การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

โดย

นางสาวธนาพร ฤทธิชัยฤกษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

โดย

นางสาวธนาพร ฤทธิชัยฤกษ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

MODIFICATION OF WAXY RICE STARCH BY HEAT-MOISTURE TREATMENTS

By
Thanaporn Ritthichairoek

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
MASTER OF SCIENCE
Department of Food Technology
Graduate School
SILPAKORN UNIVERSITY
2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง " การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น " เสนอโดย นางสาวธนาพร ฤทธิชัยฤกษ์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

……...

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..........เดือน.................... พ.ศ...........

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย
2. อาจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ)

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

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์)

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

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

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

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต)

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

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร)

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

47403215 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : สตาร์ชข้าวเหนียว/การดัดแปรสตาร์ช/วิธีการให้ความร้อนชื้น

ธนาพร ฤทธิชัยฤกษ์ : การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย , อ.ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร และ ผศ.ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต. 131 หน้า.

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น เป็นกระบวนการดัดแปรทางกายภาพที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของสตาร์ช โดยการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยความร้อน 2 ระดับ คือ อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส ความชื้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10 20 และ 30 ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 และ 4 ชั่วโมง ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด รูปร่าง และรูปแบบผลึกของสตาร์ช จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวยังคงรักษารูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอ และปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดิมทั้ง 3 พีค แต่การดัดแปรส่งผลให้สตาร์ชมีร้อยละความเป็นผลึกและปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และยังส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส มีแนวโน้มสูงขึ้น การวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลาทิไนเซชันเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการดูดความร้อนสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และค่าพลังงานเอนทาลปีมีแนวโน้มสูงขึ้น และเมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer พบว่า การดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง และเซตแบค มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าร้อยละการพองตัว ร้อยละการละลาย และความใสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา..

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. .... 2. .... 3. ....

47403215 : MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : WAXY RICE STARCH/MODIFICATION/HEAT-MOISTURE TREATMENT

THANAPORN RITTHICHAIROEK : MODIFICATION OF WAXY RICE STARCH BY HEAT-MOISTURE TREATMENTS. THESIS ADVISORS : ASST.PROF.EAKAPHAN KEOWMANEECHAI, Ph.D., ASST.PROF.SUCHED SAMUHASANEETOO, Ph.D., AND DOUNGJAI THIRATHAMMATHAWORN, Ph.D. 131 pp.

Modification of waxy rice starch by heat-moisture treatment is a physical modification that can change some properties of the starch. The modification of waxy rice starch was performed by using two temperature levels, 100°C and 120°C, with three moisture levels, 10, 20 and 30% and heating periods of 1 and 4 hours. The treatment did not affect the granular size, shape, or crystal structure. Investigation using X-ray diffraction showed similar crystal structure to type A with 3 peaks at original angles after modification. However, the modification caused the starch to have an increase or decrease of crystalinity and amylose content. In addition, the whiteness (L*), yellowness (b*) and α-amylase digestibility of the starch tended to be higher with increasing modification degree. The analysis of gelatinization by a Differential Scanning Calorimeter showed that the moisture content of 20 and 30% increased the onset, peak and end temperatures and the enthalpy. Rapid Visco Analyser revealed that peak viscosity, breakdown, and setback of the modification starch tended to be decreased. The swelling power, solubility, and clarity of the starch also tended to be decreased with increasing modification degree.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

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

Student's signature ....

Thesis Advisors' signature 1. .... 2. .... 3. ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ได้คำแนะนำปรึกษา ข้อชี้แนะ และให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ อาจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำปรึกษา และให้แนวความคิดที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่อำนวยความสะดวกทั้งในงานด้านเอกสาร สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง รวมถึงให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการทดลองในด้านต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญตาราง		ฌ
สารบัญภาพ		ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์		ฒ
บทที่		
1	บทนำ	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	สมมติฐานการวิจัย	2
	ขอบเขตการวิจัย	2
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	ข้าว	3
	ส่วนประกอบของสตาร์ชข้าว	4
	โครงสร้างและคุณสมบัติของสตาร์ชข้าว	7
	การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น	17
	ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นต่อคุณสมบัติของสตาร์ช	19
	การใช้ประโยชน์ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น	28
3	วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการ	31
	วัตถุดิบ	31
	เครื่องมือและอุปกรณ์	31
	สารเคมี	32
	วิธีการดำเนินการวิจัย	33
4	ผลการทดลองและวิจารณ์	36
	ผลของ HMT ต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียว	36
	ผลของ HMT ต่อการเปลี่ยนแปลงสี	41
	ผลของ HMT ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก	45
	ผลของ HMT ต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช	50
	ผลของ HMT ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด	58

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ผลของ HMT ต่อค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลาย 67
บทที่
ผลของ HMT ต่อความใสของสตาร์ชสุก 70
ผลของ HMT ต่อปริมาณอะไมโลส... 73
ผลของ HMT ต่อความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส..... 75
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.. 78
เอกสารอ้างอิง.. 81
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ 89
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง.. 103
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลทางสถิติ... 112
ประวัติผู้วิจัย.. 131

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ปริมาณอะไมโลส ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าว 10

ตารางผนวกที่

ก-1 วิธีการวิเคราะห์แอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 97

ก-2 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส 98

ก-3 การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร 100

ข-1 ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร 104

ข-2 ค่าสี L*, a*, b* ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร 105

ข-3 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร..... 106

ข-4 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบค ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร 107

ข-5 ร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร 108

ข-6 ร้อยละการส่งผ่านของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร 109

ข-7 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร 110

ค-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความสว่าง (L*) 113

ค-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความเป็นสีแดง (a*) 114

ค-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อความเป็นสีเหลือง (b*) 115

ค-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) 116

ค-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุด (T_p) 117

ค-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) 118

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่

ค-7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (Tc-To)	119
ค-8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าพลังงานเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเหนียว	120
ค-9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด	121
ค-10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดสูงสุด	122
ค-11	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดลดลง	123
ค-12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าเซตแบค	124
ค-13	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดสุดท้าย	125
ค-14	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าร้อยละการพองตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส................	126
ค-15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส.................	127
ค-16	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อความใส	128
ค-17	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลส..	129
ค-18	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส	130

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของอะไมโลส	5
2-2	โครงสร้างอะไมโลเพกติน	5
2-3	ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยสายเอ, สายบี และสายซี	6
2-4	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกแบบ เอ, บี และวี	8
2-5	รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างแบบเอ และแบบบี	8
2-6	ขั้นตอนการเสื่อมสลายของแกรนูลในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช	13
2-7	คุณสมบัติทางด้านความร้อนของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	14
2-8	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer	15
4-1	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	36
4-2	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	37
4-3	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	37
4-4	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	37
4-5	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	37
4-6	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	38
4-7	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	38
4-8	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	38
4-9	ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า	38

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ หน้า

4-10 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า 39
4-11 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า 39
4-12 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า 39
4-13 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า 40
4-14 ค่าสี L* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 41
4-15 ค่าสี a* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 42
4-16 ค่าสี b* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 42
4-17 ตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส 43
4-18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 45
4-19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 46
4-20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 46
4-21 ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 47
4-22 แบบจำลองโครงสร้างสายโซ่ในส่วนผลึกของสตาร์ช 48
4-23 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 50
4-24 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 51

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ หน้า

4-25 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 52
4-26 อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (To) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 53
4-27 อุณหภูมิการดูดความร้อนสูงสุด (Tp) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 54
4-28 อุณหภูมิสุดท้าย (Tc) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 54
4-29 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (Tc-To) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 55
4-30 พลังงานเอนทาลปี (ΔH) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 56
4-31 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA 58
4-32 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA 59
4-33 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA 59
4-34 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 60
4-35 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 62
4-36 ความหนืดลดลง (breakdown) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 63
4-37 เซตแบค (setback) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร 65

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่		หน้า
4-38	ร้อยละการพองตัวของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร	67
4-39	ร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร	68
4-40	ความใสสตาร์ชสุกของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร	70
4-41	ร้อยละอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร	73
4-42	ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร	75

ภาพผนวกที่		หน้า
ก-1	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	92
ก-2	ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง X-ray Diffractometer	93
ก-3	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าแอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร	99
ก-4	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร	101

