้งยังช่วยตรวจทานแก้ไขการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา เพ็ญโรจน์ อาจารย์ ดร.ดวงใจ ธีรธรรมถาวร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำปรึกษา และให้แนวความคิดที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่กรุณาอบรม และให้ความรู้ระหว่างการศึกษ ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่อำนวยความสะดวกทั้งในด้านงานเอกสาร สถานที่ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง รวมถึงให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการทดลองในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโททุกท่านด้วยความจริงใจที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงเป็นอย่างดี

สุดท้ายของกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอบรมสั่งสอน สนับสนุนการศึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และคอยเป็นกำลังใจในการศึกษาตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ตม
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ท
บทที่	

1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของการศึกษา	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ถั่วเขียว.....	4
องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว.....	4
คุณสมบัติทางเคมีของถั่วเขียว.....	5
คุณลักษณะพื้นฐานของสตาร์ช.....	10
ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช (starch granule)	10
โครงสร้างและองค์ประกอบภายในเม็ดสตาร์ช.....	10
โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช.....	13
ความหนืด.....	16
การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)	19
การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation).....	20
การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส	21
การพองตัวและการละลาย.....	23
การดัดแปรสตาร์ช	24

การแบ่งประเภทของสตาร์ชดัดแปร	25
การดัดแปรทางเคมี (Chemical Modification)	25
การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)	26
การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)	26
การดัดแปรทางเคมี	27
การดัดแปรสตาร์ชโดยการย่อยด้วยกรด (Acid-thinning)	27
ผลของการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดต่อคุณสมบัติของสตาร์ช	28
ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช	28
ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก	29
ผลต่อความหนืด	30
ผลต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน	31
ผลต่อการก่้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช	32
คุณสมบัติและการนำไปใช้	33
การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation)	34
ผลของการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันต่อคุณสมบัติของสตาร์ช	36
ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช	36
ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก	37
ผลต่อความหนืด	37
ผลต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน	37
ผลต่อการก่้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช	38
คุณสมบัติและการนำไปใช้	38
การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการเชื่อมข้าม (Cross-linking)	39
ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช	42
ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช	42
ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก	42
ผลต่อความหนืด	42
ผลต่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน	43

บทที่	หน้า
ผลต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช.....	44
คุณสมบัติและการนำไปใช้	45
3 วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย	47
วัตถุดิบ.....	47
เครื่องมือและอุปกรณ์.....	47
สารเคมี	48
สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีการย่อยด้วยกรด	48
สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีออกซิเดชัน	49
สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีการเชื่อมข้าม	49
สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส	49
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดภายหลังถูกย่อยด้วย	
เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส.....	49
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์แคติวิตีของเอนไซม์	49
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์.....	50
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด.....	50
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส.....	50
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอนิล และหมู่คาร์บอกซิล	51
วิธีดำเนินการวิจัย	51
การผลิตสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปร	51
การเตรียมสตาร์ชดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	51
การเตรียมสตาร์ชดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน.....	52
การเตรียมสตาร์ชดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้าม	52
การตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว	52
การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	53
4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	55
การดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยการย่อยด้วยกรด.....	55
ผลของการดัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชถั่วเขียว	55
ผลของการดัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว.....	57

ผลของการตัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว	58
ผลของการตัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว	60
ผลของการตัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช	61
ผลของการตัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ของสตาร์ชถั่วเขียว	65
ผลของการตัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว	68
ผลของการตัดแปรต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	72
ผลของการตัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	73
ผลของการตัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว	74
การตัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวด้วยวิธีออกซิเดชัน	76
ผลของการตัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชถั่วเขียว	76
ผลของการตัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว	79
ผลของการตัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว	80
ผลของการตัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว	81
ผลของการตัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว ...	82
ผลของการตัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ของสตาร์ชถั่วเขียว	85
ผลของการตัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว	88
ผลของการตัดแปรต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	90
ผลของการตัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	91
ผลของการตัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว	92
ผลของการตัดแปรต่อหุ้มน้ำคาร์บอนิลและหุ้มน้ำคาร์บอกซิลของสตาร์ชถั่วเขียว	93
การตัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยการเชื่อมข้าม	94
ผลของการตัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชถั่วเขียว	94
ผลของการตัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว	97
ผลของการตัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว	97
ผลของการตัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว	98

บทที่	หน้า
ผลของการดัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว..	100
ผลของการดัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ของสตาร์ชถั่วเขียว.....	103
ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว.....	106
ผลของการดัดแปรต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	109
ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียว	110
ผลของการดัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว.....	111
ผลของการดัดแปรต่อปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชถั่วเขียว.....	112
5 สรุปผลการทดลอง	114
บรรณานุกรม	117
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	127
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง.....	148
ประวัติผู้วิจัย	159

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว แบ่งถั่วเขียว เปรียบเทียบกับถั่วเหลือง.....	5
2	องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว 20 พันธุ์.....	6
3	ผลผลิตและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชและโปรตีนที่สกัดแยกออกมาจาก ถั่วเขียว.....	7
4	ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	58
5	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	64
6	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการ ย่อยด้วยกรด.....	67
7	ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยวิธี ออกซิเดชัน.....	79
8	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	84
9	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธี ออกซิเดชัน.....	87
10	ค่าร้อยละหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	94
11	ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....	97
12	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....	102
13	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการ เชื่อมข้าม.....	105
14	การวิเคราะห์แอสติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส.....	136
15	การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส.....	137

16	การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร.....	140
17	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	148
18	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	148
19	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	149
20	ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	149
21	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	150
22	ค่าความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	150
23	ปริมาณความชื้นของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....	151
24	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	151
25	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	152
26	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	152
27	ค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	153
28	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	153
29	ค่าความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....	154

ตารางที่	หน้า
30	ปริมาณความชื้นของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธี ออกซิเดชัน.....154
31	ปริมาณอะไมโลสของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....155
32	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....155
33	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....156
34	ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....156
35	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการ ดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....157
36	ค่าความแข็งแรงของเจลของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....157
37	ปริมาณฟอสฟอรัสของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....158
38	ปริมาณความชื้นของสสารที่แก้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....158

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การใช้ประโยชน์จากถั่วเขียวในประเทศไทย.....	8
2	การแปรรูปถั่วเขียว และผลิตภัณฑ์.....	9
3	โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะเป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางแบบกิ่งผลึก.....	11
4	โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วย (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพคติน ซึ่งอยู่ร่วมกับไขมันทั้งภายนอก และภายในโมเลกุล.....	11
5	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส.....	12
6	ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนผลึก และส่วนอสัณฐาน ซึ่งมีความกว้าง ของชั้นอยู่ในช่วง 5-6 และ 2-5 นาโนเมตร ตามลำดับ.....	13
7	รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกแบบ A, B และ C จากตัวอย่างแป้งข้าว เหนียวแป้งมันฝรั่ง และแป้งเมล็ดบัว ตามลำดับ.....	15
8	รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกแบบ A, B และ V.....	15
9	โครงสร้างผลึกแบบ A และ B ของอะไมโลส.....	16
10	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งหรือสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA).....	18
11	ปฏิกิริยาการเกิด dialdehyde starch และ dicarboxyl starch.....	36
12	การทำปฏิกิริยาของสตาร์ชกับสารครอสลิง.....	41
13	โครงสร้างสตาร์ชครอสลิง.....	41
14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏ ทางสัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการ ย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....	56
15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏ ทางสัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการ ย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....	57
16	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การย่อยด้วยกรด.....	60

ภาพที่	หน้า
17	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปร โดยการย่อยด้วยกรด.....61
18	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0, 0.5 และ 1.0%.....63
19	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว ที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....66
20	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียว ที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....69
21	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วย กรด อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....70
22	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วย กรด อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....71
23	ค่ากำลังการพองและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....73
24	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการ ดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด.....74
25	ความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การย่อยด้วยกรด.....76

ภาพที่	หน้า
26	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการ ดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ..... 78
27	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธี ออกซิเดชัน.....81
28	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปร โดยวิธีออกซิเดชัน.....82
29	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน.....83
30	การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว ที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน.....86
31	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียว ที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน.....88
32	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ..... 89
33	ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....91
34	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน.....92
35	ความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีออกซิเดชัน.....93
36	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....95

ภาพที่	หน้า
37	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....96
38	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....98
39	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปร โดยการเชื่อมข้าม.....99
40	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ช ถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....101
41	การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....104
42	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....106
43	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....107
44	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ ปรากฏทางสัณฐานภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ.....108
45	ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร และผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....110
46	ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการ ดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....111
47	ความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการ ดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม.....112

ภาพที่	หน้า
48	ปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดย การเชื่อมข้าม.....113
49	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร.....130
50	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าแอสติวิตีของ เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร.....138
51	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด.....141
52	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร สำหรับ เทียบค่าปริมาณฟอสเฟต.....147

คำอธิบายสัญลักษณ์

Native starch	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร
AT-40-CT	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0% เป็นตัวอย่างควบคุม (control)
AT-40-0.5	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.5%
AT-40-1.0	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0%
AT-60-CT	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0% เป็นตัวอย่างควบคุม (control)
AT-60-0.5	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.5%
AT-60-1.0	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0%
OXI-CT	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 0.0% เป็นตัวอย่างควบคุม (control)
OXI-0.5	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 0.5%
OXI-1.0	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 1.0%
OXI-1.5	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 1.5%
OXI-2.0	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 2.0%
CL-CT	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามที่ความเข้มข้นของโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต 0.0% เป็นตัวอย่างควบคุม (control)
CL-5	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามที่ความเข้มข้นของโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต 5.0%
CL-10	= สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามที่ความเข้มข้นของโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต 10.0%

CL-15 = สตาร์ชกั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามที่ความเข้มข้นของโซเดียม
ไตรเมตาฟอสเฟต 15.0%

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สตาร์ชมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหาร โดยสตาร์ชจะมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) เกี่ยวกับเนื้อสัมผัส ความข้นหนืด ความคงตัวและความสะดวกในการแปรรูปของอาหาร สตาร์ชสามารถผลิตได้จากพืชหลายชนิด เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด มันฝรั่งและถั่วเขียว เป็นต้น ซึ่งสตาร์ชแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสตาร์ชธรรมชาติอาจมีข้อจำกัดหรือข้อด้อยในการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ช่วงการให้ความหนืดแคบ ไม่ทนต่อกรด ความร้อนหรือการกวนในกระบวนการแปรรูป เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงให้สตาร์ชมีคุณสมบัติดีขึ้นตามต้องการ หรือการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เป็นการสร้างส่วนผสมอาหาร (food ingredients) ใหม่ ๆ ให้ผู้ผลิตอาหารมีทางเลือกมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้สตาร์ชชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นสินค้าเกษตรที่ผลิตได้มากในประเทศไทย มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีศักยภาพในการส่งออกมากขึ้น

เนื่องจากถั่วเขียวเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณโปรตีนสูง นอกจากนี้ถั่วเขียวยังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง จึงนิยมนำมาบริโภคทั้งเมล็ด ผลิตเป็นถั่วงอก แบ่งถั่วเขียว สตาร์ชถั่วเขียว และเนื้อเทียม

สตาร์ชถั่วเขียว (mungbean starch) ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวุ้นเส้นและเส้นก๋วยเตี๋ยวแห้ง ซึ่งสตาร์ชที่ใช้เป็นสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร ดังนั้นถ้าดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวให้มีคุณสมบัติบางประการดีขึ้นน่าจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น วุ้นเส้นที่ผลิตจากสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรมีคุณภาพดีขึ้น และอาจช่วยลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรจึงมีศักยภาพในการเป็นส่วนผสมอาหารชนิดใหม่ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวยังมีอยู่น้อยมากจำเป็นต้องมีการวิจัยพื้นฐานถึงผลของการดัดแปรวิธีต่างๆ ต่อคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของสตาร์ชถั่วเขียว

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรสตาเร็กซ์แก้วเขียวโดยการย่อยด้วยกรด (acid-thinning) ออกซิเดชัน (oxidation) และการเชื่อมข้าม (cross-linking) ที่ระดับของการดัดแปรต่างกัน ต่อคุณสมบัติของสตาเร็กซ์แก้วเขียว

3. สมมติฐานของการศึกษา

การดัดแปรสตาเร็กซ์แก้วเขียวโดยการย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้าม ที่ระดับของการดัดแปรต่างกัน จะส่งผลต่อคุณสมบัติของสตาเร็กซ์แก้วเขียวต่างกัน

4. ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาการดัดแปรสตาเร็กซ์แก้วเขียวโดยการย่อยด้วยกรด ที่ความเข้มข้นของกรด ไฮโดรคลอริก 3 ระดับ คือ 0.0, 0.5 และ 1.0% และอุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

1.4.2 ศึกษาการดัดแปรสตาเร็กซ์แก้วเขียวโดยวิธีออกซิเดชัน ที่ความเข้มข้นของแอคทีฟ คลอรีน (active chlorine) 5 ระดับคือ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%

1.4.3 ศึกษาการดัดแปรสตาเร็กซ์แก้วเขียวโดยการเชื่อมข้าม ที่ความเข้มข้นของโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต (sodium trimetaphosphate, STMP) 4 ระดับ คือ 0.0, 5.0, 10.0 และ 15.0%

1.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของสตาเร็กซ์แก้วเขียวดัดแปรที่ได้ ในด้านปริมาณความชื้น ลักษณะปรากฏทางสัณฐาน ค่าสี ปริมาณอะไมโลส พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ การละลายและกำลังการพองตัว ความแข็งแรงของเจลสตาเร็กซ์ ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลาย ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับคุณสมบัติของสตาเร็กซ์แก้วเขียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการทางเคมี

1.5.2 องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาการผลิตสตาร์ชดัดแปรจากถั่วเขียวให้มีคุณสมบัติหลากหลาย นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมและกว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มและศักยภาพในการส่งออก

1.5.3 องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาส่วนผสมอาหาร (food ingredients) ใหม่ ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตอาหารมีทางเลือกในการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์มากขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ถั่วเขียว

เมล็ดถั่วมีมากมายหลายชนิดจึงมีรูปร่างลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันบ้างหรือคล้ายคลึงกันบ้าง แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีโปรตีนสูง กลุ่มที่มีไขมันสูง และกลุ่มปกติที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง ถั่วเขียว (mungbean) จัดอยู่ในกลุ่มถั่วปกติที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง แต่ก็ให้โปรตีนมากกว่าธัญชาติ นิยมนำมาบริโภคทั้งเมล็ด ผลิตเป็นถั่วงอกซึ่งบริโภคเป็นผัก ผลิตเป็นแป้งถั่วเขียว (mungbean flour) และทำวุ้นเส้นรวมทั้งเนื้อเทียมซึ่งผลิตจากจากโปรตีนสกัด

ถั่วเขียวแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะของเมล็ด ดังนี้ 1) ถั่วเขียวธรรมชาติหรือถั่วเขียวเมล็ดด้าน เป็นพันธุ์ที่นิยมใช้ทำถั่วงอก วุ้นเส้น และส่งจำหน่ายยังต่างประเทศ ซึ่งได้ผลผลิตผลิตต่อไร่สูงกว่าพันธุ์อื่น ๆ คือ 300–350 กิโลกรัมต่อไร่ 2) ถั่วทองหรือถั่วเขียวสีทอง เป็นพันธุ์ที่เมล็ดสีเหลืองหรือสีทอง เนื้อข้างในเป็นสีเหลือง นิยมใช้ทำขนมเพราะเนื้อสีเหลืองน่ารับประทาน 3) ถั่วเขียวมันเมล็ดใหญ่ เป็นพันธุ์ที่มีเมล็ดมันและมีขนาดใหญ่กว่าพันธุ์อื่น ได้ผลผลิตต่อไร่สูงอยู่ระหว่าง 250–300 กิโลกรัมต่อไร่ 4) ถั่วเขียวผิวดำ เป็นพันธุ์ที่มีเมล็ดสีดำ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vigna Omungo* มักใช้ทำเป็นอาหารสัตว์หรือถั่วงอกที่นำไปเป็นปุ๋ย เนื่องจากเมื่อนำมาทำอาหารแล้วรสชาติไม่ดี ปัจจุบันนี้ใช้เพาะถั่วงอก เนื่องจากถั่วงอกที่เพาะจากถั่วเขียวผิวดำจะมีความอวบอ้วนน่ารับประทานและคงความสดไว้ได้นานกว่าถั่วงอกที่เพาะจากถั่วเขียวธรรมดา (จินตนา, 2538)

1.1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว

ถั่วเขียวเป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหารสูง (ตารางที่ 1) มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างสูงแต่มีปริมาณไขมันต่ำจึงไม่สามารถใช้เป็นแหล่งของน้ำมันจากพืชได้ องค์ประกอบที่มีมากที่สุดในถั่วเขียวคือคาร์โบไฮเดรต จึงใช้ถั่วเขียวเป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้ง (flour) และสตาร์ช (starch) ได้เป็นอย่างดี (จินตนา, 2538)

อรอนงค์ และคณะ (2531) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว 20 พันธุ์ ดังแสดงใน ตารางที่ 2 พบว่ามีโปรตีนอยู่ระหว่าง 19.0-23.9 % มีเถ้าอยู่ระหว่าง 3.88-4.71% ไขมัน 1.04-1.37% เยื่อใย 0.82-3.24 % และคาร์โบไฮเดรต 59.8-65.7% จึงสามารถแบ่งถั่วเขียวออกเป็นสามกลุ่มคือ กลุ่มที่มีโปรตีนสูงแต่มีคาร์โบไฮเดรตต่ำ กลุ่มที่มีปริมาณโปรตีนและปริมาณคาร์โบไฮเดรตปานกลาง และกลุ่มที่มีปริมาณโปรตีนต่ำและปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง เมื่อทำการสกัดโปรตีนและสตาร์ชจากถั่วเขียวพันธุ์วีซี-2745 วีซี-2742 และวีซี-2755 เทียบกับพันธุ์อุทุมพร 1 แล้วพบว่า ถั่วเขียวทั้ง 3 พันธุ์มีโปรตีนสูงกว่าพันธุ์อุทุมพร 1 แต่ให้สตาร์ชต่ำกว่าพันธุ์อุทุมพร 1 (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว แบ่งถั่วเขียว เปรียบเทียบกับถั่วเหลือง

Nutrients	ถั่วเหลือง	ถั่วเขียว	แบ่งถั่วเขียว
โปรตีน (protein)	40.00	25.98	25.40
ไขมัน (fat)	21.04	1.30	2.52
เถ้า (ash)	4.79	3.80	3.16
เยื่อใย (crude fiber)	5.41	4.79	1.01
คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)	28.76	64.12	58.77
สตาร์ช (starch)	-	51.80	-

ที่มา: Prabhavat (1990)

1.2 คุณสมบัติทางเคมีของถั่วเขียว

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของสตาร์ชและโปรตีนจากถั่วเขียวพันธุ์ วีซี-2745 วีซี-2742 และ วีซี-2755 กับพันธุ์อุทุมพร 1 พบว่าคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียวทั้ง 3 สายพันธุ์ไม่แตกต่างกันและไม่แตกต่างกับสตาร์ชจากถั่วเขียวพันธุ์อุทุมพร 1 (ตารางที่ 3) โดยสตาร์ชที่ได้จะคุดน้ำได้ดีกว่าน้ำมันประมาณ 10-20% และเกิดเจลได้ในส่วนผสมของสตาร์ชต่ำสุดประมาณ 16-20% น้ำหนักต่อปริมาตร คุณสมบัติของโปรตีนของถั่วเขียว 3 สายพันธุ์ไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างจากถั่วเขียวพันธุ์อุทุมพร 1 ซึ่งมีความสามารถในการคุดน้ำและน้ำมันน้อยกว่า แต่ทั้งหมดอยู่ในช่วง 2.88-3.0 % และต้องใช้โปรตีนในส่วนผสมกับน้ำในการเกิดเจลมากกว่าเกือบ 2 เท่า แต่อยู่ในช่วง 8-14%

คุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อการผลิตสตาร์ชและโปรตีนสกัด สำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับน้ำมันและการเกิดเจล เมื่อวัตถุดิบนี้ไปรวมกับส่วนผสมอื่น การนำถั่วเขียวไปแปรรูปและใช้ประโยชน์แสดงไว้ในภาพที่ 1 และ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว 20 พันธุ์

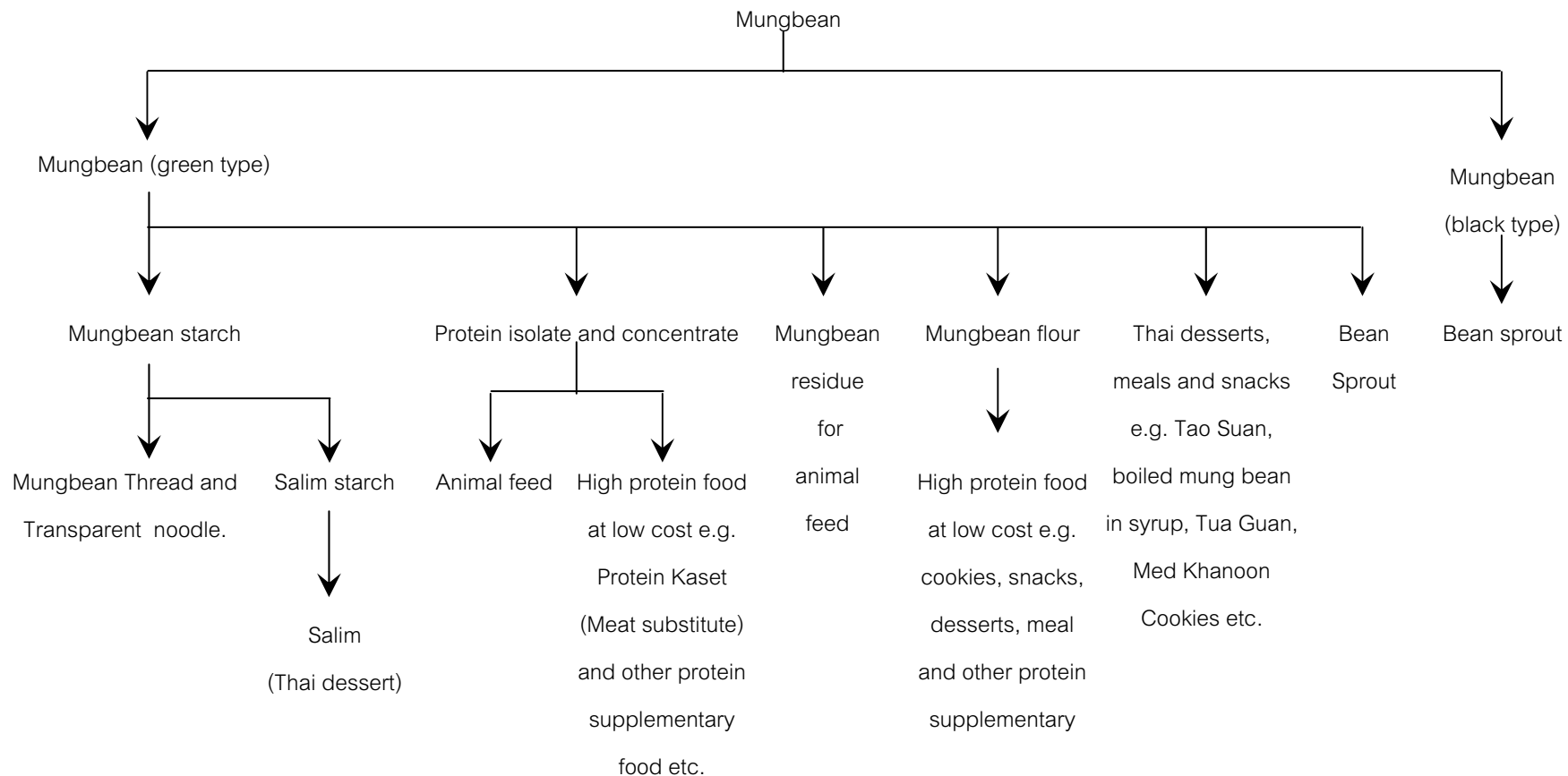
No.	Variety name or Pedigree	Country of Origin	%Moisture	%Composition (as dry basis)				
				Protein	Ash	Fat	Fiber	Carbohydrate
1	MG-50-10A(v) x ML-5	Philippines x India	8.82	19.7	4.40	1.04	1.74	64.3
2	MG-50-10A(v) x PLM-445	Philippines x India	9.33	22.9	4.71	1.12	1.92	60.1
3	MG-50-10A(g) x ML15	Philippines x India	9.33	22.1	4.18	1.17	3.24	60.0
4	MG-50-10A(g) x MC-3	Philippines x India	8.55	23.9	4.22	1.26	2.00	60.1
5	MG-50-10A(g) x CES-1D-21	Philippines x Philippines	9.45	23.4	3.98	1.12	2.25	61.9
6	EG-MG-16 x LM-6	Philippines x India	8.20	19.1	4.51	1.22	2.25	64.7
7	CES-1D-21 x ML-5	Philippines x India	8.72	19.0	4.55	1.22	0.82	65.7
8	PHLV # 18 x ML-3	Philippines x India	8.62	32.5	4.26	1.03	1.54	62.0
9	PHLV # 18 x ML-5	Philippines x India	8.49	22.5	4.51	1.27	1.08	62.1
10	PHLV # 18 x CES-87	Philippines x Philippines	6.98	19.3	4.54	1.03	2.41	65.7
11	MC-3 x LM-6	India x India	9.19	19.9	4.34	1.21	1.71	63.6
12	VC. 2742	AVRDC. Taiwan	8.86	22.5	4.14	1.08	2.89	59.8
13	VC. 2745	AVRDC. Taiwan	8.87	23.3	4.04	1.23	2.83	60.5
14	VC. 2750	AVRDC. Taiwan	7.89	19.7	3.88	1.16	1.44	65.9
15	VC. 2755	AVRDC. Taiwan	8.27	20.9	4.15	1.34	1.22	64.1
16	VC. 2770	AVRDC. Taiwan	8.67	22.8	4.08	1.37	2.31	60.8
17	VC. 2781	AVRDC. Taiwan	8.25	24.2	4.12	1.25	1.49	60.6
18	VC. 2785	AVRDC. Taiwan	7.79	23.2	4.25	1.25	1.85	61.7
19	VC. 2790	AVRDC. Taiwan	8.45	20.9	4.09	1.21	2.65	62.7
20	U-Thong 1	Thailand	9.01	21.7	3.92	1.07	1.73	62.6
Mean Average± SD			8.59± 0.59	21.7± 1.7	4.24± 0.23	1.18± 1.01	1.97± 0.64	62.5± 2.1

ที่มา: อรอนงค์ และคณะ (2531)

ตารางที่ 3 ผลผลิตและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชและโปรตีนที่สกัดแยกออกมาจากถั่วเขียว

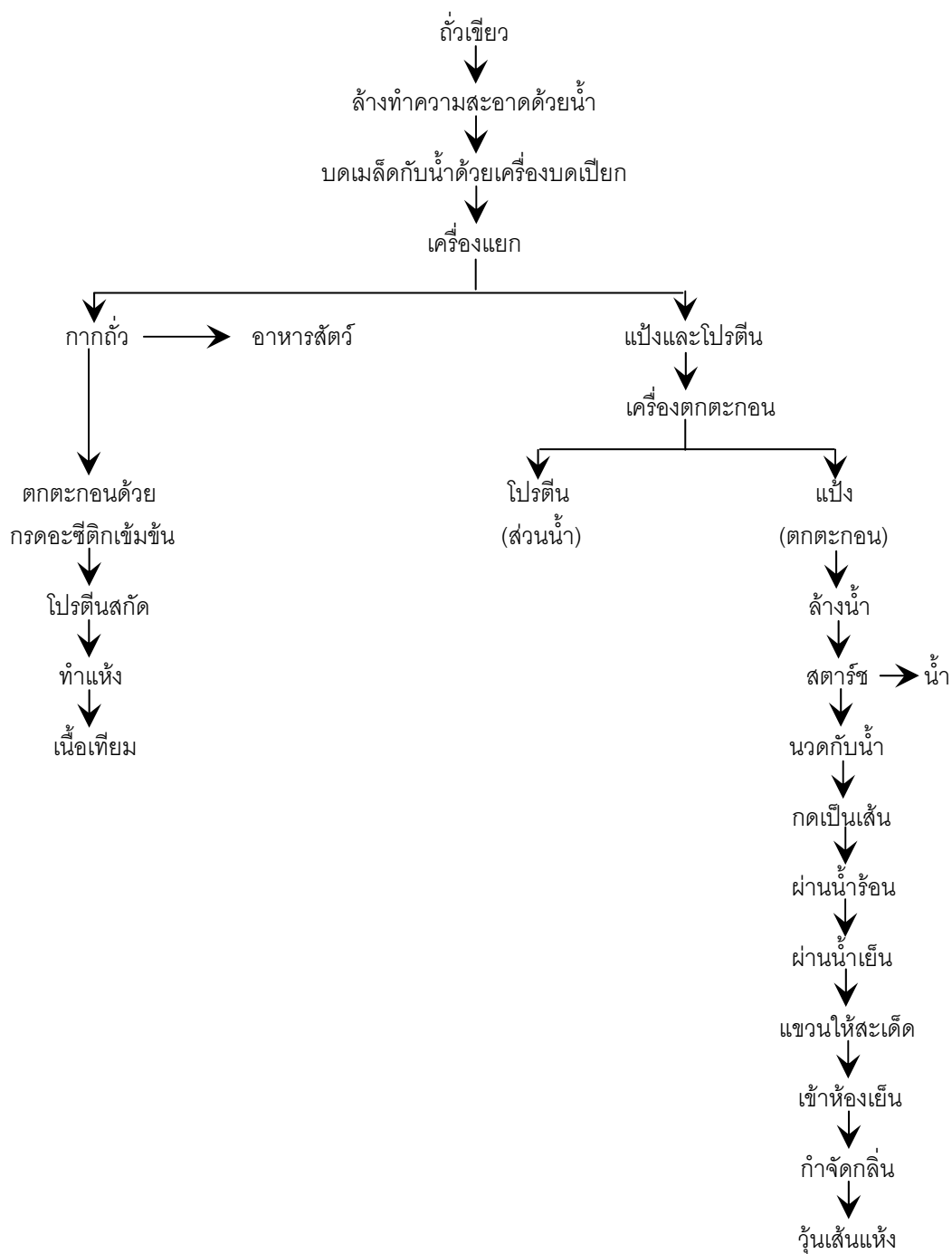
Mungbean	% Starch	%Protein	%Water absorption		%Oil absorption	
			Starch	Protein	Starch	Protein
VC. 2742	12.0	17.0	93	3.03	75	3.01
VC. 2745	12.8	16.5	92	3.05	72	2.99
VC. 2755	15.4	15.5	84	3.08	80	2.83
U-Thong 1	21.9	12.2	99	2.88	79	2.50

ที่มา: อรอนงค์ และคณะ (2531)



ภาพที่ 1. การใช้ประโยชน์จากถั่วเขียวในประเทศไทย

ที่มา : Prabhavat (1987)



ภาพที่ 2 การแปรรูปมูลขี้วัว และผลิตภัณฑ์

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2543)

2. คุณลักษณะพื้นฐานของสตาร์ช

2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช (starch granule)

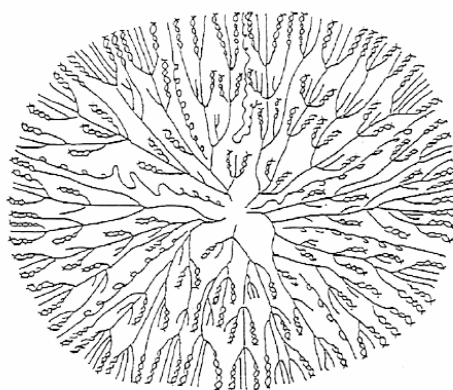
ถั่วเขียวมีขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ไม่สม่ำเสมอ มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีลักษณะกลม ในขณะที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะมีรูปร่างกลมรี ไปจนถึงรูปร่างคล้ายไต (Kasemsuwan และคณะ, 1998; Chang และคณะ, 2006; Liu และ Shen, 2007) เม็ดสตาร์ชบางเม็ดจะมีร่อง โดยจะพบร่องในเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มากกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก (Chang และคณะ, 2006) เม็ดสตาร์ชถั่วเขียวมีขนาดอยู่ในช่วง 5-20 ไมโครเมตร (Kasemsuwan และคณะ, 1998) 0.4-48.3 ไมโครเมตร (Chang และคณะ, 2006) 6.5-32.7 ไมโครเมตร (Liu และ Shen, 2007)

2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในเม็ดสตาร์ช

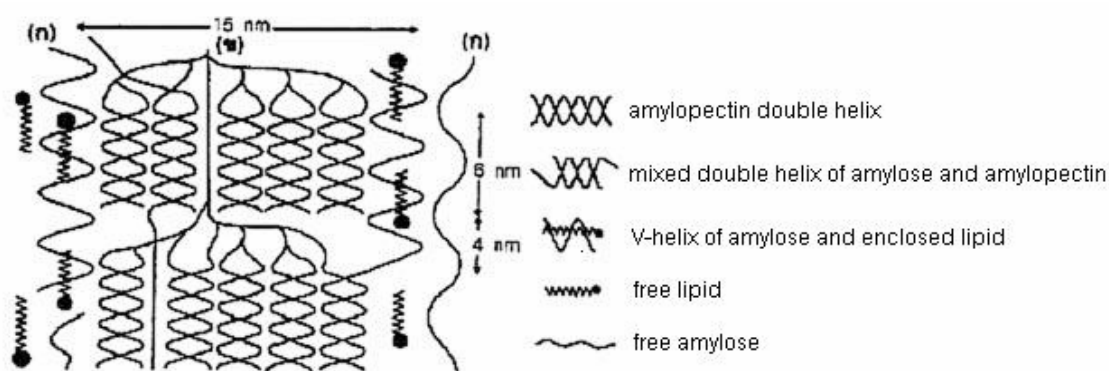
เม็ดสตาร์ชมีโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ อะไมโลส (โพลีเมอร์เชิงเส้น) และ อะไมโลเพคติน (โพลีเมอร์เชิงกิ่ง) ซึ่งโมเลกุลจะจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช โดยมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางแบบกึ่งผลึก (semi-crystallinity) แสดงดังภาพที่ 3 โดยโพลีเมอร์ดังกล่าวจะมีสัดส่วนแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ของพืช นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบสำคัญอื่นๆ ที่มีอยู่ในปริมาณน้อยแต่มีผลต่อคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช ได้แก่ ไขมัน และโปรตีน

อะไมโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,4) ไกลโคซิดิก มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน อะไมโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป และมีค่า DP (degree of polymerization) ของอะไมโลสต่างกันด้วย อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล ฟีนอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์และไอโอดีน อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของพืช โดยบางส่วนอาจกระจายอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วน

อสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) โครงสร้างของอะไมโลสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนงออิสระ (random coil) แสดงดังภาพที่ 5 อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500-160,000 ดาลตัน มีโมเลกุลแบบม้วนงออิสระ และจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 ดาลตัน จะมีบางส่วนละลายได้ และโมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix)

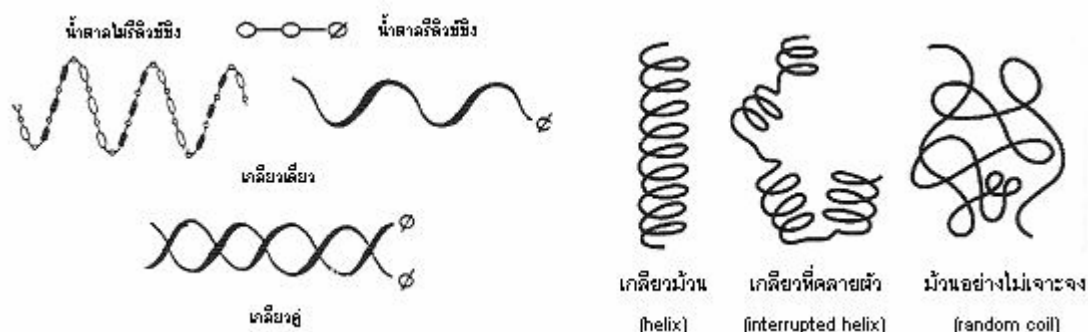


ภาพที่ 3 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะเป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางแบบกิ่งผลึก
ที่มา: Lineback (1984)



ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วย (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพคตินซึ่งอยู่
ร่วมกับไขมันทั้งภายนอกและภายในโมเลกุล

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Blanchard (1987)



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา: Oates (1996) และ Whistler และ Daniel (1984)

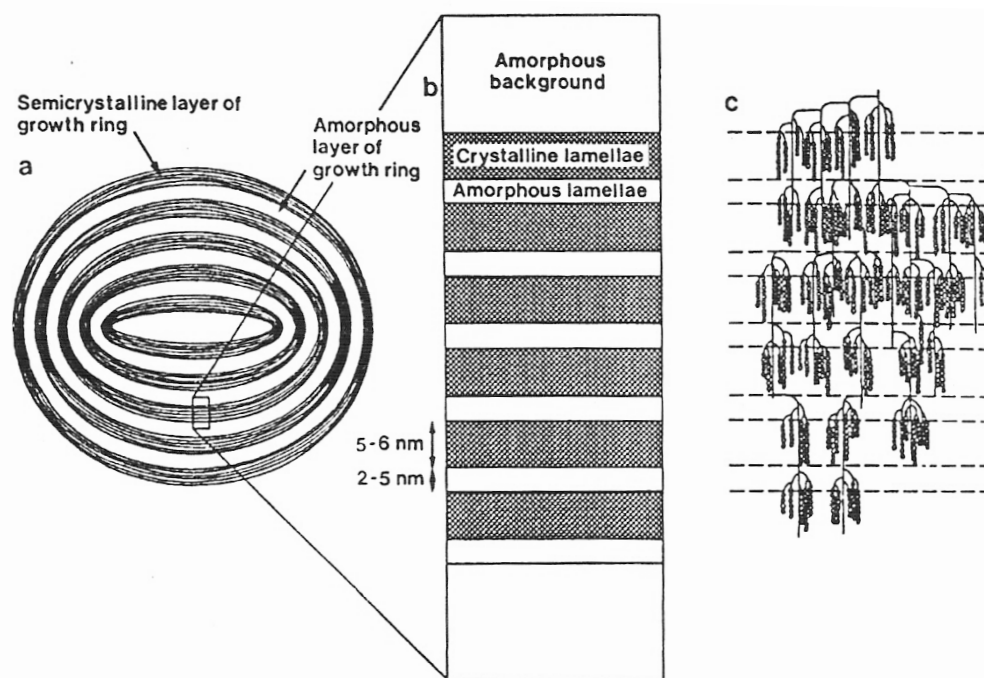
อะไมโลเพคติน เป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,4) ไกลโคซิดิก และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาซึ่งเป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,6) ไกลโคซิดิก มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด DP ของอะไมโลเพคตินในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่า ของอะไมโลส คือประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืบตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโมเลกุล (chain) 3 ชนิด คือ

- 1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)
- 2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะไมโลเพคติน ประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1
- 3) สาย C (C-chain) แบบสายแกน ซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ซึ่ง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่ง สายเท่านั้น

จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านพบว่า หน่วยความยาวของสาย (unit chain lengths) หรือเรียกสั้นๆ ว่าความยาวของสาย (chain lengths, CL) ของอะไมโลเพคตินมีความสัมพันธ์กับลักษณะผลึกของสตาร์ชแต่ละชนิด โดยสตาร์ชที่มีผลึกแบบ A (CL ประมาณ 14-20 หรือน้อยกว่า 20) จะมีความยาวของสายอะไมโลเพคตินสั้นกว่าแบบ B (CL ประมาณ 16-22 หรือมากกว่า 22) (Hizukuri, 1985; Cheetam และ Tao, 1998; Tester, Karkalas และ Qi, 2004a)

ไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ คือ 1) ไขมันที่อยู่ชิดกับโปรตีนซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ชภายนอกหรืออาจอยู่ร่วมกับโครงสร้างของอะไมโลเพคตินสายนอกที่ส่วนผิวของเม็ดสตาร์ช 2) ไขมันที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และ 3) ไขมันที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช



ภาพที่ 6 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน ซึ่งมีความกว้างของชั้นอยู่ในช่วง 5-6 และ 2-5 นาโนเมตร ตามลำดับ

ที่มา: Jacobs และ Delcour (1998)

2.3 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช

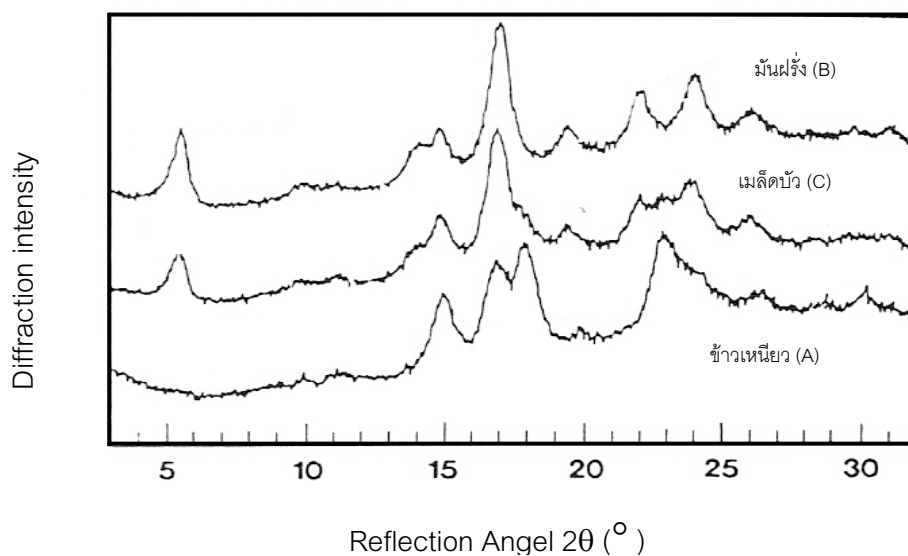
เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก โดยสายสั้นของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก สตาร์ชในธรรมชาติจะมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 15-45 (Zobel, 1988) โครงสร้างที่เป็นส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายยาวของอะไมโลเพคติน แสดงดังภาพที่ 6

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างผลึก 4 แบบ คือ แบบ A, B, C และ V จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชโดยเครื่อง X-ray diffractometer โครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ

17 และ 17.9 องศา พบในสตาร์ชจากพืชเป็นส่วนใหญ่ แบบ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 5.6 และ 17 องศา พบในสตาร์ชจากพืชหัวหรือจากพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 49 (Zobel, 1988) แบบ C เป็นลักษณะที่รวมกันของแบบ A และ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 5.6 และ 17.9 องศา พบในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว (Rickard, Asaoka และ Blanshard, 1991) แสดงดังภาพที่ 7 และ 8 แบบ V จะให้พีคที่ตำแหน่งช่วง 20 เท่ากับ 7-8, 13, 19-20 และ 22-23 องศา แสดงดังภาพที่ 8 อันเป็นรูปแบบที่เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับสารอื่น เช่น กับไฮโดรเจน แอลกอฮอล์ และไขมัน (fatty acid และ monoglycerides) เป็นต้น (Le Bali และคณะ, 1997) หรือขณะเกิดเจลาตินในเซชัน (Hibi และคณะ, 1990) นอกจากนี้ยังพบในสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วยการใช้ความร้อนและในสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงด้วย (Eliasson และ Gudmundsson, 1996) โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกชนิดนั้นๆ ได้แก่ ความยาวของสายอะไมโลเพคติน (Hizukuri และคณะ, 1981) อุณหภูมิที่พืชเจริญเติบโต (Hizukuri, 1961) และกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ (Hizukuri, 1996)

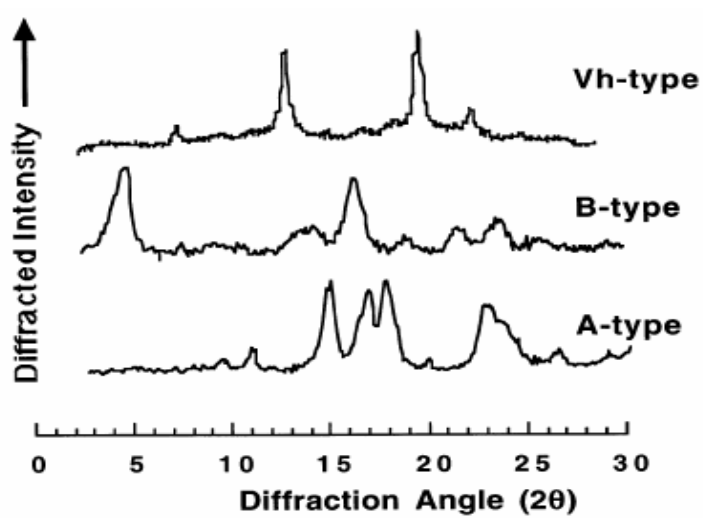
Gunaratne และ Hoover (2002) กล่าวว่าการศึกษาที่สตาร์ชแต่ละชนิดมีปริมาณความเป็นผลึก (relative crystallinity) แตกต่างกันเนื่องมาจากมีความแตกต่างของ 1) ขนาดของผลึก 2) การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ภายในส่วนโครงสร้างผลึก 3) ความยาวเฉลี่ยของอะไมโลเพคติน และ 4) อัตราส่วนโดยโมลของอะไมโลเพคตินสายสั้น (DP 10-13)

ลักษณะผลึกแบบ A และ B มีความแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ (double helices) และปริมาณน้ำในโครงสร้าง โดยผลึกแบบ B การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะเฮกซาโกนอลยูนิตเซลล์ (hexagonal unit cell) โดยมีช่องว่างขนาดใหญ่ตรงกลางซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ 36 โมเลกุลต่อยูนิตเซลล์ ในขณะที่ผลึกแบบ A การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะโมโนคลินิกยูนิตเซลล์ (monoclinic unit cell) ซึ่งมีสายเกลียวคู่ตรงกลางของโครงสร้างทำให้จับกับโมเลกุลของน้ำได้น้อยกว่า (Buléon และคณะ, 1998; Gunaratne และ Hoover, 2002) แสดงดังภาพที่ 9



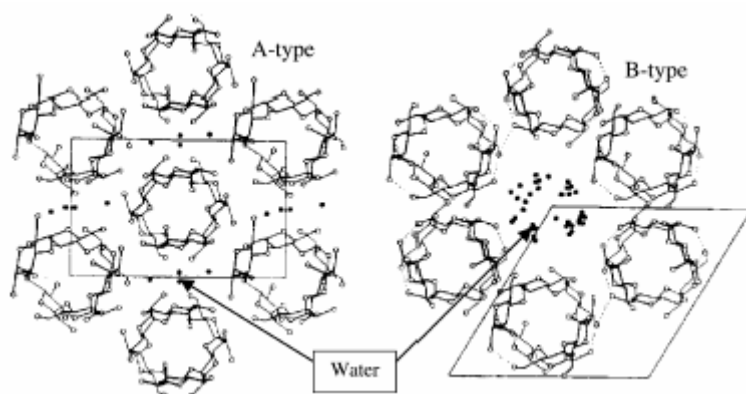
ภาพที่ 7 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกแบบ A, B และ C จากตัวอย่างแป้งข้าวเหนียวแป้งมันฝรั่ง และแป้งเมล็ดบัว ตามลำดับ

ที่มา: Hizukuri (1996)



ภาพที่ 8 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกแบบ A, B และ V

ที่มา: Buléon และคณะ (1998)



ภาพที่ 9 โครงสร้างผลึกแบบ A และ B ของอะไมโลส

ที่มา: Tester, Karkalas และ Qi (2004a)

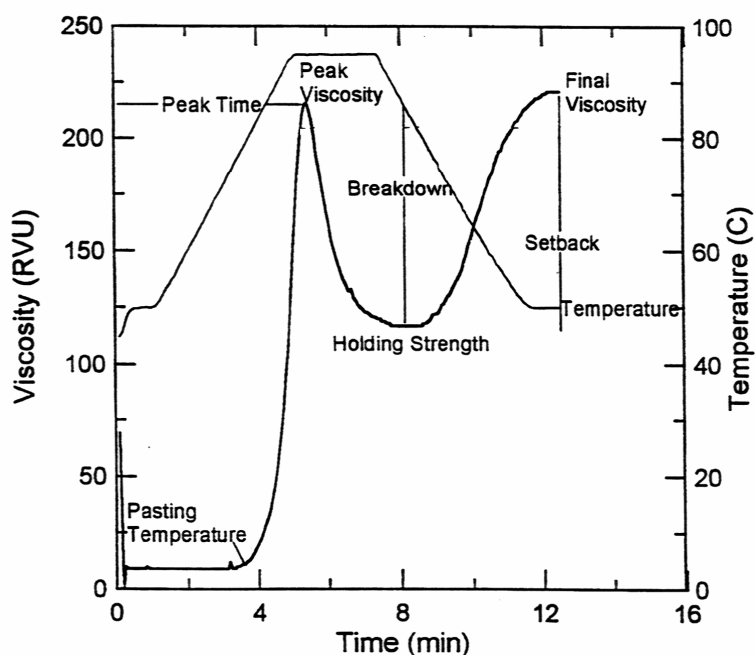
2.4 ความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์ของสตาร์ช กระบวนการที่ใช้ในการทำให้สุก ความเข้มข้นของสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการต่างๆ (กลั่นรงค์และเกื้อกุล, 2543 และ Swinkels, 1985)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเมื่ออยู่ในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นจำนวนมากและยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เมื่อนำไปทำให้แห้งก็จะกลับมามีลักษณะเหมือนเดิม เนื่องจากส่วนที่เป็นผลึกสามารถยึดหยุ่นได้ (อย่างจำกัด) ความหนืดของสตาร์ชแขวนลอยไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และเม็ดสตาร์ชจะยังคงรูปร่างและคุณสมบัติการหักเหแสงโพลาไรซ์ (polarization crosses) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์ ระยะที่ 2 เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชแขวนลอยจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง (ขึ้นกับชนิดของสตาร์ช) จะทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายลง เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำ และพองตัวอย่างรวดเร็วและถาวร ทำให้ส่วนผสมดังกล่าวมีความหนืดและใสมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การบวมพองแบบไม่ผันกลับ (irreversible swelling) และเรียกอุณหภูมิที่สตาร์ชแขวนลอยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดว่า pasting temperature เม็ดสตาร์ชจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียสมบัติการหักเหแสงโพลาไรซ์ มีการบวมพองมากขึ้นทำให้ความหนืดของสตาร์ชแขวนลอยสูงขึ้น เมื่อเม็ดสตาร์ชมีการ

พองตัวสูงสุดจะทำให้ความหนืดมีค่าสูงสุดเช่นกัน จากนั้นเม็ดสตาร์ชจะเริ่มแตกออก เมื่อให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 3 คือ มีการแตกตัวของเม็ดสตาร์ชอย่างสมบูรณ์ การละลายของสตาร์ชจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยในขณะที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่แล้วแตกออกนั้นโมเลกุลของอะไมโลสที่มีขนาดเล็กจะกระจายตัวออกมาจากเม็ดสตาร์ช ความหนืดของสารละลายสตาร์ชจะลดลง กรณีที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชสูง เมื่อปล่อยให้สตาร์ชสุกเย็นตัวลงจะเกิดการจับเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติขึ้น โดยโมเลกุลของอะไมโลสที่ออกมาจากเม็ดสตาร์ชจะเข้ามาเรียงตัวใกล้ๆ กัน และเกาะเกี่ยวกันเองด้วยพันธะไฮโดรเจนที่สามารถอุ้มน้ำและไม่ละลายน้ำอีกเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเจล (gelation) แต่ถ้าหากความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำมากจะไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นเจล แต่จะรวมตัวกัน และเกิดการตกตะกอน (precipitation) โดยถ้าหากลดอุณหภูมิของสตาร์ชลงอีกและทิ้งระยะเวลานานขึ้น การจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างดังกล่าวจะแน่นหนาขึ้นทำให้โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมานอกเจล (syneresis) ทำให้เจลมีลักษณะขุ่นและความหนืดของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง (เฉลิมเกียรติ, 2546)

การวัดความหนืดของสตาร์ชสามารถทำได้หลายวิธี โดยในปัจจุบันเครื่องมือที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายชนิดหนึ่ง ได้แก่ เครื่องวัดความหนืด Rapid Visco Analyser (RVA) เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิทั้งการทำให้ร้อนและทำให้เย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ดี ใช้ระยะเวลาในการวัดแต่ละตัวอย่างน้อย (ประมาณ 13 นาที) และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย ลักษณะของกราฟความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งหรือสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA).

ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd. (1995)

ค่าตัวแปรต่างๆ ที่เครื่อง RVA แสดงผลมีดังต่อไปนี้

Peak time หมายถึง เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด หน่วยเป็นนาที

Pasting temperature หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรืออุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

Peak viscosity หมายถึง จุดที่เกิดความหนืดสูงสุดขณะให้ความร้อน หน่วยเป็น RVU

Peak temperature หมายถึง อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

Holding strength หรือค่า Trough หมายถึง ความหนืดต่ำสุด เมื่อเริ่มการทำให้เย็น หน่วยเป็น RVU

Breakdown หมายถึง ความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด เมื่อเริ่มการทำให้เย็น หน่วยเป็น RVU

Final viscosity หมายถึง ความหนืดสุดท้ายของการวัด หน่วยเป็น RVU

Setback from peak หมายถึง ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุดขณะให้ความร้อน หน่วยเป็น RVU

Setback from trough หมายถึง ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มทำให้เย็น หน่วยเป็น RVU

2.5 การเกิดเจลลิตินในเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลลิตินในเซชัน คือปรากฏการณ์ที่ไม่ผันกลับที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสภาพที่มีน้ำ โดยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชจะคลายตัวลงเนื่องจากความร้อน ทำให้พันธะเกิดการสั่นสะเทือน มีการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและจับกับโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว สตาร์ชแขวนลอยจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระรอบๆ เม็ดสตาร์ชลดลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นและมีความใสเพิ่มขึ้นเนื่องจากสตาร์ชกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น อุณหภูมิที่สตาร์ชแขวนลอยเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า pasting temperature ซึ่งการเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดสตาร์ชในน้ำยังวัดได้จากการสูญเสียคุณสมบัติการหักเหแสงโพลาไรซ์ หรือที่เรียกว่า birefringence

การเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดสตาร์ชแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีหรือให้ความร้อน สตาร์ชแขวนลอยจะเข้าสู่ระยะที่ 2 ในระยะนี้เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า เกิดเจลลิตินในเซชัน สตาร์ชที่ละลายน้ำได้จะเริ่มละลายออกมา เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจะไม่แน่นอนหรือเกิดการแตกของเม็ดสตาร์ช การละลายของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้น เมื่อทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดต่างๆ ได้ดีขึ้นด้วย (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

ความแตกต่างของระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันระหว่างสตาร์ชแต่ละชนิดเกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัยดังนี้ คือ 1) โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความยาวของสายอะไมโลเพคติน และปริมาณของกิ่งก้าน 2) องค์ประกอบของสตาร์ช ได้แก่ อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน จำนวนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน ปริมาณอะไมโลสและ

ปริมาณฟอสฟอรัส และ 3) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช (อัตราส่วนของโครงสร้างส่วนผลึกต่อส่วนอสัณฐาน) (Gunaratne และ Hoover, 2002)

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ และเม็ดสตาร์ชมีขนาดต่างกัน ดังนั้นการเกิดเจลลิตีในเซชันจึงเกิดเป็นช่วงอุณหภูมิไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

การวัดอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ศึกษาการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช โดย DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยสามารถตั้งอัตราการให้ความร้อนด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนที่วัดได้จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการนำสตาร์ชไปผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ผลจากการวิเคราะห์ด้วย DSC จะได้ค่าอุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียส) ที่สำคัญ 3 ค่า คือ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนขณะเกิดเจลลิตีในเซชันสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ที่ใช้ในการเจลลิตีในเซชันสตาร์ช มีหน่วยเป็นจูลต่อกรัม (J/g) (อรอนงค์, 2547) ค่าอุณหภูมิเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกทั้งด้านปริมาณและคุณภาพของความเป็นผลึกของอะไมโลเพคตินในสตาร์ชชนิดนั้นๆ

2.6 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

การเกิดรีโทรกราเดชันหรือการคืนตัว (setback) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดนเมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเต็มที่ และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กกระจายในน้ำ เมื่อสตาร์ชแขวนลอยเย็นลง โมเลกุลของสตาร์ชจะจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ถ้าสารละลายสตาร์ชมีความเข้มข้นต่ำ และเย็นตัวช้าจะทำให้เกิดการตกตะกอน เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชเข้ามาเรียงชิดกัน แต่ถ้าสารละลายสตาร์ชมีความเข้มข้นสูง และเย็นตัวเร็วจะทำให้เกิดลักษณะเป็นเจลขึ้น โครงสร้างแบบร่างแหสามมิติสามารถเก็บกักน้ำไว้ภายในได้ดี เมื่อเก็บสตาร์ชเจลไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาภายนอกเจล เรียกว่า syneresis ทำให้เจลมีลักษณะขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)

ปริมาณและความยาวของโมเลกุลอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคั่นตัวหรือรีโทรกราเดชันของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคั่นตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง ความยาวของสายอะไมโลสประมาณ 100-200 กลูโคสยูนิต จะเกิดการคั่นตัวได้ดีที่สุด โดยที่อัตราการคั่นตัวจะลดลงเมื่อความยาวของอะไมโลสสั้นหรือยาวกว่านี้ ถ้าโมเลกุลอะไมโลสยาวเกินไปการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันของสายอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดยากขึ้น และถ้าสายอะไมโลสสั้นเกินไปจะทำให้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสเป็นโครงสร้างแบบร่างแหทำได้ไม่สมบูรณ์และอาจไม่เกิดลักษณะเจล (Swinkels, 1985)

2.7 การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

การนำสตาร์ชมาย่อยด้วยเอนไซม์นอกจากจะมีความสำคัญในกระบวนการผลิตน้ำตาลและสารให้ความหวานต่างๆ แล้ว ยังเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของสตาร์ชด้วย

แอลฟาอะไมเลส (α -amylase; EC 3.2.1.1; α -(1,4)-glucan glucanohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะแบบสุ่มตัดจากภายใน (endo enzyme) ที่พบได้ในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยจะตัดพันธะ α -(1,4)-ไกลโคซิดิก ในอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบประเภทโอลิโกแซคคาไรด์ โดยทำให้วงแหวนกลูโคสเปลี่ยนแปลงลักษณะการเรียงตัวจากรูปแบบเก้าอี้ (chair) เป็นแบบกึ่งเก้าอี้ (half chair) เพื่อให้หมู่ไกลโคซิลที่เหลือนำปฏิกิริยากับเอนไซม์และน้ำได้ดีขึ้น แอลฟาอะไมเลสจะสามารถตัดพันธะแบบ multiple attack mechanism คือ หลังจากมีการตัดพันธะครั้งแรก และได้สตาร์ชเป็น 2 สาย (fragments) แล้ว เอนไซม์จะเข้าจับกับสายสั้นๆ (fragment) ของสตาร์ชสายหนึ่งที่ได้จากการตัดพันธะในครั้งแรก จากนั้นจะทำการตัดพันธะในสตาร์ชสายสั้นๆ นั้นอีกหลายพันธะ ก่อนที่จะเข้าจับกับซับสเตรทโมเลกุลอื่นเพื่อทำการย่อยต่อไป โดยแอลฟาอะไมเลสจะย่อยสตาร์ชจากด้าน reducing end มาทางด้าน nonreducing end (Robyt, 1984)

การย่อยเม็ดสตาร์ชด้วยเอนไซม์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกอัตราการย่อยเม็ดสตาร์ชจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะที่ 2 อัตราการย่อยจะลดลง และคงที่ในที่สุดเมื่อความยาวของสายสตาร์ชสั้นลง (Reilly, 1985; Li และคณะ, 2004)

การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (porcine pancreatic α -amylase) ในการย่อยอะไมโลเพคตินหรือไกลโคเจน พบว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มของเดกซ์ทรินที่มีกิ่งของพันธะ α -(1,6)-ไกลโคซิดิก อยู่ด้วย (Robyt, 1984)

เมื่อย่อยสสารข้าว (smooth pea starch) ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกิดการกัดกร่อนบริเวณผิวของเม็ดสสารข้าวเป็นจำนวนมาก เม็ดสสารข้าวที่ถูกกัดกร่อนหลายเม็ดเกิดการเปลี่ยนรูป (deform) ไป และบางเม็ดเกิดรูขนาดใหญ่ และแตกที่บริเวณผิว (Hoover และ Zhou, 2003) Li และคณะ (2004) ได้นำเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกรมาทำการย่อยสสารข้าวจากบาร์เลย์ (hull-less barley) พบว่าเกิดการกัดกร่อนทั้งที่บริเวณผิว ภายในเม็ดสสารข้าว และในแนวระนาบ ส่วนกลางของเม็ดสสารข้าว ซึ่งอาจเกิดจากการที่สสารข้าวบาร์เลย์มีรูพรุนที่ผิวของเม็ดสสารข้าว และมีช่องภายในเม็ดสสารข้าวโดยธรรมชาติ ทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาภายในเม็ดสสารข้าวได้ดีขึ้น และเมื่อทิ้งระยะเวลาในการย่อยนานขึ้น พบว่าขนาด และความลึกในการกัดกร่อนเพิ่มเติมชัดเจนขึ้นซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นมากกว่าการเพิ่มจำนวนของบริเวณในการกัดกร่อน

ปัจจัยเกี่ยวกับเม็ดสสารข้าวที่มีผลต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ได้แก่ 1) ชนิดและสายพันธุ์ของสสารข้าว 2) ขนาด และรูปร่างของเม็ดสสารข้าว โดยพบว่าเม็ดสสารข้าวที่มีขนาดเล็กจะถูกย่อยได้เร็ว และมากกว่าเม็ดสสารข้าวที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่า (Tester และคณะ, 2004b) นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างของเม็ดสสารข้าวก็มีส่วนสำคัญต่อความยากง่ายในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เช่นกัน เม็ดสสารข้าวที่มีลักษณะกลมจะถูกย่อยได้ยากกว่าเม็ดสสารข้าวที่มีลักษณะเหลี่ยม บริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมของเม็ดสสารข้าวนั้นจะเป็นส่วนที่อ่อนแอที่สุดในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (Valetudie และคณะ, 1993) 3) การเกิดเจลาติไนเซชัน โดยปกติแล้วเอนไซม์สามารถย่อยสสารข้าวได้ดีในสภาวะที่สสารข้าวเกิดเจลาติไนเซชันแล้ว แต่ในสสารข้าวที่ยังไม่เกิดการเจลาติไนเซชันก็สามารถถูกย่อยได้เช่นกันแต่จะใช้ระยะเวลาในการย่อยนานกว่า 4) การเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลอื่นกับสสารข้าว เช่น การเกิดโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมันภายในเม็ดสสารข้าวซึ่งพบได้ในสสารข้าวจากกลุ่มธัญพืช จะจำกัดการถูกย่อยของสสารข้าวจากเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลง 5) อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน โดยเฉพาะในสายของอะไมโลเพคติน (อยู่ในส่วนโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสสารข้าว) พบว่าตำแหน่งที่มีการแตกกิ่งหรือเกิดพันธะ α -(1,6)-ไกลโคซิดิก จะเป็นตำแหน่งที่มีความอ่อนแอ เนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าจับและทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าพันธะ α -(1,4)-ไกลโคซิดิก (Gunaratne และ Hoover, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hu และคณะ (2004) ที่พบว่าสสารข้าวเหนียวและสสารข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (ซึ่งจะมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง) จะสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้เร็วกว่าสสารข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสระดับปานกลาง และสูง 6) ระดับความเป็นผลึกของสสารข้าว โดยโครงสร้างผลึกส่วนอสัณฐานจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ง่ายกว่าโครงสร้างแบบผลึก (Tester และ

คณะ, 2004b) เนื่องจากโครงสร้างส่วนผลึกนั้นจะมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบมากกว่าจึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและทนทานต่อการถูกย่อยได้มากกว่า แต่เมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์นานขึ้น โครงสร้างส่วนที่ย่อยได้ยากดังกล่าวจะถูกทำให้คลายตัวลง และทำปฏิกิริยาได้ในที่สุด (วรางคณา, 2544) 7) ชนิดของโครงสร้างผลึก (แบบ A, B, C หรือ V) โดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างผลึกแบบ A (พบในกลุ่มธัญพืช และมันสำปะหลัง) จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสได้เร็วกว่าผลึกแบบ B (พบในข้าวโพดอะไมโลสสูง และมันฝรั่ง) เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบ B มีพันธะที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลอื่นกับสตาร์ช (Li และคณะ, 2004) 8) สารยับยั้งเอนไซม์ เช่น ในข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรย์ ข้าวฟ่าง ถั่วลิสง ถั่ว และเปลือกพบสารยับยั้งเอนไซม์ตามธรรมชาติที่เป็นโปรตีน มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 9,000-63,000 ดาลตัน ซึ่งมีคุณสมบัติค่อนข้างทนต่อความร้อน โดยอาจต้องใช้เวลาในการทำลายด้วยความร้อนนานอย่างน้อย 1 ชั่วโมง (นิธิยา, 2545) 9) การมีช่องหรือรูพรุนที่ผิวของเม็ดสตาร์ชจะทำให้เอนไซม์สามารถแทรกตัวผ่านเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชได้ดีและง่ายขึ้น ส่วนรูพรุนและช่องออสัญฐานนั้นก็จะถูกย่อยจนมีลักษณะกว้างขึ้นเช่นกัน โดยลักษณะรูพรุนบนผิวของเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีความไวต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แตกต่างกันออกไป (วรางคณา, 2544)

2.8 การพองตัวและการละลาย

สตาร์ชจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กันโดยตรงหรืออาศัยน้ำเป็นตัวกลางเชื่อมต่อ แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสภาพที่มีน้ำ โมเลกุลของน้ำจะแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ช โดยเริ่มจากส่วนออสัญฐาน ทำให้เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว เมื่อให้ความร้อนต่อไปเม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวมากขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิหนึ่งที่เป็นอุณหภูมิวิกฤต (อุณหภูมิเจลาติไนซ์) จะเกิดการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช ทำให้สูญเสียสมบัติการหักเหแสงโพลาไรซ์ไป โดยระหว่างที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่มีขนาดเล็กและเป็นอิสระภายในเม็ดสตาร์ชจะละลายออกมาอยู่ในส่วนสารละลาย เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่และแตกในที่สุดจะทำให้เกิดสภาพการละลายมากขึ้น (Swinkels, 1985 และ วรางคณา, 2544)

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ช ได้แก่ 1) ชนิดของสตาร์ช สตาร์ชจากธัญพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น ซึ่งแสดงถึงการจับกันระหว่างโมเลกุลหรือมีพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชุด คือ พันธะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช ในขณะที่สตาร์ชจากส่วนหัวและรากของพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลายชั้นเดียว 2) จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช ส่วนประกอบและการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล การจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในอะไมโลเพคติน เป็นต้น 3) องค์ประกอบในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เช่น สตาร์ชข้าวโพดที่ถูกสกัดไขมันออกจะมีการพองตัวอย่างอิสระ และเป็นรูปแบบเดียวกันดีกว่าสตาร์ชข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันในธรรมชาติของสตาร์ชข้าวโพดจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช 4) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัวโดยในสภาพที่มีปริมาณน้ำอยู่น้อยจะทำให้การพองตัวอย่างอิสระของเม็ดสตาร์ช และการละลายหรือการกระจายตัวของอะไมโลสออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชถูกยับยั้ง (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

3. การดัดแปรสตาร์ช

เนื่องจากสตาร์ชมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำสตาร์ชมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติสตาร์ชดัดแปร (modified starch) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง ฯลฯ มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ชี้บ่งต่าง ๆ ของสตาร์ชดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

สตาร์ชดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติบางประการของสตาร์ชดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะการผลิตได้ดี (Light, 1990)

การเกิดเจลลาติไนซ์ (gelatinization) การคืนตัว (retrogradation) และการสูญเสีย^{น้ำ}ของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวยเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือความสามารถในการ ผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ เพิ่มขึ้น (BeMiller, 1997)

4. การแบ่งประเภทของสตาร์ชดัดแปร

การดัดแปรสตาร์ชแบ่งกลุ่มได้ดังนี้ (BeMiller, 1997)

4.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical Modification)

4.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

- การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของสตาร์ช (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น สตาร์ชแอซีเทต (starch acetate) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น ไฮดรอกซีเอทิลสตาร์ช (hydroxyethyl starch)

- การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น ครอสลิงสตาร์ช (cross-linked starch)

4.1.2 การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชโดยกรด (acid-thinning) เช่น สตาร์ชย่อยด้วย กรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

4.1.3 เดกซ์ทรีไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization/transglycosilation) โดยการใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น มอลโตเดกซ์ทรีน (maltodextrin)

4.1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดย ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) เช่น ออกซิไดซ์สตาร์ช (oxidized starch)

4.1.5 การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็น น้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น enzymatically modified starch

4.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)

4.2.1 เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนสตาร์ชจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น พรีเจลาติไนซ์สตาร์ช (pregelatinized starch)

4.2.2 สตาร์ชละลายน้ำเย็น (Granule-Cold-Water-Soluble-Starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้สตาร์ชที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

4.2.3 การลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยทางกล การทำให้เม็ดสตาร์ชแตกโดยทางกล จะได้เม็ดสตาร์ชขนาดเล็กกว่าปกติ

4.2.4 Annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดสตาร์ชอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน

4.2.5 การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันแก่สตาร์ชในขณะที่สตาร์ชมีความชื้นต่ำ

4.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

4.3.1 Waxy starch คือ สตาร์ชที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย

4.3.2 High-amylose starch คือ สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง

5. การดัดแปรทางเคมี

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับสตาร์ช โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ เจลาติไนเซชัน (40-50 องศาเซลเซียส) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับสตาร์ชบริเวณพื้นผิวเม็ดสตาร์ช โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีของเม็ดสตาร์ชขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของส่วนผลึกและภายในส่วนอสัณฐาน เนื่องจากเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับสารละลายไอโอดีน (มีน้ำเป็นตัวกลาง) เม็ดสตาร์ชจะให้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดสตาร์ชเข้ากับไอของไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่ง

แสดงว่าปฏิกริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเท่านั้น ดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกริยากับเม็ดสตาร์ชแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกริยาได้ แต่เมื่อทำปฏิกริยากับเม็ดสตาร์ชที่ชุ่มน้ำหรือเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่าง เม็ดสตาร์ชจะพองตัวและสามารถทำปฏิกริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้ (Hoseney และ Lineback, 1996)

ในระหว่างการดัดแปรสตาร์ชทางเคมี จะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลาติไนซ์ได้โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต หรือ โซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม (Hoseney และ Lineback, 1996) การดัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกริยาในปริมาณน้อย ปฏิกริยาส่วนใหญ่ทำในน้ำ ใช้ค่า degree of substitution (DS) ต่ำประมาณ 0.1–0.2 ใช้วิธีการดัดแปรหลาย ๆ วิธีร่วมกันให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับปรุงได้ (Sanders, 1996)

จะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะวิธีการดัดแปรที่ทำการวิจัยครั้งนี้

6. การดัดแปรสตาร์ชโดยการย่อยด้วยกรด (Acid-thinning)

การผลิตสตาร์ชดัดแปรโดยการลดขนาดโมเลกุลของสตาร์ช เป็นการทำปฏิกริยาระหว่างสตาร์ชและกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง กรดจะตัดโมเลกุลของสตาร์ชทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลง จนได้ความหนืดที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์สตาร์ชดัดแปรด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch หรืออะไมโลเดกซ์ทริน (amylodextrin) (Wurzburg, 1986 และ Hoseney และ Lineback, 1996) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ช ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าสตาร์ชดิบ ทำให้สามารถใช้สตาร์ชได้ในปริมาณมากขึ้น เมื่อเกิดการคื่นตัวจะได้เจลที่แข็ง สามารถยืดเกาะกันได้ดี ใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ท็อปปี้ ช็อคโกแลต เนื่องจากมีความหนืดต่ำขณะร้อน สะดวกในการเทลงพิมพ์ และได้เจลที่แข็งและใสกว่าสตาร์ชดิบ (Imeson, 1992)

กระบวนการผลิตสตาร์ชย่อยด้วยกรด โดยทั่วไปเริ่มจากการนำสารละลายสตาร์ชเข้มข้น (ของแข็ง 36–40 %) มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (ประมาณ 40–60 องศาเซลเซียส) เติมกรด กวนเป็นระยะเวลา 1–หลายชั่วโมง จนได้ความหนืดที่ต้องการ ทำให้เป็นกลาง กรองหรือเหวี่ยงให้ได้เม็ดสตาร์ช นำมาล้างและทำให้แห้ง ชนิดของกรดที่ใช้ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก โดยความเข้มข้นของกรดที่ใช้ อุณหภูมิความเข้มข้นของสตาร์ช และเวลาที่ทำปฏิกริยาจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิต และคุณสมบัติของสตาร์ชดัดแปรที่ต้องการ ในระหว่างกระบวนการผลิต กรดจะ

ย่อยพันธะไกลโคซิดิกทำให้สายสั้นลงโดยที่พันธะ α -D-(1,4)-ไกลโคซิดิก จะถูกย่อยได้ง่ายกว่าพันธะ α -D-(1,6)-ไกลโคซิดิก (Wurzburg, 1986)

6.1 ผลของการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดต่อคุณสมบัติของสตาร์ช

6.1.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช

Sandhu, Singh และ Lim (2007) ได้ศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ผ่านการตัดแปร และผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด พบว่าสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม และพบว่าการย่อยด้วยกรดไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช อาจเนื่องมาจากระดับการย่อยอยู่ในระดับต่ำ (0.14 โมลาร์ ของกรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง) แต่พบว่าพื้นผิวของสตาร์ชมีความเรียบเพิ่มมากขึ้นหลังจากผ่านการตัดแปรเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง Lawal (2004); Lawal และ Lim (2007) พบว่าหลังจากผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชเช่นเดียวกัน

Wang และคณะ (2007) ได้ตัดแปรสตาร์ชไชนีสแยม (chinese yam) ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4, 8, 16 และ 32 วัน โดยสตาร์ชดิบมีลักษณะกลมรี มีขนาด 8-80 ไมโครเมตร ในระยะเวลาการย่อยสตาร์ช 2 วัน จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ช เมื่อผ่านไป 4 วัน จะพบสายสตาร์ชเส้นสั้นๆ บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งเกิดในขณะที่ย่อยโมเลกุลสตาร์ชสายสั้นๆ ออกมา และเกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลสายสั้นๆ เหล่านั้นในระหว่างการย่อย เมื่อระยะเวลาการย่อยผ่านไป 8 วัน เม็ดสตาร์ชจะมีขนาดเล็กลง และบางขึ้น เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร โดยผิวยังคงเรียบ ไม่พบการกักร่อน หรือหลอมรวมกัน จากเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะกลมรี จะมีรูปร่างเปลี่ยนไปคล้ายขนมปัง หรือขนมเค้ก พบว่าหลังจากย่อยสตาร์ชด้วยกรด 16 และ 32 วัน เม็ดสตาร์ชจะมีลักษณะที่แตกต่างไปจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรและสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรในระดับที่ต่ำ จากผลที่เกิดขึ้นสามารถกล่าวได้ว่าบริเวณใจกลางของเม็ดสตาร์ชจะเป็นส่วนที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) เข้าไปย่อย (โดยทั่วไปส่วนที่เป็นอสัณฐานจะถูกย่อยได้ง่ายที่สุด และบริเวณส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะอยู่บริเวณภายใน) และเมื่อระยะเวลาการย่อยผ่านไป 16 วัน เม็ดสตาร์ชจะเกิดการแตกหัก และที่ผิวจะเกิดการกักร่อนและจะเกิดการกักร่อนอย่างรุนแรงมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 32 วัน

6.1.2 ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

Chung, Jeong และ Lim (2003) พบว่าสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (high amylose maize) จะให้โครงสร้างผลึกแบบ B+V ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้น (2 ชั่วโมง) จะส่งผลให้พื้นที่พิกโดยรวมมีค่าสูงขึ้น โดยการย่อยสตาร์ชด้วยกรดจะส่งผลในการลดความยาวของสายสตาร์ช ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้น จึงง่ายต่อการจัดเรียงโครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับการทดลองของ Vasanthan และ Bhatta (1998) ที่ทำการย่อยสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลส สูง ที่ระยะเวลา 0.5-6 ชั่วโมง

Wang และคณะ (2007) ได้ดัดแปรสตาร์ชไซนิสแยม โดยการย่อยด้วยกรด ซึ่งก่อนการดัดแปรสตาร์ชจะมีโครงสร้างผลึกแบบ C (เป็นลักษณะที่ร่วมกันระหว่าง A และ B) คือเกิดพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 6.5 องศา ซึ่งให้ลักษณะของผลึกแบบ B และพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 27.4 องศา ซึ่งเป็นพิกที่ให้ลักษณะของผลึกแบบ A หลังจากผ่านการย่อยด้วยกรดเป็นระยะเวลา 2 วัน โครงสร้างผลึกของสตาร์ชยังคงเป็นแบบ C แต่พิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 6.5 องศา จะลดลงเล็กน้อย และพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 17.7, 20 และ 27.0 องศา จะมีลักษณะที่แหลมขึ้นเล็กน้อย การลดลงของพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 6.5 องศา เนื่องมาจากการลดโครงสร้างผลึกแบบ B ในระหว่างการดัดแปร ส่วนการเพิ่มขึ้นของพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 17.7, 20 และ 27.0 องศา แสดงว่าปริมาณผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกแบบ C จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A โดยหลังจากการย่อยด้วยกรด 4 วัน พิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 6.5 องศา จะหายไป และเมื่อระยะเวลาในการย่อยผ่านไป 16 วัน พิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 20 องศา จะเกิดการแยกออกเป็น 2 พิก ที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 20 และ 21 องศา ซึ่งเป็นลักษณะที่เด่นของโครงสร้างผลึกแบบ A

สตาร์ชข้าวโพดลูกผสม (hybrid maize) จะให้ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A คือเกิดพิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 15.9, 17.2, 18.8 และ 25.0 องศา ซึ่งหลังจากผ่านการย่อยด้วยกรด พิกที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 18.8 และ 25.0 องศา จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงโครงสร้างผลึกแบบ A การเพิ่มขึ้นของพิกแสดงว่าการย่อยด้วยกรดมีผลในการเพิ่มปริมาณร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (Lawal และคณะ, 2005) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Lawal (2004) ที่ศึกษาสตาร์ชนิวโคโคแยม (new cocoyam) ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A และ Lawal และ Adebawale (2005) ที่ศึกษาสตาร์ชถั่ว (jack bean) ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C ซึ่งหลังจากการ

ดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก แต่จะมีปริมาณร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

6.1.3 ผลต่อความหนืด

Lawal และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความหนืดของสตาร์ชข้าวโพดลูกผสมด้วยเครื่อง บาร์เบนเดอร์ (Brabender) พบว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรดจะส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิด ความหนืดลดลง ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็น และค่าเบรกดาวน์มี ค่าลดลง ในขณะที่เซตแบคมีค่าเพิ่มขึ้น Sandhu, Singh และ Lim (2007) พบว่าหลังผ่านการย่อย สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดด้วยกรด ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็น เบรกดาวน์ และเซตแบค จะมีค่าลดลง และมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิด ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น โดยในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่าเบรกดาวน์ และเซตแบคลดลงอย่างมาก ส่วนในสตาร์ชนิวโคโคแย้มที่ผ่านการย่อยด้วยกรด จะมีค่าความหนืดสูงสุด เบรกดาวน์ และความ หนืดขณะร้อนลดต่ำลง ในขณะที่มีความหนืดขณะเย็น เซตแบค และอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิด ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น (Lawal, 2004) ในกรณีของการดัดแปรสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชมันฝรั่งและ สตาร์ชข้าวโพด พบว่าหลังสตาร์ชทั้ง 3 ชนิด ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ความหนืด สูงสุด ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็น เบรกดาวน์ และเซตแบค มีค่าลดลง (Gunaratne และ Corke, 2007)

Chung, Jeong และ Lim (2007) กล่าวว่า การลดลงของความหนืดเกิดเนื่องมาจากการที่ สตาร์ชมีสายของโพลิเมอร์สั้นลงหลังจากผ่านการย่อยด้วยกรด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มการจัดเรียงผลึก ในส่วนของสายอะไมโลส ส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไป เพราะว่าสายเกลียวคู่ที่ไม่ถูกทำลาย ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนส่งผลในการต้านการพองตัวของสตาร์ช ซึ่งคล้ายกับรายงาน ของ Wang และ Wang (2001)

Lawal และคณะ (2005) ให้เหตุผลว่าการย่อยสตาร์ชด้วยกรดจะทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน ของสตาร์ชถูกย่อย และส่งผลต่อการจับกันของน้ำกับสายของสตาร์ช และลดค่าการพองตัวใน ระหว่างการให้ความร้อน จึงส่งผลให้สตาร์ชมีความหนืดลดต่ำลง เช่นเดียวกับ Gunaratne และ Corke (2007) ที่กล่าวว่าเมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการอ่อนตัวลง และเกิดการแตกออกในระหว่างการให้ ความร้อน เมื่อถูกแรงกวนจะทำให้เกิดการเสียสภาพได้ง่าย ส่งผลให้ความหนืดลดลง เมื่อ พิจารณาถึงค่าเซตแบค (การเกิดรีโทรกราเดชัน) ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการย่อยสตาร์ช

ด้วยกรดจะไปส่งเสริมการเพิ่มปริมาณสายอะไมโลสสายสั้นทำให้สามารถเกิดการจัดเรียงตัวกันได้อย่างรวดเร็ว (Lawal, 2004; Lawal และคณะ, 2005) แต่จากการทดลองของ Sandhu, Singh และ Lim (2007); Gunaratne และ Corke (2007) พบว่าเซตแบคมีค่าลดลง โดย Sandhu, Singh และ Lim (2007) ให้เหตุผลว่าเกิดจากพฤติกรรมด้านความหนืดของสตาร์ชที่เป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian) คือความหนืดจะลดลงเมื่อเกิดแรงเฉือน แต่ Gunaratne และ Corke (2007) กล่าวว่า โดยปกติการย่อยสตาร์ชด้วยกรดจะส่งผลให้เกิดสตาร์ชที่เป็นเส้นตรงเพิ่มมากขึ้น น่าจะมีความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้น แต่จากโปรแกรมของเครื่อง RVA ใช้ระยะเวลาในการทำเย็นไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้ค่าเซตแบคลดลง

6.1.4 ผลต่อการเกิดเจลลาติไนเซชัน

จากการศึกษาอุณหภูมิก่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_0) อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนมากที่สุดขณะเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_c) และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (ΔH) หลังการดัดแปรสตาร์ชต่างๆ โดยการย่อยด้วยกรด พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c จะมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของสตาร์ชข้าวโพด (Sandhu, Singh และ Lim, 2007) สตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่ง และข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (Gunaratne และ Corke, 2007) สตาร์ชถั่ว (Lawal และ Adebawale, 2005) สตาร์ชนิวกโคเคแยม (Lawal, 2004) ในขณะที่พบว่าค่า T_0 , T_p และ T_c จะมีค่าลดลงในกรณีของสตาร์ชข้าวโพดลูกผสม (Lawal และคณะ, 2005) สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (Sandhu, Singh และ Lim, 2007) ซึ่งการที่อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการที่กรดจะเข้าไปทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดการเชื่อมของบริเวณที่ไม่เสถียร ดังนั้นจึงส่งผลให้บริเวณผลึกของสตาร์ชเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วน Morrison และคณะ (1993) กล่าวว่าการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากสายเกลียวคู่ที่มีขนาดยาวที่เกิดจากการย่อยด้วยกรดจะมีผลมากกว่าสายอะไมโลเพคตินที่ไม่ถูกย่อย

ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาติไนเซชัน เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานที่ใช้ในการสลายโมเลกุลของสายสตาร์ช และ Cooke และ Gidley (1992) กล่าวว่าค่า ΔH บ่งบอกถึงการเกิดผลึกทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ และบ่งชี้การสูญเสียโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช แต่จะมีค่า ΔH เพิ่มขึ้น ลดลง หรือไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับสภาวะในการดัดแปรและชนิดของสตาร์ช (Donovan และ

Maper, 1980) เช่นจะมีค่า ΔH ลดลงในสตาร์ชข้าวโพดลูกผสม (Lawal และคณะ, 2005) ข้าวโพดและข้าวโพดข้าวเหนียว (Sandhu, Singh และ Lim, 2007) แต่มีค่าเพิ่มขึ้นในสตาร์ชนิโคโคแยม (Lawal, 2004) สตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่งและข้าวโพด (Gunaratne และ Corke, 2007) และสตาร์ชถั่ว (Lawal และ Adebawale, 2005) และการศึกษาของ Gunaratne และ Corke (2007) ยังพบอีกว่าสตาร์ชที่ผ่านการย่อยด้วยกรดจะปรากฏเป็นพีคขนาดเล็กขึ้นอีก 1 พีคที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของสายอะไมโลสกับไขมัน (amylase-lipid complex)

6.1.5 ผลต่อการงอกตัวของเมล็ดและการละลายของสตาร์ช

หลังผ่านการดัดแปรโดยวิธีการย่อยด้วยกรดสตาร์ชส่วนมากจะมีกำลังการงอกตัวที่ลดลง เช่น สตาร์ชนิโคโคแยม (Lawal, 2004) ข้าวโพดลูกผสม (Lawal และคณะ, 2005) และสตาร์ชถั่ว (Lawal และ Adebawale, 2005) สตาร์ชข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียว (Sandhu, Singh และ Lim, 2007) แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นสตาร์ชจะมีค่ากำลังการงอกตัวที่สูงขึ้น Lawal และคณะ (2005) กล่าวว่าในกระบวนการย่อยด้วยกรด H_3O^+ (hydroxonium ion) จะเข้าไปจับที่พันธะไกลโคซิดิก และเกิดการย่อยพันธะไกลโคซิดิกภายในโมเลกุล ทำให้เกิดอะไมโลสสายสั้นๆ เป็นจำนวนมาก ส่วน Lawal (2004) กล่าวว่าจากการที่ปริมาณร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น หลังจากผ่านการย่อยด้วยกรด จะส่งผลในการจำกัดการงอกตัวของสตาร์ช โดยจะไปส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของการเกาะกันของโครงสร้างของอะไมโลเพคตินในบริเวณผลึกของสตาร์ช ซึ่งตรงข้ามกับการทดลองในสตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่งและข้าวโพด (Gunaratne และ Corke, 2007) ที่พบว่าหลังผ่านการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ สตาร์ชมีกำลังการงอกตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่จะมีกำลังการงอกตัวลดลงเมื่อผ่านการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 และ 1.0 โมลาร์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ระดับต่ำจะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนในสายโพลิเมอร์ซึ่งจะส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการงอกตัว แต่ที่ระดับความเข้มข้นของกรดสูงจะเกิดการกัดกร่อนในส่วนของอสัณฐานซึ่งจะส่งผลให้กำลังการงอกตัวลดลง โดย Jayakody และ Hoover (2000) สนับสนุนว่าการเพิ่มกำลังการงอกตัวในสตาร์ชจากธัญพืชในช่วงการย่อยช่วงแรกๆ จะส่งผลเพิ่มการทำปฏิกิริยาระหว่างอะไมโลสและน้ำ ส่งผลให้กำลังการงอกตัวเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาแรกๆ ของการดัดแปร

สตาร์ชข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียว (Sandhu, Singh และ Lim, 2007) สตาร์ชนิวโคโคแยม (Lawal, 2004) สตาร์ชข้าวโพดลูกผสม (Lawal และคณะ, 2005) สตาร์ชถั่ว (Lawal และ Adebowale, 2005) และสตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่งและข้าวโพด (Gunaratne และ Corke, 2007) จะมีค่าการละลายเพิ่มสูงขึ้นหลังผ่านการดัดแปรโดยวิธีย่อยด้วยกรด เนื่องมาจากการที่สตาร์ชเกิดโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้หมู่ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) หรือหมู่ -OH มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สามารถละลายออกมาได้มากขึ้น แต่จากทฤษฎีของการจับน้ำของหมู่ -OH จะส่งผลให้กำลังการพองตัวเพิ่มขึ้น แต่จะตรงข้ามกับในกรณีของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยกรด เพราะเมื่อให้ความร้อนเม็ดสตาร์ชจะเกิดการแตกออกอย่างรวดเร็ว โดยจะไม่ส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้าง ดังนั้นจึงไม่สามารถจับน้ำไว้ในโครงสร้าง ทำให้กำลังการพองตัวลดลง

6.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้

สตาร์ชที่ถูกลดขนาดโมเลกุลด้วยกรดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตไนซ์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสตาร์ชย่อยด้วยกรด ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดสตาร์ช คุณสมบัติในการบดระนาบแสงโพลาไรซ์ และคุณสมบัติที่ไม่ละลายในน้ำเย็นเหมือนกับสตาร์ชดิบ (Rohwer และ Klem, 1984) แต่มีคุณสมบัติบางประการที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ให้ความร้อนเม็ดสตาร์ชที่ย่อยด้วยกรดจะแตกออกได้ สตาร์ชเปียกเป็นของเหลวใสที่มีความหนืดลดลง มีความเหลว (fluidity) เพิ่มขึ้น จึงสามารถให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่มีความเข้มข้นสูงได้ แต่เมื่อเย็นลงจะเกิดการคืนตัวทำให้สูญเสียความใส ได้เป็นเจลแข็งทึบแสง นอกจากนี้สตาร์ชย่อยด้วยกรดยังมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้ขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากมีความหนืดต่ำ สามารถให้ความร้อนได้ถึงแม้ว่าสตาร์ชจะมีความเข้มข้นสูง คุณน้ำหรือระเหยน้ำได้น้อย ดังนั้นฟิล์มจะแห้ง แข็ง และเกาะติดได้เร็ว (Wurzburg, 1986)

ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ผลิตลูกกวาด ท็อปปี้ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้เคลือบเส้นด้าย ทำให้เส้นใยผ้าแข็งแรงและทนต่อการเสียดสีระหว่างการทอ ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเคลือบกระดาษเพื่อกันไม่ให้หมึกซึมผ่านกระดาษ ได้กระดาษที่มีผิวหน้าเรียบ มีคุณสมบัติในการพิมพ์ (printability) ที่ดีและใช้ผลิตกระดาษลูกฟูก (Rohwer และ Klem, 1984)

ในอุตสาหกรรมยา ใช้ทำเป็นสารช่วยเพิ่มปริมาณเมื่อนำไปอัดผสมรวมกับยา ทำให้เม็ดยามีความแข็งแรงมากขึ้นและพัฒนาคุณสมบัติในเรื่องการปลดปล่อยตัวยา การแตกของเม็ดยาและการสลายตัวของตัวยา (Atichokudomchai และ Varavinit, 2003) นอกจากนี้ยังได้นำสตาร์ช

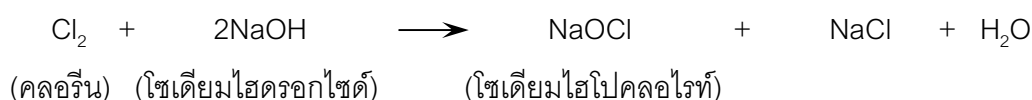
ดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดมาผสมกับตัวยาและนำไปผ่านการพ่นฝอย (Spray drying) หรือที่เรียกกันว่า spherical agglomerated starch ซึ่งเม็ดยาที่ได้จะมีความสามารถในการไหลที่ดีขึ้น (free flowing) ทำให้เม็ดยามีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และขึ้นรูปได้ง่าย

7. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation)

การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันเป็นการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมี และขนาดของโมเลกุลเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป ได้สตาร์ชดัดแปรที่เรียกว่าออกซิไดซ์สตาร์ช (oxidized starch) หรือคลอรีเนตสตาร์ช (chlorinated starch) หรือออกซิสตาร์ช (oxystarch) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮด์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้สตาร์ชมีความขาวเพิ่มขึ้น (Smith, 1982) ออกซิไดซ์สตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกินร้อยละ 5.5 และมีกลุ่มคาร์บอกซิลไม่เกินร้อยละ 1.1 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

ในการผลิตออกซิไดซ์สตาร์ชทางการค้าจะใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์หรือแคลเซียมไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดซ์

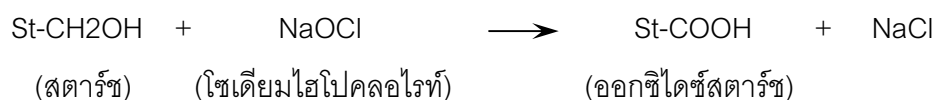
การเตรียมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ทำโดยเติมก๊าซคลอรีนอย่างช้า ๆ ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เย็น ดังปฏิกิริยา



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (24,650 แคลอรี) ในการผลิตต้องควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาให้ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส สารละลายไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สตาร์ชโดยทั่วไปจะมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 5-10% และมีความเป็นเบสเพียงเล็กน้อย

การผลิตออกซิไดซ์สตาร์ช ทำโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ลงในสารละลายสตาร์ช ปริมาณของสารละลายไฮโปคลอไรท์ที่ใช้วัดเป็น % available chlorine ต่อน้ำหนักสตาร์ช

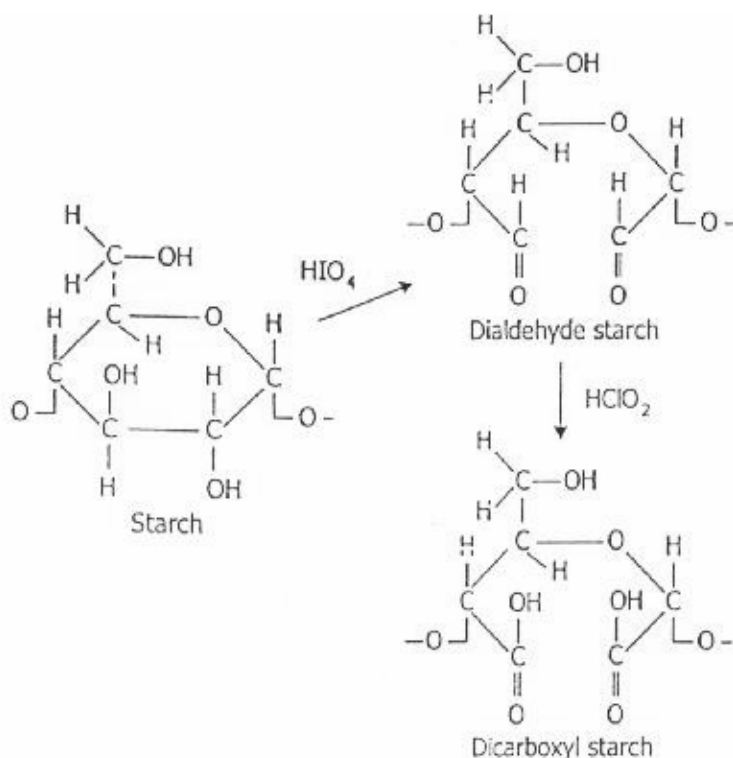
โดยทั่วไป %available chlorine ในสตาร์ชสูงสุดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะไม่เกิน 5-6% เมื่อเติม โซเดียมไฮโปคลอไรท์จะเกิดปฏิกิริยากับเม็ดสตาร์ชดังนี้



หลังจากเติมสารละลายไฮโปคลอไรท์จนถึงจุดที่ต้องการแล้ว ปรับค่าพีเอชของสารละลายสตาร์ช ให้เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย (pH 6.0-6.5) กำจัดไฮโปคลอไรท์ที่เกินโดยเติมตัวรีดิวซ์ เช่น โซลฟิตไฟท์ หลังจากนั้นล้างสารละลายสตาร์ชโดยใช้ continuous vacuum filter หรือ Dorr clones กำจัดน้ำออกจากสารละลายโดยใช้ vacuum filter หรือ centrifuge ทำให้แห้งใน hot-air dryer จนได้ความชื้นที่สมดุล

เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นในระหว่างดำเนินปฏิกิริยา จะต้องระมัดระวังความร้อนที่จะเพิ่มขึ้น โดยการใช้สารละลายที่เย็นเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา หรือให้ความเย็นแก่สารละลายในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา ถ้าอุณหภูมิในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะทำให้เม็ดสตาร์ชในบางส่วนละลายหรือพองตัว จะทำให้เกิดการสูญเสียของเม็ดออกซิไดซ์สตาร์ชในระหว่างการทำเจ้าน้ำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอะไมโลเพกทินของสตาร์ช จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 จะไม่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีพันธะแบบ α -D-(1,6) ไกลโคซิดิก การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในการผลิตทางการค้าจะควบคุมให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7-8 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ/หรือคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอกซิล และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อ พันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 จะแตกออกได้ ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (ภาพที่ 11) จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์ ที่เป็นด่างจะทำให้พันธะระหว่างหมู่กลูโคไพราโนสแตกออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับสตาร์ชได้ไดคาร์บอกซิลสตาร์ช



ภาพที่ 11 ปฏิกริยาการเกิด dialdehyde starch และ dicarboxyl starch
ที่มา: Knight (1969)

7.1 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันต่อคุณสมบัติของสตาร์ช

7.1.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช

Kuakpetoon และ Wang (2008) ได้ดัดแปรสตาร์ชข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียวและข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงด้วยวิธีออกซิเดชันที่ระดับแอคทีฟคลอรีน 2% พบว่าผิวของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะไม่ขรุขระมากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ในขณะที่ Li และ Vasanthan (2003) พบว่าสตาร์ชจาก field pea หลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันที่ระดับแอคทีฟคลอรีน 0.89-3.28% ไม่มีความแตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรทั้งขนาดและรูปร่าง

Rutenberg และ Solarek (1984) รายงานว่าสตาร์ชข้าวโพดและมันฝรั่งที่ดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันที่ระดับแอคทีฟคลอรีน 6% ไม่พบความแตกต่างระหว่างสตาร์ชดัดแปรและสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่ที่ระดับแอคทีฟคลอรีน 8% จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชดัดแปร และ

พบว่าสสารสีขาวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 16% ในขณะที่สสารสีขาวโพดขาวเหนียวขนาดไม่เปลี่ยนแปลง

7.1.2 ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

สสารสีขาวโพดลูกผสม (Lawal และคณะ, 2005) มีโครงสร้างผลึกแบบ A คือเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 15.9, 17.2, 18.8 และ 25.0 องศา ซึ่งหลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน สสารสีขาวดัดแปรยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A

7.1.3 ผลต่อความหนืด

Wang และ Wang (2003) ได้ศึกษาการดัดแปรสสารสีขาวโพด และสีขาวโพดขาวเหนียวที่ระดับแอคทีฟคลอรีน 0.25-3.0% พบว่าที่ระดับการดัดแปรต่ำๆ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% แอคทีฟคลอรีนสำหรับสสารสีขาวโพด และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.75% สำหรับสสารสีขาวโพดขาวเหนียว) อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสสารสีขาวโพดมีค่าลดลง แต่ในสสารสีขาวโพดขาวเหนียวไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความหนืดสูงสุด และความหนืดสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสสารสีขาวที่ไม่ผ่านการดัดแปร Farley และ Hixun (1942) กล่าวว่าที่ระดับของการดัดแปรต่ำๆ เม็ดสสารสีขาวสามารถพองตัวได้มากกว่าเม็ดสสารสีขาวที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลภายในโมเลกุลส่งผลให้สามารถจับกับน้ำได้มากขึ้นทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น

Li และ Vasanathan (2003) พบว่าสสารสีขาวจาก field pea เมื่อผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และเมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้น ความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็น และเซตแบคมีค่าลดลง แต่เบรกดาวนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับการดัดแปรสูงสุด (แอคทีฟคลอรีน 3.28%) การให้ความร้อน และการหล่อเย็นส่งผลต่อความหนืดเพียงเล็กน้อย

7.1.4 ผลต่อการเกิดเจลลิตในเซชัน

Wang และ Wang (2003) พบว่าสสารสีขาวโพด และสีขาวโพดขาวเหนียวหลังผ่านการออกซิไดส์ที่ระดับแอคทีฟคลอรีนไม่เกิน 1.25 % อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตในเซชัน (T_0) อุณหภูมิที่ทำให้สสารสีขาวดูดความร้อนมากที่สุดขณะเกิดเจลลิตในเซชัน (T_p) มีค่าสูงขึ้น แต่พลังงาน

เอนทาลปีของการเกิดเจลาตินในเซชัน (ΔH) ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันเป็นผลมาจากส่วนที่เป็นอสังฐานถูกย่อยไป (Donovan, 1979) แต่ถ้าระดับของแอดที่พอลิอีนเกิน 1.25 % พบว่า T_0 และ T_p มีค่าลดลง อาจเกิดจากชั้นของผลึกถูกย่อย ขณะที่ ΔH ไม่เปลี่ยนแปลง อาจเป็นเพราะออกซิเดชันไม่มีผลต่อปริมาณของผลึก

Lawal และคณะ (2005) พบว่า T_0 , T_p , T_c และ ΔH มีค่าลดลงหลังสตาร์ชข้าวโพดถูกผสมผ่านการออกซิไดซ์ การที่พันธะไกลโคซิดิกถูกตัดระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมี อาจทำให้ ΔH มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

7.1.5 ผลต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช

Lawal และคณะ (2005) พบว่ากำล้างการพองตัวมีค่าลดลงเมื่อผ่านการออกซิไดซ์ แต่ค่าการละลายเพิ่มสูงขึ้น ค่าการละลายที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากโครงสร้างที่อ่อนแอและการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช

7.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้

คุณสมบัติของออกซิไดซ์สตาร์ช คือ แบ่งมีลักษณะเป็นประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลอะไมโดส ทำให้อัตราการคืบตัวของสตาร์ชเปียกลดลง สตาร์ชเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้สตาร์ชเปียกที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ สตาร์ชเปียกสลาย และฟิล์มมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดสตาร์ชขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้นและมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์จะไปละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์และล้างออกจากสตาร์ช (Sanders, 1996)

เม็ดสตาร์ชของออกซิไดซ์สตาร์ชมีลักษณะเหมือนเม็ดสตาร์ชดิบ มีคุณสมบัติ polarization และการยอมสีไอโอดีนคงเดิม เม็ดสตาร์ชมีรอยแตกตามรอยรัศมีจากการทำปฏิกิริยาของสารออกซิไดซ์ เมื่อนำไปให้ความร้อนภายในน้ำ เม็ดสตาร์ชจะแตกออกตามรอยแตกมากกว่าที่จะพองตัวเหมือนเม็ดสตาร์ชดิบ เม็ดสตาร์ชออกซิไดซ์มีความไวต่อเมทิลีนบลูและสีย้อมประจุบวกอื่น ๆ เช่น เม็ดสตาร์ชออกซิไดซ์จะดูดซับสีย้อม ในขณะที่เม็ดสตาร์ชดิบจะไม่ดูดซับสีย้อม ดังนั้นเมื่อย้อมเม็ดสตาร์ชด้วยเมทิลีนบลูแล้วล้างส่วนที่ไม่ถูกดูดซับออก จะสามารถจำแนกเม็ดสตาร์ชออกซิไดซ์ออกจากเม็ดสตาร์ชดิบได้ วิธีนี้เป็นการวัดปริมาณของประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลในเม็ด

สตาร์ชจึงไม่เจาะจงเฉพาะออกซิไดซ์สตาร์ชเท่านั้น อนุพันธ์ที่มีประจุลบก็สามารถทำปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน

สตาร์ชเปียกของออกซิไดซ์สตาร์ชมีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำมาฝรั่งและลูกอม ซึ่งจะมีอายุการเก็บที่ยาวนานกว่าผลิตภัณฑ์จากสตาร์ชย่อยด้วยกรดเนื่องจากความเสถียรในสภาวะที่มีน้ำตาลและความต้านทานต่อการหดตัวของออกซิไดซ์สตาร์ช

ออกซิไดซ์สตาร์ชขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แข็งและใสมากขึ้น มีแนวโน้มในการแตกตัวหรือหดตัวน้อยกว่าฟิล์มจากสตาร์ชย่อยด้วยกรดหรือสตาร์ชดิบ มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า เนื่องจากคุณสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างการออกซิเดชัน

ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ชูปังสำเร็จรูป หรืออาหารประเภทของเหลวที่ต้องการความข้น เช่น น้ำสลัด มายองเนส (Knight, 1969 และ Voragen, 1996) ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษ เพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษให้เรียบและแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษสำหรับกันหมึกซึม ใช้สำหรับเคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้เส้นด้ายลื่น และมีความยืดหยุ่น ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝ้าผนัง ฉนวน กระเบื้อง (Wurzburg, 1986)

8. การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการเชื่อมข้าม (Cross-linking)

สตาร์ชครอสลิงหรือที่มีชื่อเรียกอื่นๆ ว่า crossbonded starch หรือ inhibit starch การเชื่อมข้ามเป็นการดัดแปรสตาร์ชกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multifunctional reagent) เรียกสารเคมีนั้นว่า Cross-linking reagent เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ฟอสฟอรัสออกไซด์ และอพิคลอโรไฮดริน เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชในสภาพแขวนลอย

ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์เป็นสารที่นิยมใช้ในการผลิต cross-linked starch esters โดยทำปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (ประมาณ 11.5) ในสภาวะที่มีเกลือหรือไม่มีเกลือ เกลือที่ใช้กันคือ โซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมซัลเฟต ตามปกติปฏิกิริยาจะสิ้นสุดภายใน 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สตาร์ชดัดแปรที่ได้จัดเป็น di-starch phosphate แต่ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษ ซึ่งไอของมันสามารถปนเปื้อนกับอากาศได้ง่าย (Wu และ Seib, 1990)

โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตสามารถใช้ในการผลิต cross-linked starch esters ที่เป็น

di-starch phosphate ได้เช่นเดียวกันกับฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ แต่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่ามาก อย่างน้อยหลายชั่วโมง สตาร์ชดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติ คล้ายคลึงกับการใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์

การใช้ส่วนผสมของ adipic และ acetic anhydride จะทำให้เกิด organic ester linkages ในสตาร์ชที่คงตัวมากในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง แต่ในสภาวะที่เป็นกรด หรือเบสมากๆ จะคงตัวน้อยกว่า ether หรือ inorganic ester linkages ดังนั้นการใช้ส่วนผสมดังกล่าวในการ ดัดแปรจึงควรทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 9 สตาร์ชที่ดัดแปรได้จะมีการแทนที่ของหมู่อะเซทิล ร่วมด้วย

โดยทั่วไปการทำครอสลิงจะช่วยเสริมพันธะไฮโดรเจนในเม็ดสตาร์ชด้วยพันธะเคมี ซึ่งจะทำให้ หน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่างโมเลกุล ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชครอสลิงในน้ำพันธะ ไฮโดรเจนจะถูกทำลาย แต่เม็ดสตาร์ชยังคงอยู่ในสภาพปกติ

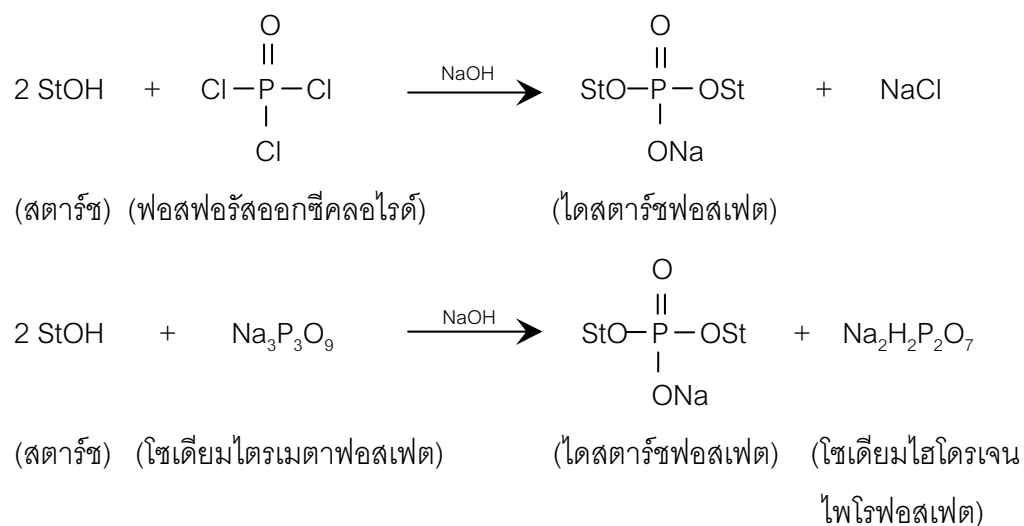
การทำครอสลิงเป็นการควบคุมคุณสมบัติในระดับเม็ดสตาร์ช ซึ่งพันธะไฮโดรเจนจะน้อยมาก สตาร์ช เมื่อเทียบกับน้ำหนัก และปริมาณกลูโคสทั้งหมดที่มีภายในเม็ดสตาร์ช สตาร์ชครอสลิงโดย ส่วนใหญ่จะมีพันธะครอสลิง 1 พันธะต่อกลูโคส 100-3,000 หน่วย

ในอุตสาหกรรมอาหารมีเกณฑ์กำหนด และลักษณะสีบ่งของสตาร์ชดัดแปรประเภทไดสตาโรส ฟอสเฟต คือ ปริมาณฟอสเฟต (คำนวณเป็นฟอสฟอรัส) ไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับสตาร์ชดัดแปร ที่มาจากมันฝรั่งหรือจากข้าวสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับสตาร์ชประเภทอื่น เจลของ สตาร์ชดัดแปรที่ได้ต้องมีความคงตัว และเกิดเป็นเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่าสตาร์ชดิบโดยทั่วไป (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

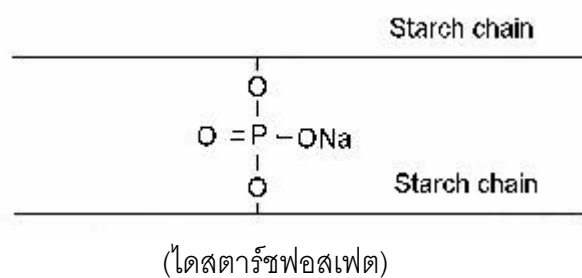
การผลิตไดสตาโรสฟอสเฟตสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมอาหาร ผลิตโดยปรับปรุงคุณสมบัติ ของสารแขวนลอยสตาร์ชด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในสภาวะ เบส ดังภาพที่ 12 และ 13 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะดำเนินไปอย่าง รวดเร็ว สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะเป็นไปอย่างช้าๆ สามารถ เร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นได้โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ไดสตาโรสฟอสเฟตจะมีพันธะ inorganic ester เชื่อมหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้สามารถต้านทานความเป็นกรด และเบสอ่อนๆ ได้ แต่สามารถถูกย่อยได้ในสภาวะที่เป็นเบสปานกลาง

สภาวะที่ใช้ผลิตสตาร์ชครอสลิงจะแตกต่างกันไปตามสารเคมีที่ใช้ โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิห้องจนถึง 50 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะเป็นกลางค่อนข้างเบส แต่ต่ำกว่าระดับที่ทำให้ สตาร์ชเกิดการพองตัว เมื่อถึงระดับการเชื่อมข้ามที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาโดยการปรับพีเอชให้

เป็นกลางด้วยกรดเจือจาง แล้วกรองล้างเกลือหรือสารเคมีที่ไม่ทำปฏิกิริยา และสิ่งเจือปนออก (Wurzburg, 1989; Rutenberg และ Solarek, 1984)



ภาพที่ 12 การทำปฏิกิริยาของสตาร์ชกับสารครอสลิง
ที่มา : Rutenburg และ Solarek (1984)



ภาพที่ 13 โครงสร้างสตาร์ชครอสลิง
ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล (2543)

8.1 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช

8.1.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของเม็ดสตาร์ช

Kaur และ Singh (2005) ได้ดัดแปรสตาร์ชจากมันฝรั่งด้วยการใช้สารฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ และอีพิกลอโรไฮดริน พบว่าหลังผ่านการดัดแปรด้วยการเชื่อมข้ามสตาร์ชยังคงมีผิวที่เรียบไม่แตกต่างจากที่ไม่ผ่านการดัดแปร เช่นเดียวกับการทดลองของ Kim และ Lee (2002) ในสตาร์ชมันฝรั่งที่ดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามด้วยสารละลายอีพิกลอโรไฮดรินที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0% ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชหลังผ่านการเชื่อมข้าม แม้จะมีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายอีพิกลอโรไฮดรินเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีของ Yeh และ Yeh (1993) ที่พบว่าการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือลักษณะปรากฏของสตาร์ชข้าวเจ้า โดยสภาวะในการดัดแปรคือ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ร้อยละ 0.1 ในสารละลายต่างที่มีสารละลายโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 5 และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15, 30, 60 และ 120 นาที

8.1.2 ผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

Kim และ Lee (2002) ได้ทำการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชโดยการเชื่อมข้ามในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B คือเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 5.59, 14.4, 17.2 และ 22.1 องศา แต่หลังจากผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้าม สตาร์ชจะเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 14.4, 17.2, 22 และ 24 องศา แต่ยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์ พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงว่าการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช

8.1.3 ผลต่อความหนืด

Yeh และ Yeh (1993) ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ โดยสตาร์ชจะให้ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 71.4 องศาเซลเซียส ค่าความ

หนืดสูงสุด 600 BU (brabender unit) ที่อุณหภูมิ 84.6 องศาเซลเซียส โดยหลังจากผ่านการดัดแปรด้วยการเชื่อมข้าม สตาร์ชข้าวเจ้าจะมีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 800 BU ที่อุณหภูมิ 87 องศาเซลเซียส

Liu, Ramsden และ Corke (1999) พบว่าหลังผ่านการเชื่อมข้าม สตาร์ชข้าวเจ้าจะมีความหนืดสูงสุด อุณหภูมิในการเริ่มเกิดความหนืดลดต่ำลง แต่จะค่าเพิ่มสูงขึ้นในสตาร์ชข้าวเหนียว ซึ่งสตาร์ชทั้ง 2 จะมีค่าเบรกดาวนลดต่ำลง ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็น เพิ่มขึ้น

Hirsch และ Kokini (2002) ได้ทำการศึกษาสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม พบว่าฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะให้คุณสมบัติทางด้านความหนืดมากกว่าสารเคมีชนิดอื่น (โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและอีพิคลอโรไฮไดริน)

8.1.4 ผลต่อการเกิดเจลลิตในเซชัน

Singh, Kaur และ McCarthy (2007) กล่าวว่า การเกิดเจลลิตในเซชันคือการทำลายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ผันกลับของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ช เช่น การพองตัวของเม็ดสตาร์ช การหลอมเหลวของผลึก การสูญเสียคุณสมบัติในการบิรระนาบแสงโพลาไรซ์ และการละลายของสตาร์ช

Chatakanonda, Varavinit และ Chinachoti (2000) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยการเชื่อมข้ามโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (99:1) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง DSC พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าเริ่มเกิดเจลลิตในซ์ (T_o) เท่ากับ 57.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนมากที่สุดขณะเกิดเจลลิตในซ์ (T_p) เท่ากับ 67.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดเจลลิตในซ์ (T_c) เท่ากับ 76.8 องศาเซลเซียส และพลังงานเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตในเซชัน (ΔH) เท่ากับ 6.7 จูลต่อกรัม หลังจากผ่านการดัดแปรสตาร์ชจะมีช่วงการเกิดเจลลิตในเซชัน ($T_c - T_o$) แคบลง เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และตัวควบคุม (ไม่เติมโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต) และสตาร์ชควบคุมจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในซ์ลดลงเล็กน้อย แต่สตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้ยืนยันได้ว่าหมู่ฟอสเฟตจะเข้าไปในโมเลกุลของสตาร์ช ส่งผลให้สตาร์ชเกิดการจับตัวกันแน่นมากขึ้น และมีค่า ΔH ลดต่ำลง หลังผ่านการเชื่อมข้าม และยังพบพีคที่เกิดขึ้นอีก 1 พีคที่อุณหภูมิ 90-110 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น

ลักษณะของการรวมกันของอะไมโลส และไขมัน เช่นเดียวกับ Vermeylen และ Delcour (2001) ที่พบพีคที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสด้วย

Choi และ Kerr (2004) รายงานว่าการดัดแปรด้วยการเชื่อมข้ามโดยใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ที่ระดับต่ำๆ จะทำให้ช่วงการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ในขณะที่ถ้าระดับของการดัดแปรเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มสูงขึ้น และค่า ΔH เพิ่มสูงขึ้น คล้ายกับการทดลองของ Yeh และ Yeh (1993)

Kaur และคณะ (2002) กล่าวว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามจะขึ้นอยู่กับ 1) ความเข้มข้น และชนิดของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2) สภาพที่ใช้ในการดัดแปร 3) แหล่งของสตาร์ช

8.1.5 ผลต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ช

Kaur และ Singh (2005) ได้ทำการศึกษาสตาร์ชมันฝรั่งที่ดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์และอีพิกคลอโรไฮดริน พบว่าหลังจากผ่านการเชื่อมข้ามสตาร์ชจะมีค่าร้อยละการพองตัวลดลง เช่นเดียวกับการทดลองในสตาร์ชข้าวเจ้า และข้าวเหนียวที่หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม จะมีค่าร้อยละการพองตัวลดลง (Liu, Ramsden และ Corke, 1999)

Singh, Kaur และ McCarthy (2007) กล่าวว่าการศึกษาการพองตัวของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามมีค่าลดลงเนื่องมาจาก 1) ชนิดของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2) สภาพที่ใช้ในการดัดแปร 3) ชนิดของสตาร์ช ซึ่ง Leach (1995) กล่าวว่าความแข็งแรงของร่างแห (micellar network) ภายในเม็ดสตาร์ชเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ส่วน Choi และ Kerr (2004) รายงานว่าการเกิดการเชื่อมข้ามภายในเม็ดสตาร์ชจะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชต้านทานต่ออุณหภูมิ และความร้อนได้สูงขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของพันธะที่เกิดการเชื่อมข้ามภายในเม็ดสตาร์ชจะทำให้ต้านทานต่อการพองตัว

Yeh และ Yeh (1993) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าในสารละลาย dimethyl sulphoxide (DMSO) พบว่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่อระยะเพิ่มมากขึ้น ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยการเชื่อมข้ามจะมีค่าการละลายลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากการทำการเชื่อมข้ามจะส่งผลให้พันธะระหว่างสายสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น และเกิดการรวมตัวกันภายในเม็ดสตาร์ช

8.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างภายนอกของเม็ดสตาร์ชครอสลิงไม่มีการเปลี่ยนแปลง พันธะเคมีที่เกิดขึ้นเสริมพันธะไฮโดรเจนทำให้เม็ดสตาร์ชแข็งแรงและเสถียรมากขึ้น ไม่แตกง่าย มีการละลายลดลง มีคุณสมบัติในการเกิดเจลลิตในซัสสูงขึ้น สตาร์ชเปียกมีความต้านทานต่อแรงเฉือนและความเป็นกรดมากขึ้น ลักษณะเนื้อครีมเนียนคล้ายขี้ผึ้ง ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นในอาหาร เหมาะสำหรับใช้ผลิตอาหารที่มีสภาพเป็นกรด ใช้คุณสมบัติสูงเป็นเวลานาน และมีแรงเฉือนจากการกวนของเครื่องมือหรือส่งผ่านตามท่อโดยใช้ปั๊ม รวมทั้งชะลอการเกิดเจลลิตในเซชันทำให้ผลิตภัณฑ์มีความข้นหนืดตามที่ต้องการเมื่อเย็นตัวลง (Wurzburg, 1986) มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นหนืดที่สูง ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสตาร์ชให้เหมาะแก่การหุงต้ม เมื่อเพิ่มระดับการทำครอสลิงจะเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ชจึงเหมาะที่จะใช้ในอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ เช่น ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ ใสผลไม้สำหรับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนสูง เช่น อาหารกระป๋อง (Luallen, 1985) พิล์มที่ได้จากสตาร์ชครอสลิงมีคุณสมบัติที่ดี มีความเหนียวคงตัว เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Kirby, 1986)

ในอุตสาหกรรมอาหาร อาศัยคุณสมบัติของสตาร์ชครอสลิงที่ไม่สูญเสียความหนืดที่พีเอชต่ำนำมาเป็นสารเพิ่มความข้นสำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดสูง เช่น ซอส น้ำสลัด และอาศัยคุณสมบัติของสตาร์ชที่มีอัตราการพองตัวและการเกิดเจลลิตในเซชันลดลงที่อุณหภูมิสูง นำมาใช้กับอาหารกระป๋องที่ต้องการความร้อนสูงและต้องการความหนืดต่ำในช่วงแรก ซึ่งทำให้การนำความร้อนในกระป๋องเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อน้อยลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดตามต้องการเมื่อเย็นตัวลง (Rutenberg และ Solarek, 1984) นอกจากนี้ยังใช้ผลิตอาหารว่างได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโพรงอากาศละเอียดและสม่ำเสมอกว่าเมื่อผลิตโดยใช้สตาร์ชดิบ (ดวงใจ, 2536) ใช้สตาร์ชครอสลิงเป็นสารทำให้เกิดความคงตัวในซอสมะเขือเทศ ทำให้ซอสมะเขือเทศมีความหนืด และคุณภาพทางประสาทสัมผัสเหมาะสม และรักษาความคงตัวในซอสมะเขือเทศได้เป็นเวลานาน (วรรณพร, 2528)

ในอุตสาหกรรมกระดาษ สิ่งทอ และกาวย ใช้สตาร์ชครอสลิงเคลือบกระดาษและสิ่งทอ และผลิตกาวยที่ทนน้ำ ในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้สตาร์ชครอสลิงในรูปเม็ดสตาร์ชในการทำ surgical dusting power ใช้ epichlorohydrin cross-linked starch เป็นสารเพิ่มความข้นในสารทำความสะอาดเตาอบ (Wurzburg, 1986)

Nebeshima และ Grossmann (2001) นำสารไขมันดำปะหลังที่ผ่านการเชื่อมข้ามไปทำการอัดผ่านเกลียว พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงของเจล ค่าการดูดซึมน้ำ ทนต่ออุณหภูมิและการกวนเพิ่มมากขึ้น แต่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเจล ความใสและการละลายลดลง

บทที่ 3

วัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

- สตาร์ชถั่วเขียว

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งน้ำหนัก (Sartorius, BP 3100S, Germany)
- ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (hot air oven) (WTB binder, Germany)
- เครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) (Newport Scientific, Model RVA-4, Australia)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (Jeol, JSM-5410LV, England)
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (Hettich Zentrifugen, Universal 16/16R, Germany)
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) (MeterLab, PHM 210, France)
- ปั๊มกรอง (suction pump) (Eyela, Aspirator A-3S, Tokyo)
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Stuart Scientific, SBS 30, USA)
- แท่นให้ความร้อนพร้อมระบบกวนด้วยแม่เหล็ก (Framo, Type M 22/1, Thailand)
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) (Spectronic Unicam, Genesys 10 UV, USA)
- เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Perkin-Elmer, Pyris1, USA)
- เครื่องวัดสี (colorimeter) (HunterLab, Miniscan, USA)
- เครื่องกวนผสม (Heidolph, RZR 2021, Germany)
- เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA-XT2i, England)
- เตาเผา (furnace)
- เครื่องผสมวอร์เทค
- ถาดอลูมิเนียมขนาด 17x20 นิ้ว

- ถังพลาสติกทนความร้อนขนาด 6x8 และ 12x18 นิ้ว
- ตะแกรงร่อนขนาด 35 เมช
- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
- แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน (magnetic bar)
- ปีกเกอร์ (beaker)
- ปิเปต (pipette)
- ขวดแก้วรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
- หลอดทดลอง (test tube)
- แท่งแก้วกวน (stirring rod)
- กระบอกตวง
- ขวดน้ำกลั่น
- ขวดแก้ววัดปริมาตร (volumetric flask)
- หลอดวัดค่าการดูดกลืนแสง (cuvette)
- หลอดเหวี่ยง (centrifuge tube)
- กระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 1 และ 4
- กรวยกรอง
- ที่คีบ (tongs และ forceps)
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- ถังอะลูมิเนียมมีฝา (moisture can)
- อะลูมิเนียมฟอยล์
- ชุดกรอง (suction flask และ Büchner funnel)

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีการย่อยด้วยกรด

- กรดไฮโดรคลอริก
- โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีออกซิเดชัน

- โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กรดซัลฟูริก

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยวิธีการเชื่อมข้าม

- โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (sodium trimetaphosphate)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมคาร์บอเนต
- กรดไฮโดรคลอริก

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส

- อะไมโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง
- เอทานอล 95%
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กรดแกลเชียลอะซิติก
- ไอโอดีน
- โพแทสเซียมไอโอไดด์

3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดภายหลังถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

3.5.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์

- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมคลอไรด์
- โซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิกแอนไฮไดรอส (sodium phosphate monobasic anhydrous)

anhydrous)

- สตาร์ชมันฝรั่งที่ละลายน้ำได้
- โซเดียมโพแทสเซียมทาทเรต (sodium potassium tartrate)
- กรดไดไนโตรซาลิไซลิก (dinitrosalicylic acid)
- น้ำตาลมอลโตสมาตรฐาน
- น้ำดีไอไอไนซ์ (deionized water)
- เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (Alpha-amylase from porcine pancreatic suspension in 2.9 M NaCl solution containing 3 mM CaCl_2) (Sigma aldrich chemical, GmbH, Germany)

3.5.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วย เอนไซม์

- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมคลอไรด์
- โซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิกแอนไฮไดรรัส (sodium phosphate monobasic anhydrous)
- เอทานอล 95%
- เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (Alpha-amylase from porcine pancreatic suspension in 2.9 M NaCl solution containing 3 mM CaCl_2) (Sigma aldrich chemical, GmbH, Germany)

3.5.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด

- น้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน
- ฟีนอล
- กรดซัลฟูริก

3.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส

- แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate)

- แอมโมเนียมวานาเดต (ammomium vanadate)
- โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium dihydrogen phosphate)
- กรดไฮโดรคลอริก
- กรดไนตริก