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

คำอธิบายสัญลักษณ์

HMT	=	การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น
10-100-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
10-100-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง
10-120-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
10-120-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง
20-100-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
20-100-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง
20-120-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
20-120-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง
30-100-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
30-100-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง
30-120-1	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง
30-120-4	=	การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สตาร์ชมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหรือส่วนประกอบที่สำคัญในการทำให้อาหารเกิดความข้นหนืด การเกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหาร สตาร์ชจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร สตาร์ชจะมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช และองค์ประกอบภายในสตาร์ช สตาร์ชธรรมชาติจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น ช่วงการให้ความหนืดแคบ เกิดการคืนตัว (retrogradation) ได้ง่าย ไม่ทนต่อกรด ความร้อนหรือการกวนในการแปรรูป เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการนำสตาร์ชมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติให้ดีขึ้นตามต้องการหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เป็นการสร้างส่วนผสมอาหาร (food ingredients) ใหม่ๆ ให้ผู้ผลิตอาหารมีทางเลือกมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวซึ่งเป็นสินค้าเกษตรที่ผลิตได้มากในประเทศให้มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีศักยภาพในการส่งออกมากขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การดัดแปรสตาร์ช (starch modification) สามารถทำได้โดยวิธีการทางกายภาพ เช่น การให้ความร้อน การบดลดขนาด และวิธีการทางเคมี เช่น การเชื่อมข้าม (cross-linking) การแทนที่ด้วยหมู่ทางเคมี (substitution) การย่อยด้วยกรด (acid-thinning) สตาร์ชดัดแปรที่ได้จะมีคุณสมบัติเฉพาะขึ้นกับชนิดของสตาร์ชวัตถุดิบ วิธีการดัดแปรและระดับของการดัดแปร แต่การดัดแปรทางเคมีของสตาร์ชมีผลเสียคือ สารเคมีที่อาจตกค้างอยู่ในสตาร์ช การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นจึงเป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพที่มีความปลอดภัยมากกว่าการดัดแปรทางเคมี

การดัดแปรสตาร์ชด้วยการให้ความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส และความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 35 โดยไม่เกิดเจลาทิไนเซชัน จะทำให้ได้สตาร์ชดัดแปรที่มีคุณสมบัติทางด้านความร้อน ความหนืด การดูดซึมน้ำ และการพองตัวเปลี่ยนไป เช่น อุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการดัดแปร (Jacobs and Delcour, 1998)

การศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชข้าวโดยวิธีการให้ความร้อนชื้นยังมีอยู่น้อยและไม่ครอบคลุม (Jacobs and Delcour, 1998) ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น โดยใช้สตาร์ชข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น โดยศึกษาผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรที่แตกต่างกัน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

สภาวะในการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่แตกต่างกัน คือ ความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อน มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสตาร์ชข้าวเหนียว

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น โดยใช้ระดับความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการให้ความร้อน 1 และ 4 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับผลของสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรต่อคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

1.5.2 องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้พัฒนาการผลิตสตาร์ชดัดแปรจากข้าวและพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ให้มีคุณสมบัติหลากหลาย โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมและกว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มและเพิ่มศักยภาพในการส่งออก

1.5.3 องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาส่วนผสมอาหาร (food ingredients) ชนิดใหม่ ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตอาหารมีทางเลือกในการนำไปใช้ปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์มากขึ้น

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชในตระกูลหญ้าที่มนุษย์ใช้บริโภคไม่ต่ำกว่า 5,000 ปี ข้าวสามารถเจริญเติบโตในทุกทวีปของโลกยกเว้นทวีปแอนตาร์กติกา ตั้งแต่ความสูงในระดับน้ำทะเลจนถึง 2,500 เมตรหรือมากกว่า ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ทั้งในที่ราบลุ่มจนถึงที่สูง โดยจะปลูกกันมากในแถบทวีปเอเชียเนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนและร้อนชื้นซึ่งเหมาะกับการเจริญของพืชชนิดนี้ ทวีปเอเชียสามารถผลิตข้าวได้มากถึงร้อยละ 91 ของจำนวนข้าวที่ผลิตได้ทั้งหมดในโลก โดยประเทศจีนผลิตได้ร้อยละ 31 และประเทศอินเดียผลิตได้ร้อยละ 20 ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันแบ่งออกเป็นข้าวแอฟริกาและข้าวเอเชีย

ข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) แพร่กระจายอยู่เฉพาะบริเวณเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น สันนิษฐานว่าข้าวแอฟริกาอาจเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อประมาณ 1,500 ปีก่อนคริสตศักราช

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ข้าวเอเชีย เป็นข้าวลูกผสม เกิดจาก *Oryza sativa* กับข้าวป่า มีถิ่นกำเนิดบริเวณประเทศอินเดีย บังคลาเทศ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อินเดีย ตอนเหนือของบังคลาเทศ บริเวณดินแดนสามเหลี่ยมระหว่าง พม่า ไทย ลาว เวียดนาม และจีนตอนใต้

มนุษย์บริโภคข้าวในหลายรูปแบบ ทั้งข้าวเต็มเมล็ด แป้งข้าวและสตาร์ชข้าวซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตยาและผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ โดยแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ เช่น ไม่มีสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ ปราศจากกลูเตนและมีกลิ่นรสน้อย พันธุ์ข้าวแต่ละชนิดมีโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหารที่แตกต่างกัน

แป้งข้าวและสตาร์ชข้าวเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร ปัจจุบันมีการใช้แป้งข้าวและสตาร์ชข้าวในอุตสาหกรรมอาหารอย่างหลากหลาย ตัวอย่างเช่น การผลิตอาหารเด็กอ่อน อาหารเช้า ขนมปังกรอบ ลูกกวาด เส้นก๋วยเตี๋ยว ขนมปังและขนมขบเคี้ยว แป้งข้าวยังใช้เป็นส่วนประกอบในการเคลือบมันฝรั่งทอด เป็นส่วนผสมของแพนเค้กและวัฟเฟิล เป็นส่วนผสมของแป้งทอดเพื่อเพิ่มความกรอบและช่วยลดการดูดซึมน้ำมัน เป็นต้น โดยปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้แป้งข้าวและสตาร์ชข้าวให้เหมาะกับอาหารแต่ละชนิดนั้นขึ้นกับปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในข้าว ตัวอย่างเช่น การผลิตอาหารเด็กอ่อน เบียร์ และ

อาหารเช้าของประเทศสหรัฐอเมริกาจะเลือกใช้พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 12-20) ในการผลิตเส้นพาสต้าจะใช้พันธุ์ข้าวที่มีอะไมโลสปานกลาง (ร้อยละ 20-25) ส่วนแป้งข้าวเหนียวจะใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดกับซอส น้ำเกรวี และพุดดิ้ง โดยสามารถป้องกันการเยิ้มน้ำของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งภายหลังการละลายน้ำแข็งได้

ในผลิตภัณฑ์นมก็มีการใช้สตาร์ชข้าวเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากแกรนูลสตาร์ชข้าวมีขนาดเล็ก และเจลของสตาร์ชข้าวมีลักษณะอ่อนนุ่มจึงนิยมใช้เป็นส่วนทดแทนไขมันในนม ไอศกรีม โยเกิร์ต และน้ำสลัด เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเนื่องจากให้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนจึงใช้แทนไขมันได้ นอกจากนี้สตาร์ชข้าวยังใช้ผลิตเป็นมอลโตเด็กตรินซึ่งเป็นตัวพากลิ่นรสที่สำคัญในอาหารและยังช่วยลดความหวานของอาหารอีกด้วย

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว

โปรตีน อะไมโลส และอะไมโลเพกติน เป็นส่วนประกอบหลักของแป้งข้าว ในการผลิตสตาร์ชข้าวจากแป้งข้าวจะมีการสกัดโปรตีนออกซึ่งโดยปกติแล้วโปรตีนในข้าวมีประมาณร้อยละ 4.5-15.9 (Kennedy และคณะ, 2003) ในอุตสาหกรรมการผลิตสตาร์ชข้าวนิยมใช้สารละลายอัลคาไลน์ในขั้นตอนการแช่ข้าวเพื่อกำจัดโปรตีนออกให้เหลือเท่ากับหรือน้อยกว่าร้อยละ 0.5 การแยกสตาร์ชออกจากข้าวโดยการแช่สารละลายอัลคาไลน์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1-0.2) จะผลิตสตาร์ชได้ประมาณร้อยละ 73-85 (น้ำหนักแห้ง) มีโปรตีนเหลือประมาณร้อยละ 0.07-0.42 (Kennedy และคณะ, 2003) สตาร์ชจะประกอบด้วยอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบอื่นๆ

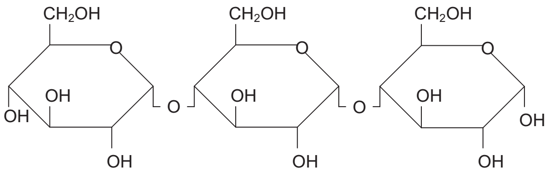
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.2.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นตรงสายยาวที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา 1,4 (α-1,4) และมีส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1,6 (α-1,6) เล็กน้อย ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีส่วนพอลิเมอร์เส้นตรงของอะไมโลสประมาณร้อยละ 40-67 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาของอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 33-60 (Juliano, 1998) อะไมโลสมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization) ประมาณ 987-1225 กลูโคสยูนิต และมีความยาวสายโซ่ประมาณ 276-430 กลูโคสยูนิต (Lii และคณะ, 1998) ซึ่งมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ข้าว สภาพแวดล้อมหรือวิธีการวิเคราะห์

อะไมโลสประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยมของกลูโคสมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว สายของอะไมโลสมักอยู่ในรูปเกลียว มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ผิวด้านนอกของเกลียว (ดังภาพที่ 2-1) ทำให้ช่องว่างด้านในเกลียวมีลักษณะเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) อะไมโลสจึง

สามารถรวมตัวกับไอโอดีนด้วยแรงวันเดอร์วาลล์ (van der Waals) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนทำให้เกิดสีน้ำเงิน ซึ่งการเกิดสีน้ำเงินจะเกิดได้มากน้อยขึ้นกับความยาวของสายอะไมโลส โดยอะไมโลสที่มีความยาวมากกว่า 80 กลูโคสยูนิตจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน และสามารถดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดได้มากกว่า 610 นาโนเมตร ส่วนอะไมโลสสายสั้นจะเกิดสีแดงซึ่งสามารถดูดซับความยาวคลื่นที่สั้นกว่า

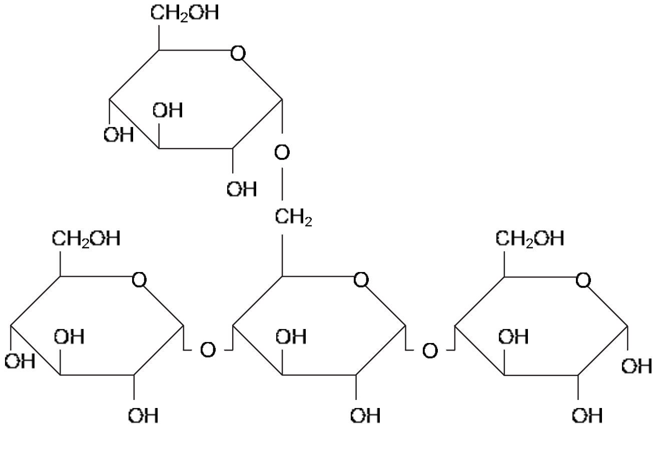


ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของอะไมโลส
ที่มา : กล้าณรงค์ และคณะ (2546)

2.2.2 อะไมโลเพกติน

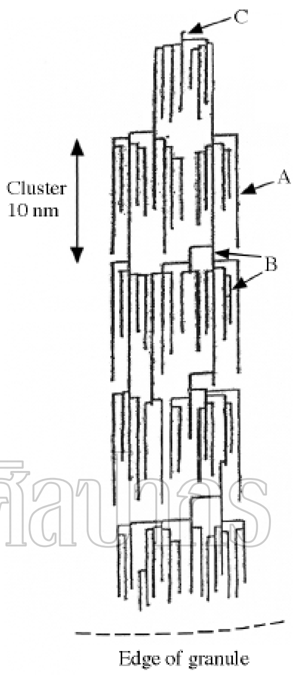
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1,4 (α-1,4) และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเป็นพอลิเมอร์สายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา 1,6 (α-1,6) ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างอะไมโลเพกติน
ที่มา : กล้าณรงค์ และคณะ (2546)

โครงสร้างของอะไมโลเพกตินมีความแตกต่างกันขึ้นกับพื้นที่เพาะปลูก จากการศึกษาของ Hizukuri (1986) พบว่า โครงสร้างของอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิดซึ่งแตกต่างกันตามความยาวของสายโซ่ ได้แก่ สายเอ เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อ สายบี (บี1-บี4) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายเอหรือบีหนึ่งสายหรือมากกว่า และสายซี เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ดังภาพที่ 2-3



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 2-3 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยสายเอ สายบี และสายซี
ที่มา : Eliasson (2004)

อะไมโลเพกตินของสตาร์ชข้าวมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization) ประมาณ 2,700 - 12,000 กลูโคสยูนิต และมีจำนวนสายโซ่เฉลี่ยประมาณ 128-586 (Lu และคณะ, 1997) สตาร์ชข้าวเหนียวมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ประมาณ 19,000 กลูโคสยูนิต (Hizukuri, 1993) โดยอะไมโลเพกตินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเกิดโครงสร้างผลึกของสตาร์ช

2.2.3 องค์ประกอบอื่นๆภายในสตาร์ชข้าว ได้แก่ ไขมัน ฟอสฟอรัส และสารประกอบอื่นๆ ข้าวเจ้าจะมีไขมันอยู่ประมาณร้อยละ 0.3-0.4 ข้าวเหนียวจะมีไขมันอยู่น้อยมากประมาณร้อยละ 0.03 (Morrison และคณะ, 1984, 1987) ไขมันในสตาร์ชข้าวเจ้าประกอบด้วยไขมันอิสระร้อยละ 32 และไลโซฟอสโฟทิดิลคลอรีน (lysophosphatidyl choline) ร้อยละ 68

(Morrison และคณะ, 1984) ส่วนฟอสฟอรัสในสตาร์ชข้าวมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติของสตาร์ช เช่น ความใสของเพลสต์ ความหนืด และความคงตัวของเพลสต์ ฟอสฟอรัสในสตาร์ชข้าวมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ ฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ และฟอสฟอลิปิด ในสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีฟอสฟอรัสในรูปแบบของฟอสฟอลิปิดประมาณร้อยละ 0.048 (น้ำหนักแห้ง) และฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ร้อยละ 0.013 และในสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีฟอสฟอรัสในรูปแบบของฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ร้อยละ 0.003 เพียงรูปแบบเดียว (Lim และคณะ, 1994; Jane และคณะ, 1996)

2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ชข้าว

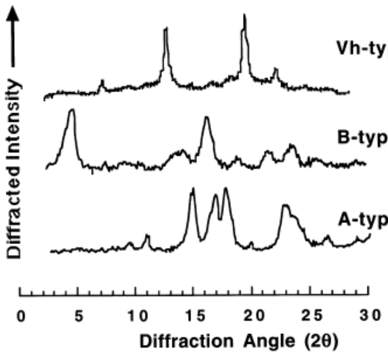
2.3.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชหรือแกรนูลของสตาร์ชข้าวมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธัญพืชอื่นๆ โดยมีขนาดตั้งแต่ 3-8 ไมครอนซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพันธุ์ข้าวและแหล่งที่ปลูก จากการศึกษาของ Sodhi และคณะ (2003) พบว่าข้าวที่เจริญในประเทศอินเดียจะมีขนาดเม็ดสตาร์ชประมาณ 2.4-5.4 ไมครอน ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 4.9-5.7 ไมครอน (Qi และคณะ, 2003) เม็ดสตาร์ชจะมีผิวหน้าที่เรียบและมีรูปร่างเป็นรูปหลายเหลี่ยม สตาร์ชข้าวที่เกิดการกลายพันธุ์จะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวปกติ ตัวอย่างเช่น สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีรูปร่างทรงกลมไม่แน่นอนและเกาะกันอย่างหลวมๆภายในเซลล์เอนโดสเปอร์ม (Yano และคณะ, 1985)