3.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล

- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กรดไฮโดรคลอริก
- โพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (potassium hydrogen phthalate)
- ฟีนอล์ฟทาลีน
- ไฮดรอกซิลเอมีนไฮโดรคลอไรด์ (hydroxylamine hydrochloride)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การผลิตสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปร

4.1.1 การเตรียมสตาร์ชดัดแปรโดยวิธีการย่อยด้วยกรด

เตรียมของผสมน้ำกับสตาร์ชถั่วเขียวความเข้มข้นร้อยละ 35 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) เติมกรดไฮโดรคลอริกให้มีความเข้มข้นของกรดร้อยละ 0.0, 0.5 และ 1.0 (ปริมาตรต่อน้ำหนัก) จากนั้นนำของผสมเข้าเครื่องเขย่าซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดเวลา 1 ชั่วโมง ทำของผสมให้เย็นอย่างรวดเร็ว ปรับพีเอชของของผสมให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ทำการกรองสลับกับการล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ นำสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 18 ชั่วโมง ทำการบดแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35 เมช

4.1.2 การเตรียมสตาร์ชดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน (ดัดแปลงจาก Wang และ Wang, 2003)

เตรียมของผสมน้ำกับสตาร์ชถั่วเขียวความเข้มข้นร้อยละ 35 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) จำนวน 200 กรัม และปรับให้ของผสมมีค่าพีเอชประมาณ 9.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 นอร์มอล จากนั้นค่อย ๆ เติม โซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0, 20, 40, 60 และ 80 กรัม ตามต้องการ เพื่อให้มีแอกทิฟคลอรีน 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ตามลำดับ อย่างช้า ๆ ภายในเวลา 30 นาที โดยต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส และควบคุมให้มีค่าพีเอชประมาณ 9.5 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 นอร์มอล หลังจากเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์หมด ควบคุมพีเอชของของผสมให้มีค่าประมาณ 9.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล ต่อไปอีกเป็นเวลา 50 นาที จากนั้นปรับให้พีเอชของของผสมเป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มอล ทำการกรองสลับกับการล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ แล้วนำสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช

4.1.3 การเตรียมสตาร์ชดัดแปรโดยวิธีการเชื่อมข้าม (ดัดแปลงจาก Atichokudomchai และ Varavinit, 2003)

เตรียมสารละลายโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นตามต้องการร้อยละ 0.0, 5.0, 10.0 หรือ 15.0 ปริมาตร 600 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.8 กรัม และ โซเดียมคาร์บอเนต 9 กรัม เติมสตาร์ชถั่วเขียว 300 กรัม (น้ำหนักแห้ง) กวนที่อุณหภูมิห้อง 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับให้ของผสมมีค่าพีเอช 6.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 นอร์มอล ทำการกรองสลับกับการล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ นำสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ทำการบด แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35 เมช

4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (native) และสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรจะผ่านการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติ (ภาคผนวก ก) ดังต่อไปนี้

- 4.2.1 ปริมาณความชื้น ด้วยการอบแห้ง (AOAC, 1990)
- 4.2.2 ลักษณะปรากฏทางสัณฐาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Walker, 1976)
- 4.2.3 ค่าสี ด้วยเครื่อง colorimeter (Nollet, 1996)
- 4.2.4 ปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)
- 4.2.5 โครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Cheetham และ Tao, 1998)
- 4.2.6 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (Newport Scientific Pty, Ltd., 1995)
- 4.2.7 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (ดัดแปลงจากกล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543)
- 4.2.8 ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (susceptibility to enzyme digestion) โดยการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Bernfeld, 1995, Li และคณะ, 2003 และ Dubois และคณะ, 1956)
- 4.2.9 การพองตัว และการละลาย (Leach และคณะ, 1959)
- 4.2.10 ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลาย (ดัดแปลงจาก Jayati, Singhal และ Kulkarni, 2002)
- 4.2.11 ความแข็งแรงของเจล ด้วยเครื่อง Texture Analyzer
- 4.2.12 ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล (เฉพาะสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน) (Wang และ Wang, 2003)
- 4.2.13 ปริมาณฟอสฟอรัส (เฉพาะสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม) (ดัดแปลงจาก Food analysis, 1998)

4.3 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวางแผนการทดลองแบบ Augmented Factorial Design (3x2+control) ในการศึกษาสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรโดยวิธีการย่อยด้วยกรด และวางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) ในการศึกษาสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน และการเชื่อมข้าม ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistical

Analysis System (SAS) Version 8.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ The Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

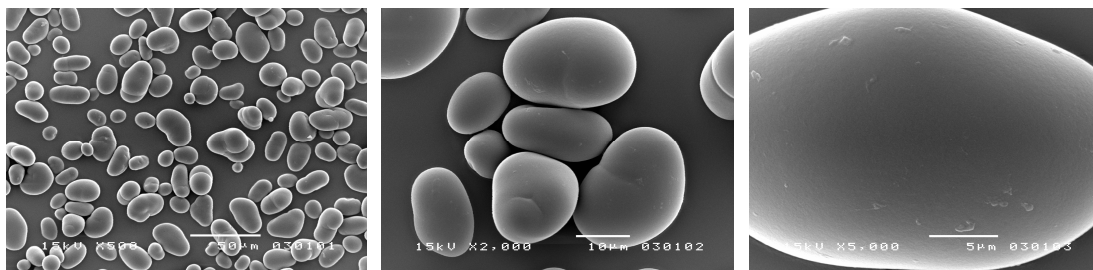
1. การดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยการย่อยด้วยกรด

1.1 ผลของการดัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชถั่วเขียว

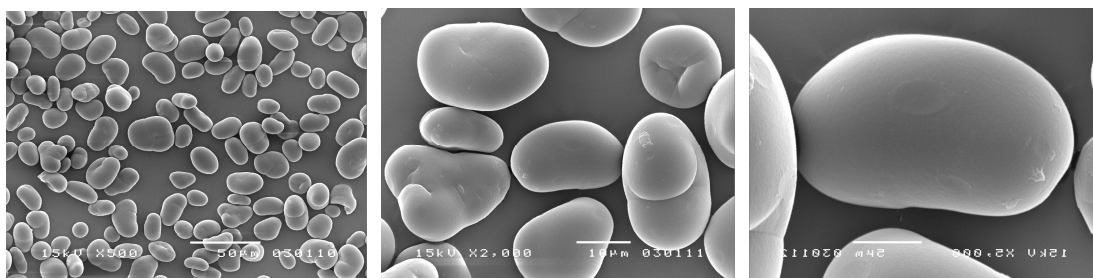
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (native starch) และดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ระดับของกรดไฮโดรคลอริก 0.0 และ 1.0% ดังแสดงในภาพที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

จากภาพที่ 14 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะรูปร่างหลายแบบ ได้แก่ กลม กลมรี ไปจนถึงมีลักษณะคล้ายไต และมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่างกลมจะมีขนาดเล็ก เม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่าง กลมรี และคล้ายไตจะมีขนาดใหญ่ เม็ดสตาร์ชบางเม็ดจะมีร่องซึ่งจะพบร่องในเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มากกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก โดยเม็ดสตาร์ชจะกระจายตัวอยู่แบบเม็ดเดี่ยว ไม่มีการจับเป็นกลุ่มก้อน

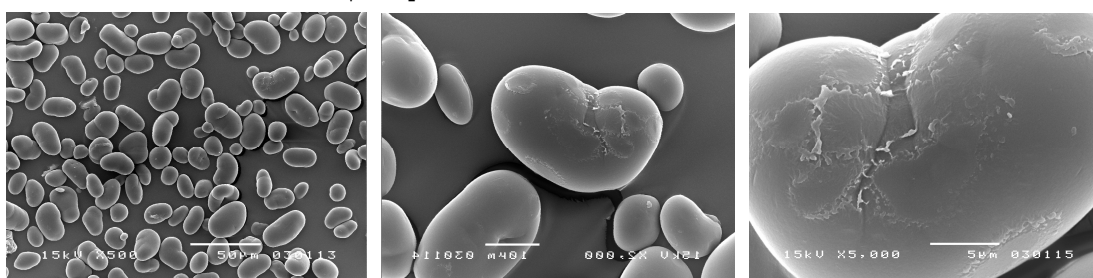
จากภาพที่ 14 และ 15 พบว่าภายหลังการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวด้วยการย่อยด้วยกรด บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชมีรอยของการถูกย่อย เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้น จะพบรอยที่ถูกย่อยเพิ่มขึ้นด้วย ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ รัฐสุธา และลัดดาวัลย์ (2548); Atichokudomchai และ Varavinit (2003) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดจะเข้าไปย่อยส่วนที่เป็น อณูฐาน โดยเฉพาะอะไมโลสบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช



สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

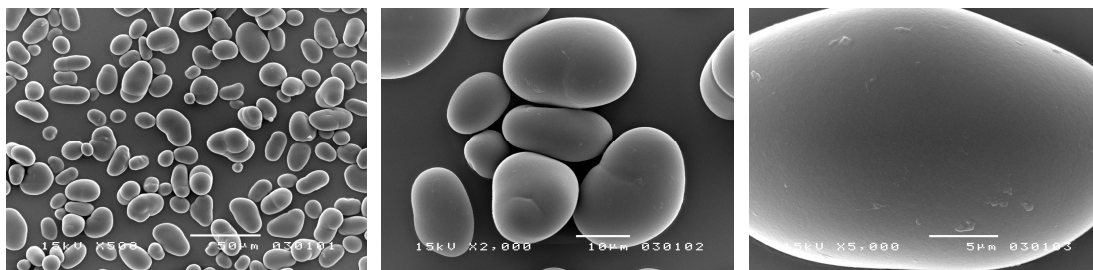


สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.0%

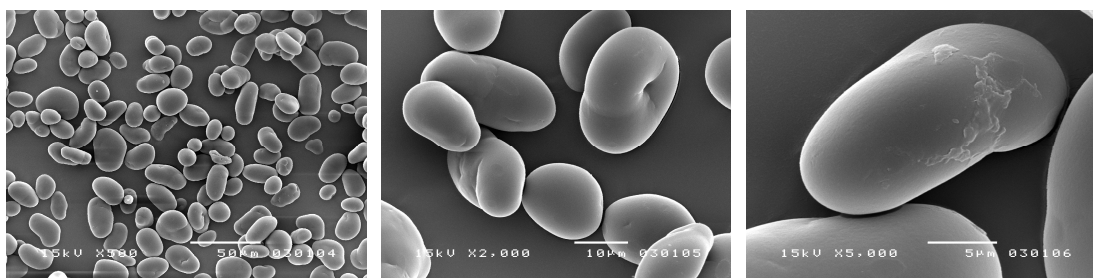


สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1.0%

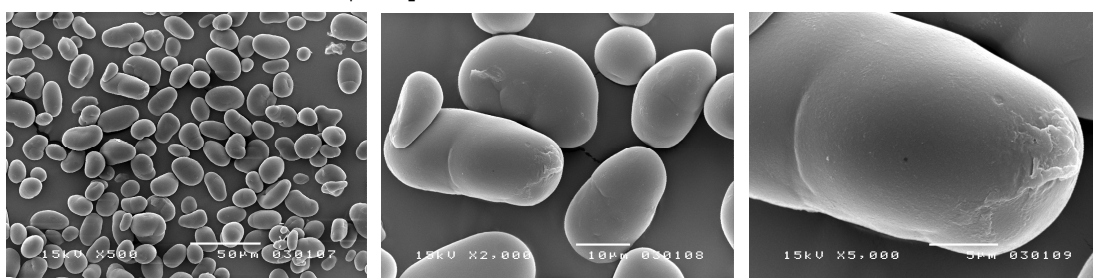
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 ลักษณะของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ
 40 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)



สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร



สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.0%



สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1.0%

ภาพที่ 15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 พื้นฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ
 60 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)

1.2 ผลของการดัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว

ค่าสีที่วัดจากเครื่องวัดสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด
 แสดงไว้ในตารางที่ 4 ค่า L^* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0-100 โดยที่ 0 แสดงถึงสี
 ดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว $+a^*$ แสดงความเป็นสีแดง $-a^*$ แสดงความเป็นสีเขียว $+b^*$ แสดง
 ความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดร
 คลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีอิทธิพลต่อค่า L^* , a^* และ b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งจากการ

ทดลองพบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่า L^* เท่ากับ 78.22 a^* เท่ากับ 0.36 และ b^* เท่ากับ 1.95 สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีค่า L^* อยู่ระหว่าง 77.94-80.85 โดยสตาร์ชที่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.5% มีค่าความขาวสูงสุด เมื่อสตาร์ชผ่านการย่อยด้วยกรดพบว่าจะมีค่า a^* ลดลง ยกเว้นสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1.0% ที่มีค่า a^* เพิ่มมากขึ้น สตาร์ชย่อยด้วยกรด มีค่า b^* เพิ่มมากขึ้น โดยสตาร์ชที่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.5% มีค่า b^* มากที่สุด ซึ่งรัฐสุธา และลัดดาวัลย์ (2548) รายงานว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าโดยการย่อยด้วยกรด ไม่ส่งผลต่อค่า L^* และ a^* แต่จะทำให้ค่า b^* เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
native starch	78.22 ± 0.01^d	0.36 ± 0.02^b	1.95 ± 0.02^d
AT-40-CT	77.94 ± 0.08^d	0.16 ± 0.02^e	2.25 ± 0.73^c
AT-40-0.5	78.09 ± 0.34^d	0.06 ± 0.03^f	2.94 ± 0.26^a
AT-40-1.0	78.73 ± 0.31^c	0.26 ± 0.03^c	2.44 ± 0.04^b
AT-60-CT	79.74 ± 0.03^b	-0.02 ± 0.03^f	2.41 ± 0.01^b
AT-60-0.5	80.85 ± 0.31^a	0.21 ± 0.03^d	2.45 ± 0.08^b
AT-60-1.0	78.12 ± 0.70^d	0.43 ± 0.04^a	2.51 ± 0.09^b

a,...,f = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

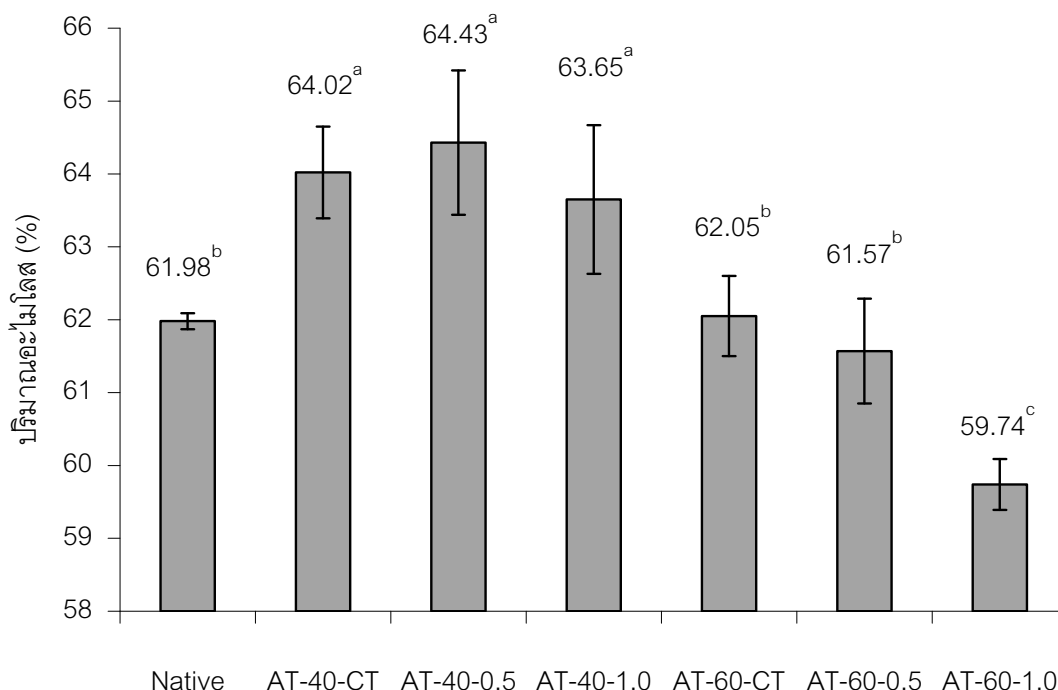
1.3 ผลของการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว

การหาปริมาณอะไมโลสเพื่อตรวจสอบการสลายตัวของโมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยอาศัยการที่อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ

ไอโอไดน์ โดยอะไมโลสจะไปพันเป็นเกลียวล้อมรอบไอโอไดน์ (Galliard และ Bowler, 1987) ซึ่งจะให้น้ำเงิน และสามารถค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรได้

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อปริมาณอะไมโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองการหาปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยยอยด้วยกรด ดังแสดงในภาพที่ 16 และตารางที่ 17 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณอะไมโลสอยู่ร้อยละ 61.98 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับสตาร์ชถั่วเขียวในรายงานอื่นๆ ที่มีอะไมโลสร้อยละ 30.7 (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998) หรือร้อยละ 32.7-34.3 (Liu และ Shen, 2007a และ Liu และ Shen, 2007b) อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตหรือสารเคมีที่ใช้ในการสกัดโปรตีนจึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสสูงกว่ารายงานอื่นๆ หรืออาจเกิดจากอะไมโลเพกตินที่มีสายยาวเกิดการรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอไดน์จึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสที่วัดได้มีค่าสูง (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998)

หลังผ่านการดัดแปรโดยการยอยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณอะไมโลสได้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการยอยด้วยกรดจะส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชถูกตัดให้สั้นลงหรือทำการตัดส่วนที่เชื่อมต่อกันในโครงผลึกให้เกิดเป็นเส้นตรงเพิ่มมากขึ้น (Gunaratne และ Corke, 2007) ส่วนการดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณอะไมโลสลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 1.0% ซึ่ง Lawal (2004) กล่าวว่าปริมาณอะไมโลสจะลดลงหากใช้ระดับของการดัดแปรที่สูง อาจเนื่องมาจากกรดได้ตัดสายสตาร์ชจนมีขนาดสั้นเกินกว่าที่จะสามารถรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอไดน์ได้



ภาพที่ 16 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

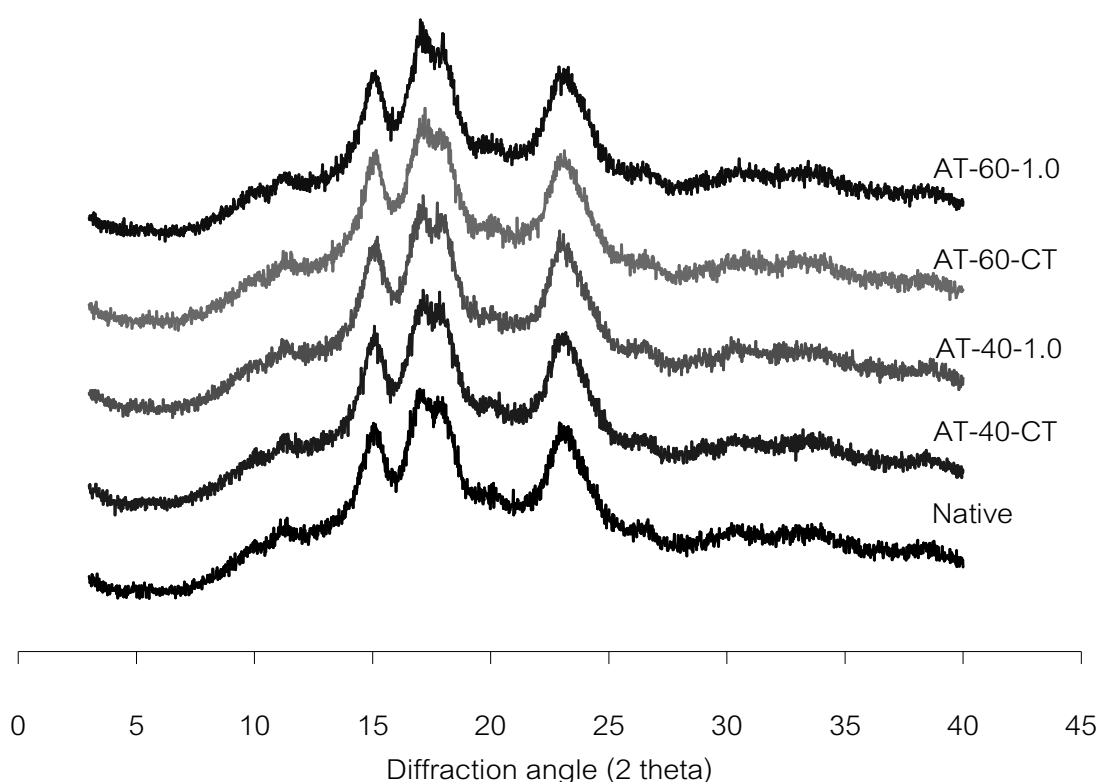
1.4 ผลของการดัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งทำการสแกนที่มุม 2θ เท่ากับ 3-40 องศา แสดงไว้ในภาพที่ 17 และผลการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกจากพื้นที่ใต้กราฟ X-ray diffraction แสดงไว้ในตารางที่ 18

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งมีพีคหลักปรากฏอยู่ 3 พีคคือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา สองพีคเชื่อมกันที่ 17 และ 18 องศา และพีคสุดท้ายที่ 23 องศา ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Liu และ Shen (2007b) สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละความเป็นผลึกเท่ากับ 51.84

หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด พบว่าสตาร์ชยังคงมีโครงสร้างเป็นแบบ A แต่จะส่งผลให้ความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17 และ 18 องศา เพิ่มขึ้น และมีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ในการย่อยด้วยกรดนี้กรดจะไปย่อยสายสตาร์ชในส่วนอสัณฐานให้มีสายสั้นลง ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงขึ้น จึงง่ายต่อการจัดเรียงโครงสร้างผลึก (Lawal และคณะ, 2005) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองในสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (Chung, Jeong และ Lim, 2003) สตาร์ชนิวโคโคแยม (Lawal, 2004) สตาร์ชไซนิสแยม (Wang และคณะ, 2007)



ภาพที่ 17 รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

1.5 ผลของการดัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว

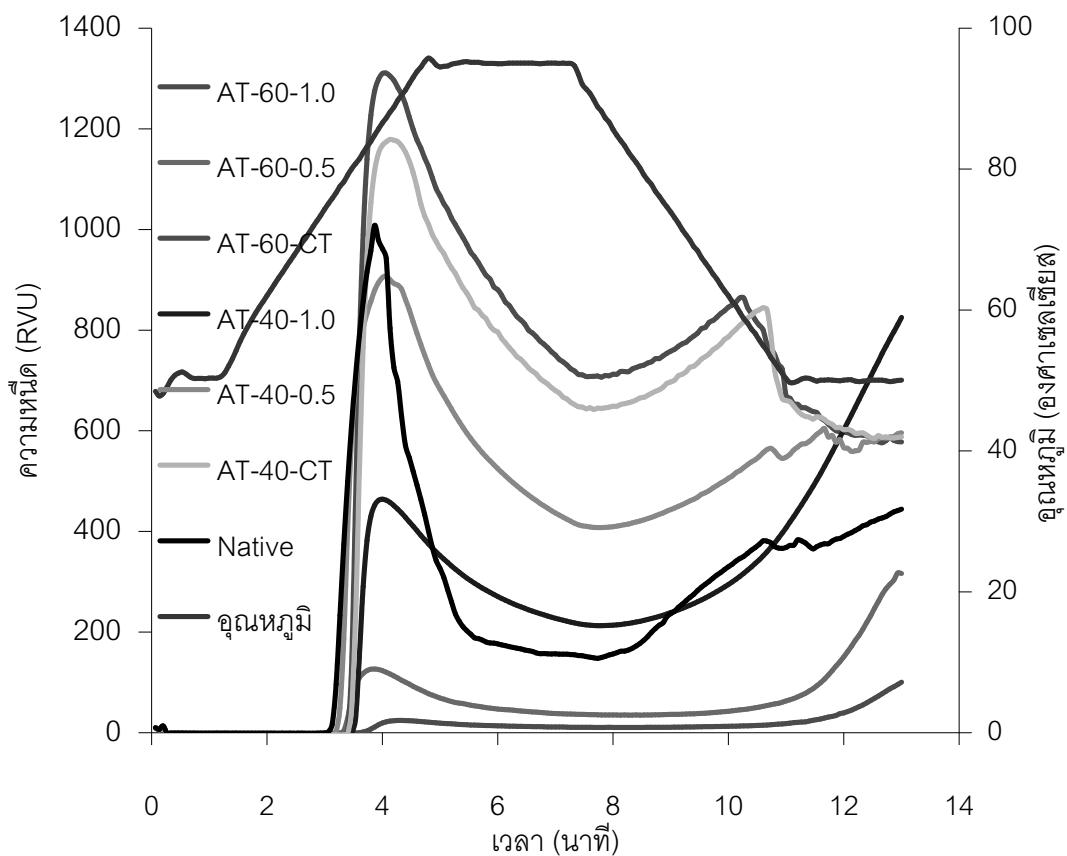
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด แสดงดังภาพที่ 18 และตารางที่

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรในทุกค่า ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็น (trough) ผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดกับค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นหรือเบรคดาวน์ (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นหรือเซตแบค (setback) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) และเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) และพบว่าปัจจัยเดียว ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็น และอุณหภูมิไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 1022 RVU และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 74.30 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านการย่อยด้วยกรดพบว่า ความหนืดสูงสุด เบรคดาวน์ มีค่าลดลง และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าสูงขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับ Sandhu, Singh และ Lim (2007) ค่าความหนืดที่ลดลงเกิดจากกรดไปตัดโมเลกุลของสตาร์ชให้มีขนาดสั้นลง และเกิดการย่อยในบริเวณส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นการจัดเรียงผลึกในสายอะไมโลส ส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไป เพราะสายเกลียวคู่ที่ไม่ถูกทำลายในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนส่งผลในการต้านการพองตัวของสตาร์ช (Chung, Jeong และ Lim, 2003) ค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นและค่าความหนืดสุดท้าย ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าลดลง สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0% มีค่าเซตแบคมากที่สุด เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.5% ที่มีค่าไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืด จะพบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0% (control) เมื่อผ่านช่วงให้ความเย็นบริเวณส่วนท้ายของกราฟจะมีการลดลงของค่าความหนืด เนื่องจากสตาร์ชเกิดเป็นเจลที่แข็งแรงมากจึงส่งผลให้เมื่อทำการกวน เจลสตาร์ชได้แตก

ออกเป็นช่องว่างและมีขึ้นของเจลสตาร์ชซึ่งเมื่อสัมผัสกับไบพัตแล้วจึงส่งผลให้กราฟมีค่าความหนืดลดลง



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0, 0.5 และ 1.0%

ตารางที่ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak time (min)	Pasting temp. (°C)
Native starch	1022.92 ± 6.61 ^c	146.89 ± 8.30 ^d	876.03 ± 8.17 ^a	444.31 ± 91.96 ^c	297.42 ± 83.72 ^b	3.94 ± 0.12 ^d	74.30 ± 0.05 ^f
AT-40-CT	1180.01 ± 17.43 ^b	598.49 ± 42.92 ^a	581.53 ± 44.26 ^c	588.04 ± 43.16 ^b	10.45 ± 26.11 ^e	4.19 ± 0.07 ^b	79.63 ± 0.46 ^c
AT-40-0.5	907.99 ± 44.04 ^d	407.67 ± 7.62 ^b	500.37 ± 48.46 ^d	595.90 ± 51.96 ^b	188.24 ± 46.65 ^c	4.05 ± 0.04 ^c	77.09 ± 0.64 ^e
AT-40-1.0	464.50 ± 6.61 ^e	212.59 ± 10.47 ^c	251.92 ± 15.71 ^e	825.34 ± 54.31 ^a	612.75 ± 47.13 ^a	4.00 ± 0.04 ^{cd}	80.43 ± 0.70 ^b
AT-60-CT	1311.28 ± 18.13 ^a	596.50 ± 17.42 ^a	714.78 ± 31.16 ^b	577.89 ± 28.33 ^b	18.59 ± 23.77 ^e	4.06 ± 0.05 ^c	78.29 ± 0.51 ^d
AT-60-0.5	126.70 ± 10.44 ^f	34.88 ± 4.82 ^e	91.82 ± 6.47 ^f	316.30 ± 37.98 ^d	281.49 ± 34.73 ^b	3.85 ± 0.04 ^e	77.38 ± 0.34 ^e
AT-60-1.0	24.74 ± 1.55 ^g	10.17 ± 1.12 ^f	14.57 ± 0.76 ^g	100.64 ± 3.90 ^e	90.49 ± 4.51 ^d	4.31 ± 0.05 ^a	82.27 ± 1.03 ^a

a,...,g = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

1.6 ผลของการดัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_o$) และพลังงานเอนทาลปี (gelatinization enthalpy, ΔH) ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) แสดงดังภาพที่ 19 และตารางที่ 6

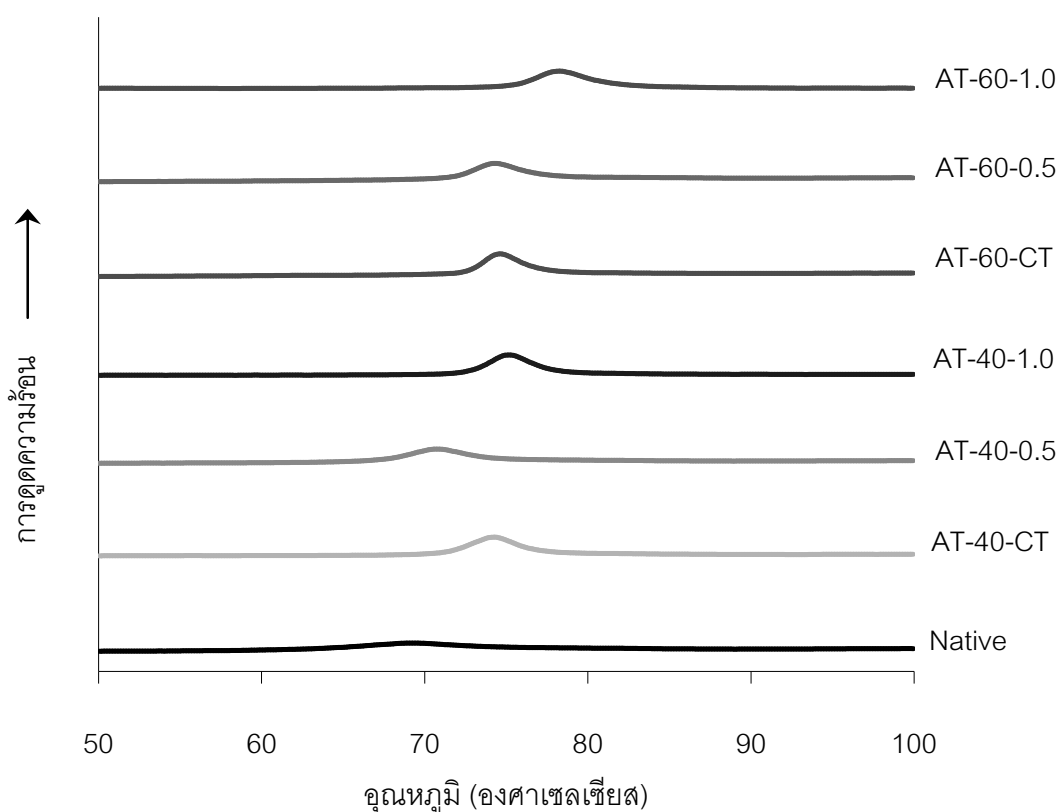
จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อ T_o , T_p และ T_c ส่วนปัจจัยเดี่ยวคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรไม่ส่งผลต่อ T_o , T_p , T_c , $T_c - T_o$ และ ΔH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมี T_o เท่ากับ 68.91 องศาเซลเซียส T_p เท่ากับ 62.74 องศาเซลเซียส T_c เท่ากับ 75.35 องศาเซลเซียส $T_c - T_o$ เท่ากับ 12.61 องศาเซลเซียส และ ΔH เท่ากับ 12.61 จูลต่อกรัม หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดพบว่า T_o , T_p และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นสตาร์ชย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.5% ที่มีค่า T_c ไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ส่วน $T_c - T_o$ มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gunaratne และ Corke (2007); Lawal และ Adebawale (2005); Lawal (2004) ที่พบว่า T_o , T_p และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน $T_c - T_o$ มีค่าลดลง

จากผลการทดลองพบว่า ΔH ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ยกเว้นสตาร์ชย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1.0% ซึ่งมีค่า ΔH เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มว่าจะมีค่า ΔH จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการดัดแปรสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของ Gunaratne และ Corke (2007); Lawal และ Adebawale (2005); Lawal (2004) ที่พบว่า ΔH จะเพิ่มขึ้นเมื่อสตาร์ชผ่านการย่อยด้วยกรด

Sandhu, Singh และ Lim (2007) ได้ศึกษาการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดในสตาร์ชข้าวโพด และข้าวโพดข้าวเหนียว พบว่าสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดจะส่งผลให้ T_o , T_p และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน $T_c - T_o$ มีค่าลดลง แต่ในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้ผลในทางตรงข้ามกัน ในขณะที่ ΔH ของสตาร์ชทั้งสองชนิดจะมีค่าลดลงเมื่อผ่านการย่อยด้วยกรด

Gunaratne และ Corke (2007) กล่าวว่ากรดจะเข้าไปย่อยส่วนที่เป็นอสังฐานมากกว่าส่วนที่เป็นผลึก ส่งผลให้เพิ่มปริมาณผลึก ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น ส่วน ΔH ที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดเนื่องจากการย่อยด้วยกรดจะส่งผลให้เกิดการสร้างสายสตาร์ชที่เป็นเกลียวคู่ระหว่าง อะไมโลส-อะไมโลส และอะไมโลส-อะไมโลเพคตินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ส่วนที่เป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ช



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่าน และผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลาติไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (องศาเซลเซียส)				เอนทาลปี
	T _O	T _P	T _C	(T _C -T _O)	(ΔH; J/g)
Native starch	62.74 ± 0.05 ^e	68.92 ± 0.22 ^e	75.35 ± 0.12 ^d	12.61 ± 0.22 ^a	12.61 ± 0.15 ^b
AT-40-CT	71.07 ± 0.17 ^c	74.26 ± 0.00 ^{bc}	77.44 ± 0.31 ^c	6.38 ± 0.49 ^b	13.35 ± 0.10 ^{ab}
AT-40-0.5	68.39 ± 1.51 ^d	71.41 ± 0.95 ^d	74.81 ± 0.32 ^d	6.42 ± 1.19 ^b	13.23 ± 0.98 ^{ab}
AT-40-1.0	72.93 ± 0.34 ^b	75.44 ± 0.48 ^b	78.49 ± 0.55 ^b	5.57 ± 0.21 ^{bc}	13.41 ± 0.00 ^{ab}
AT-60-CT	72.58 ± 0.01 ^{bc}	74.59 ± 0.00 ^{bc}	77.47 ± 0.18 ^c	4.89 ± 0.19 ^c	13.46 ± 0.93 ^{ab}
AT-60-0.5	71.36 ± 0.46 ^c	73.92 ± 0.48 ^c	77.25 ± 0.63 ^c	5.89 ± 0.17 ^{bc}	13.75 ± 0.21 ^{ab}
AT-60-1.0	75.87 ± 0.62 ^a	78.68 ± 0.58 ^a	82.26 ± 0.53 ^a	6.39 ± 0.09 ^b	14.30 ± 0.21 ^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

1.7 ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว

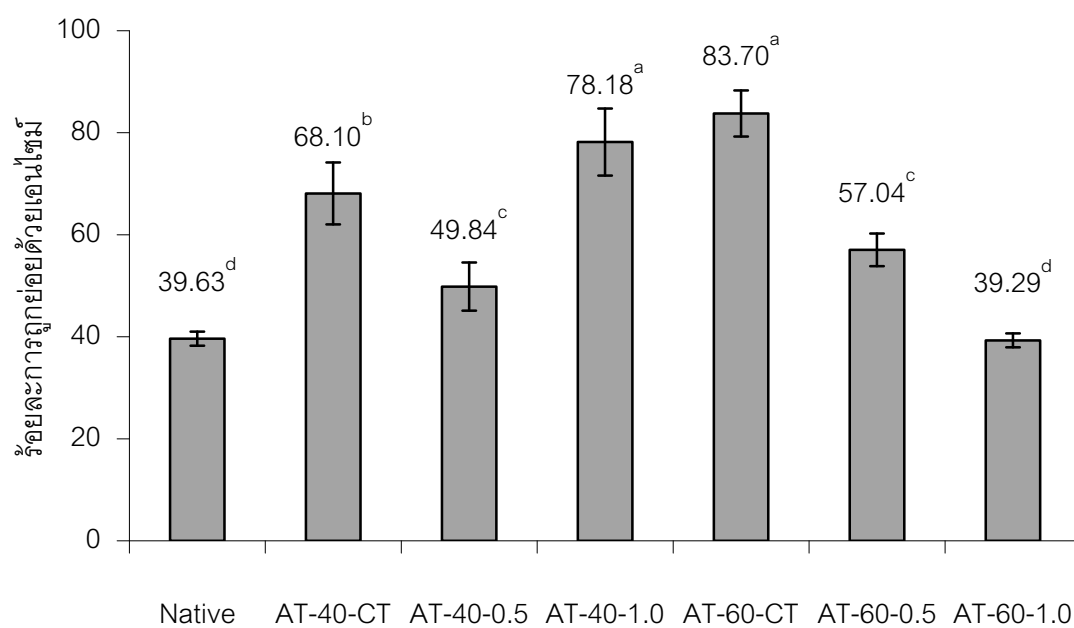
ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนาน 6 ชั่วโมง ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด แสดงในภาพที่ 20 และตารางที่ 19 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ดังกล่าว แสดงไว้ในภาพที่ 21 และ 22

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

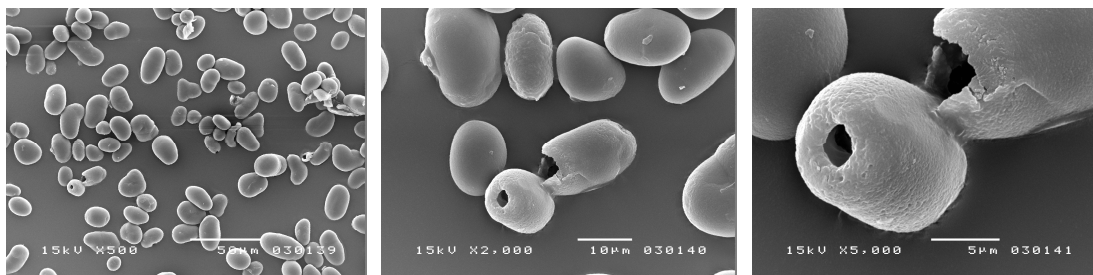
จากภาพที่ 20 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเท่ากับ 39.63 และหลังจากผ่านการย่อยด้วยกรดพบว่าร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ยกเว้นสตาร์ชที่ผ่านการย่อยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0% ที่ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การที่สตาร์ชดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง เนื่องมาจากการที่กรดสามารถตัดสายโมเลกุลของสตาร์ชให้สั้นลง ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอะไมโลส เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีคุณสมบัติเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะภายในแบบสุ่ม (endo enzyme) ที่จำเพาะเจาะจงต่อการตัดพันธะ α -(1,4)-ไกลโคซิดิก สตาร์ชจึงถูกย่อยได้มากขึ้น ที่ระดับของการดัดแปรสูงๆ กรดจะเข้าไปย่อยส่วนที่เป็นอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ชโดยเฉพาะอะไมโลสจึงส่งผลปริมาณอะไมโลสลดลงมาก จึงทำให้ส่วนที่เอนไซม์จะเข้าไปย่อยได้มีปริมาณน้อยลงและเอนไซม์จะเข้าไปย่อยในส่วนที่เป็นผลึกได้ยากกว่าส่วนอสัณฐาน จึงส่งผลให้สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0% มีร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

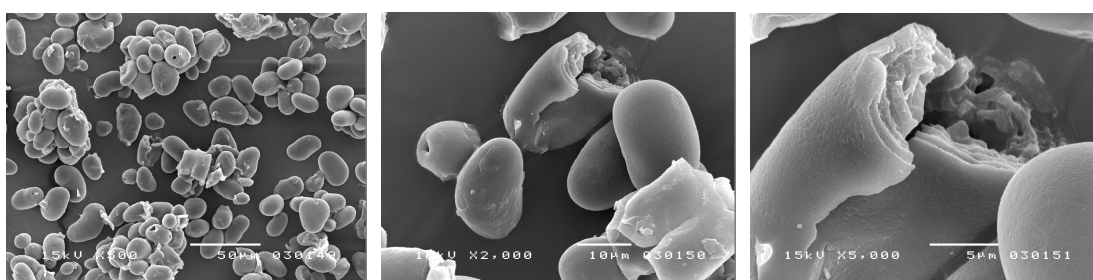
จากภาพที่ 21 และ 22 พบว่าบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชถูกกัดกร่อนอย่างชัดเจน มีรูเกิดขึ้นในสตาร์ชบางเม็ด บางเม็ดเสียสภาพไปหรือเหลือเพียงชั้นบางๆ ของเม็ดสตาร์ช และบางเม็ดสตาร์ชเกิดการเชื่อมกันบริเวณผิว ซึ่ง Gunaratne และ Hoover (2002) ได้อธิบายหลักการของการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสไว้ว่า แอลฟาอะไมเลสจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช และทำการย่อยส่วนที่เป็นผลึกบริเวณผิวหน้า หลังจากนั้นจะเข้าไปย่อยภายในเม็ดสตาร์ชต่อไป



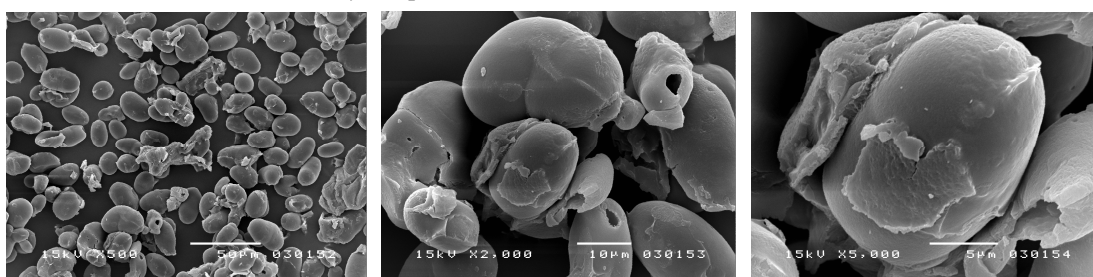
ภาพที่ 20 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่าน การดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด



สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

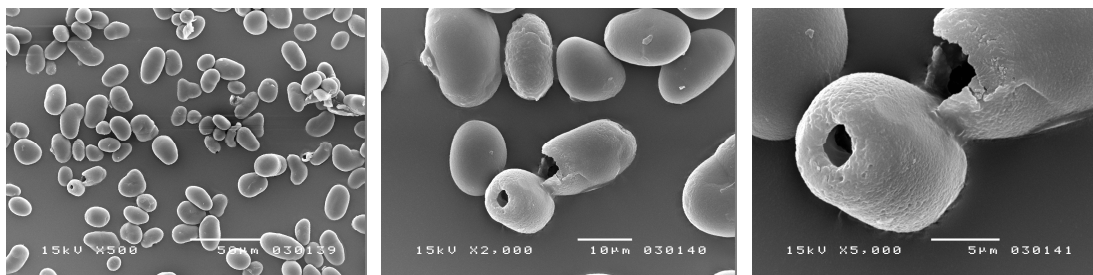


สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.0%

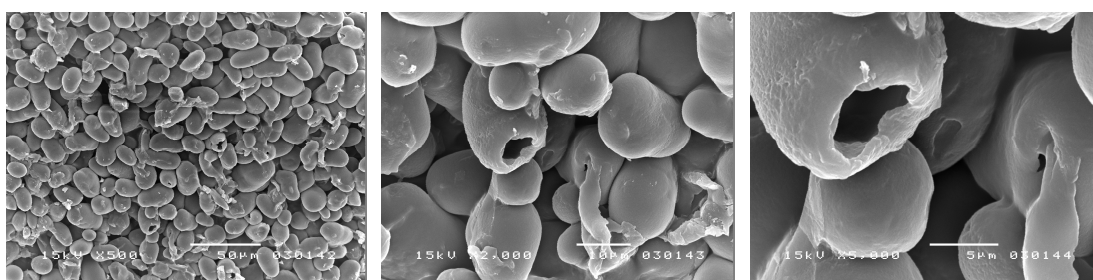


สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1.0%

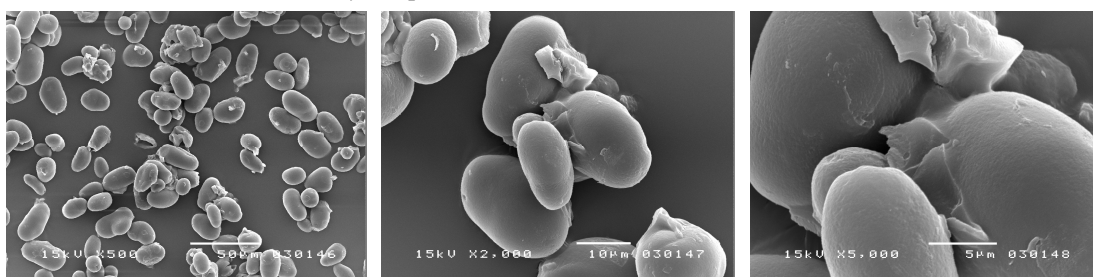
ภาพที่ 21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานภายหลังจากย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและ
 ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170,
 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)



สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร



สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นของกรด 0.0%



สตาร์ชดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นของกรด 1.0%

ภาพที่ 22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและ
 ผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 170,
 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ

1.8 ผลของการดัดแปรต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว

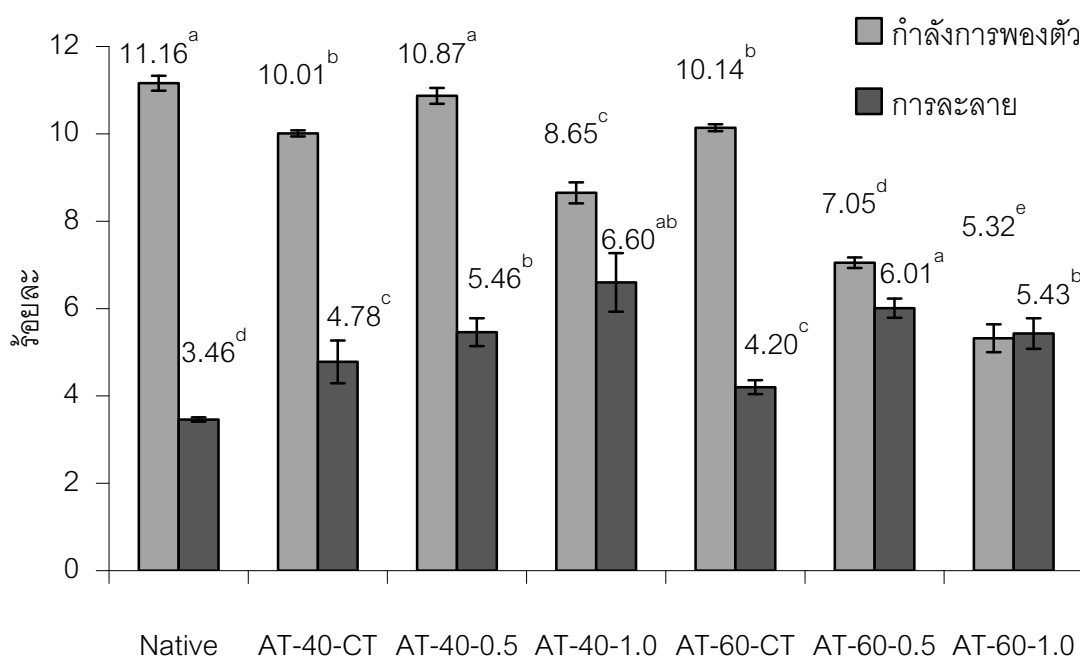
เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชที่แขวนลอย (starch suspension) เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว และจะทำให้บางส่วนของเม็ดสตาร์ชละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดที่ละลายในสารละลาย

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปร มีผลต่อค่ากำล้างการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่ากำล้างการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปร โดยการย่อยด้วยกรด แสดงไว้ในภาพที่ 23 และตารางที่ 20 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 3.46 และมีค่ากำล้างการพองตัวเท่ากับ 11.16 ซึ่งหลังจากผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดพบว่า มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นและค่ากำล้างการพองตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้น

Gunaratne และ Corke (2007) กล่าวว่าหากใช้ระดับการย่อยที่ต่ำจะส่งผลให้ค่ากำล้างการพองตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรด โดยกรดจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโพลีเมอร์ จึงส่งผลทำให้เพิ่มความสามารถเพิ่มการพองตัวที่ระดับความเข้มข้นของกรดต่ำๆ แต่เมื่อระดับความเข้มข้นของกรดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดการกีดกันบริเวณส่วนอสัณฐานทำให้ค่ากำล้างการพองตัวลดลง

ร้อยละการละลายที่เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นเนื่องจากกรดเข้าไปตัดโมเลกุลของสตาร์ช ส่งผลให้สตาร์ชมีโครงสร้างอ่อนแอลง โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนละลายหลุดออกมา ซึ่งคล้ายกับการทดลองของ Lawal และคณะ (2005); Sandhu, Singh และ Lim (2007) ที่กล่าวว่า การย่อยด้วยกรดจะส่งผลทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้หมู่ไฮโดรฟิลิกหรือหมู่ไฮดรอกซิล เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้สตาร์ชมีความสามารถในการละลายสูงขึ้น



ภาพที่ 23 ค่าการล้างการพอง และการละลายการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

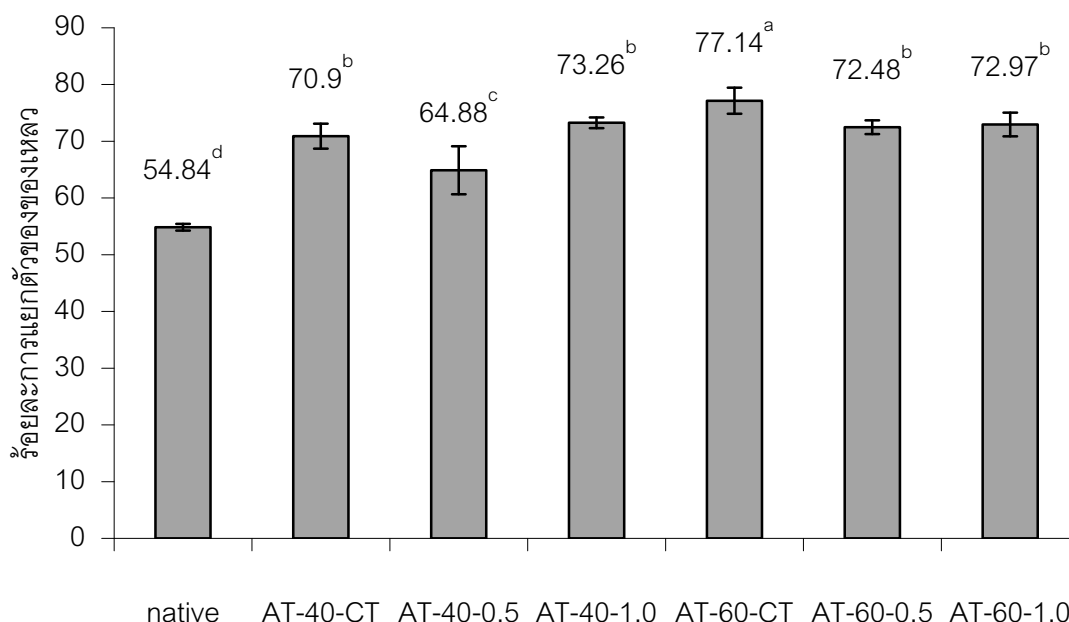
1.9 ผลของการตัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการศึกษาความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดแสดงไว้ในภาพที่ 24 และตารางที่ 21 ซึ่งความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายจะแสดงอยู่ในรูปของปริมาณการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชสุกที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลาย ถ้าหากมีร้อยละของการแยกตัวของของเหลวออกมาสูง แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายต่ำ

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการตัดแปรมีผลต่อค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเท่ากับ 54.84 และเมื่อผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด พบว่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้น การที่ร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการย่อยด้วยกรดจะทำให้สายโมเลกุลของสตาร์ชสั้นลง เมื่อนำไปผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลง จะส่งผลให้สายสตาร์ชเกิด

รีโทรเกรดชันสามารถกลับมาเกาะกันง่ายขึ้น ทำให้น้ำที่เกาะโมเลกุลของสตาร์ชถูกบีบออกมาได้มาก ทำให้มีร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 24 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

1.10 ผลของการดัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว

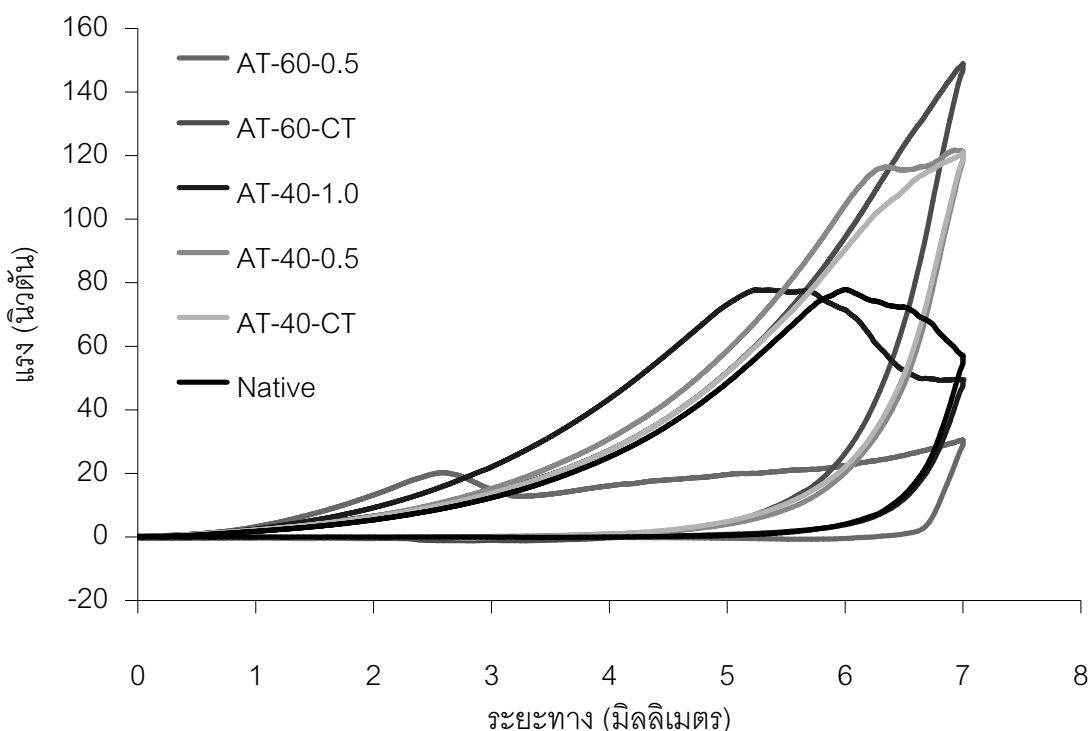
ผลการศึกษาความแข็งแรงของเจลจากสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดแสดงในภาพที่ 25 และตารางที่ 22

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 78.96 นิวตัน หลังจากสตาร์ชถั่วเขียวผ่านการย่อยด้วยกรดพบว่าค่าการย่อยที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.5% ทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของกรด 1.0% ให้ค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ส่วนการย่อยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเข้มข้นของกรด 0.5%

ทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลง ส่วนที่ความเข้มข้นของกรด 1.0% ไม่สามารถวัดความแข็งแรงของเจลได้เนื่องจากเจลมีลักษณะเหลวติดพิมพ์

Gunaratne และ Corke (2007) ได้ศึกษาการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดในสตาร์ชข้าวสาลีมันฝรั่งและข้าวโพด พบว่าสตาร์ชข้าวสาลีเมื่อผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดความแข็งแรงของเจลจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดสูงขึ้น ในขณะที่สตาร์ชมันฝรั่งจะมีความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น แต่ในสตาร์ชข้าวโพดพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 0.1 โมลาร์ ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดความแข็งแรงของเจลจะมีค่าลดลง การที่ความแข็งแรงของเจลมีค่าเพิ่มขึ้นเกิดจากความยาวของสายสตาร์ชที่เหมาะสม และความเข้มข้นของสายสตาร์ชส่วนที่เป็นเส้นตรงมีค่าสูง ส่วนการที่ความแข็งแรงของเจลลดลงเนื่องมาจากการย่อยด้วยกรดทำให้สูญเสียความยืดหยุ่นในการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และเกิดจากความยาวของสายอะไมโลสหลังจากถูกย่อยด้วยกรดไม่เหมาะสมทำให้ไม่มีประสิทธิภาพในการรวมตัวกัน แม้ว่าจะมีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นหลังผ่านการย่อยด้วยกรด

Wang, Truong และ Wang (2003) ได้ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดโดยการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 0.06, 0.14 และ 1.00 นอร์มอล พบว่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของเจลมีค่าลดลง ความแข็งแรงของเจลที่ลดลงเกิดจากโมเลกุลของอะไมโลสที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณลดลงเมื่อผ่านการย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น



ภาพที่ 25 ความแข็งแรงของเจลของสตาวิชัวเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

2. การดัดแปรสตาวิชัวเขียวโดยวิธีออกซิเดชัน

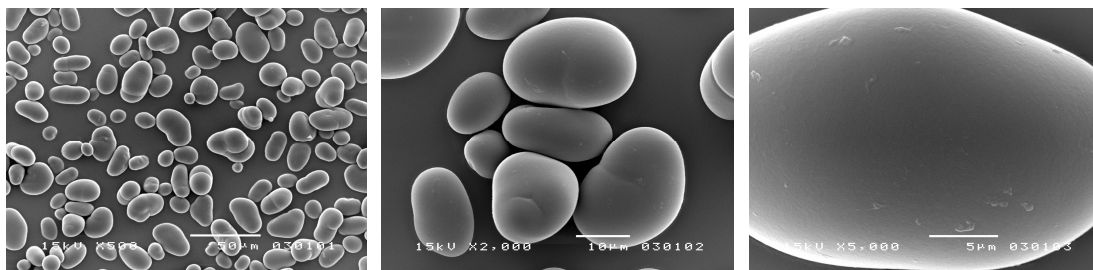
2.1 ผลของการดัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาวิชัวเขียว

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสตาวิชัวเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันที่แอคทีฟคลอรีน 0.0, 1.0 และ 2.0% แสดงไว้ในภาพที่ 26

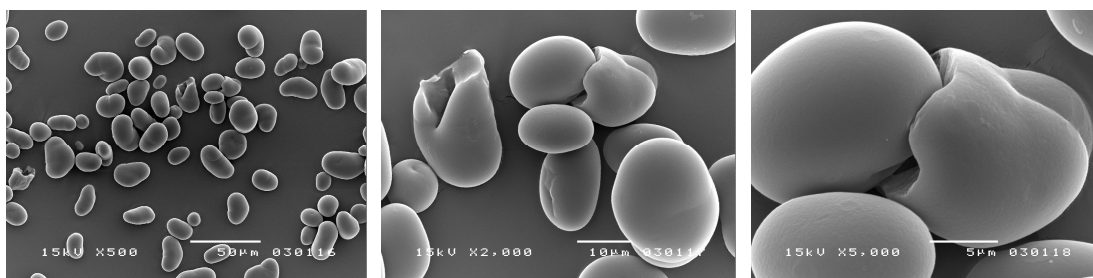
จากภาพที่ 26 พบว่าสตาวิชัวเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะรูปร่างหลายแบบ ได้แก่ กลม กลมรี ไปจนถึงมีลักษณะคล้ายไต และมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาวิชัวที่มีรูปร่างกลมจะมีขนาดเล็ก เม็ดสตาวิชัวที่มีรูปร่าง กลมรี และคล้ายไตจะมีขนาดใหญ่ เม็ดสตาวิชัวบางเม็ดจะมีร่องซึ่งจะพบร่องในเม็ดสตาวิชัวขนาดใหญ่มากกว่าเม็ดสตาวิชัวขนาดเล็ก โดยเม็ดสตาวิชัวจะกระจายตัวอยู่แบบเม็ดเดี่ยว ไม่มีการจับเป็นกลุ่มก้อน

สตาวิชัวเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันจะมีการหลุดลอกที่บริเวณผิวของเม็ดสตาวิชัว แต่รูปร่างของเม็ดสตาวิชัวไม่เปลี่ยนแปลง การหลุดลอกบริเวณผิวของสตาวิชัวเกิดขึ้น

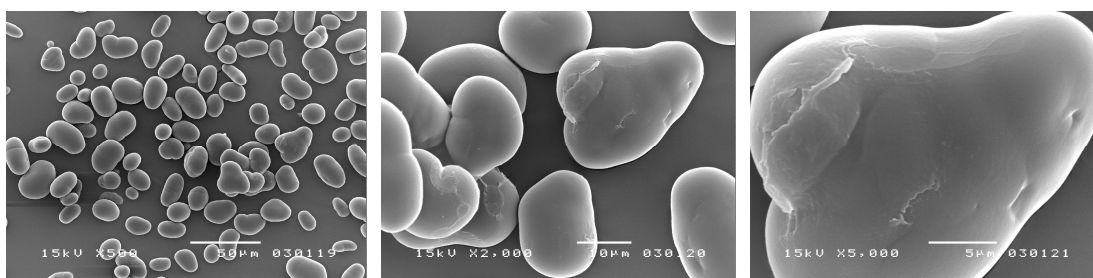
เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชถูกตัดให้มีขนาดสั้นลง ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับการทดลองของ Kuakpetoon และ Wang (2008) ที่ศึกษาในสตาร์ชข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียว และข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แต่ต่างจากการทดลองของ Lawal และ Abedowale (2005) ที่ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชจาก jack bean โดยวิธีออกซิเดชันที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 0.5% และ Lawal (2004) ที่ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชนิวโคโคแยมโดยวิธีออกซิเดชันที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 0.5% ที่พบว่าหลังการดัดแปรลักษณะรูปร่างและขนาดไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร Lawal และ Abedowale (2005) กล่าวว่าที่ไม่เห็นความแตกต่างระหว่างสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอาจเป็นเพราะลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชและการดัดแปรสตาร์ชที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนต่ำๆ



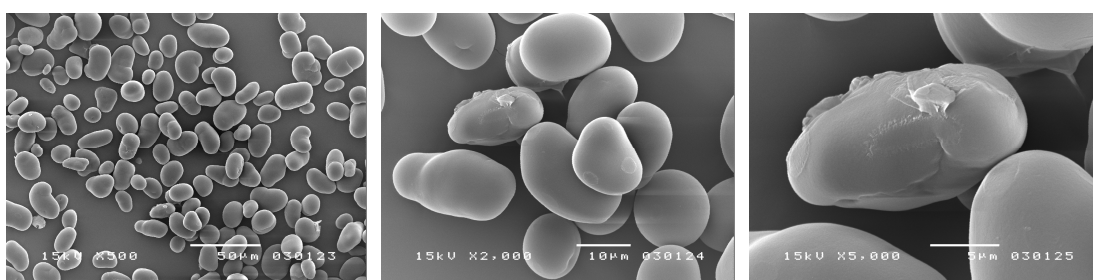
สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 0.0%



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 1.0%



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 2.0%

ภาพที่ 26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 พื้นฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่
 กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)

2.2 ผลของการดัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว

ค่าสีที่วัดจากเครื่องวัดสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงไว้ในตารางที่ 7 ค่า L^* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0-100 โดยที่ 0 แสดงถึง สีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว $+a^*$ แสดงความเป็นสีแดง $-a^*$ แสดงความเป็นสีเขียว $+b^*$ แสดง ความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

จากการทดลองพบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่า L^* เท่ากับ 78.22 ส่วนสตาร์ช ถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันมีค่า L^* เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0% ให้ค่า L^* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้อง กับการทดลองของ Sánchez-Rivera และคณะ (2005) การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันเป็นการทำ ปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่อัลดีไฮด์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ส่งผลให้สตาร์ชมีความขาวมากขึ้น (Smith, 1982)

ตารางที่ 7 ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
native starch	78.22 ± 0.01^d	0.36 ± 0.02^a	1.95 ± 0.02^c
OXI-CT	79.42 ± 0.27^b	-0.25 ± 0.03^c	2.69 ± 0.05^b
OXI-0.5	78.77 ± 0.05^c	0.02 ± 0.04^b	3.50 ± 0.05^a
OXI-1.0	81.80 ± 0.12^a	-0.23 ± 0.05^c	1.21 ± 0.04^f
OXI-1.5	82.22 ± 0.83^a	-0.28 ± 0.05^{cd}	1.41 ± 0.02^d
OXI-2.0	81.98 ± 0.26^a	-0.31 ± 0.03^d	1.31 ± 0.06^e

$a, \dots, f$ = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD ($n=2$)

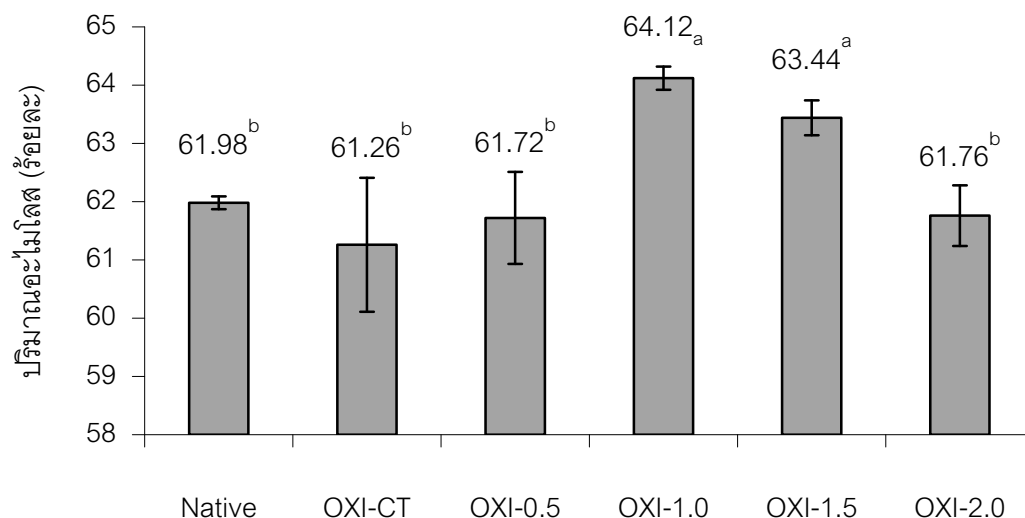
2.3 ผลของการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว

การหาปริมาณอะไมโลสเพื่อตรวจสอบการสลายตัวของโมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยอาศัยการที่อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน โดยอะไมโลสจะไปพันเป็นเกลียวล้อมรอบไอโอดีน (Galliard และ Bowler, 1987) ซึ่งจะให้น้ำเงิน และสามารถค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรได้

ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงไว้ในภาพที่ 27 และตารางที่ 24 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณอะไมโลสอยู่ร้อยละ 61.98 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับสตาร์ชถั่วเขียวในรายงานอื่นๆ ที่มีอะไมโลสร้อยละ 30.7 (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998) หรือร้อยละ 32.7-34.3 (Liu และ Shen, 2007a; Liu และ Shen, 2007b) อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตหรือสารเคมีที่ใช้ในการสกัดโปรตีนจึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสสูงกว่ารายงานอื่นๆ หรืออาจเกิดจากกึ่งของอะไมโลเพกตินที่มีสายยาวเกิดการรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสที่วัดได้มีค่าสูง (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998)

หลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันพบว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 1.0 และ 1.5% มีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 2.0% ปริมาณอะไมโลสไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณอะไมโลสที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากสารออกซิไดซ์เข้าไปย่อยสตาร์ชในส่วนที่เป็นอสัณฐาน ส่งผลให้มีโมเลกุลของอะไมโลสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระดับของแอคทีฟคลอรีนเพิ่มสูงขึ้น การย่อยหรือตัดโมเลกุลของสตาร์ชเกิดมากขึ้นจนส่งผลให้เกิดอะไมโลสสายสั้นๆ ไม่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้ จึงทำให้ปริมาณอะไมโลสไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

Lawal และ Adebawale (2005) ได้ศึกษาการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันในสตาร์ช jack bean พบว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 0.5% สตาร์ชดัดแปรจะมีปริมาณอะไมโลสลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Lawal และคณะ (2005) ส่วน Lawal (2004) พบว่าหลังผ่านการดัดแปรสตาร์ชนิวโคโคแยมด้วยวิธีออกซิเดชันไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร



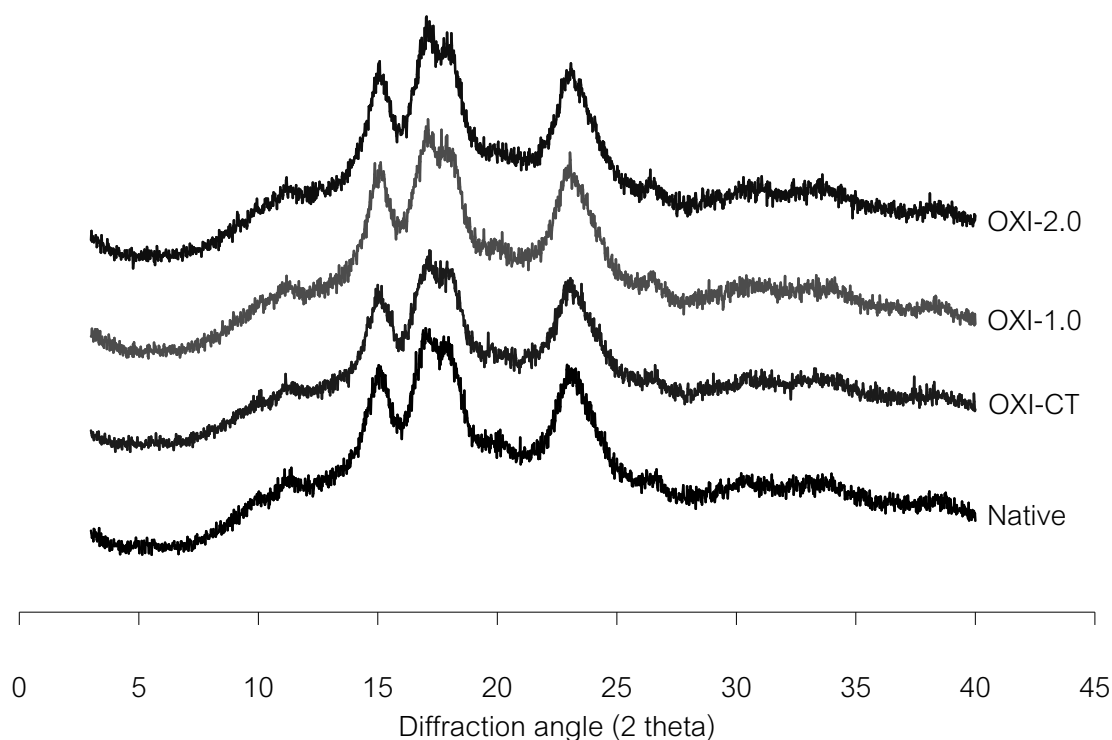
ภาพที่ 27 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

2.4 ผลของการดัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งทำการสแกนที่มุม 2θ เท่ากับ 3-40 องศา แสดงไว้ในภาพที่ 28 และผลการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกจากพื้นที่ใต้กราฟ X-ray diffraction แสดงไว้ในตารางที่ 25

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งมีพีคหลักปรากฏอยู่ 3 พีคคือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา สองพีคเชื่อมกันที่ 17 และ 18 องศา และพีคสุดท้ายที่ 23 องศา ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ Liu และ Shen (2007b) สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละความเป็นผลึกเท่ากับ 51.84

หลังจากผ่านดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน โครงสร้างของผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Lawal (2004); Lawal และ Adebawale (2005); Lawal และคณะ (2005) เนื่องจากสารออกซิไดซ์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช จึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึก ซึ่งส่วนอสัณฐานประกอบไปด้วยสายของอะไมโลส และบริเวณกิ่งของอะไมโลเพคติน แสดงให้เห็นว่าอะไมโลสไวต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่าอะไมโลเพคติน (Wang และ Wang, 2003)



ภาพที่ 28 รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

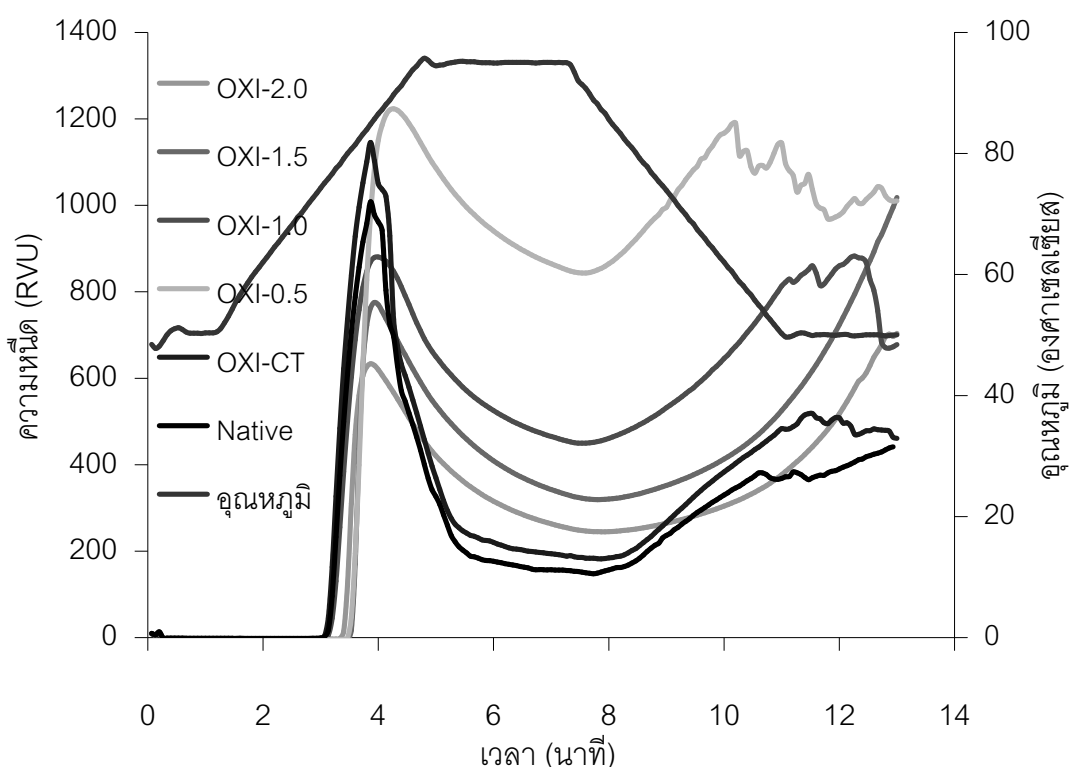
2.5 ผลของการดัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงดังภาพที่ 29 และตารางที่ 8

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 1022 RVU และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 74.30 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการดัดแปรพบว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 0.5% ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้มากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเพิ่มขึ้น ความหนืดสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการแตกออกของโมเลกุลของสตาร์ช (Sánchez-Rivera และคณะ, 2005; Wang และ Wang, 2003) อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด ความหนืดสุดท้าย และความหนืดต่ำสุดเมื่อให้ความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเบรกดาวนมีค่าลดลง

จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืด จะพบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 0.0, 0.5 และ 1.0% เมื่อผ่านช่วงให้ความเย็นบริเวณส่วนท้ายของกราฟจะมีการแกว่งขึ้นและลงของค่าความหนืด เนื่องมาจากสตาร์ชเกิดเป็นเจลที่แข็งแรงมากจึงส่งผลให้เมื่อทำการกวน เจลสตาร์ชได้แตกออกเป็นช่องว่างและมีชั้นของเจลสตาร์ชซึ่งเมื่อสัมผัสกับใบพัดแล้วจึงส่งผลให้กราฟมีค่าความหนืดแกว่ง

Lawal (2004) กล่าวว่าความหนืดที่ลดลงหลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันมีสาเหตุมาจากการแตกของพันธะไกลโคซิดิกระหว่างทำปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชลดลง ซึ่งการที่ร่างแหภายในเม็ดสตาร์ชถูกย่อยส่งผลให้สตาร์ชไม่สามารถทนต่อแรงกวนและไม่สามารถคงสภาพของเม็ดสตาร์ชไว้ได้ จึงทำให้ความหนืดลดลง และความหนืดขณะให้ความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ของสตาร์ชซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล



ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตารางที่ 8 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak time (min)	Pasting temp. (°C)
Native starch	1022.92 ± 6.61 ^c	146.89 ± 8.30 ^f	876.03 ± 8.17 ^b	444.31 ± 91.96 ^c	297.42 ± 83.72 ^c	3.94 ± 0.12 ^{bc}	74.30 ± 0.05 ^e
OXI-CT	1147.81 ± 22.09 ^b	181.54 ± 3.74 ^e	966.26 ± 21.61 ^a	461.11 ± 64.45 ^c	279.57 ± 65.03 ^{cd}	3.88 ± 0.02 ^c	75.44 ± 0.46 ^d
OXI-0.5	1225.99 ± 42.09 ^a	821.70 ± 10.85 ^a	404.29 ± 44.74 ^{de}	1010.57 ± 33.77 ^a	188.87 ± 38.41 ^e	4.25 ± 0.09 ^a	80.57 ± 0.88 ^a
OXI-1.0	881.67 ± 43.50 ^d	449.63 ± 20.68 ^b	432.04 ± 23.79 ^{cd}	677.79 ± 35.55 ^b	228.17 ± 51.92 ^{de}	3.98 ± 0.06 ^b	76.26 ± 0.67 ^c
OXI-1.5	775.75 ± 12.50 ^e	319.24 ± 6.71 ^c	456.52 ± 8.67 ^c	1018.31 ± 34.87 ^a	699.07 ± 40.37 ^a	3.94 ± 0.03 ^{bc}	80.41 ± 0.40 ^a
OXI-2.0	634.31 ± 4.40 ^f	244.77 ± 7.89 ^d	389.54 ± 10.30 ^e	704.07 ± 52.93 ^b	459.31 ± 51.36 ^b	3.88 ± 0.02 ^c	79.08 ± 0.70 ^b

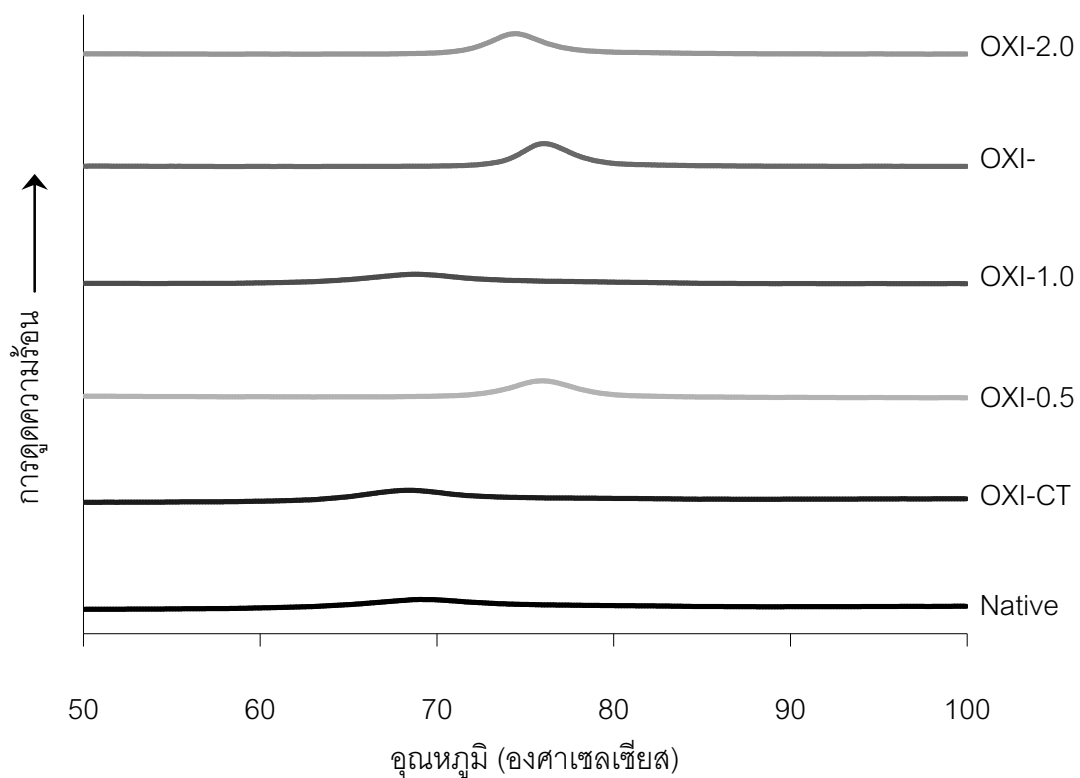
a,...,f = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

2.6 ผลของการดัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_o$) และพลังงานเอนทาลปี (gelatinization enthalpy, ΔH) ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) แสดงดังภาพที่ 30 และตารางที่ 9

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมี T_o เท่ากับ 68.91 องศาเซลเซียส T_p เท่ากับ 62.74 องศาเซลเซียส T_c เท่ากับ 75.35 องศาเซลเซียส $T_c - T_o$ เท่ากับ 12.61 องศาเซลเซียส และ ΔH เท่ากับ 12.61 จูลต่อกรัม หลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันพบว่า T_o , T_p และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นการดัดแปรที่ระดับแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 1.0% ที่ค่า T_o , T_p และ T_c ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ค่า ΔH ของสตาร์ชดัดแปรไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Wang และ Wang (2003) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันเกิดจากบริเวณอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ชถูกย่อย โดยเพิ่มการจับกับน้ำ และการพองตัวของส่วนที่เป็นผลึก เมื่อความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 2.0% มีแนวโน้มว่า T_o , T_p และ T_c มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 1.5% อาจเกิดจากส่วนที่เป็นผลึกถูกย่อย ในขณะที่ Lawal (2004); Lawal และ Adebowale (2005); Lawal และคณะ (2005) พบว่าหลังจากสตาร์ชผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน T_o , T_p , T_c และ ΔH มีค่าลดลง ส่วน Sánchez-Rivera และคณะ (2005) พบว่า T_o , T_p และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ ΔH มีค่าลดลง



ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลาติไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (องศาเซลเซียส)				เอนทาลปี
	T _O	T _P	T _C	(T _C -T _O)	(ΔH; J/g)
Native starch	62.74 ± 0.05 ^b	68.92 ± 0.22 ^c	75.35 ± 0.12 ^b	12.61 ± 0.22 ^a	12.61 ± 0.15 ^{ab}
OXI-CT	64.59 ± 1.99 ^b	67.92 ± 0.71 ^c	73.91 ± 0.32 ^c	9.32 ± 1.67 ^b	11.64 ± 1.36 ^b
OXI-0.5	72.15 ± 0.55 ^a	75.29 ± 0.94 ^{ab}	78.65 ± 1.34 ^a	6.50 ± 0.79 ^c	12.01 ± 0.61 ^{ab}
OXI-1.0	63.00 ± 0.01 ^b	68.78 ± 0.00 ^c	74.43 ± 0.20 ^{bc}	11.43 ± 0.19 ^a	11.80 ± 0.46 ^b
OXI-1.5	73.11 ± 0.55 ^a	75.88 ± 0.35 ^a	79.10 ± 0.15 ^a	5.98 ± 0.39 ^c	13.34 ± 0.13 ^a
OXI-2.0	71.09 ± 0.63 ^a	74.20 ± 0.36 ^b	77.71 ± 0.07 ^a	6.61 ± 0.50 ^c	13.39 ± 0.05 ^a

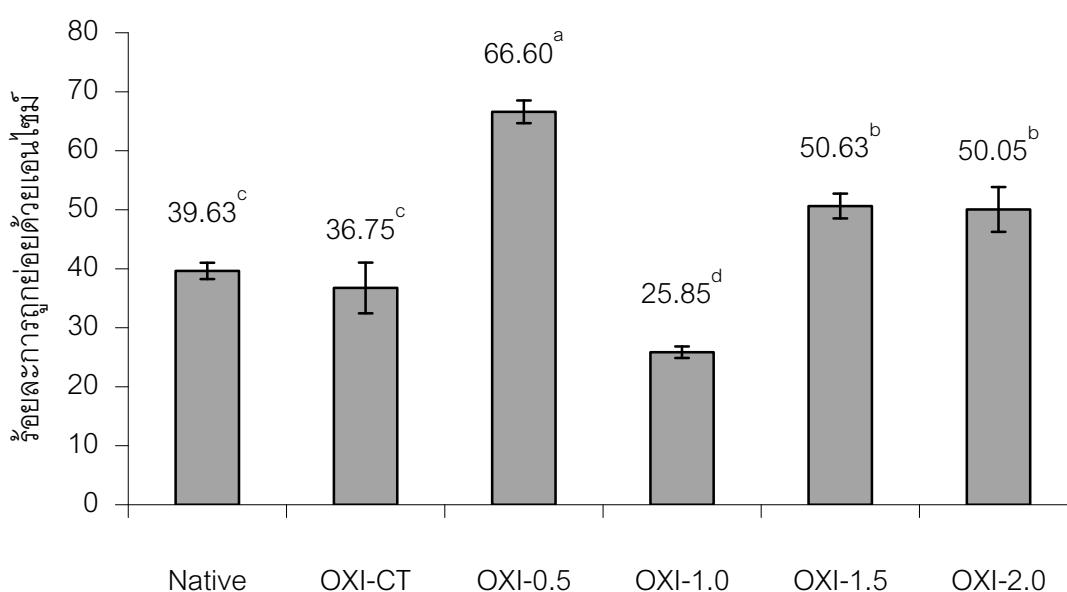
a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

2.7 ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว

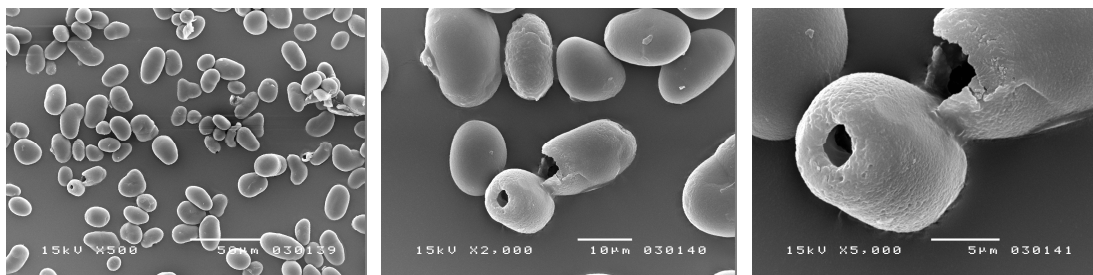
ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนาน 6 ชั่วโมง ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงในภาพที่ 31 และตารางที่ 26 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสตาร์ชที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันแสดงในภาพที่ 32

จากภาพที่ 31 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเท่ากับ 39.63 และหลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันพบว่าค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 1.0% ที่มีค่าลดลง

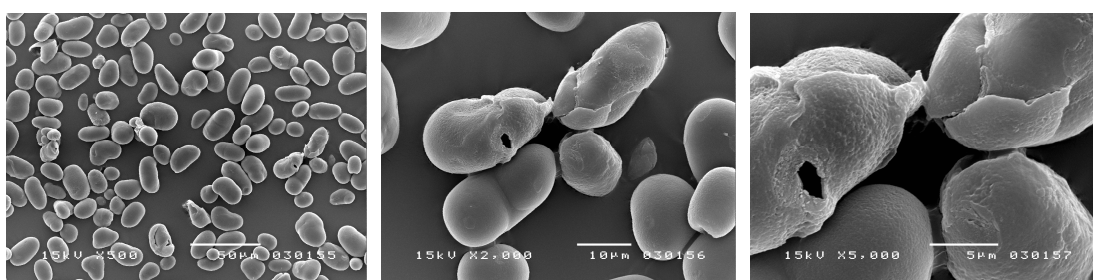
และจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสตาร์ชที่ถูกดัดแปรที่ผิวอย่างเห็นได้ชัด มีบางเม็ดถูกเอนไซม์ย่อยจนเกิดเป็นโพรงภายใน บางส่วนมีการแตกของเม็ดสตาร์ช



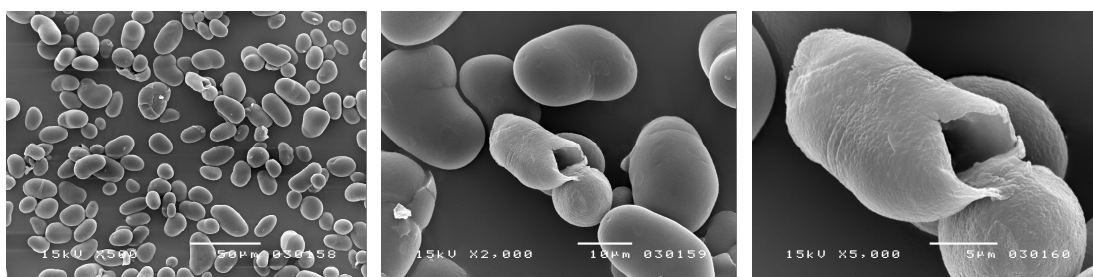
ภาพที่ 31 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน



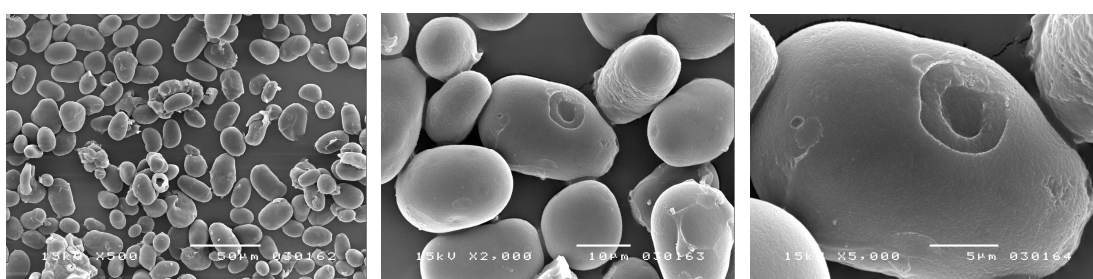
สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 0.0%



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 1.0%



สตาร์ชดัดแปรที่แอคทีฟคลอรีน 2.0%

ภาพที่ 32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและ
 ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ
 (จากซ้ายไปขวา)

2.8 ผลของการดัดแปรต่อกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว

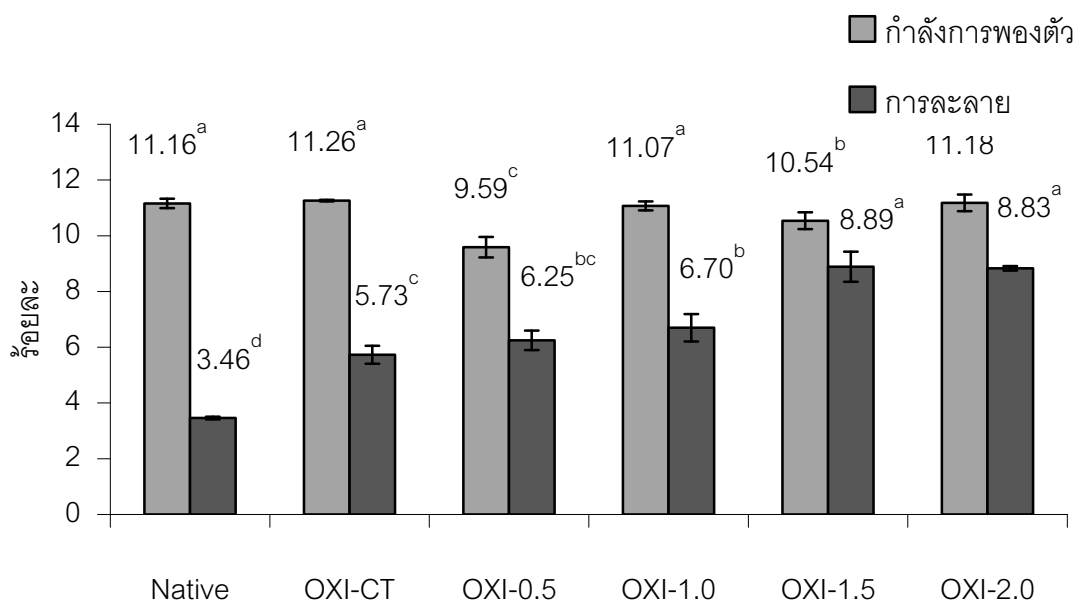
เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชที่แขวนลอย (starch suspension) เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว และจะทำให้บางส่วนของเม็ดสตาร์ชละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดที่ละลายในสารละลาย

ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงไว้ในภาพที่ 33 และตารางที่ 27 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 3.46 และมีกำลังการพองตัวเท่ากับ 11.16 ซึ่งหลังจากผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันพบว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 0.5 และ 1.5% กำลังการพองตัวมีค่าลดลง ส่วนที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 1.0 และ 2.0% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ในขณะที่ค่าการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการดัดแปร ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับการทดลองของ Wang และ Wang (2003)

Lawal และ Adebawale (2005); Lawal และคณะ (2005); Lawal (2004); Adebawale, Afolabi และ Lawal (2002) รายงานว่าหลังจากสตาร์ชผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ค่ากำลังการพองตัวจะลดลง แต่ค่าการละลายจะเพิ่มขึ้น ส่วน Sánchez-Rivera และคณะ (2005) รายงานว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 0.75 และ 1.0% กำลังการพองตัวจะลดลง แต่ที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเท่ากับ 1.5 และ 2.0% กำลังการพองตัวจะเพิ่มขึ้น และหลังจากผ่านการดัดแปรค่าการละลายจะเพิ่มขึ้น

การที่กำลังการพองตัวลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดจากจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลเพคตินและสตาร์ชสูญเสียความสามารถในการจับกับน้ำ (Wang และ Wang, 2003) ไฮโปรคโลไรท์มีผลต่อโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงภายในเม็ดสตาร์ชอย่างสูง จะส่งผลให้สตาร์ชสามารถละลายได้มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้กำลังการพองตัวลดลง (Adebawale, Afolabi และ Lawal, 2002)

Lawal (2004) กล่าวว่าสารออกซิไดซ์จะเข้าทำปฏิกิริยาภายในเม็ดสตาร์ชบริเวณที่เป็นออสันฐานเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งค่าการละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลและโครงสร้างที่อ่อนแอของเม็ดสตาร์ช

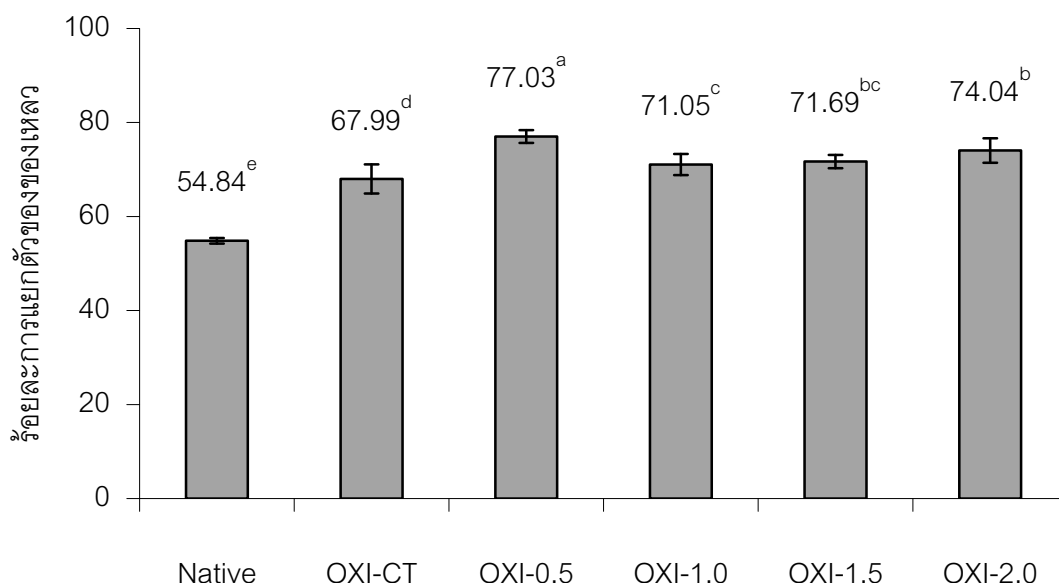


ภาพที่ 33 ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

2.9 ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการศึกษาความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงในภาพที่ 34 และตารางที่ 28 ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายจะแสดงอยู่ในรูปของปริมาณการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชสุกที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลาย ถ้าหากมีร้อยละของการแยกตัวของของเหลวออกมาสูง แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายต่ำ

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละการแยกตัวของของเหลวเท่ากับ 54.84 และเมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน พบว่ามีร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้น การที่ร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากไฮโปคลอไรท์สามารถย่อยโมเลกุลส่วนที่เป็นอะไมโลสได้มากกว่าอะไมโลเพคติน จึงทำให้สตาร์ชสามารถจัดเรียงตัวให้เป็นร่างแหสามมิติได้ดีขึ้น เมื่อเก็บสตาร์ชเจลไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเรียงตัวของโครงสร้างจึงแน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงถูกบีบออกมาจนเจลมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

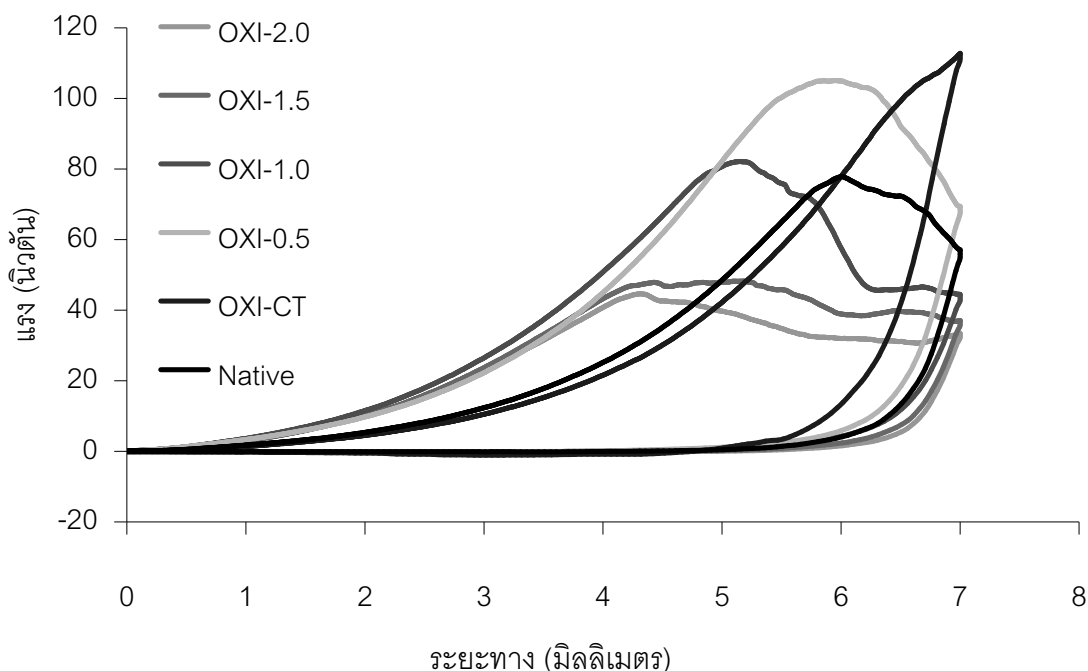


ภาพที่ 34 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

2.10 ผลของการดัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว

การศึกษาความแข็งแรงของเจลจากสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน แสดงในภาพที่ 35 และตารางที่ 29 ซึ่งสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 78.96 นิวตัน หลังจากสตาร์ชถั่วเขียวผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน พบว่าที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 0.5% ทำให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 1.0% ให้ค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ส่วนที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 1.5 และ 2.0% ทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลง

การที่ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากสตาร์ชถูกย่อยในส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้โมเลกุลมีความยาวที่เหมาะสม และทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายสตาร์ชมากขึ้นส่งผลให้เจลแข็งแรงขึ้น ส่วนที่ความระดัของการดัดแปรสูงๆ ความแข็งแรงของเจลลดลงเนื่องจากหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลภายในโมเลกุลสตาร์ชเกิดแรงผลักกัน ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของสายสตาร์ชเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของเจลลดลง



ภาพที่ 35 ความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน

2.11 ผลของการดัดแปรต่อหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลของสตาร์ชถั่วเขียว

การศึกษาปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน แสดงไว้ในตารางที่ 10 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละหมู่คาร์บอนิลเท่ากับ 0.0198 หลังจากการดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวด้วยวิธีออกซิเดชัน พบว่าร้อยละหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเพิ่มขึ้น โดยร้อยละหมู่คาร์บอนิลอยู่ในช่วง 0.0197-0.0810 และหมู่คาร์บอกซิลอยู่ในช่วง -0.0065-0.0667 ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Sánchez-Rivera และ คณะ (2005); Wang และ Wang (2003); Li และ Vasanathan (2003) ที่พบว่าร้อยละของหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเพิ่มขึ้น

กระทรวงอุตสาหกรรม (2535) ได้มีเกณฑ์กำหนดและลักษณะชี้บ่งของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันคือ ออกซิไดซ์สตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกินร้อยละ 5.5 และมีหมู่คาร์บอกซิลไม่เกินร้อยละ 1.1 ซึ่งจากผลการทดลองที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 2.0% ซึ่งเป็นระดับสูงสุดที่ใช้ในการดัดแปร พบว่าตัวอย่างมีร้อยละหมู่คาร์บอกซิลไม่เกินจากที่กฎหมายกำหนด

ตารางที่ 10 ค่าร้อยละหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการ
ดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ร้อยละหมู่คาร์บอนิล	ร้อยละหมู่คาร์บอกซิล
Native starch	0.0198 ± 0.0043^e	-
Oxidized starch, control	0.0197 ± 0.0046^e	-0.0065 ± 0.0012^d
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	0.0286 ± 0.0041^d	0.0008 ± 0.0006^d
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	0.0548 ± 0.0053^c	0.0094 ± 0.0011^c
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	0.0641 ± 0.0031^b	0.0381 ± 0.0011^b
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	0.0810 ± 0.0024^a	0.0667 ± 0.0019^a

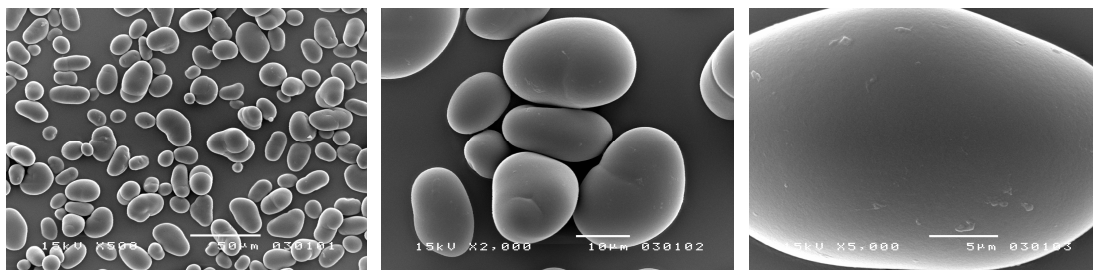
a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมี
นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

3. การดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยการเชื่อมข้าม

3.1 ผลของการดัดแปรต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชถั่วเขียว

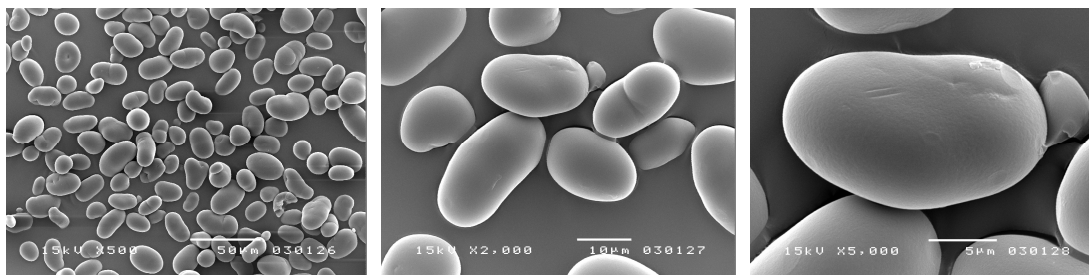
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร แสดงในภาพที่ 36 และสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงในภาพที่ 37 จากภาพที่ 36 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะรูปร่างหลายแบบ ได้แก่ กลม กลมรี ไปจนถึงมีลักษณะคล้ายไต และมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่างกลมจะมีขนาดเล็ก เม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่าง กลมรี และคล้ายไตจะมีขนาดใหญ่ เม็ดสตาร์ชบางเม็ดจะมีร่อง ซึ่งจะพบร่องในเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มากกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก โดยเม็ดสตาร์ชจะกระจายตัวอยู่แบบเม็ดเดี่ยว ไม่มีการจับเป็นกลุ่มก้อน

หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชมีรอยคล้ายกับถูกยอย ซึ่งน่าจะเกิดสภาวะที่เป็นเบสในระหว่างการดัดแปร ซึ่งผลที่ได้ต่างจาก Kaur, Singh และ Singh (2005); Kim และ Lee (2002); Yeh และ Yeh (1993); Kartha และ Srivastava (1985) ที่พบว่า การดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

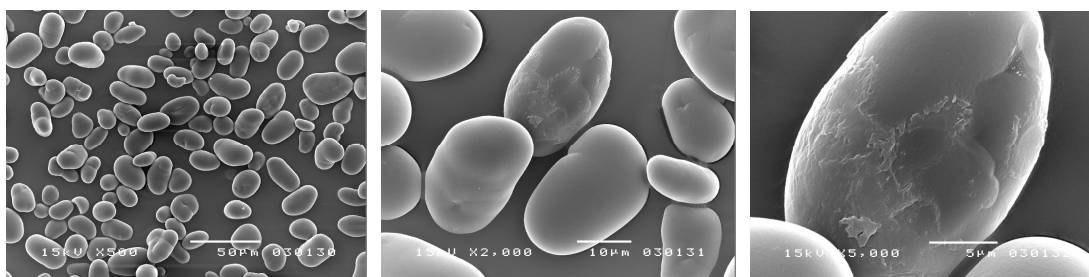


สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

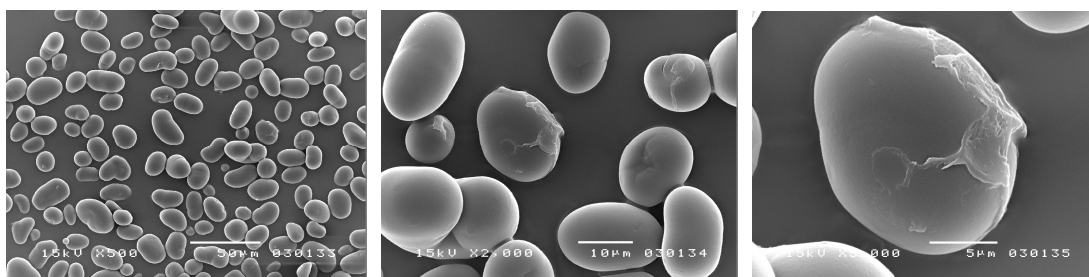
ภาพที่ 36 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 พื้นฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า
 ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)



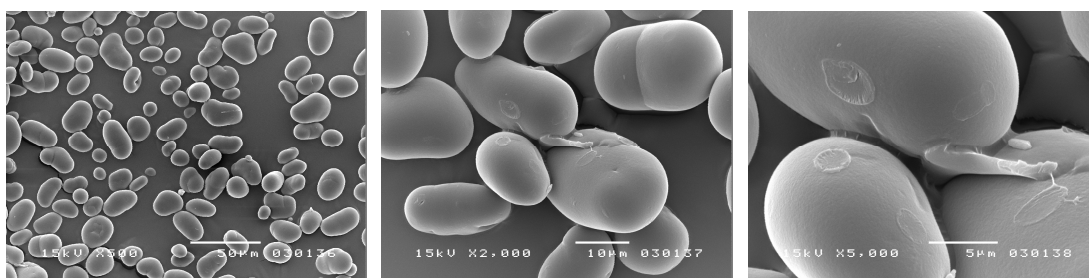
สตาร์ชดัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 0.0%



สตาร์ชดัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 5.0%



สตาร์ชดัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0%



สตาร์ชดัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 15.0%

ภาพที่ 37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานของสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม ที่กำลังขยาย 170, 650
 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)

3.2 ผลของการดัดแปรต่อค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียว

ค่าสีที่วัดจากเครื่องวัดสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงไว้ในตารางที่ 11 ค่า L^* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0-100 โดยที่ 0 แสดงถึงสีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว $+a^*$ แสดงความเป็นสีแดง $-a^*$ แสดงความเป็นสีเขียว $+b^*$ แสดงความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่า L^* เท่ากับ 78.22 a^* เท่ากับ 0.36 และ b^* เท่ากับ 1.95 หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าค่า a^* และ b^* มีค่าเพิ่มขึ้น และสตาร์ชดัดแปรที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0 และ 15.0% มีค่า L^* เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 11 ค่าสีของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
Native starch	78.22 ± 0.01^c	0.36 ± 0.02^b	1.95 ± 0.02^c
CL-CT	78.34 ± 0.68^{bc}	0.11 ± 0.08^c	2.68 ± 0.05^a
CL-5.0	78.32 ± 0.35^{bc}	0.48 ± 0.07^a	2.60 ± 0.21^{ab}
CL-10.0	78.89 ± 0.18^{ab}	0.54 ± 0.03^a	2.46 ± 0.13^b
CL-15.0	78.94 ± 0.54^a	0.52 ± 0.06^a	2.64 ± 0.03^a

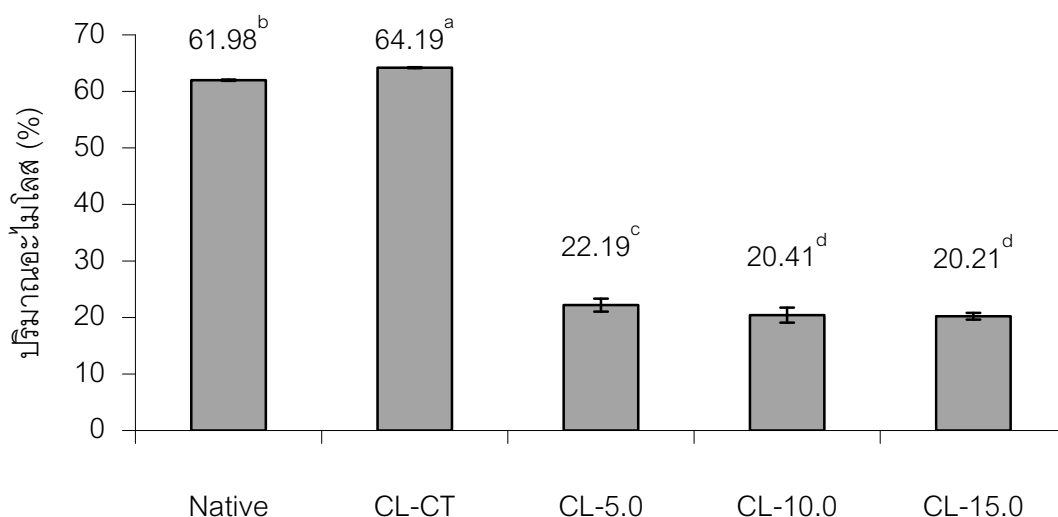
a,...,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

3.3 ผลของการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียว

การหาปริมาณอะไมโลสเพื่อตรวจสอบการสลายตัวของโมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยอาศัยการที่อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน โดยอะไมโลสจะไปพันเป็นเกลียวล้อมรอบไอโอดีน (Galliard และ Bowler, 1987) ซึ่งจะให้สีน้ำเงิน และสามารถค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรได้

จากผลการทดลองการหาปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม ดังแสดงในภาพที่ 38 และตารางที่ 31 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวมีปริมาณอะไมโลสอยู่ร้อยละ 61.98 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับสตาร์ชถั่วเขียวในรายงานอื่นๆ ที่มีอะไมโลสร้อยละ 30.7 (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998) หรือร้อยละ 32.7-34.3 (Liu และ Shen, 2007a และ Liu และ Shen, 2007b) อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตหรือสารเคมีที่ใช้ในการสกัดโปรตีนจึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสสูงกว่ารายงานอื่นๆ หรืออาจเกิดจากกึ่งของอะไมโลเพกตินที่มีสายยาวเกิดการรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจึงส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสที่วัดได้มีค่าสูง (Kasemsuwan, Bailey และ Jane, 1998)

เมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าปริมาณอะไมโลสลดลงอยู่ในช่วง 20.21-22.19 การที่ปริมาณอะไมโลสลดลงเกิดจากพันธะระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรส่งผลให้มีปริมาณอะไมโลสอิสระน้อยลง



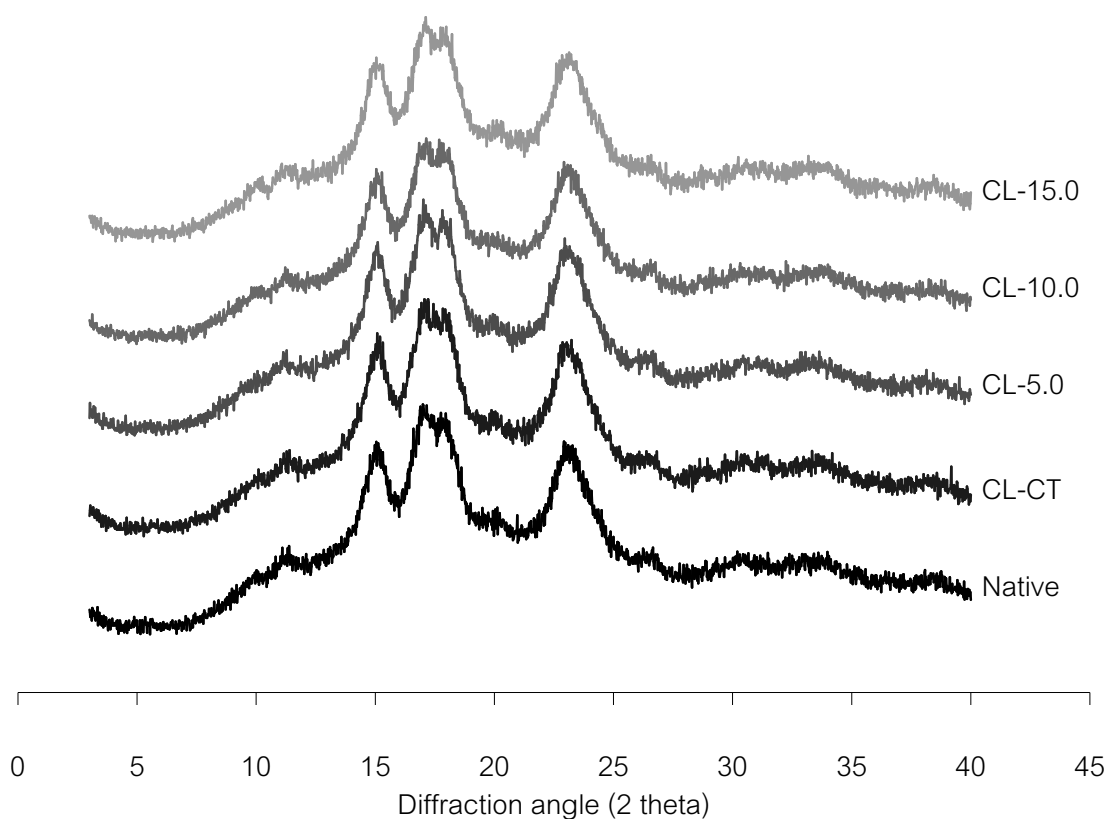
ภาพที่ 38 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

3.4 ผลของการดัดแปรต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งทำการสแกนที่มุม 2θ เท่ากับ 3-40 องศา แสดงไว้ในภาพที่ 39 และผลการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกจากพื้นที่ใต้กราฟ X-ray diffraction แสดงไว้ในตารางที่ 32

สตาร์ชถั่วเขียวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งมีพีคหลักปรากฏอยู่ 3 พีค คือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา สองพีคเชื่อมกันที่ 17 และ 18 องศา และพีคสุดท้ายที่ 23 องศา ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ (Liu และ Shen, 2007b) สตาร์ชถั่วเขียวมีร้อยละความเป็นผลึกเท่ากับ 51.84

สตาร์ชถั่วเขียวเมื่อผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าโครงสร้างผลึกและร้อยละความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งผลทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Atichoudomchai และ Varavinit (2003)



ภาพที่ 39 รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

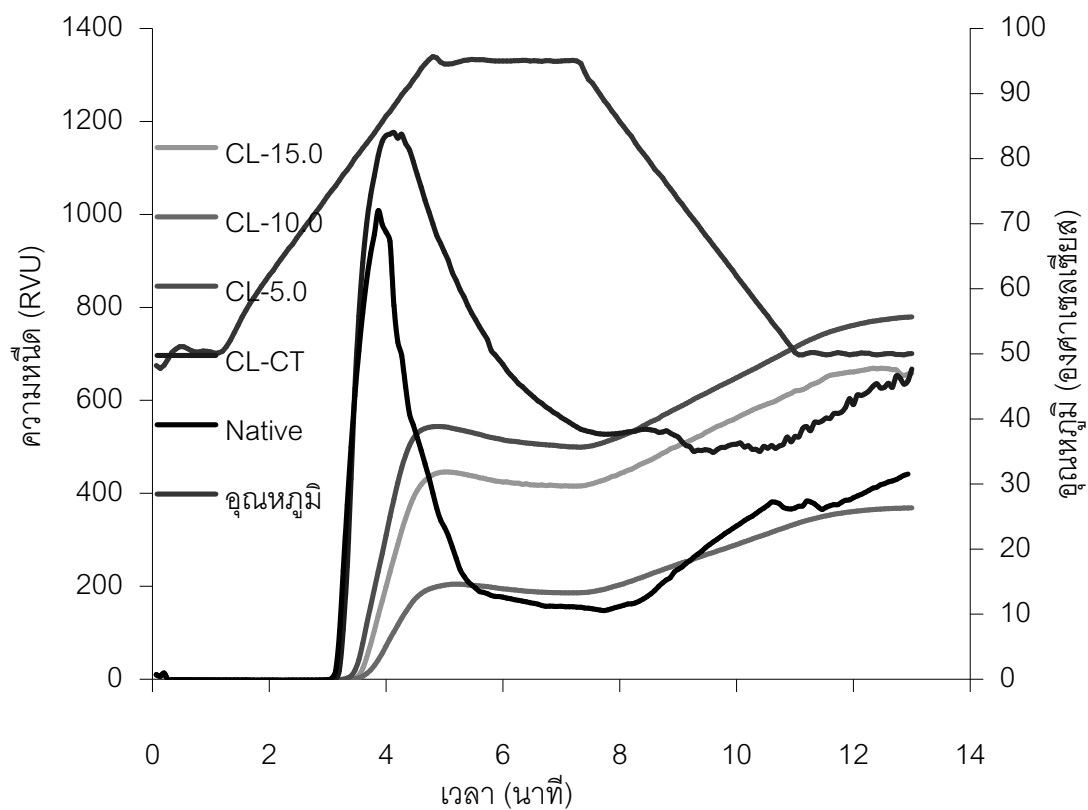
3.5 ผลของการดัดแปรต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงดังภาพที่ 40 และตารางที่ 12

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 1022 RVU และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 74.30 องศาเซลเซียส หลังผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าความหนืดสูงสุด เบรกดาวน์ และเซตแบคมีค่าลดลง ส่วนอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนความหนืดมีค่าสูงขึ้น

การที่ความหนืดสูงสุดลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมาก จนไปส่งผลขัดขวางหรือยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช จึงทำให้ความหนืดลดลง

ค่าเบรกดาวน์เป็นค่าที่อธิบายถึงความทนทานของเม็ดสตาร์ช หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามสตาร์ชจะมีค่าเบรกดาวน์ลดลง แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชมีความทนทานเพิ่มขึ้น จึงเกิดการแตกของเม็ดสตาร์ชน้อยลง ซึ่งถ้าหากค่าเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และแรงเฉือน (พิณทิพย์, 2547) เช่นเดียวกับการทดลองในสตาร์ชข้าวเหนียว และข้าวเจ้า จะมีค่าเบรกดาวน์ลดลงหลังผ่านการเชื่อมข้าม (Liu, Ramsden และ Corke, 1999)



ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์พอลิเมอร์ที่
ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตารางที่ 12 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak time (min)	Pasting temp. (°C)
Native starch	1022.92 ± 6.61 ^b	146.89 ± 8.30 ^c	876.03 ± 8.17 ^a	444.31 ± 91.96 ^c	297.42 ± 83.72 ^a	3.94 ± 0.12 ^c	74.30 ± 0.05 ^c
CL-CT	1194.94 ± 50.51 ^a	473.88 ± 50.00 ^{ab}	715.04 ± 18.46 ^b	667.17 ± 41.54 ^b	193.29 ± 26.51 ^c	4.15 ± 0.10 ^c	76.43 ± 0.46 ^{bc}
CL-5.0	546.30 ± 25.06 ^c	499.36 ± 11.68 ^a	47.01 ± 17.29 ^c	773.60 ± 23.93 ^a	280.24 ± 5.66 ^{ab}	4.89 ± 0.18 ^b	78.71 ± 1.08 ^b
CL-10.0	206.59 ± 9.73 ^e	185.24 ± 16.03 ^c	21.35 ± 7.10 ^d	368.60 ± 23.41 ^c	183.35 ± 7.70 ^c	5.37 ± 0.26 ^a	82.23 ± 4.28 ^a
CL-15.0	446.89 ± 92.00 ^d	414.86 ± 88.65 ^b	32.03 ± 6.33 ^{cd}	658.28 ± 100.60 ^b	243.42 ± 27.94 ^b	5.08 ± 0.12 ^b	81.64 ± 1.20 ^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

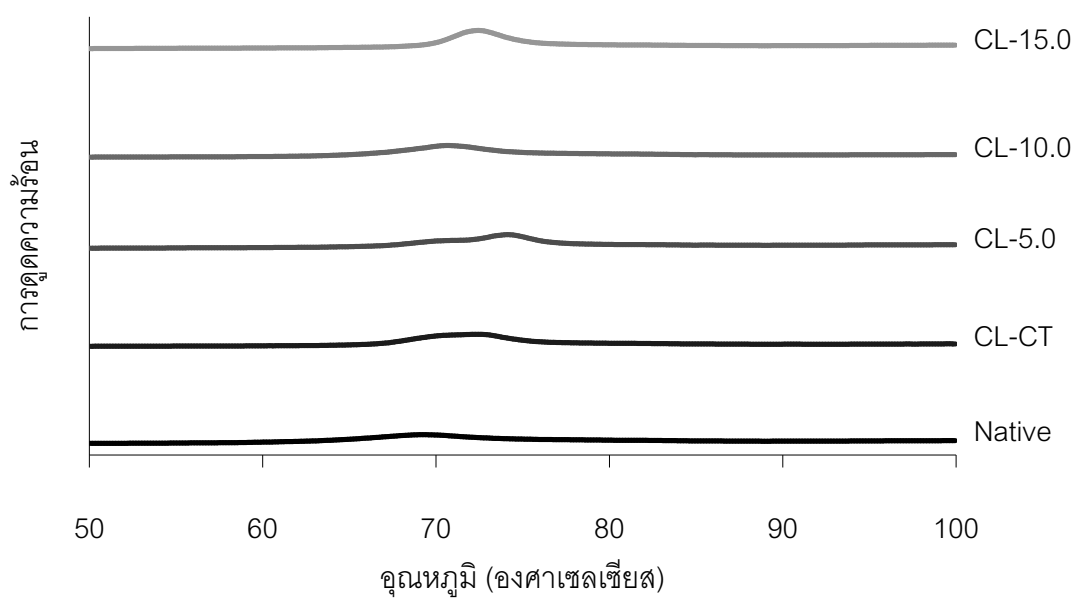
95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

3.6 ผลของการดัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_o$) และพลังงานเอนทาลปี (gelatinization enthalpy, ΔH) ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) แสดงดังภาพที่ 41 และตารางที่ 13

สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมี T_o เท่ากับ 68.91 องศาเซลเซียส T_p เท่ากับ 62.74 องศาเซลเซียส T_c เท่ากับ 75.35 องศาเซลเซียส $T_c - T_o$ เท่ากับ 12.61 องศาเซลเซียส และ ΔH เท่ากับ 12.61 จูลต่อกรัม หลังจากผ่านการเชื่อมข้ามพบว่า T_o มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน T_p , T_c และ ΔH ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ $T_c - T_o$ มีค่าลดลง การเชื่อมข้ามทำให้โครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ชมีความเสถียร จึงเกิดเจลลิตีในเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Atichokudomchai และ Varavinit, 2003)

ค่าเอนทาลปีเป็นการวัดความเป็นผลึกทั้งปริมาณและคุณภาพ และบ่งบอกถึงการสูญเสียโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช (Cooke และ Gidley, 1992) จากการทดลองค่าเอนทาลปีไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการเชื่อมข้าม อาจเนื่องมาจากการดัดแปรไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ช



ภาพที่ 41 การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชกั้วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตารางที่ 13 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลาติไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่าและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (องศาเซลเซียส)				เอนทาลปี
	T_O	T_P	T_C	$(T_C - T_O)$	$(\Delta H; J/g)$
Native starch	62.74 ± 0.05^b	68.92 ± 0.22^a	75.35 ± 0.12^a	12.61 ± 0.22^a	12.61 ± 0.15^a
CL-CT	67.80 ± 1.94^{ab}	71.43 ± 1.89^a	74.93 ± 0.18^a	7.13 ± 0.22^b	14.08 ± 1.29^a
CL-5.0	69.01 ± 3.74^a	72.43 ± 2.59^a	76.43 ± 0.81^a	7.42 ± 2.93^b	13.52 ± 1.25^a
CL-10.0	65.58 ± 3.00^{ab}	69.92 ± 1.42^a	75.18 ± 0.31^a	9.60 ± 3.30^{ab}	13.17 ± 0.76^a
CL-15.0	69.53 ± 0.31^a	72.43 ± 0.00^a	75.68 ± 0.27^a	6.15 ± 0.58^b	13.17 ± 0.07^a