2.3.2 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชข้าว

สตาร์ชทั่วไปมีโครงสร้างผลึกแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ (Katz และ Itallie, 1930) คือ แบบเอ บี ซี และวี โดย แบบเอพบในสตาร์ชธัญพืชจะให้พีคที่ 17 และ 17.9 $^{\circ}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ 5.6 $^{\circ}2\theta$ แบบบีพบในสตาร์ชจากพืชหัวจะให้พีคที่ตำแหน่ง 17 และ 17.9$^{\circ}2\theta$ แบบซีพบในพืชตระกูลถั่ว ซึ่งเป็นลักษณะที่รวมกันของแบบเอและแบบบีจะให้พีคที่ตำแหน่ง 5.6 และ 17.9 $^{\circ}2\theta$ โดยส่วนกึ่งกลางของเม็ดสตาร์ชจะเป็นแบบบีและส่วนนอกสุดจะเป็นแบบเอ (Gidney, 1987; Bogracheva และคณะ, 1998; Buleon และคณะ, 1998) ส่วนแบบวีพบได้ในสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูงบางชนิด แต่โดยทั่วไปเป็นสตาร์ชที่เกิดเจลาทิไนซ์และจับกับลิปิดไว้และจะให้พีคที่ตำแหน่งในช่วง 7-8 13 19-20 และ 22-23 $^{\circ}2\theta$ (Buleon และคณะ, 1998) ดังภาพที่ 2-4

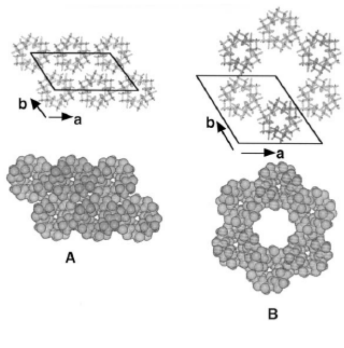
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 2-4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกแบบเอ บี และวี
ที่มา : Buleon และคณะ (1998)

สตาร์ชข้าวจากธรรมชาติมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ พบว่าสตาร์ชข้าวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเอ โดยโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวมีแกนผลึกที่ยาวไม่เท่ากัน 3 แกน คือ แกนเอมีความยาว 2.124 นาโนเมตร แกนบีมีความยาว 1.172 นาโนเมตร แกนซีมีความยาว 1.069 นาโนเมตร และมีปริมาณน้ำ 8 โมเลกุลต่อหน่วยเซลล์ ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างผลึกในรูปแบบต่าง ๆนั้นขึ้นกับการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยพบว่าสตาร์ชข้าวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเอจะมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่หนาแน่นมากเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชอื่นที่มีโครงสร้างผลึกแบบบี (Imbery และคณะ, 1991) ดังภาพที่ 2-5

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 2-5 รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างแบบเอ (A) และแบบบี (B)
ที่มา : Buleon และคณะ (1998)

อะไมโลเพกตินเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเกิดรูปแบบผลึกของสตาร์ชข้าว สตาร์ชข้าวที่มีอะไมโลเพกตินมากจะมีความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชข้าวที่มีอะไมโลเพกตินน้อย เมื่อวัดความเป็นผลึก (relative crystallinity) ของสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟเฟรกโตมิเตอร์ พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวมีความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า แต่ระดับความเป็นผลึกของสตาร์ชยังขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น ความยาวของอะไมโลเพกติน, พันธุ์พืชและสภาพภูมิอากาศที่พืชเจริญ โดยพบว่า พืชที่มีโครงสร้างผลึกแบบเอจะชอบอากาศอบอุ่นและแห้ง ซึ่งแตกต่างจากพืชที่มีโครงสร้างผลึกแบบบีที่ชอบอากาศเย็นและชื้น และการดัดแปรสตาร์ชข้าวยังส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากแบบเอเป็นแบบบีหรือแบบวีได้ (Eliasson, 2004)

2.3.3 การพองตัวและการละลายของสตาร์ช

สตาร์ชดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่อสตาร์ชถูกให้ความร้อนและมีน้ำปริมาณที่มากเกินพอ จะทำให้โครงสร้างผลึกถูกทำลาย เนื่องจากการที่พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะรวมตัวกับกลุ่มไฮดรอกซิลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ทำให้เกิดการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น มีการสูญเสียคุณสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชคือ ชนิดของสตาร์ช ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช ปริมาณอะไมโลส โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช และสิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิปิด หรือการเกิดอะไมโลสลิปิดคอมเพล็กจะทำให้ค่าการพองตัวและการละลายลดลง (Tester และ Morrison, 1990a)

Tester และคณะ (1996a) ศึกษาคุณลักษณะการพองตัวของสตาร์ชธัญพืชที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอะไมโลเพกติน พบว่าโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่มีระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization) สูงจะส่งผลให้ค่าการละลายมีค่าลดลง เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลเพกตินขนาดใหญ่จะมีแนวโน้มในการจับกับโมเลกุลอื่นๆมากขึ้นทำให้ค่าการละลายมีค่าลดลง และจากการศึกษาของ Vandeputte และคณะ (2003) พบว่า อะไมโลเพกตินสายสั้นๆขนาดเล็กที่มีระดับขั้นในการเกิดพอลิเมอร์ในช่วง 6-9 จะมีค่ากำลังการพองตัวที่มากขึ้น ตรงกันข้ามกับอะไมโลเพกตินสายยาวที่มีระดับขั้นในการเกิดพอลิเมอร์ในช่วง 12-22 ที่มีค่ากำลังการพองตัวที่ลดลง และเม็ดสตาร์ชที่มีการจัดเรียงตัวของพันธะภายในอย่างแข็งแรงจะส่งผลให้ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชมีค่าลดลง (Lii และคณะ, 1996)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ปริมาณอะไมโลสก็มีผลต่อกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าว Sodhi และคณะ (2003) พบว่าในข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 7.8) จะมีกำลังการพองตัวที่สูงและมีค่าการละลายที่ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Lii และคณะ (1995) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังการพองตัวที่เพิ่มขึ้นในสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ เนื่องจากอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวได้ต่ำ ซึ่งกำลังการพองตัวของสตาร์ชจะลดลงเมื่อสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน มากกว่า 2.33 (Leloup และคณะ, 1991)

เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ส่วนอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชจะถูกขับออกมาในเวลาเดียวกัน การที่โมเลกุลอะไมโลสถูกขับออกจะรวมตัวกันเป็นโครงสร้างสามมิติ (Hennig และคณะ 1976) ซึ่งความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้

ตารางที่ 2-1 ปริมาณอะไมโลส ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่างๆ

พันธุ์ข้าวไทย	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	กำลังการพองตัว (กรัม/กรัม)	ค่าการละลาย (ร้อยละ)
PR-106	16.1 bc	28.8 bc	0.319 b
PR-114	16.1 c	28.6 b	0.360 d
IR-8	15.6	30.1 c	0.307 b
PR-103	7.8	33.2 d	0.287 a
PR-113	18.9	26.1 a	0.346 c

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P<0.05$)

ที่มา : Sodhi และคณะ (2003)

ความเป็นกรดด่างหรือค่าพีเอชก็มีผลกับการพองตัวและการละลายของสตาร์ชและสตาร์ชดัดแปร จากการทดลองของ Lawal และคณะ (2005) ที่ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชต่อกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชโกโกแยม โดยมีการทำการทดลองปรับพีเอชของสตาร์ชในช่วง 2-12 พบว่าสตาร์ชที่ไม่ถูกดัดแปรจะมีค่าการพองตัวและการละลายที่มากกว่าสตาร์ชที่ถูกดัดแปร และสตาร์ชทุกชนิดจะมีค่าการพองตัวดีที่สุดที่พีเอช 12 ซึ่งอาจเกิดจากการที่สตาร์ชมีค่าเป็นด่างเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลง น้ำสามารถเข้าไปจับกับพันธะภายในได้มากขึ้น ทำให้การพองตัวและการละลายมีค่ามากขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Adebowale และคณะ (2003) ที่ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชต่อกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่ว โดยพบว่าค่าการพองตัว

ของสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่ามากที่สุด และเมื่อมีการปรับค่าพีเอชให้เป็นด่างมากขึ้นจะทำให้ค่าการพองตัวและการละลายเพิ่มขึ้น

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการพองตัวและการละลายของสตาร์ช ได้แก่ (1) ชนิดของสตาร์ช โดยสตาร์ชจากธัญพืชมีกำลังการพองตัวและการละลาย 2 ขั้น แสดงถึงแรงของพันธะที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือพันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐานของสตาร์ช (2) ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช คือจำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช โดยพบว่าเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากหรือน้อย ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและรูปร่างของอะไมโลเพกติน (Tester และคณะ, 1990) (3) สิ่งเจือปนอื่นที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่นไขมันและลิปิดในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลสเกิดเป็นอะไมโลสลิปิดคอมเพล็ก ซึ่งจะจำกัดการพองตัวและการละลายของสตาร์ช (4) คุณสมบัติหลังการดัดแปรสตาร์ช (5) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว โดยสารละลายที่มีปริมาณสตาร์ชต่ำกว่าร้อยละ 20 ค่าการละลายจะสูงกว่าเมื่อมีสตาร์ชสูงกว่าร้อยละ 20 และสารประกอบอื่นๆ เช่น ซูโครส กลูโคส มีผลต่อการพองตัวของสตาร์ช

2.3.4 การเกิดเจลของสตาร์ช

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช คือการสูญเสียความเป็นระเบียบของโมเลกุลเม็ดสตาร์ช โดยพันธะไฮโดรเจนในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย และโมเลกุลน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปและจับกับเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น (hydration) และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible swelling) โมเลกุลสตาร์ชบางส่วนเริ่มละลายน้ำได้ (solubilization) (Slade และ Levine, 1988) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงหลายๆ อย่างเกิดขึ้น ดังนี้

1. การสูญเสียความเป็นผลึก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่ทำให้โครงสร้างเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจึงมีความเป็นผลึกลดลง

2. การสูญเสียสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบของเม็ดสตาร์ชดิบจะทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพราไรซ์ได้ ทำให้เห็นลักษณะที่เป็นกากบาท (maltese cross) แต่เมื่อโครงสร้างเป็นระเบียบถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะสูญเสียสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ และลักษณะกากบาทจะหายไป

3. การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่ารูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชจะเปลี่ยนไป โดยขนาดเม็ดสตาร์ชจะใหญ่ขึ้นและความสม่ำเสมอของเม็ดสตาร์ชจะลดลง

4. การพองตัวและการละลาย (swelling and leaking) ในการเกิดเจลาทิไนเซชัน เมื่อพันธะไฮโดรเจนในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย สตาร์ชจะดูดซับน้ำไว้มีผลทำให้สตาร์ชเกิดการพอง

ตัวมากขึ้น ซึ่งการพองตัวของแกรนูลสตาร์ชจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก (5 ถึง 10 นาที) เมื่ออุณหภูมิของเพสต์ถึงจุดที่สตาร์ชเกิดเจลาทิไนเซชันได้ และยังคงเกิดการพองตัวเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง และที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 95 องศาเซลเซียส) การพองตัวจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ในขณะที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว บางส่วนของโมเลกุลสตาร์ชจะละลายออกมา

5. การเปลี่ยนแปลงพลังงานและสถานะ (endothermic transition) การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการดูดความร้อน (endothermic process)

6. การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกระแสวิทยา (rheological properties) ในขณะที่สตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ เม็ดสตาร์ชจะสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นและเกิดการพองตัว ทำให้โมเลกุลของน้ำอิสระรอบ ๆเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น และโมเลกุลสตาร์ชบางส่วนเริ่มละลายน้ำได้ จึงทำให้ส่วนผสมของเพสต์มีความหนืดเพิ่มขึ้น

การเกิดเจลาทิไนเซชันเป็นผลมาจากการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช กลไกการเกิดเจลาทิไนเซชันมี 2 ขั้นตอน (Eliasson, 2004)

ขั้นตอนที่ 1 การกระจายของน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ช

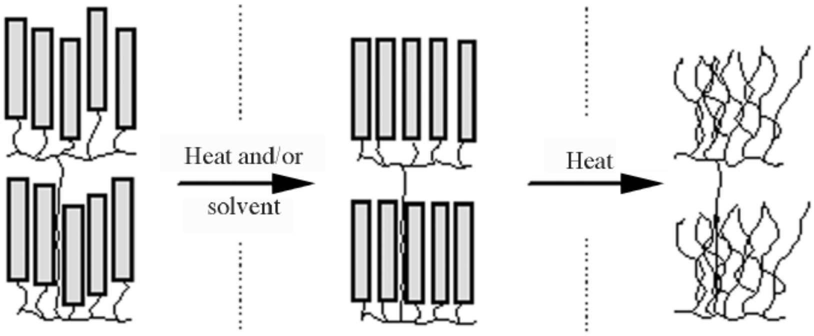
เมื่อนำเม็ดสตาร์ชมากระจายตัวในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวแบบผันกลับ และยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบไบรีฟรินเจนซ์ได้ การเกิดพันธะไฮโดรเจนในสตาร์ชจะเกิดขึ้นที่ออกซิเจนตำแหน่งที่ 6 (O-6) ของอะไมโลสและหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลเพกติน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ขั้นตอนที่ 2 การพองตัวและการหลอมเหลว

เมื่อนำสารแขวนลอยสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำมากพอ (ความชื้นประมาณร้อยละ 70) มาให้ความร้อน ผลึกของเม็ดสตาร์ชที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โดยมีน้ำเข้าไปในช่องว่างของเม็ดสตาร์ชและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว ในระหว่างการให้ความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐาน ระบบจะดูดความร้อน (endothermic process) เพื่อทำให้บริเวณอสัณฐานเปลี่ยนสภาพจากของแข็งคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) หรือเรียกว่าการเกิดกลาสทรานซิชัน (glass transition) โดยมีน้ำและความร้อนที่มีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไทเซอร์ ทำให้ระบบมีความหนืดลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นระบบจะดูดความร้อนครั้งที่สอง ทำให้บริเวณผลึกเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิหลอมเหลวนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงอันดับหนึ่ง (first-order transition) ในช่วงนี้เม็ดสตาร์ชจะแตกออก อะไมโลสซึ่งละลายน้ำได้จะออกจากเม็ดสตาร์ชเข้าไปในสารละลาย ส่วนอะไมโลเพกตินซึ่งจับกันแน่นจะเกิดเป็นเจล ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การเกิดเจลาทิไนเซชัน” และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “อุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน” การเปลี่ยนแปลงภายในเม็ดสตาร์ชระหว่างการเกิด

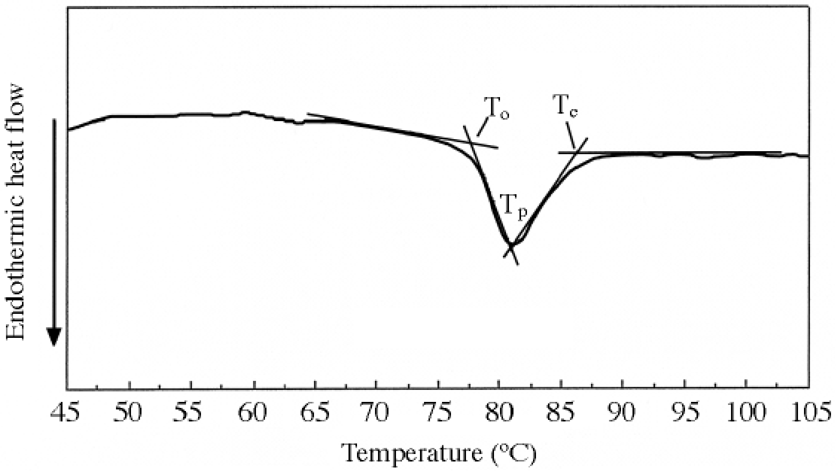
เจลาทิไนเซชันแสดงในภาพที่ 2-6 โดยเม็ดสตาร์ชจะถูกทำลายจากผลของความร้อนและ/หรือตัวทำละลายบางชนิด ทำให้เกิดการคลายเกลียวของเกลียวคู่ (Eliasson, 2004)



ภาพที่ 2-6 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในการเกิดเจลาทิไนเซชัน
ที่มา : Eliasson (2004)

การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาทิไนเซชัน นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนคุณสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดคุณลักษณะทางด้านความร้อนของสตาร์ช การเกิดเจลาทิไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นคุณลักษณะทางด้านความร้อนที่สำคัญของสตาร์ช ผลของ DSC จะสามารถวัดปริมาณการเกิดเจลาทิไนเซชัน (Stevens และคณะ, 1971, Biliaderis และคณะ, 1980, Nakazawa และคณะ, 1984, Krueger และคณะ,1987) และรีโทรเกรเดชัน (Atwell และคณะ, 1988, Yuan และคณะ, 1993) ซึ่งสังเกตได้จากกราฟเอนโดเทอร์มที่ให้ผลค่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature; T_0) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; T_c) และเอนทาลปี (ΔH) ดังแสดงในภาพที่ 2-7

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

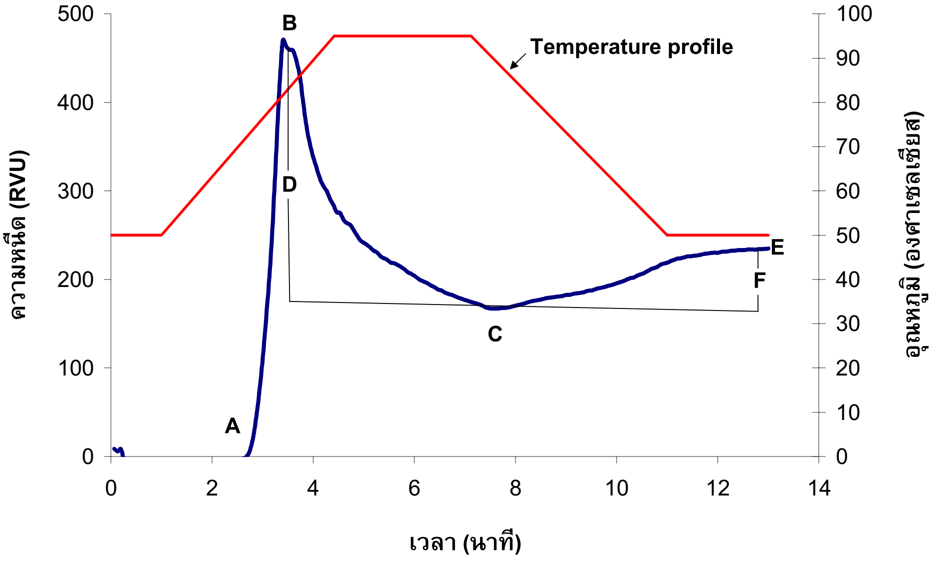


ภาพที่ 2-7 คุณสมบัติทางด้านความร้อนของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดย T_0: อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง, T_p: อุณหภูมิสูงสุด และ T_c: อุณหภูมิสุดท้าย

ที่มา : Eliasson (2004)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านกระแสวิทยา (rheological properties) ของสตาร์ช เป็นการวัดคุณสมบัติทางด้านความหนืดในระหว่างการพองตัวและการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ (brabender Visco Amylograph) และเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) โดยเครื่องจะระบุค่าของอุณหภูมิในช่วงการเกิดเจลาทิไนเซชันต่าง ๆดังภาพที่ 2-8 ในช่วงเริ่มต้นสารแขวนลอยสตาร์ชจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ สตาร์ชจะเกิดการพองตัวอย่างเต็มที่จนสตาร์ชมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นความหนืดจะลดลงเมื่อเม็ดสตาร์ชที่พองตัวเกิดการแตกออกจากการกวนด้วยเครื่อง RVA เม็ดสตาร์ชที่เกิดการแตกสลายจะส่งผลให้ความหนืดของสตาร์ชมีค่าลดลงจนถึงความหนืดต่ำสุด (through) และเมื่อสตาร์ชถูกทำให้เย็นลง โมเลกุลสตาร์ชบางส่วนจะสามารถรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งเกิดเป็นเจล เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลอะไมโลสที่รวมตัวกันโดยความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชทราบได้จากค่า เซตแบค (setback)



ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) โดย A= อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature), B=ความหนืดสูงสุด (peak viscosity), C=ความหนืดต่ำสุด (Though), D=ความหนืดลดลงหรือความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown), E= ผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback) และ F=ความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

คุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชข้าวขึ้นกับปัจจัยต่างๆเช่น ชนิดของพันธุ์ข้าว สภาพแวดล้อมในการปลูก โครงสร้างอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช และระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ของสตาร์ชข้าว เป็นต้น Han และคณะ (2001) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชข้าวทั้ง 10 พันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสใกล้เคียงกัน พบว่าสตาร์ชข้าวที่มีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ที่มากกว่า 100 จะให้ค่าความหนืดต่ำสุด (breakdown) ที่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวที่มีสายของอะไมโลเพกตินที่สั้นซึ่งมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ประมาณ 17 ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาของ Vandeputte และคณะ (2003) ที่ไม่พบความแตกต่างของค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลงและความหนืดสุดท้ายในสตาร์ชข้าวเหนียว 5 พันธุ์และสตาร์ชข้าวเจ้า 10 พันธุ์ที่มีความยาวของสายโซ่อะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน นอกจากนี้คุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชยังขึ้นกับปริมาณของโปรตีนและไขมันที่ถูกกำจัดออกไปในกระบวนการผลิตสตาร์ช โดย Singh และคณะ (2000) และ Fitzgerald และคณะ (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชก่อนและหลังการกำจัดโปรตีนและไขมันออก พบว่าโปรตีนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำ

ให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความหนืด โดยโปรตีนส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชมีค่าลดลง และการศึกษาของ Wang และคณะ (2002) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชข้าวจากข้าวเต็มเมล็ด ข้าวหัก และข้าวเหลือง เปรียบเทียบกับแป้งข้าวจากข้าวเต็มเมล็ด ข้าวหัก และข้าวเหลือง พบว่าแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันเหมือนกัน แต่แป้งข้าวจากข้าวเหลืองจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันที่สูงกว่า มีค่าความหนืดต่ำสุดน้อยกว่า และมีค่าความหนืดต่ำสุดและความหนืดสุดท้ายที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.3.5 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกที่ร้อนถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสตาร์ช โดยขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้าหากันและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นมาใหม่ทั้งในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินซึ่งส่งผลทำให้สตาร์ชเกิดความหนืดเพิ่มสูงขึ้นและเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูงและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ สตาร์ชแต่ละชนิดมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันต่างกัน โดยทั่วไปสตาร์ชจากพืชหัวและรากจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ช้ากว่าสตาร์ชจากธัญพืช เนื่องจากสตาร์ชจากพืชหัวและรากเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว เม็ดแป้งแตกง่ายทำให้โมเลกุลสตาร์ชทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง โมเลกุลอะไมโลสจึงเกิดการรวมตัวกันใหม่ได้ยาก แต่สตาร์ชจากธัญพืชเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อยโมเลกุลที่เกิดการแยกตัวกันออกยังอยู่ใกล้ชิดกันทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ได้ง่ายกว่า ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างการพองตัวของสตาร์ชซึ่งอยู่ใกล้กันหรือระหว่างชิ้นส่วนของโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายซึ่งจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ (Karim และคณะ, 2000)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเกิดจากการรวมตัวกันของเกลียวคู่ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นส่วนผลึกของสตาร์ช การเกิดรีโทรเกรเดชันจะสัมพันธ์กับการสูญเสียโครงสร้างของอะไมโลส การเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอะไมโลส และการรวมตัวกันของชิ้นส่วนเล็กๆของอะไมโลส การเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลสจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 1 วัน) (Zhou และคณะ, 2002) ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลเพกตินจะมีอัตราการเกิดได้ช้ากว่าอะไมโลส ซึ่งอาจใช้เวลานานหลายสัปดาห์ (Lii และคณะ, 1998; Zhou และคณะ, 2002) เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากทำให้เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้

2.3.6 ความใสของสตาร์ชสุก

ความใสของสตาร์ชสุกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของสตาร์ชในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารหลายชนิด เช่น ในอาหารจำพวกไส้ขนมต้องการสตาร์ชสุกที่มีคุณสมบัติโปร่งแสง แต่ในน้ำสลัดต้องการสตาร์ชสุกที่มีคุณสมบัติทึบแสง ซึ่งความใสของสตาร์ชสุกขึ้นกับการจัดเรียงตัวกันในโมเลกุลในเม็ดสตาร์ช และความเป็นเนื้อเดียวกันของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว (Schoch, 1942)

ความใสของสตาร์ชแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสตาร์ช ขนาดเม็ดสตาร์ช และปริมาณอะไมโลสในสตาร์ช Sodhi และคณะ (2003) พบว่าความใสของสตาร์ชขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บของสตาร์ชสุก โดยสตาร์ชสุกที่มีระยะเวลาการเก็บที่นานกว่าจะมีความใสน้อยกว่าสตาร์ชสุกที่มีระยะเวลาการเก็บสั้นกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บรักษาที่นานทำให้เกิดการละลายของอะไมโลส และสายโซ่ของอะไมโลเพกตินเกิดการรวมตัวกันทำให้เกิดบริเวณที่โมเลกุลรวมตัวกันหรือ junction zone ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการหักเหของแสง (Perera และคณะ, 1999) นอกจากนี้ความใสของสตาร์ชสุกยังเกิดจากฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์และปริมาณของฟอสโฟลิปิดภายในสตาร์ช (Jane และคณะ, 1996) โดยฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จะทำให้สตาร์ชมีความใสเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมฟอสโฟลิปิดเข้าไป (Kasemsuwan และคณะ, 1996) การวิเคราะห์ความใสของสตาร์ชทำได้โดยการวัดการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆกัน (Kerr และคณะ, 1962; Mellies และคณะ, 1961; Hoover และคณะ, 1981; Maningat, 1986)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.4 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นเป็นการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพโดยใช้วิธีการหลาย ๆอย่างร่วมกัน เช่น อุณหภูมิ ความดัน แรงเฉือน และความชื้นกับสตาร์ช การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชโดยไม่ทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช โดยกระบวนการจะมีการบ่มสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำพอดีหรือมากเกินพอ และมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของสตาร์ช (Jacob และคณะ, 1998) โดยการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นนั้นทำได้หลายวิธี เช่น

1. การให้ความร้อนโดยการใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง (autoclave) จากการวิจัยของ Lim และคณะ (2001) ที่ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งและข้าวโพด และของพิณทิพย์ (2547) ในการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียว
2. การให้ความร้อนโดยการใช้ตู้อบลมร้อน (hot-air oven) จากการวิจัยของ Adebowale และ Lawal (2003) ในการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชแป้งถั่ว และของ Hoover และ Manuel (1996) ในการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชแป้งข้าวโพดสายพันธุ์ต่าง ๆและในแป้งมันฝรั่ง

3. การให้ความร้อนโดยการใช้ไมโครเวฟจากการวิจัยของ Anderson และ Guraya (2006)

การศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งความชื้นที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 18-30% อุณหภูมิในช่วง 100-120 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาทีถึง 16 ชั่วโมง ซึ่งวิธีการให้ความร้อนในการดัดแปรที่แตกต่างกัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเม็ดสตาร์ชคือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ช พบว่า การให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อนไม่พบการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างหรือลักษณะผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง มันสำปะหลัง มันเทศ เผือก ข้าวโพด และข้าวสาลี (Kulp และ Lorenz, 1981; Hoover และ Manuel, 1996; Perera และคณะ, 1997 และ Gunaratne และ Hoover, 1996) แต่พบการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งโดยพบรอยแตกบริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช และมีการยุบตัวที่บริเวณกึ่งกลางเม็ดสตาร์ชข้าวโพดเมื่อให้ความร้อนโดยการใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (retort sterilizer) (Maruta และคณะ, 1994) แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นในการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ พบการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชแกรนูลเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการรวมตัวกันบริเวณผิวหน้าเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น (Anderson และ Guraya, 2006)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

จากการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นของสตาร์ชข้าวพบว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชเพิ่มขึ้น และค่าการละลายลดลง (Lu และคณะ, 1996, Kim และคณะ, 1990) และมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเอนทาลปี (Lu และคณะ, 1996)

Kim และคณะ (1990) พบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น มีผลทำให้สตาร์ชข้าวเจ้ามีกำลังการพองตัวที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lu และคณะ (1994) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังการพองตัวและความหนืดของสตาร์ชลดลงในสตาร์ชข้าวเจ้า ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวให้ผลในทางกลับกัน

Hoover และ Manuel (1996), Hoover และคณะ (1993) และ Hoover และ Vasanthan (1994) ได้ทำการศึกษาการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นกับสตาร์ชหลายชนิด พบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในส่วนของผลึกและส่วนอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ช โดยความร้อนหรือความชื้นที่มากพอในการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีผลทำให้ผลึกลดลง (Takaya และคณะ, 2000) และพบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้สตาร์ชจากพืชหัวเกิดการเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างผลึกซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B ให้เป็นแบบ A ได้ (Kawabata และคณะ, 1982) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gunaratne และ Hoover (2001) ที่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งที่ดัดแปรด้วยความร้อนชื้นจากแบบ B เป็นแบบ A+B ได้ และจากการศึกษาการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นในแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว (พิณทิพย์, 2547) พบว่าระดับความเป็นผลึกลดลง

การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นมีผลต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช ซึ่งพบว่า การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นทำให้ค่า T_o (onset temperature), T_p (peak temperature) และ T_c (conclusion temperature) ของการเจลาทิไนเซชันมีค่าสูงขึ้นในสตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่ว เผือก รวมทั้งแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว และช่วงกว้างของอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_p) เพิ่มสูงขึ้น (Donovan และคณะ, 1983; Stute, 1992; Hoover และ Manuel, 1996; Lu และคณะ, 1996; Perera และคณะ, 1997; Collado และ Corke, 1999; Takaya และคณะ, 2000; Lai, 2001; Lim และคณะ, 2001; Miyoshi, 2002; Gunaratne และ Hoover, 2002) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ transition temperature ที่สูงขึ้น สอดคล้องกับผลต่อคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชซึ่งพบว่า การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาทิไนเซชันมีค่าสูงขึ้นและความหนืดสูงสุดมีค่าลดลงในสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง (Miyoshi, 2002) และจากการดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นยังมีผลทำให้ความสามารถในการพองตัวในสตาร์ชมันฝรั่งลดลงด้วย (Stute, 1992)

ความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น กล่าวคือ ความคงทนต่อการย่อยโดยเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้นในสตาร์ชมันฝรั่ง มันสำปะหลัง เผือก ข้าวโพด และสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียว (Hoover และ Gaunaratne, 2002; Hoover และ Manuel, 1996; Anderson และ Guraya, 2006) ซึ่งมีประโยชน์ในด้านโภชนาการ โดยทำให้ระบบการย่อยและการดูดซึมช้าลง ช่วยลดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือดหลังจากทานอาหารผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานและโรคอ้วน (Anderson, 2002, Guraya และคณะ, 2002)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.5 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้นต่อลักษณะของสตาร์ช

2.5.1 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อลักษณะสัณฐานของเม็ดสตาร์ช

Anderson และคณะ (2006) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าวจ้าวและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยไมโครเวฟ พบว่า การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นโดยไมโครเวฟไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชทั้งสองชนิด แต่การดัดแปรทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการรวมตัวกันมากกว่าเดิม ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ พิณทิพย์ (2547) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวจ้าวและแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น แต่พบว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรจะมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมากกว่าเดิม ซึ่งเกิดจากแป้งบางส่วนเกิดเจลาทิไนเซชันในระหว่างการดัดแปร

Hoover และคณะ (1996) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 30 พบว่า การดัดแปรสตาร์ชไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดหรือรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Sair (1967) ที่ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 95, 105 และ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง

Adebowale และคณะ (2003) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสตาร์ชถั่วที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) โดยเม็ดสตาร์ชถั่วยังคงรูปร่างทรงกลมและทรงรีที่มีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น (Abraham, 1993)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Kulp และคณะ (1981) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่า การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) โดยสตาร์ชทั้งสองชนิดยังคงรูปร่างที่สมบูรณ์เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ สตาร์ชไม่เกิดรอยแตกร้าวหรือผิดรูปไปจากเดิม ซึ่งให้ผลการทดลองที่แตกต่างจาก Kawabata และคณะ, 1994 ที่พบการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 125 และ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 20 และ 30 นาทีตามลำดับ โดยพบความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่เกิดเป็นโพรงภายหลังการดัดแปร

Gunaratne และคณะ (2002) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสตาร์ชจากพืชหัวและราก ซึ่งประกอบด้วย สตาร์ชทรูแยม สตาร์ชทาโร่ สตาร์ชนิวโกโกแยม สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 10 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 30 พบว่าการดัดแปรสตาร์ชไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช โดยที่ผิวของเม็ดสตาร์ชทุกชนิดมีความเรียบซึ่งไม่ถูกทำลาย ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Lawal (2005) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของ

เม็ดสตาร์ชนิวโกโกแยมที่ผ่านการให้ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

2.5.2 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อโครงสร้างผลึก

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสตาร์ช แหล่งที่ปลูก รูปแบบการจัดเรียงตัวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดสตาร์ช วิธีการที่ใช้ในการดัดแปร และวิธีการในการให้ความร้อน เป็นต้น

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 20 นาทีส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่ง โดยผลึกเกิดการเปลี่ยนรูปแบบจากแบบบีเป็นแบบเอ (Kawabata และคณะ, 1994) เมื่อวัดด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟเฟรกโตมิเตอร์ ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Miyoshi (2002) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 นาที และจากการศึกษาของ Vermeylen และคณะ (2006) ในสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 90, 100, 110, 120 และ 130 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 24 ชั่วโมง มีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 23 ซึ่งพบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากแบบบีเป็นแบบเอในทุกอุณหภูมิของการดัดแปร และพบว่าที่สภาวะการดัดแปรที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสจะมีความเป็นผลึกมากที่สุดและความเป็นผลึกจะลดลงตามสภาวะการดัดแปรของอุณหภูมิที่ลดลง โดยให้เหตุผลว่าความร้อนที่สูงมากทำให้เกิดการแยกตัวของเกลียวคู่ระหว่างอะไมโลเพกตินกับสายหลัก (backbone) และทำให้เกิดการเคลื่อนที่จึงสามารถเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของ Lim และคณะ (2001) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้หม้อนึ่งความดันสูงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 20-25 แต่พบว่าการดัดแปรทำให้ความสูงของพีคลดลงซึ่งเกิดจากความร้อนหรือความชื้นที่มากเกินพอในการดัดแปรส่งผลให้ความเป็นผลึกของสตาร์ชลดลง (Takaya และคณะ, 2000)

Shin และคณะ (2004) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันฝรั่งหวานที่มีรูปแบบผลึกตามธรรมชาติแบบบีและเอตามลำดับ เมื่อนำสตาร์ชมาดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี (acid-hydrolysis) ร่วมกับการดัดแปรด้วยวิธี autoclaving-cooling และการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อน พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดยังคงรูปแบบผลึกไว้ไม่เปลี่ยนแปลง แต่การดัดแปรในขั้นตอนของ autoclaving-cooling สตาร์ชจะมีความสูงของพีคน้อยกว่าสตาร์ชธรรมชาติเมื่อวัดด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ และสตาร์ชมันเทศจะมี

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคที่ 17.3 และ 5.6 $^{\circ}2\theta$ และเมื่อสตาร์ชถูกดัดแปรต่อด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นจะทำให้สตาร์ชมันเทศมีความสูงของพีคเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 15 และ 17$^{\circ}2\theta$ โดยเกิดจากการที่เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายในระหว่างการดัดแปร

Lawal (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชนิวโกโกแยมที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าการดัดแปรสตาร์ชไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกในสตาร์ชนิวโกโกแยม โดยสตาร์ชยังคงรูปแบบผลึกแบบเอ

Hoover และคณะ (1996) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และสตาร์ชอะไมโลสสูง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 30 พบว่าสตาร์ชทุกชนิดยังคงรักษารูปแบบผลึกแบบบีแต่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของพีคที่เพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรโดยสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวมีความสูงของพีคเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาเป็นสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูง ตามลำดับ โดยให้เหตุผลว่าอาจเกิดจากการดัดแปรทำให้เกลียวคู่ภายในผลึกสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากพลังงานความร้อนและความชื้น ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Kawabata และคณะ (1994) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของสตาร์ชข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (retort) ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 5 และ 20 นาที โดยพบว่าวงแหวนลำดับที่ 5 มีพีคที่แหลมมากขึ้นและพบพีคใหม่ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 13$^{\circ}2\theta$ แสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมัน ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Miyoshi (2002) ที่พบว่าสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรจะมีรูปแบบผลึกเป็นแบบเอ และมีแบบวีร่วมด้วยซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส และอะไมโลสกับลิปิด เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกในระหว่างการดัดแปร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

พิณทิพย์ (2547) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 นาที โดยปรับความชื้นของแป้งเป็นร้อยละ 25 พบว่าแป้งทั้งสองชนิดยังคงรูปแบบผลึกแบบเอ แต่มีความหนาแน่นของผลึกและระดับความเป็นผลึกลดลง โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากโครงสร้างอะไมโลเพกตินถูกทำให้แตกสลายไปด้วยความร้อนในระหว่างการดัดแปร ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของอะไมโลเพกตินมีจำนวนลดลงและเกิดโมเลกุลขนาดเล็กของอะไมโลเพกตินเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนอะไมโลเพกตินที่ถูกทำให้แตกสลายนั้นเป็นสายโซ่ตรงด้านนอก หรือสายเอของโครงสร้าง (Lu และคณะ, 1996)

2.5.3 ผลของการดัดแปรสตาร์ชต่อคุณสมบัติทางด้านความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Lu และคณะ (1996) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความร้อนในสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 100 และ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 และ 20 นาที พบว่าภายหลังการดัดแปรสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเกิดเจลที่เพิ่มขึ้นในสตาร์ชทั้งสองชนิด และค่าเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าลดลง ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงของเอนโดเทอร์มโดยพบว่าพีคหายไปภายหลังจากการดัดแปรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 20 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวแตกสลายได้โดยง่ายเมื่อถูกดัดแปร และการดัดแปรที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนแปลงเอนโดเทอร์มของสตาร์ชทั้งสองชนิดซึ่งมีพีคที่หายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการเสื่อมสลายในส่วนอะไมโลเพกตินโดยโมเลกุลใหญ่ๆมีจำนวนลดลงและมีโมเลกุลเล็กๆเพิ่มมากขึ้น (Mahanta และคณะ, 1989; Murugesan และคณะ, 1989) และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นยังส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของโครงสร้างทางโมเลกุลของสตาร์ช (Kulp และคณะ, 1981) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ พิณทิพย์ (2547) ที่ดัดแปรแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที โดยมีการปรับความชื้นเป็นร้อยละ 25 พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่า T_0, T_p, T_c และ (T_c-T_0) ที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าเอนทาลปีมีค่าลดลง โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากโครงสร้างอะไมโลเพกตินของแป้งข้าวถูกทำให้แตกออกด้วยความร้อนซึ่งเห็นได้จากการที่ระดับความเป็นผลึกลดลงเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่เหลืออยู่หรืออาจเปลี่ยนแปลงไปนี้มีความคงทนต่อความร้อนได้มากกว่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งข้าวที่ผ่านการดัดแปรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Adebowale และคณะ (2003) ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชถั่วที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature; T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดการเกิดเจลาทิไนเซชัน (conclusion temperature; T_c) ช่วงกว้างในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_0) และเอนทาลปี (ΔH) เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยค่า T_0, T_p, T_c และ (T_c-T_0) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่ใช้ในการดัดแปร และค่าเอนทาลปีมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลสและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด ซึ่งส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ในส่วนอสัณฐานลดลงทำให้ค่า T_0, T_p, T_c และ (T_c-T_0) มีค่าสูงขึ้น และอาจเกิดจากการดัดแปรส่งผลให้เกิดการรวมตัว

กันระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลสซึ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ภายในส่วนอสัณฐาน จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ส่วนอสัณฐานเกิดการพองตัวและเกิดการทำลายโครงสร้างผลึกได้ (Hoover และคณะ, 1996)

Hoover และคณะ (1996) พบการเปลี่ยนแปลงของค่า T_0, T_p และ T_c ที่สูงขึ้นของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูงที่ผ่านการดัดแปร และค่า T_c-T_0 ของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด และอาจเกิดจากการรวมตัวกันของผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนค่าของ T_c-T_0 ในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาของสายอะไมโลเพกตินในระหว่างการดัดแปรไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกใหม่ของสตาร์ช ส่วนค่าเอนทาลปี (ΔH) ในสตาร์ชทุกชนิดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินไม่ถูกทำลายภายใต้การดัดแปร

Gunaratne และคณะ (2002) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชจากพืชหัวและรากที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 30 พบว่าสตาร์ชมีค่า T_0, T_p และ T_c เพิ่มขึ้นส่วนค่าเอนทาลปีมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากเกลียวคู่ทั้งในส่วนที่เป็นผลึกและส่วนไม่เป็นผลึกของสตาร