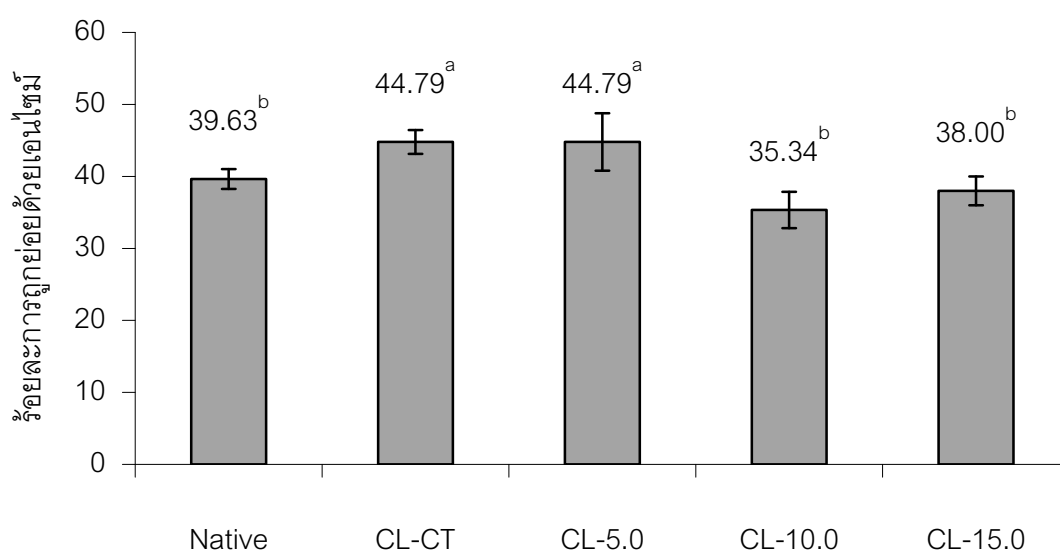
a,...,b = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

3.7 ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชถั่วเขียว

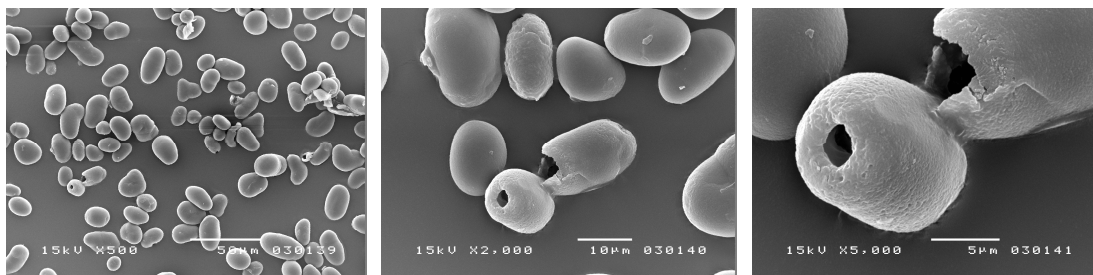
ผลการวิเคราะห์ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนาน 6 ชั่วโมง ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงไว้ในภาพที่ 42 และตารางที่ 33 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส แสดงไว้ในภาพที่ 43 และสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสแสดงในภาพที่ 44

จากภาพที่ 42 พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวมีร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเท่ากับ 39.63 หลังผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 5.0% มีร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0 และ 15.0% ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสตาร์ชโดนกัดกร่อนอย่างชัดเจน โดยสตาร์ชบางเม็ดถูกย่อยจนภายในกลายเป็นโพรง บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชมีรูพรุนที่เกิดจากเอนไซม์ และเกิดการเชื่อมกันของสตาร์ชบางส่วน

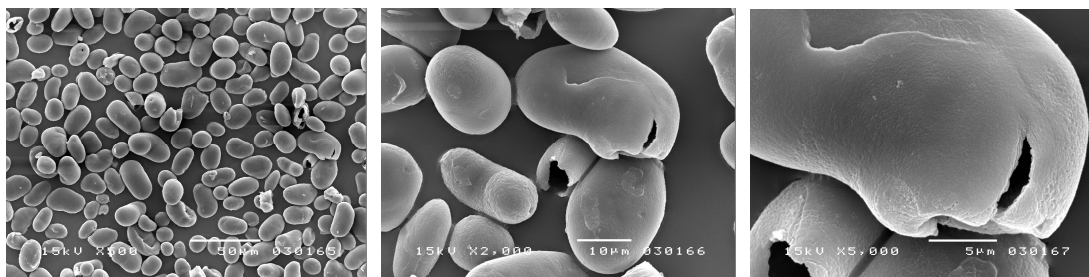


ภาพที่ 42 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

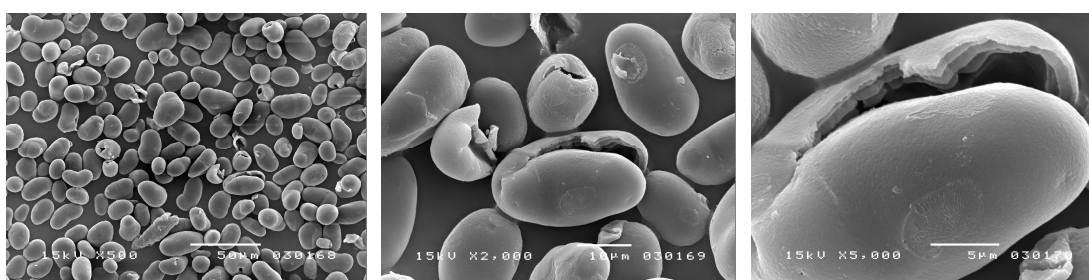


สตาวิชที่ไม่ผ่านการดัดแปร

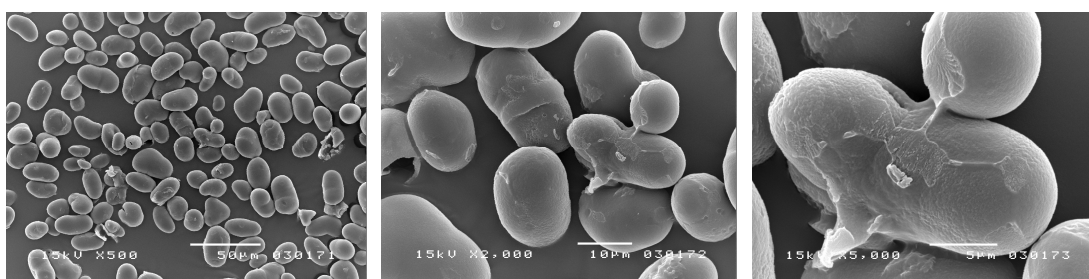
ภาพที่ 43 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แลฟาอะไมเลสของสตาวิชถ้วยเขียวที่ไม่ผ่านการ
 ดัดแปรที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)



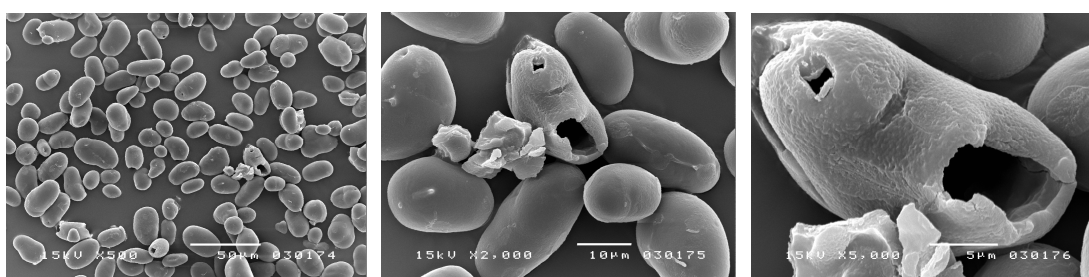
สตาร์ชตัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 0.0%



สตาร์ชตัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 5.0%



สตาร์ชตัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0%



สตาร์ชตัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 15.0%

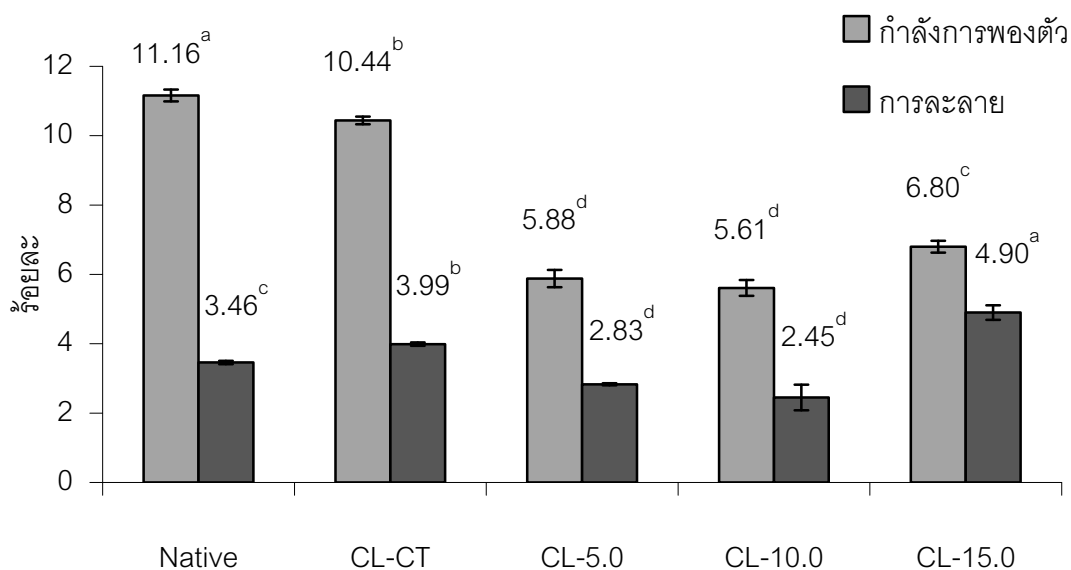
ภาพที่ 44 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะปรากฏทาง
 สัณฐานภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่าน
 การตัดแปรโดยการเชื่อมข้าม ที่กำลังขยาย 170, 650 และ 1,700 เท่า ตามลำดับ (จาก
 ซ้ายไปขวา)

3.8 ผลของการดัดแปรต่อกำล้างการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วเขียว

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชที่แขวนลอยในน้ำ เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว และจะทำให้บางส่วนของเม็ดสตาร์ชละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดที่ละลายในสารละลาย

ค่ากำล้างการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงดังในภาพที่ 45 และตารางที่ 34 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 3.46 และมีกำล้างการพองตัวเท่ากับ 11.16 หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่ากำล้างการพองตัวมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมข้ามภายในโมเลกุล สตาร์ชส่งผลให้สตาร์ชมีความสามารถในการต้านทานความร้อนและอุณหภูมิได้เพิ่มขึ้น จึงส่งผลด้านการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้เพิ่มขึ้น (Kaur, Singh และ Singh, 2005) Rutenberg และ Solarek (1984) กล่าวว่า การเชื่อมข้ามจะส่งผลให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่ช่วยให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง และมีผลในการยับยั้งการพองตัวของสตาร์ช

ค่าการละลายที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเท่ากับ 5.0 และ 10.0% มีค่าลดลง ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 15.0% มีค่าการละลายเพิ่มขึ้น ร้อยละการละลายมีความสัมพันธ์กับค่ากำล้างการพองตัว ซึ่งถ้าเม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการพองตัวได้ดี จะส่งผลให้อะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชหลุดออกมาอยู่ในสารละลายได้มากขึ้น ถ้าสตาร์ชมีกำล้างการพองตัวที่ต่ำก็จะส่งผลให้ค่าการละลายต่ำไปด้วย (Chabot และคณะ, 1976)



ภาพที่ 45 ค่าการเลี้ยงฟองตัวและการละลายของสตาเรชตัวเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

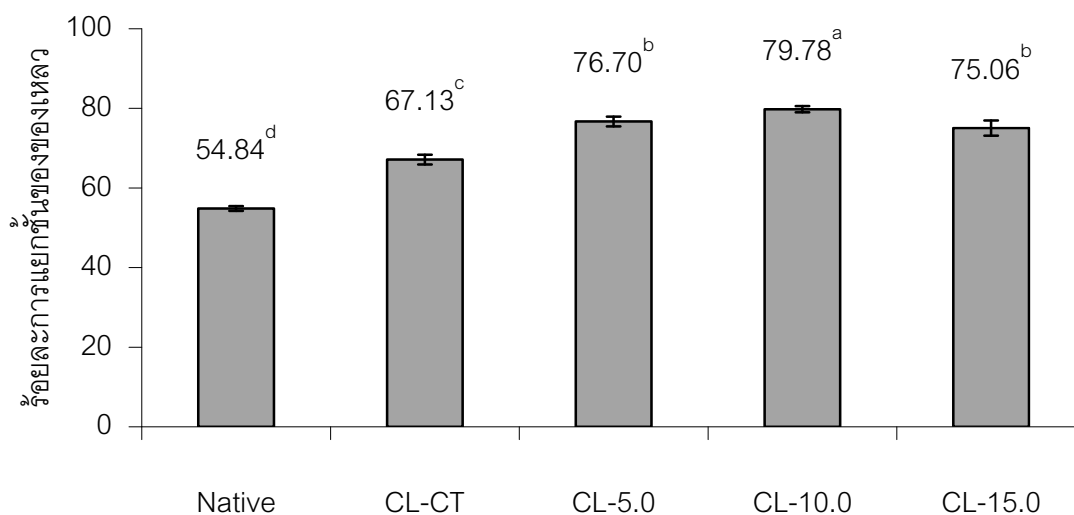
3.9 ผลของการดัดแปรต่อความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาเรชตัวเขียว

ผลการศึกษาความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายของสตาเรชที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงไว้ในภาพที่ 46 และตารางที่ 35 ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายจะแสดงอยู่ในรูปของปริมาณการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาเรชสุกที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลาย ถ้าหากมีร้อยละของการแยกตัวของของเหลวออกมาสูง แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายต่ำ

สตาเรชตัวเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเท่ากับ 54.84 และเมื่อผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม พบว่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเชื่อมข้ามจะไปส่งผลให้โมเลกุลของสตาเรชเกิดการเชื่อมกันเป็นร่างแหสามมิติ เมื่อให้ความร้อนจะทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกอยู่ภายในร่างแห และมีโมเลกุลของน้ำจำนวนหนึ่งที่เกาะอยู่กับสายสตาเรช ซึ่งเป็นส่วนน้อย เมื่อนำไปแช่เย็นจะส่งผลให้โครงสร้างของสตาเรชจัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น และดันให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกอยู่ภายในออกมาเป็นจำนวนมาก

Yeh และ Yeh (1993) กล่าวว่าถึงแม้ว่าสตาเรชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะส่งผลทำให้เม็ดสตาเรชมีความคงทนต่อการกวนและความร้อน แต่สตาเรชจะมีความต้านทานต่อการแช่แข็ง-ละลายต่ำ ซึ่ง Perera และ Hoover (1999) ได้กล่าวว่าการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาเรชเป็นอิทธิพลมาจากการ

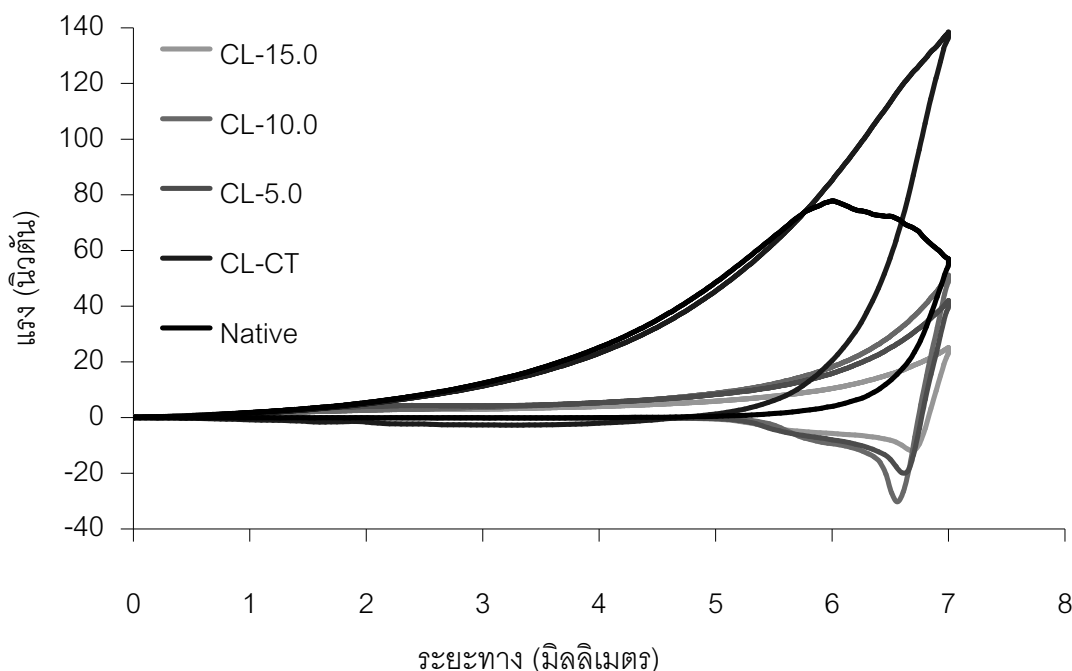
จัดเรียงสายสตาร์ชภายในบริเวณอณูฐานและส่วนผลึก เมื่อเกิดการเย็นตัวลงหลังเจลาตีไนเซชัน จะเกิดการกลับมาจับตัวกันระหว่างและ/หรือภายในสายสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 46 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

3.10 ผลของการดัดแปรต่อความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียว

ผลการศึกษาความแข็งแรงของเจลจากสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงในภาพที่ 47 และตารางที่ 36 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 78.96 นิวตัน หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามพบว่าค่าความแข็งแรงของเจลลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการพองตัวของสตาร์ชที่ลดลงหลังการเชื่อมข้าม ปริมาณน้ำอิสระภายนอกเม็ดสตาร์ชจึงเหลืออยู่มาก สตาร์ชเจลที่ได้จะมีลักษณะนิ่ม แตกได้ง่าย และเจลไม่เต็มแบบพิมพ์เนื่องจากมีปริมาณน้ำส่วนเกินที่เจลไม่สามารถเก็บไว้ภายในโครงสร้างได้เป็นปริมาณมาก

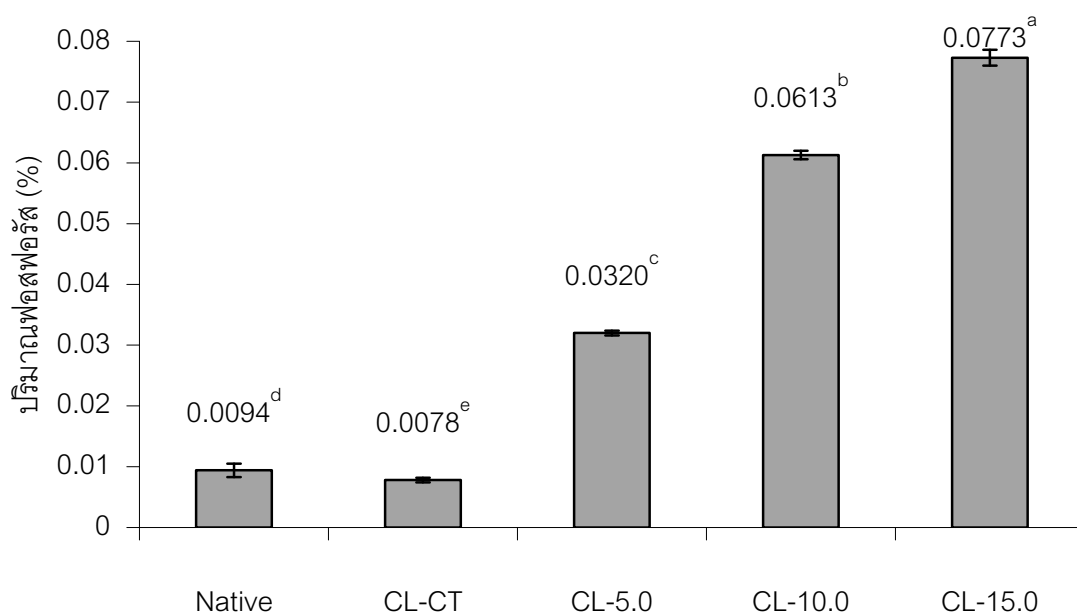


ภาพที่ 47 ความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

3.11 ผลของการดัดแปรต่อปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชถั่วเขียว

การศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม แสดงในภาพที่ 48 และตารางที่ 37 สตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ร้อยละ 0.0094 เมื่อผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามจะส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้นตามระดับของการดัดแปร โดยสตาร์ชดัดแปรมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.0320-0.0773

กระทรวงอุตสาหกรรม (2535) ได้มีเกณฑ์กำหนด และลักษณะชี้บ่งของสตาร์ชดัดแปรประเภทไดสตาร์ชฟอสเฟต คือ ปริมาณฟอสฟอรัส (คิดเป็นจำนวนฟอสฟอรัส) ไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับสตาร์ชดัดแปรที่มาจากสตาร์ชมันฝรั่งหรือจากข้าวสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับสตาร์ชประเภทอื่น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามที่ใช้ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 มีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยกว่าที่กฎหมายกำหนด สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ แต่สตาร์ชดัดแปรที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร้อยละ 10.0 และ 15.0 มีปริมาณฟอสฟอรัสเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้



ภาพที่ 48 ปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การดัดแปรสสารด้วยวิธีเยียวโดยการย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้าม เมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ พบว่าการดัดแปรที่ต่างกันจะส่งผลให้เกิดคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การดัดแปรสสารด้วยวิธีเยียวโดยการย่อยด้วยกรด

การดัดแปรสสารด้วยวิธีเยียวโดยการย่อยด้วยกรดจะส่งผลให้ผิวของเม็ดสสารมีรอยของการถูกย่อย เมื่อระดับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มมากขึ้น จะพบรอยบริเวณผิวของเม็ดสสารเพิ่มขึ้น แต่ลักษณะและรูปร่างของเม็ดสสารไม่เปลี่ยนแปลง ยังคงมีรูปร่าง กลม กลมรี ไปจนถึงรูปร่างคล้ายไตเช่นเดิม สสารดัดแปรที่มีค่า b^* เพิ่มขึ้น และพบว่าสสารดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.0 และ 0.5% และสสารดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.0% มีค่า L^* เพิ่มขึ้น ส่วนสสารดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระดับของกรด 1.0% มีค่า a^* เพิ่มขึ้น การดัดแปรสสารด้วยวิธีเยียวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณอะไมสเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของการดัดแปรเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1.0% ปริมาณอะไมสจะลดลง การดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรดจะไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยสสารมีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความหนืดสูงสุด และเบรกดาวน์มีค่าลดลง แต่อุณหภูมิที่เริ่มให้ความหนืดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน และพลังงานเอนทาลปีมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่จะมีช่วงที่สสารเกิดความหนืดลดลง หลังจากผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระดับกรด 1.0% ที่มีค่าไม่ต่างจากสสารที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเม็ดสสารมีรอยถูกย่อยอย่างชัดเจนโดยผิวจะขรุขระมากขึ้น มีรูเกิดขึ้นในสสารบางเม็ด และมีส่วนเกิดการเชื่อมกันระหว่างเม็ดสสาร ค่าการละลายเพิ่มขึ้น แต่กำลังการพองตัวลดลง ยกเว้นสสารที่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ระดับของกรด 0.5% ที่กำลังการพองตัวไม่ต่างจากสสารที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพบว่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ที่ระดับของการดัดแปรต่ำๆ สสารจะมีความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระดับของการดัดแปรให้สูงขึ้น ความแข็งแรงของเจลจะลดลง

2. การดัดแปรสสารธัวเขียวด้วยวิธีออกซิเดชัน

การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันไม่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของเม็ดสสารธัว แต่จะมีรอยจากการถูกย่อยโดยสารออกซิไดซ์บริเวณผิวของเม็ดสสารธัว ค่า L^* มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ a^* มีค่าลดลงตามระดับของการดัดแปร และที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนร้อยละ 0.5 มีค่า b^* เพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนร้อยละ 1.0 ถึง 2.0 ค่า b^* จะลดลง สสารธัวเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน ที่ความเข้มข้นแอคทีฟคลอรีน 1.0 และ 1.5% มีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกของสสารธัวหลังผ่านการดัดแปรไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะมีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สสารธัวผ่านการดัดแปรที่ระดับของการดัดแปรต่ำๆ คือแอคทีฟคลอรีน 0.5% มีค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้นค่าความหนืดสูงสุดจะลดลง และพบว่าหลังผ่านการดัดแปร เบรกดาวนมีค่าลดลง ส่วนอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความร้อน และความหนืดสุดท้ายสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มขึ้น แต่ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลง ยกเว้นสสารธัวที่ดัดแปรที่ความเข้มข้นแอคทีฟคลอรีน 1.0% ที่ให้ผลไม่ต่างจากสสารธัวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีน 1.0% มีค่าลดลง และภาพถ่ายจาก SEM แสดงให้เห็นว่าเม็ดสสารธัวมีรอยที่เกิดจากการถูกเอนไซม์ย่อย เกิดรูหรือโพรงในสสารธัวบางเม็ด มีการแตกหักและเกิดการรวมกันของสสารธัวบางเม็ด ค่าร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการดัดแปร ส่วนกำลังการพองตัวพบว่าที่ระดับแอคทีฟคลอรีนร้อยละ 0.5 และ 1.0 มีค่าลดลง ในขณะที่ระดับอื่นๆ ไม่ต่างจากสสารธัวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้น โดยที่แอคทีฟคลอรีน 0.5% มีร้อยละการแยกตัวของของเหลวมากที่สุด ความแข็งแรงของเจลจะมีค่าลดลงเมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้น โดยสสารธัวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับต่ำ คือแอคทีฟคลอรีน 0.5% จะมีความแข็งแรงของเจลสูงสุด ซึ่งสูงกว่าสสารธัวที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่เมื่อระดับการดัดแปรเพิ่มขึ้นเป็นแอคทีฟคลอรีน 1.0% ความแข็งแรงของเจลลดลง แต่ไม่ต่างจากสสารธัวที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อความเข้มข้นของแอคทีฟคลอรีนเพิ่มเป็น 1.5 และ 2.0% ค่าความแข็งแรงของเจลจะลดลง และมีค่าน้อยกว่าสสารธัวที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิล และหมู่คาร์บอกซิลจะเพิ่มขึ้นตามระดับของการดัดแปร

3. การดัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวโดยการเชื่อมข้าม

สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามจะส่งผลให้บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชมีรอยที่คล้ายถูกย่อย แต่ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง ค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้น ส่วนค่า L^* ที่ความเข้มข้นโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0 และ 15.0 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ 5.0% มีค่าไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ปริมาณอะไมโลสลดลง โครงสร้างผลึกและร้อยละความเป็นผลึก ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าความหนืดสูงสุด เบรกดาวน์ และเซตแบคลดลง แต่มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดและเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น T_0 มีค่าเพิ่มขึ้น $T_C - T_0$ มีค่าลดลง ส่วน T_p , T_C และ ΔH ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 5.0% ส่วนที่ระดับการดัดแปรที่สูงขึ้น ผลที่ได้ไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และภาพที่ถ่ายจาก SEM แสดงให้เห็นเม็ดสตาร์ชที่ถูกเอนไซม์ย่อยจนเกิดรอยขรุขระที่ผิว พบรอยแตก รู หรือโพรงภายในเม็ดสตาร์ช และมีบางส่วนบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชเกิดการเชื่อมกัน กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายลดลง ยกเว้นสตาร์ชที่ดัดแปรที่โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร้อยละ 15.0 มีค่าการละลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการแยกตัวของของเหลวเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0% มีร้อยละการแยกตัวของของเหลวมากที่สุด ความแข็งแรงของเจลมีค่าลดลงหลังสตาร์ชผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้ามและมีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นตามระดับของการดัดแปร ซึ่งสตาร์ชที่ดัดแปรที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 5.0% มีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เกินที่กฎหมายกำหนดให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ แต่ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 10.0 และ 15.0% มีปริมาณฟอสฟอรัสเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

บรรณานุกรม

- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์เบื้องต้นสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสาร มอก. ที่ 1073-2535. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร. 11 หน้า.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2524. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวุ้นเส้น. เอกสาร มอก. ที่ 444-2524. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 292 หน้า.
- จินตนา อุดิสกุล. 2538. การใช้ประโยชน์จากถั่วเขียว. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเชิงปฏิบัติการงานวิจัยถั่วเขียวครั้งที่ 6. นครราชสีมา; สำนักเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เฉลิมเกียรติ ดุลสัมพันธ์. 2546. ผลของความร้อน-ความชื้น คลื่อนอัลตราโซนิกส์ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง. ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 198 หน้า.
- ดวงใจ ธีรธรรมถาวร. 2536. การดัดแปรสตาโรซมันสำปะหลังแบบโครสลิงกิง. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 210 น.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพมหานคร. 504 หน้า.
- พิณทิพย์ รัชมกการณ. 2547. การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 166 หน้า.
- รัฐฐา งามขำ และลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์. 2548. การดัดแปรสตาโรซข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับการย่อยด้วยกรด. จุลนิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร. 68 หน้า.

- วรางคณา สงวนพงษ์. 2544. การลดขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 130 หน้า.
- วรรณพร ศิริโรจน์. 2528. การปรับปรุงคุณภาพของแป้งมันสำปะหลังโดยการแปรรูปทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรอนงค์ นัยวิกุล จิตธนา แจ่มเมฆ อรพิน ภูมิภมร และวุฒิชัย นาครักษา. 2531. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์) 23: 188-197.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 366 หน้า.
- Adebowale, K.O., Afolabi, T.A. and Lawal, O.S. 2002. Isolation, chemical modification and physicochemical characterisation of Bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. Food Chemistry 78: 305-311.
- AOAC. 1990. Official Method of Analysis. 15th Ed. Association of Official Analytical Chemists, Inc., Virginia. 1,298 p.
- Atichokudomchai, N. and Varavinit, S. 2003. Characterization and utilization of acid-modified cross-linked Tapioca starch in pharmaceutical tablets. Carbohydrate Polymers 53: 263-270.
- Baker, L.A. and Duarte, R. 1998. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperature and effect of salt and sugar. Cereal Chemistry. 75(3): 308-314.
- BeMiller, J.N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. Starch/Stärke 49: 127-131.
- Bernfeld, P. 1955. Amylase alpha- and beta- in method. In Colowik, S.P. and Kaplan, M.O. (Eds.). Enzymology 1: 149-158.
- Blanshard, J.M.V. 1987. Starch granule structure and function: A physicochemical approach. In Gailliard, T. (Eds.). Starch Properties and Potential. John Wiley and Sons, New York.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. International Journal of Biological Macromolecules 23: 85-112.

- Chatakanonda, P., Varavinit, S. and Chinachoti, P. 2000. Effect of crosslinking on thermal and microscopic transitions of rice starch. *LWT-Food Science and Technology*. 33: 276-284.
- Cheetham, N.W.H. and Tao, L. 1998. Variation in crystallinity type with amylase content in maize starch granules: An X-ray powder diffraction study. *Carbohydrate Polymers* 36: 277-284.
- Choi, S.G., and Kerr, W.L. 2003. Effects of chemical modification of wheat starch on molecular mobility as studied by pulsed ¹H NMR. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technology* 51: 1–8.
- Chung, H.J., Jeong, H.Y. and Lim, S.T. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch. *Carbohydrate polymer* 54: 449-455.
- Cooke, D. and Gidley, M.J. 1992. Loss of crystallinity and molecular order during starch gelatinization: origin or the enthalpy transition. *Carbohydrate Research* 227: 103-112.
- Donovan, J. W. 1979. Phase transition of the starch–water system. *Biopolymers* 18: 263–275.
- Dubois, M.K., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Robers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and substances. *Analytical Chemistry* 28: 350-356.
- Farley, F. F. and Hixon, R. M. 1942. Oxidation of raw starch granules by electrolysis in alkaline sodium chloride solution. *Industrial Engineering Chemistry* 34: 677–681.
- Galliard, T. and Bowler, P. 1987. Morphology and composition of starch. *In* Galliard, T. (Ed.). *Starch: Properties and Potential*. John Wiley and Sons., New York.
- Gunaratne, A. and Corke, H. 2007. Influence of prior acid treatment on acetylation of wheat, potato and maize starches. *Food Chemistry* 105: 917-925.
- 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: 425-437.

- Hibi, Y., Kitamura, S. and Kuge, T. 1990. Effect of lipids on the retrogradation of cooked rice. *Cereal Chemistry* 67(1): 7-10.
- Hirsch, J.B. and Kokini, J.L. 2002. Understanding the mechanism of cross-linking agents (POCl_3 , STMP, and EPI) through swelling behavior and pasting properties of cross-linked waxy maize starches. *Cereal Chemistry* 79: 102–107.
- Hizukuri, S. 1961. Effect of temperature during germination on the crystalline type of starch in soya bean seeding. *Nature* 192: 239-242.
- Hizukuri, S., Takeda, Y., Yasuda, M. and Suzuki, A. 1981. Multibranched nature of amylose and the action of debranching enzyme. *Carbohydrate Research* 94: 205-213.
- Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granule. *Carbohydrate Research* 141: 295-305.
- Hizukuri, S. 1996. Starch: analysis aspects. p. 342-429. *In* Eliasson, A. (Eds.). *Carbohydrate in Food*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Hoover, R. and Manuel, H. 1996. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. *Food Research International* 29(8): 731-750.
- Hoover, R. and Zhou, Y. 2003. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by alpha-amylase and resistant starch formation in legume: a review. *Carbohydrate Polymers* 54: 401-417.
- Hoseney, R.C. and Lineback, D.R. 1996. Methods of synthesis and characterization. *In* R.C. Hoseney (Ed.). *AACC Short course on "Starch: Structure, Properties and Food Uses"*. August 27-29, 1996. Bangkok, Thailand.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z. and Wu, D. 2004. Starch digestibility and the estimated glycemic score of diggerant types of rice different in amylase contents. *Journal of Cereal Science* 40:231-237.
- Imeson, A. 1992. *Thickening and Gelling Agents for Food*. Blakie Academic & Professional, Bishopbriggs., Glasgow. 258 p.

- Jacobs, H. and Delcour, J.A. 1998. Hydrothermal modification of granular starch with retention of the granular structure: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46: 2895-2905.
- Jayati, P., Singhal, R.S. and Kulkarni, P.R. 2002. Physicochemical properties of hydroxypropyl derivative from corn and amaranth starch. *Carbohydrate Polymers* 48: 49-53.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylase. *Cereal Science Today* 16: 337-338, 340-360.
- Kasemsuwan, T., Bailey, T. and Jane, J. 1998. Preparation of clear noodles with mixtures of tapioca and high-amylose starches. *Carbohydrate Polymers* 32: 301-312.
- Kim, M. and Lee, S. 2002. Characteristics of crosslinked potato starch and starch-filled linear low-density polyethylene films. *Carbohydrate Polymers* 50: 331-337.
- Kirby, K.W. 1986. Textile industry. p. 229-252. *In* O.B. Wurzburg (Ed.). *Modified Starches: Properties and Uses*. CRC Press Inc., Florida.
- Knight, J.W. 1969. *The Starch Industry*. Pergamon Press Ltd., Oxford. 189 p.
- Kuakpetoon, D. and Wang, Y. 2008. Locations of hypochlorite oxidation in corn starches varying in amylose content. *Carbohydrate Research* 343: 90-100.
- Lawal, O.S. 2004. Composition, physicochemical properties and retrogradation characteristics of native, oxidised, acetylated and acid-thinned new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *Food Chemistry* 87: 205-218.
- Lawal, O.S. and Adebawale, K.O. 2005. Physicochemical characteristics and thermal properties of chemically modified jack bean (*Canavalia ensiformis*) starch. *Carbohydrate Polymers* 60: 331-341.
- Lawal, O.S., Adebawale, K.O., Ogunsanwo, B.M., Barba, L.L. and Ilo, N.S. 2005. Oxidized and acid thinned starch derivatives of hybrid maize: functional characteristics, wide-angle X-ray diffractometry and thermal properties. *International Journal of Biological Macromolecules* 35: 71-79.

- Le Bail, P., Blueon, A., Colona, P. and Bizot, H. 1997. Structure and polymorphic transition of amylose induced by water and temperature change. p. 51-57. *In* Frazier, P.J., Richmond, P. and Donald, A.M. (Eds.). Starch: Structure and Functionality. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Leach, H.W., McCowen, L.D. and Schoch, T.J. 1959. Structure of starch granule I. Swelling and Solubility patterns of various starches. *Cereal Chemistry* 39: 534-544.
- Li, J.H. and Vasanthan, T. 2003. Hypochlorite oxidation of field pea starch and its suitability for noodle making using an extrusion cooker. *Food Research International* 36: 381-386.
- Li, J.H., Vasathan, T., Hoover, R. and Rossmagel, B.G. 2004. Starch from hull-less barley: V. In-vitro susceptibility of waxy, normal and high-amylose starch towards hydrolysis by alpha-amylases and amyloglucosidase. *Food Chemistry* 84: 621-632.
- Light, J.M. 1990. Modified food starches: why, what, where and how. *Cereal Foods World* 35(11): 1080-1092.
- Lineback, D.R. 1984. The starch granule: organization and properties. *Bakers Digest* 58(2): 16-21.
- Liu, W. and Shen, Q. 2007a. Studies on the physicochemical properties of mung bean starch from sour liquid processing and centrifugation. *Journal of Food Engineering* 79: 358-363.
- Liu, W. and Shen, Q. 2007b. Structure analysis of mung bean starch from sour liquid processing and centrifugation. *Journal of Food Engineering* 79: 1310-1314.
- Nabeshima, E.H. and Grossmann, M.V.E. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. *Carbohydrate Polymers* 45: 347-535.
- Newport Scientific Pty, Ltd. 1995. Operation Manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer. Australia. 93 p.
- Nollet, L.M.L. 1996. Handbook of Food Analysis. Marcel Dekker, Inc., New York. 2041 p.

- Oates, C.G. 1996. Physical modification of starch. *In* Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology. January 22-26 & February 19-23. 1996. AIT Center, Bangkok.
- Prabharvat, S. 1987. Seminar on Mungbean at Ambassador Hotel, Bangkok, 16-20 November 1987. Organized by Ministry of Agriculture and Cooperatives, Kasetsart University, and Asian Vegetable Research and Development Centre.
- Quan, Y., Kweon, M.R. and Sosulski, F.W. 1997. Effect of cross-linking on functional properties of cationic corn starch. *Starch/Stärke* 49(11): 458-464.
- Reilly, P.J. 1985. Enzyme degradation of starch. p. 101-141. *In* Van Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. (Eds.). *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Rickard, J.E., Asaoka, M. and Blanshard, J.M.V. 1991. The physicochemical properties of cassava starch: a review. *Tropical Science* 31: 189-207.
- Robyt, J.F. 1984. Enzyme in the hydrolysis and synthesis of starch. p. 87-123. *In* Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press, Inc., London.
- Rohwer, R.G. and Klem, R.E. 1984. Acid-modified starch: production and uses. p. 529-574. *In* Whistler, R.L., BeMiller, J.N., and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press Inc., Florida.
- Rutenburg, M.W. and Solarek, D. 1984. Starch derivatives: technology and uses. p. 311-388. *In* Whistler R.L., BeMiller, J.N., and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press Inc., Florida.
- Sander, J.P.M. 1996. Chemical modification of starch. *In* Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology (I). January 22-26 & February 19-23, 1996. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Sandhu, K.S., Singh, N. and Lim, S. 2007. A comparison of native and acid thinned normal and waxy corn starches: physicochemical, thermal, morphological and pasting properties. *LWT-Food Science and Technology* 40: 1527-1536.
- Sánchez-Rivera, M.M., García-Suárez, F.J.L., Velázquez del Valle, M., Gutierrez-Meraz,

- F. and Bello-Pérez, L.A. 2005. Partial characterization of banana starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. *Carbohydrate Polymers* 62: 50-56.
- Singh, J., Kaur, L. and McCarthy, O.J. 2007. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: a review. *Food Hydrocolloids* 21: 1-22.
- Smith, P.S. 1982. Starch derivatives their uses in foofs. p. 237-269. *In* Lineback, D.R. and Inglett, G.E. (Eds.). *Food Carbohydrates*. AVI Publishing Co., Inc., Connecticut.
- Swinkels, J.J.M. 1985. Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Stärke* 37: 1-5.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, X. 2004a. Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science* 39: 151-165.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, X. 2004b. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. *World's Poultry Science Journal* 60: 186-195.
- Valetudie, J.C., Colona, P., Bouchet, B. and Gallant, D.J. 1993. Hydrolysis of tropical tuber starches by bacterial and pancreatic alpha-amylase. *Starch* 45: 270-276.
- Voragen, A.G.J. 1996. Modified starches in food industry. *In* *Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology (1)*. January 22-26 & February 19-23, 1996. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Walker, D.A. 1976. Preparation of geological samples for scanning electron microscopy. p. 68. *In* Delokkunaund, A. *Specimen Preparation for SEM*. Kasetsart University, Bangkok.
- Wang, Y. and Wang, L. 2003. Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. *Carbohydrate Polymers* 52: 207-217.
- Wang, S., Yu, J., Gao, W., Pang, J., Liu, H. and Yu, J. 2007. Granule structural changes in native Chinese Yam (*Dioscorea oppositifolia* Thunb var. *Anguo*) starch during acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers* 69: 286-292.

- Whistler, R.L. and Deniel, J.R. 1984. Molecular structure of starch. pp. 153-178. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller. and E.F. Paschall. (Eds.). Starch: Chemistry and Technology. 2nd ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Wu, Y. and Seib, P.A. 1990. Acetylated and hydroxypropylated distarch phosphates from waxy barley: paste properties and freeze-thaw stability. *Cereal Chemistry* 67(2): 202-208.
- Wurzburg, O.B. 1986. Modified Starches: Properties and Uses. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 277 p.
- Yeh, A.I. and Yeh, S.L. 1993. Some characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rice starch. *Cereal Chemistry* 70: 596-601.
- Zobel, H.F. 1988. Starch crystal transformations and their industrial importance. *Starch/Stärke* 40(1): 1-7.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างสดารซ์ประมาณ 2 กรัม ให้น้ำหนักที่แน่นอนในภาชนะอะลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนมีน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 130 ± 3 องศาเซลเซียส ซ้ำมคิน (ประมาณ 15 – 18 ชั่วโมง) โดยเปิดฝาภาชนะ เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะทันที ทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นแล้วจึงชั่งน้ำหนัก ทำการอบซ้ำอีก 1 ชั่วโมงหรือจนได้น้ำหนักคงที่ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

คำนวณปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักเปียก (wet basis) จาก

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

คำนวณปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักแห้ง (dry basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก}}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})} \times 100$$

2. การตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสสารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Walker, 1976)

2.1 นำสสารตัวอย่างเพียงเล็กน้อยติดลงบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่งอะลูมิเนียม (aluminium stub)

2.2 นำแท่งอะลูมิเนียมที่ติดสสารตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อเคลือบทองลงที่ผิวของสสารสำหรับช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

2.3 วางแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบทองแล้วลงในช่องสำหรับใส่แท่งอะลูมิเนียมภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.4 ตรวจสอบลักษณะรูปร่าง และเลือกบริเวณที่จะบันทึกภาพของเม็ดสตาร์ชโดยควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ ใช้กำลังขยายที่ 500, 2,000 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ

3. ค่าสี (Nollet, 1996)

นำตัวอย่างไปวัดค่าสี โดยใช้ D65 10 องศา เป็นแหล่งกำเนิดแสง (illuminant) เพื่อหาค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) โดยใช้อุปกรณ์เทียบมาตรฐาน (black and white reference) เป็นตัวเทียบมาตรฐานค่าสี

4. ปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส

ชั่งอะไมโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง 0.040 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ อย่าให้อะไมโลสเกาะผนังขวด เติมน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันดี

4.2 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส ยกเว้นแต่ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1000 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง แทนอะไมโลสบริสุทธิ์

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ปิเปตสารละลายจากข้อ 4.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร (เตรียมโดยละลายไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที

ทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่สารตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแบล็ก วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบล็กให้เท่ากับ 0

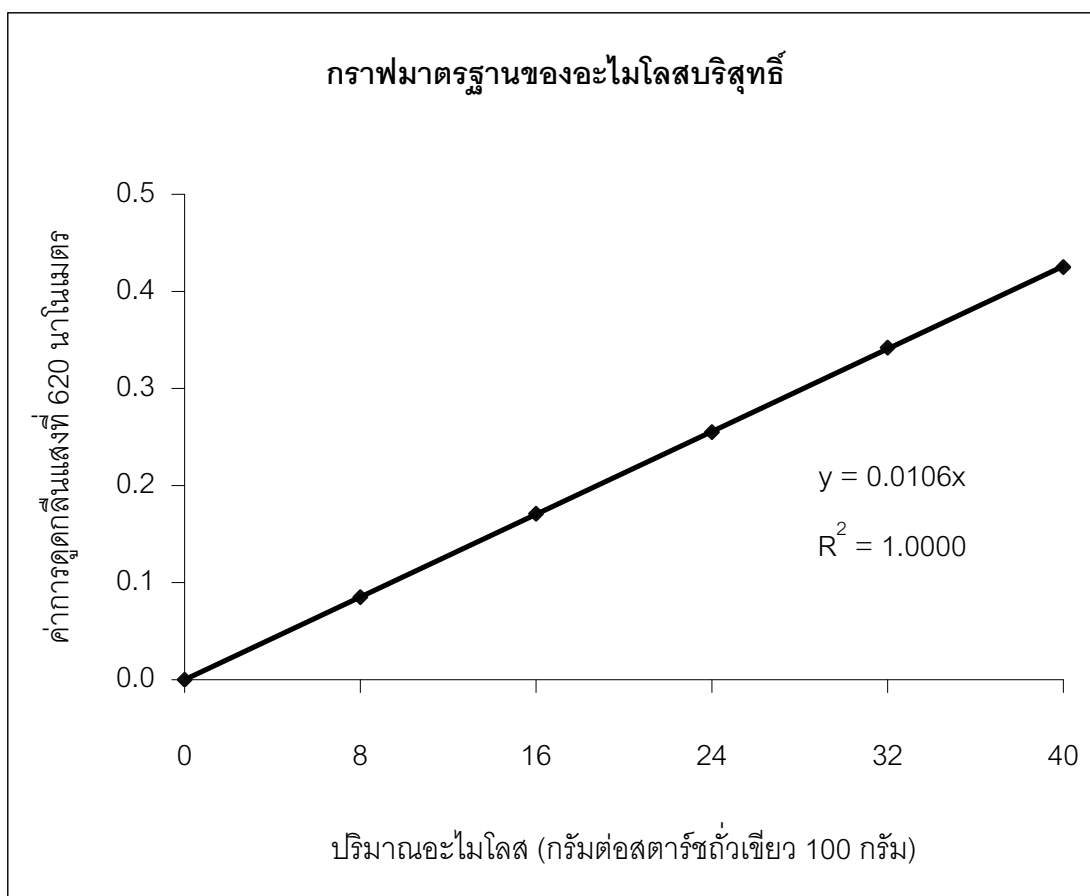
4.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐานจากข้อ 4.1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ และปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาตร 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันดี

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่มีความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และเขียนกราฟระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ช 100 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 8, 16, 24, 32 และ 40) กับค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบล็ก แสดงดังภาพที่ 49

4.5 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณอะไมโลส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณตัวอย่าง 0.1000 กรัม ของแต่ละตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วอ่านค่าเป็นร้อยละของอะไมโลสต่อสตาร์ชถั่วเขียว 100 กรัม



ภาพที่ 49 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

5. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Cheetham และ Tao,1998)

5.1 การเตรียมสตาร์ชก่อนการวิเคราะห์

ซังสตาร์ชประมาณ 7 กรัม ใส่ในจานแก้ว (Petri dish) และเกลี่ยสตาร์ชให้ทั่ว นำจานแก้ววางเรียงในถาดดูดความชื้นเปล่าที่มีการเติมน้ำกลั่นด้านล่างของภาชนะ นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 13-14)

5.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

5.2.1 บรรจุสตาซ์ที่ปรับความชื้นแล้วลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ

5.2.2 นำตัวอย่างใส่เข้าในเครื่อง โดยกำหนดสภาวะทดสอบ คือ ใช้เป้าหมาย (target) เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 5.00 ถึง 40.00 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศาต่อวินาที

5.2.3 บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ และคำนวณค่าร้อยละของความเป็นผลึก จากสมการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Cheetam และ Tao (1998) ดังนี้คือ

$$\text{ค่าร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค (A)}}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของสเปคตรัม (B)}} \times 100$$

ค่าของพื้นที่ใต้พีค (A) และพื้นที่ทั้งหมดของสเปคตรัม (B) สามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่อง

5.2.4 วิธีการคำนวณร้อยละความเป็นผลึกโดยละเอียดทำได้โดย

5.2.4.1 ค่าจากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของสเปคตรัม (B) ได้จากการนำค่าจากการวัดพื้นที่

5.2.4.2 ค่าจากพื้นที่ใต้พีค (A) ได้จากการนำค่าจากพื้นที่ใต้พีคหลัก 3 พีค ได้แก่ พีคตำแหน่งที่ 15 (1 พีค) 17 และ 18 (2 พีคเชื่อมกัน) และ 23 (1 พีค) องศา 2θ และพื้นที่จากพีคที่ปรากฏขึ้นใหม่อีก 1 พีค คือ ที่ตำแหน่ง 20 องศา 2θ มารวมกัน ซึ่งจะได้ตัวเลขทั้งหมด 3 ค่า

5.2.4.3 นำค่าจากพื้นที่ B และ A จากข้อ 5.2.4.1 และ 5.2.4.2 ไปแทนในสมการซึ่งแสดงไว้ในข้อ 5.2.3 จะได้ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาซ์ดัดแปรตัวอย่างนั้นๆ

5.3 สถานที่วิเคราะห์

ห้องปฏิบัติการ X-ray diffraction ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) (Newport Scientific Pty. Ltd., 1995)

6.1 นำตัวอย่างสตาร์ชไปหาปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC (1990) ก่อนทำการวิเคราะห์

6.2 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 4 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร สามารถคำนวณปริมาณสตาร์ช และน้ำกลั่นที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามร้อยละความชื้นของตัวอย่าง ตามสมการ

$$\text{ปริมาณสตาร์ช } S = \frac{4.0 \times 100}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})}$$

$$\text{ปริมาณน้ำกลั่น } W = 25 + (4.0 - S)$$

6.3 ใส่ใบพัดกวน (paddle) ลงในภาชนะอะลูมิเนียม ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นหมุนใบพัดกวนจนตัวอย่างสตาร์ช และน้ำกลั่นผสมกันดี

6.4 ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดตามโปรแกรม STD1 ดังนี้

เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 690 รอบต่อนาที

เวลา 10 วินาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

เวลา 1 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที และเริ่มให้

ความร้อน

เวลา 4 นาที 42 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จนถึง

เวลา 7 นาที 12 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที และเริ่มให้

ความเย็น

เวลา 11 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จนถึง

เวลา 13 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

ได้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำความเย็น (trough)

ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

การคืนตัว (setback) และอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature)

7. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (ดัดแปลงจากกัลลัณรงค์ และเกื้อกูล, 2543 และ Baker และ Duarte, 1998)

7.1 วิธีการทดลอง

ซึ่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 3.5 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำร้อยละ 70 ของน้ำหนักทั้งหมดโดยใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็ก (micro syringe) ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียม (DSC pan) ปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส คงไว้ 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที คำนวณหาค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_O , T_P , และ T_C ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลาติไนเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$; จูลต่อกรัม)

7.2 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิ และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลาติไนเซชัน

การคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน (T_O , T_P , และ T_C ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลาติไนเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$; จูลต่อกรัม) กรณีที่มีพีคปรากฏขึ้นเพียงพีคเดียวหรือปรากฏขึ้นมากกว่าหนึ่งพีคแต่มีการแยกของพีคเป็นพีคเดี่ยวๆ ค่าอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนเซชันต่างๆ จะสามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่องทั้งหมด

8. การวิเคราะห์ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (susceptibility to enzyme digestion) ของสตาร์ช

8.1 การวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (Alpha-amylase from porcine pancreatic) (Bernfeld, 1995)

8.1.1 การเตรียมสารเคมี

8.1.1.1 สารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ ค่าพีเอช 6.9 ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ซิงโซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิคแอนไฮไดรต์ 0.138 กรัม ปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ จากนั้นปรับพีเอชเป็น 6.9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในอ่างน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เตรียมโดยใช้น้ำดีไอไอไนซ์ (deionized water) เป็นตัวทำละลาย)

8.1.1.2 สารละลายสตาร์ชมันฝรั่งเข้มข้นร้อยละ 1.0

ซิงสตาร์ชมันฝรั่งที่ละลายน้ำได้ (soluble potato starch) 0.250 กรัม ใส่ปิกเกอร์ เต็มสารละลายข้อ 8.1.1.1 พอท่วม ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน จากนั้นนำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อน (hot plate) จนกระทั่งเดือด จับเวลาขณะเดือด 15 นาที ทำให้น้ำที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำดีไอไอไนซ์

8.1.1.3 สารละลายสี (Color reagent solution)

ซิงกรดไดไนโตรซาลิกไซคลิก 1.0 กรัม เติมน้ำดีไอไอไนซ์ 50 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน นำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อน แต่อย่าให้สารละลายเดือด เมื่อละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ค่อยๆ เติมโซเดียมโพแทสเซียมทาทาเทรต 30.0 กรัม และเติมสารละลายโซเดียม

ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 นอร์มอล ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เมื่อสารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ทำให้น้ำที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำดีไอโอไนซ์ เก็บสารละลายสีในขวดสีชา โดยสารละลายสีที่เตรียมนี้มีอายุการใช้งาน 2 สัปดาห์

8.1.1.4 สารละลายมอลโตสมาตรฐานเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนักต่อปริมาตร)

นำมอลโตสอบในตู้อบลมร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง ก่อนการนำมาใช้เพื่อไล่ความชื้น ชั่งมอลโตส 0.050 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร โดยใช้ น้ำดีไอโอไนซ์

8.1.1.5 สารละลายเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลส

เตรียมสารละลายเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลสให้มีความเข้มข้น 1 หน่วยเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลสต่อ 1 มิลลิลิตร ในน้ำดีไอโอไนซ์เย็น (1 ยูนิตต่อมิลลิลิตร)

8.1.2 วิธีการวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

การวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์จะป้อนสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังตารางที่ 14 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด จำนวน 4 หลอด (หลอดที่ 1-3 เป็นหลอดทดสอบ และหลอดที่ 4 เป็นหลอดแบลนด์) และทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส กำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (unit enzyme) หมายถึงปริมาณเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสตาร์ชเป็นมอลโตส 1.0 มิลลิกรัม ในเวลา 3 นาที ที่ค่าพีเอช 6.9 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 14 วิธีการวิเคราะห์แควตีวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

วิธีการทดลอง	หลอดทดสอบ (มิลลิลิตร)	หลอดแบลงค์ (มิลลิลิตร)
8.1.2.1 ปิเปตสารละลายสตาร์ชมันฝรั่ง (ข้อ 8.1.1.2) แช่หลอดทดลองในอ่างน้ำเย็นนาน 3 นาที	1.00	1.00
8.1.2.2 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.5) เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ปลอ่ยให้ทำปฏิกิริยานาน 3 นาที โดยเขย่าหลอดทดลองตลอดเวลา	1.00	---
8.1.2.3 ปิเปตสารละลายสี (ข้อ 8.1.1.3)	1.00	1.00
8.1.2.4 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.5) ปิดฝาหลอดทดลองแล้วรีบนำไปต้มในอ่างน้ำเดือด ทันที นาน 15 นาที เมื่อครบเวลา นำหลอดทดลองมาทำให้ เย็นในอ่างน้ำแข็ง	---	1.00
8.1.2.5 ปิเปตน้ำดีไอโอไนซ์ในหลอดทดลอง เขย่าสารละลายให้เข้ากัน และนำไปวัดค่าการ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่า สารละลายแบลงค์เป็น 0	9.00	9.00

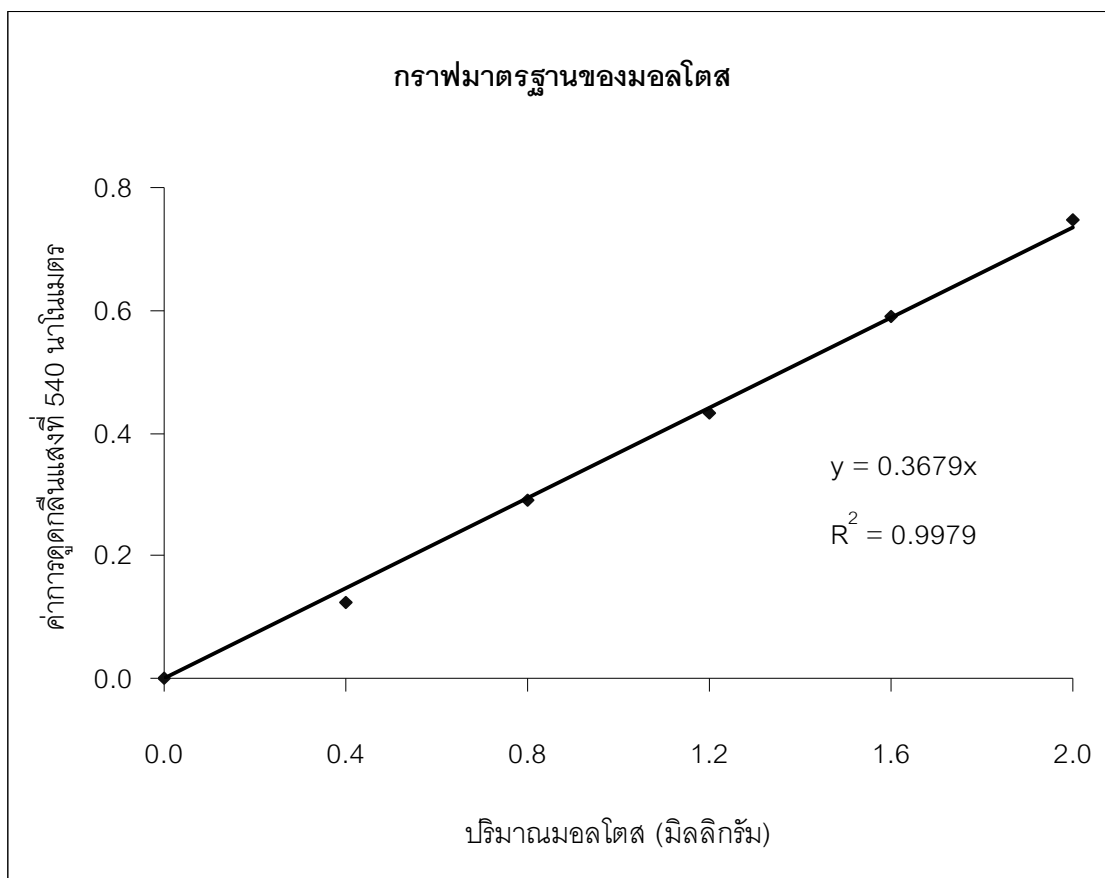
8.1.3 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

การเตรียมกราฟมาตรฐานจะปิเปตสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 15 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด จำนวน 6 หลอด

ตารางที่ 15 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

วิธีการทดลอง	หาค่าสารละลายมาตรฐานที่					
	1	2	3	4	5	เบลอค์
8.1.3.1 สารละลายมาตรฐานมอลโตส (ข้อ 8.1.1.4)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	---
8.1.3.2 น้ำดีไอโอไนซ์	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	2.00
8.1.3.3 สารละลายสี (ข้อ 8.1.1.3)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ปิดฝาหลอดทดลอง และนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที เมื่อครบเวลา นำหลอดทดลองมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง						
8.1.3.4 ปิเปตน้ำดีไอโอไนซ์	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
เขย่าสารละลายให้เข้ากันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายเบลอค์เป็น 0						

เขียนกราฟมาตรฐานของมอลโตส ระหว่างปริมาณมอลโตส หน่วยเป็นมิลลิกรัม (คิดเป็น 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมมอลโตส) กับค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าแอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร

8.1.4 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณมิลลิกรัมมอลโตส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากการวัดแอกติวิตีของเอนไซม์ (ข้อ 8.1.2) เทียบกับกราฟมาตรฐานมอลโตสแล้วคำนวณค่าเป็นปริมาณมิลลิกรัมของมอลโตส

8.1.5 การคำนวณค่าแอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

$$\text{หน่วยต่อมิลลิกรัมเอนไซม์} = \frac{A \times (df)}{B}$$

A = มิลลิกรัมมอลโตสจากการย่อยด้วยเอนไซม์

B = ปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ (ในหน่วยมิลลิลิตร)

df = อัตราการเจือจาง (dilution factor)

8.2 การย่อยสสารด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Li และคณะ, 2003)

8.2.1 ปิเปตเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 1.39 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำดีไอไอไนซ์ (ใช้เอนไซม์ 5 หน่วยต่อมิลลิกรัมสสารตัวอย่าง โดยเอนไซม์ที่ใช้มีแอกติวิตีจำเพาะ (specific activity) เท่ากับ 1,125 หน่วยต่อมิลลิกรัมโปรตีน และมี 32 มิลลิกรัมโปรตีนต่อมิลลิลิตร)

8.2.2 ชั่งตัวอย่างสสาร 100 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดเหวี่ยงที่มีฝาเกลียวปิด (screw cap centrifuge tube) ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.006 โมลาร์ ค่าพีเอช 6.9 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน

8.2.3 นำหลอดเหวี่ยงแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

8.2.4 ปิเปตสารละลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 1.00 มิลลิลิตร นำหลอดเหวี่ยงแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที นาน 6 ชั่วโมง

8.2.5 เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด เติมน้ำเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 2.20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที แยกส่วนใส ด้านบนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่อไป ส่วนสสารที่เหลือด้านล่าง นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 3 ครั้ง และเอทานอล 95% ซ้ำ 2 ครั้ง นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสสารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ต่อไป

8.3 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Dubois และคณะ, 1956)

8.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานกลูโคส

8.3.1.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) จากนั้นนำสารละลายกลูโคสมาเจือจางอีกครั้งให้เป็นความเข้มข้นร้อยละ 0.01

8.3.1.2 ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 16

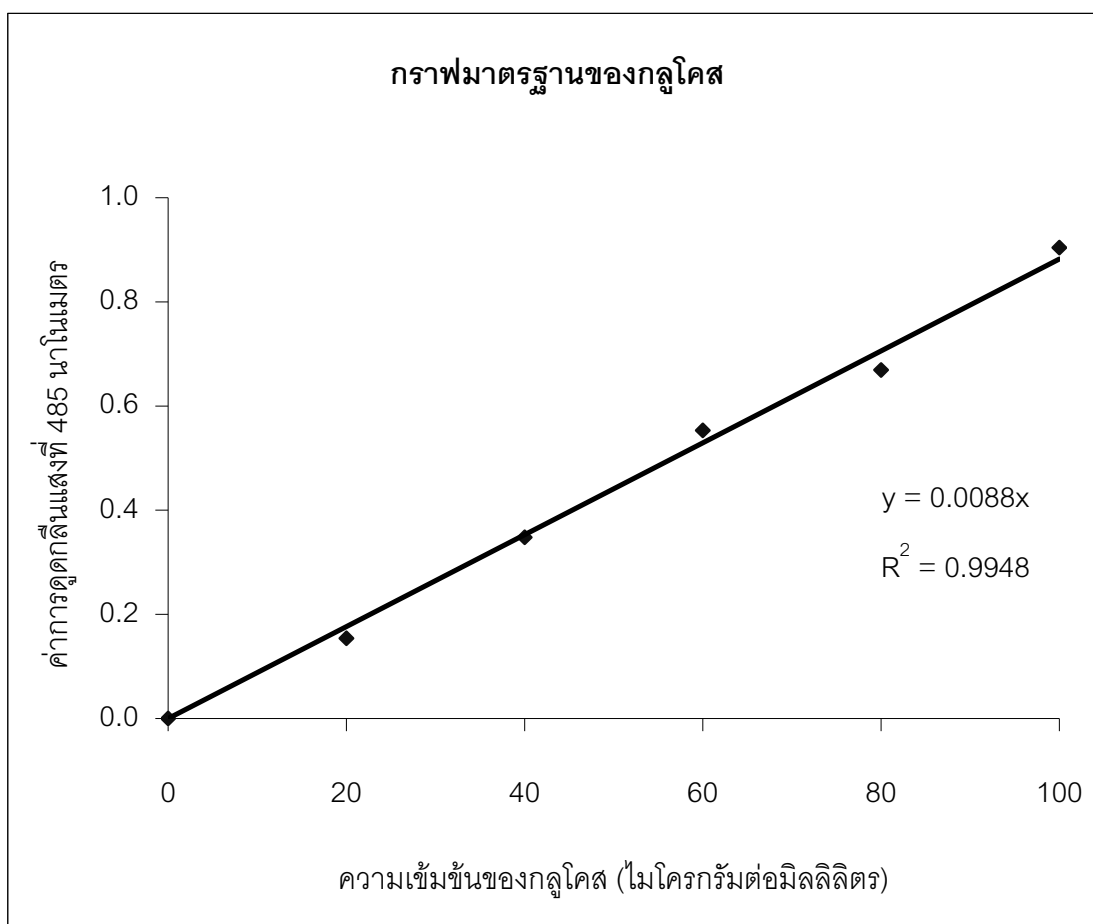
ตารางที่ 16 การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

หลอดที่	ปริมาตรสารละลายกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 0.01 ที่ปิเปต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่นที่เติม (มิลลิลิตร)	คิดเป็นความเข้มข้นของกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0.0	1.0	0
2	0.2	0.8	20
3	0.4	0.6	40
4	0.6	0.4	60
5	0.8	0.2	80
6	1.0	0.0	100

8.3.1.3 ปิเปตสารละลายฟินอลความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว

8.3.1.4 ปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควัน 30 นาที

8.3.1.5 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในหน่วย ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด

8.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

8.3.2.1 ทำการเจือจางตัวอย่างให้มีความเข้มข้นไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (ในงานวิทยานิพนธ์นี้เจือจาง 100 เท่า)

8.3.2.2 ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร จากนั้นทำตามขั้นตอนในข้อ 8.3.1.3 ถึง 8.3.1.5

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส และคำนวณความเข้มข้นของกลูโคส (ปริมาณคาร์โบไฮเดรต) ทั้งหมดในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (1 มิลลิลิตรของสารละลาย) โดยคูณอัตราการเจือจาง (dilution factor) ของตัวอย่างด้วย จากนั้นหารด้วย 1,000 เพื่อเปลี่ยนให้เป็นหน่วยมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และคูณด้วย 13.2 มิลลิลิตร (มาจากการใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ในข้อ 8.2.2 เอนไซม์ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ในข้อ 8.2.4 และเอทานอลปริมาตร 2.20 มิลลิลิตร ในข้อ 8.2.5) เพื่อจะคำนวณค่าปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสทั้งหมดในหน่วยมิลลิกรัมต่อการย่อยสลายแห้ง 100 มิลลิกรัม ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ซึ่งก็คือ ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (% enzyme hydrolysis) ของสตาร์ชตัดแปร (Hoover และ Manuel, 1996)

9. ร้อยละการละลายและกำลังการพองตัว (ดัดแปลงจาก Leach และคณะ, 1959)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เขย่าตลอดเวลานาน 30 นาที ด้วยอัตราเร็ว 140 รอบต่อนาที จากนั้นเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยง ที่ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ดูดของเหลวใส่ตอบนบนทั้งหมดใส่ในภาชนะอบแห้งที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ข้ามคืบจนมีน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้หลังจากการอบจะเป็นน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ ส่วนสตาร์ชเปียกซึ่งเหลืออยู่ในหลอดเหวี่ยงนำมาชั่งเป็นน้ำหนักสตาร์ชที่พองตัว จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละการละลาย และกำลังการพองตัว โดยคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละของการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลาย} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่พองตัว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละของการละลาย})}$$

10. ความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลาย (ดัดแปลงจาก Jayati และคณะ, 2002)

เตรียมน้ำสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที โดยกวนตลอดเวลาที่ความเร็ว 270 รอบต่อนาที จากนั้นเทใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน บันทึกน้ำหนักหลอดปั่นเหวี่ยงที่บรรจุสารละลายสตาร์ช นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -23.93 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลา ทำการละลายโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนกว่าจะละลายหมด ชั่งน้ำหนักหลอดปั่นเหวี่ยงที่กำจัดน้ำออก จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละปริมาณน้ำที่แยกชั้น (% syneresis) โดยคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละปริมาณน้ำที่แยกชั้น} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่แยกชั้น}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \times 100$$

11. ความแข็งแรงของเจลด้วยเครื่อง Texture Analyzer

เตรียมของผสมน้ำกับสตาร์ชถั่วเขียวความเข้มข้นร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที โดยกวนตลอดที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที จากนั้นเทใส่ภาชนะพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.9 เซนติเมตร สูง 1.0 เซนติเมตร นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความแข็งแรงของเจลด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยใช้หัววัด P100 และทำการวัดความแข็งแรงของเจลตามโปรแกรมดังนี้

Pre-test speed	2.0 mm/sec
Test speed	1.0 mm/sec
Post-test speed	10.0 mm/sec
Rupture test distance	1.0 mm
Distance	7.0 mm
Force	400 g
Time	2 sec
Count	3

โดยความแข็งแรงของเจลคิดจากค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลเริ่มแตกหรือเสียสภาพ

12. ปริมาณหมู่คาร์บอนิล และหมู่คาร์บอกซิล (เฉพาะสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรโดยวิธี ออกซิเดชัน) (Wang และ Wang, 2003)

12.1 การหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล

12.1.1 การเตรียมสารละลายไฮดรอกซิลเอมีน

เตรียมสารละลายไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวด วัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร เติมไฮดรอกซิลเอมีนไฮโดรคลอไรด์ 25 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

12.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่คาร์บอนิล

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 4 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ต้มในอ่างน้ำร้อน นาน 20 นาที เมื่อครบระยะเวลา ทำให้เย็นจนมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปรับให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.2 ด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นเติมสารละลายไฮดรอกซิลเอมีน 15 มิลลิลิตร ปิดปากขวดรูปชมพู่ นำไปใส่ในอ่าง น้ำควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง โดยเขย่าช้า ๆ ตลอดเวลา เมื่อครบระยะเวลา นำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.2 (แปลงค่าได้จากการไตเตรตระหว่างสารละลายไฮดรอกซิลเอมีน กับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา ร้อยละปริมาณหมู่คาร์บอนิล โดยคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละปริมาณหมู่คาร์บอนิล} = \frac{(\text{เบลงค์} - \text{ตัวอย่าง}) \text{ มิลลิลิตร} \times \text{ความเข้มข้นของกรด} \times 0.028 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง}}$$

12.2 การหาปริมาณหมู่คาร์บอกซิล

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 2 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ใส่ในปิกรเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 30 นาที นำไปกรองโดยใช้ระบบสุญญากาศ โดยกรองผ่าน medium porosity fritted glass funnel ขนาด 150 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร จากนั้นย้ายก้อนสตาร์ชใส่ในปิกรเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 300 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำไปต้มในอ่างน้ำร้อน นาน 15 นาที โดยกวนตลอดเวลา ปรับให้สารละลายมีปริมาตร 450 มิลลิลิตร และนำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 นอร์มอล จนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.3 (ใช้สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรเป็นแบลงค์) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละปริมาณหมู่คาร์บอกซิล โดยคำนวณจาก

$$\text{ร้อยละปริมาณหมู่คาร์บอกซิล} = \frac{(\text{ตัวอย่าง} - \text{แบลงค์}) \text{ มิลลิลิตร} \times \text{ความเข้มข้นของเบส} \times 0.045 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง}}$$

13. ปริมาณฟอสฟอรัส (เฉพาะสตาร์ชถั่วเขียวดัดแปรโดยวิธีการเชื่อมข้าม)

13.1 การเตรียมสารเคมี

13.1.1 สารละลายโมลิบโดวานาเดต

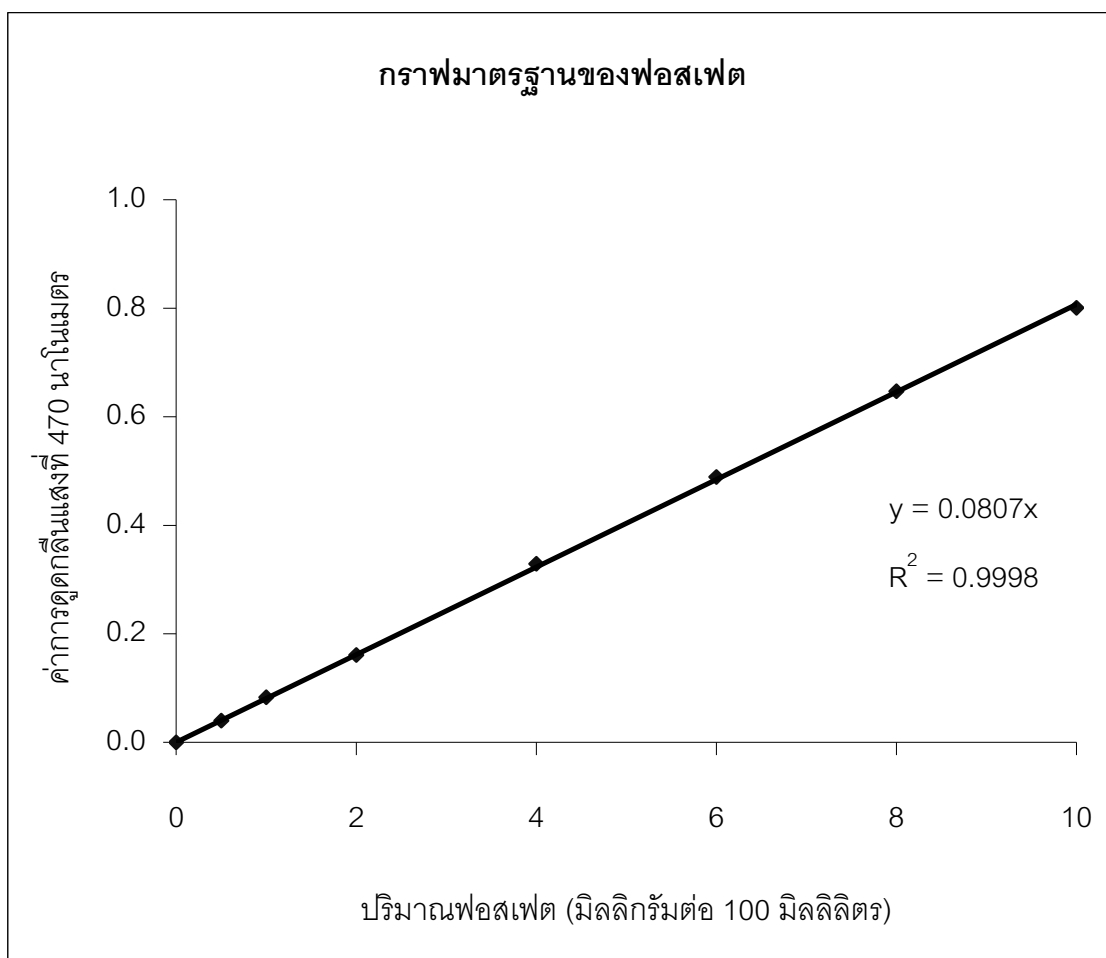
ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 20 กรัม ในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาตร 400 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้เย็น ละลายแอมโมเนียมวานาเดต 1.0 กรัม ในน้ำเดือดปริมาตร 300 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้เย็น และเติมกรดไนตริกเข้มข้น 140 มิลลิลิตร โดยค่อย ๆ กวน จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายโมลิบเดตลงในสารละลายกรดวานาเดต และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

13.1.2 สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

ซึ่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 3.834 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น แซ่เย็นไว้จนกว่าจะแข็ง เมื่อจะใช้ให้ปิเปตสารละลายดังกล่าวมา 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร (1 มิลลิลิตร = 0.2 มิลลิกรัม P_2O_5)

13.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ปริมาตร 0, 2.5, 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ (0-10 มิลลิกรัม P_2O_5) ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 50-60 มิลลิลิตร เติมสารละลายโมลิบโดวานาเดตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปรับให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณฟอสเฟตในหน่วยมิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร แสดงไว้ในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าปริมาณฟอสเฟต

ภาคผนวก ข
ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 17 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	61.98 ± 0.11^b
Acid-thinned starch, 40°C, control	64.02 ± 0.63^a
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	64.43 ± 0.99^a
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	63.65 ± 1.02^a
Acid-thinned starch, 60°C, control	62.05 ± 0.55^b
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	61.57 ± 0.72^b
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	59.74 ± 0.35^c

a,...,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 18 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก
Native starch	51.84
Acid-thinned starch, 40°C, control	53.85
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	53.93
Acid-thinned starch, 60°C, control	54.42
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	52.67

ตารางที่ 19 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์
Native starch	39.63 ± 1.38^d
Acid-thinned starch, 40°C, control	68.10 ± 6.07^b
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	49.84 ± 4.73^c
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	78.18 ± 6.58^a
Acid-thinned starch, 60°C, control	83.78 ± 4.52^a
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	57.04 ± 3.19^c
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	39.29 ± 1.36^d

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 20 ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย
Native starch	11.16 ± 0.17^a	3.46 ± 0.05^d
Acid-thinned starch, 40°C, control	10.01 ± 0.07^b	4.78 ± 0.49^c
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	10.87 ± 0.18^a	5.46 ± 0.32^b
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	8.65 ± 0.24^c	6.60 ± 0.67^{ab}
Acid-thinned starch, 60°C, control	10.14 ± 0.08^b	4.20 ± 0.16^c
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	7.05 ± 0.12^d	6.01 ± 0.22^a
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	5.32 ± 0.32^e	5.43 ± 0.35^b

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 21 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ร้อยละการแยกตัวของของเหลว
Native starch	54.84 ± 0.59^d
Acid-thinned starch, 40°C, control	70.90 ± 2.21^b
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	64.88 ± 4.23^c
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	73.26 ± 0.94^b
Acid-thinned starch, 60°C, control	77.14 ± 2.30^a
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	72.48 ± 1.20^b
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	72.97 ± 2.09^b

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 22 ค่าความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ความแข็งแรงของเจล (นิวตัน)
Native starch	78.96 ± 3.92^c
Acid-thinned starch, 40°C, control	121.06 ± 14.72^b
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	120.25 ± 6.79^b
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	79.39 ± 7.54^c
Acid-thinned starch, 60°C, control	145.78 ± 9.80^a
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	21.34 ± 2.06^d
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	-

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 23 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	12.18 ± 0.08^{de}
Acid-thinned starch, 40°C, control	12.56 ± 0.15^c
Acid-thinned starch, 40°C, 0.5% HCl	11.95 ± 0.25^e
Acid-thinned starch, 40°C, 1.0% HCl	12.13 ± 0.24^{de}
Acid-thinned starch, 60°C, control	13.02 ± 0.09^b
Acid-thinned starch, 60°C, 0.5% HCl	12.36 ± 0.18^{cd}
Acid-thinned starch, 60°C, 1.0% HCl	13.41 ± 0.56^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 24 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	61.98 ± 0.11^b
Oxidized starch, control	61.26 ± 1.15^b
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	61.72 ± 0.79^b
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	64.12 ± 0.20^a
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	63.44 ± 0.30^a
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	61.76 ± 0.52^b

a,...,b = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 25 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก
Native starch	51.84
Oxidized starch, control	53.48
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	53.29
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	53.64

ตารางที่ 26 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์
Native starch	39.63 ± 1.38^c
Oxidized starch, control	36.75 ± 4.30^c
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	66.60 ± 1.93^a
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	25.85 ± 0.98^d
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	50.63 ± 2.10^b
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	50.05 ± 3.79^b

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 27 ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย
Native starch	11.16 ± 0.17^a	3.46 ± 0.05^d
Oxidized starch, control	11.26 ± 0.03^a	5.73 ± 0.32^c
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	9.59 ± 0.37^c	6.25 ± 0.35^{bc}
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	11.07 ± 0.16^a	6.70 ± 0.49^b
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	10.54 ± 0.30^b	8.89 ± 0.54^a
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	11.18 ± 0.30^a	8.83 ± 0.08^a

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 28 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ร้อยละการแยกตัวของของเหลว
Native starch	54.84 ± 0.59^e
Oxidized starch, control	67.99 ± 3.11^d
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	77.03 ± 1.36^a
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	71.05 ± 2.25^c
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	71.69 ± 1.40^{bc}
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	74.04 ± 2.61^b

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 29 ค่าความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ความแข็งแรงของเจล (นิวตัน)
Native starch	78.96 ± 3.92^b
Oxidized starch, control	112.60 ± 7.39^a
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	109.86 ± 4.05^a
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	82.95 ± 8.56^b
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	49.83 ± 2.29^c
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	45.12 ± 2.38^c

a,...,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 30 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	12.18 ± 0.08^a
Oxidized starch, control	11.39 ± 0.08^d
Oxidized starch, 0.5% active chlorine	11.27 ± 0.13^d
Oxidized starch, 1.0% active chlorine	11.66 ± 0.16^c
Oxidized starch, 1.5% active chlorine	11.87 ± 0.11^b
Oxidized starch, 2.0% active chlorine	11.87 ± 0.18^b

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 31 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	61.98 ± 0.11^b
Cross-linked starch, control	64.19 ± 0.08^a
Cross-linked starch, 5.0% STMP	22.19 ± 1.14^c
Cross-linked starch, 10.0% STMP	20.41 ± 1.33^d
Cross-linked starch, 15.0% STMP	20.21 ± 0.59^d

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 32 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก
Native starch	51.84
Cross-linked starch, control	53.72
Cross-linked starch, 5.0% STMP	52.81
Cross-linked starch, 10.0% STMP	51.50
Cross-linked starch, 15.0% STMP	52.81

ตารางที่ 33 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์
Native starch	39.63 ± 1.38^b
Cross-linked starch, control	44.79 ± 1.66^a
Cross-linked starch, 5.0% STMP	44.79 ± 3.99^a
Cross-linked starch, 10.0% STMP	35.34 ± 2.52^b
Cross-linked starch, 15.0% STMP	38.00 ± 2.00^b

a,...,b = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 34 ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	กำลังการพองตัว	ร้อยละการละลาย
Native starch	11.16 ± 0.17^a	3.46 ± 0.05^c
Cross-linked starch, control	10.44 ± 0.11^b	3.99 ± 0.05^b
Cross-linked starch, 5.0% STMP	5.88 ± 0.25^d	2.83 ± 0.03^d
Cross-linked starch, 10.0% STMP	5.61 ± 0.23^d	2.45 ± 0.37^d
Cross-linked starch, 15.0% STMP	6.80 ± 0.17^c	4.90 ± 0.21^a

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 35 ค่าร้อยละการแยกตัวของของเหลวของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ร้อยละการแยกตัวของของเหลว
Native starch	54.84 ± 0.59^d
Cross-linked starch, control	67.13 ± 1.23^c
Cross-linked starch, 5.0% STMP	76.70 ± 1.23^b
Cross-linked starch, 10.0% STMP	79.78 ± 0.78^a
Cross-linked starch, 15.0% STMP	75.06 ± 1.90^b

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 36 ค่าความแข็งแรงของเจลของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ความแข็งแรงของเจล (นิวตัน)
Native starch	78.96 ± 3.92^b
Cross-linked starch, control	138.45 ± 6.07^a
Cross-linked starch, 5.0% STMP	37.20 ± 6.16^d
Cross-linked starch, 10.0% STMP	51.24 ± 8.96^c
Cross-linked starch, 15.0% STMP	25.14 ± 5.48^e

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 37 ปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ปริมาณฟอสฟอรัส (กรัมต่อน้ำหนักสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	0.0094 ± 0.0011^d
Cross-linked starch, control	0.0078 ± 0.0004^e
Cross-linked starch, 5.0% STMP	0.0320 ± 0.0004^c
Cross-linked starch, 10.0% STMP	0.0613 ± 0.0007^b
Cross-linked starch, 15.0% STMP	0.0773 ± 0.0013^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางที่ 38 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรโดยการเชื่อมข้าม

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (กรัมต่อน้ำหนักสตาร์ชถั่วเขียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	12.18 ± 0.08^c
Cross-linked starch, control	12.48 ± 0.24^{ab}
Cross-linked starch, 5.0% STMP	12.26 ± 0.19^{bc}
Cross-linked starch, 10.0% STMP	12.58 ± 0.21^a
Cross-linked starch, 15.0% STMP	12.68 ± 0.05^a

a,...,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตารางคือค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นายณัฐ ไซตจิรัฐติกาล

ที่อยู่

19/210 หมู่ที่ 2 ถ.เพชรเกษม ต.เขาน้อย อ.ปรางค์บุรี

จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77120

โทรศัพท์ 081-9258130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2545

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์
นครปฐม

พ.ศ. 2546

ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม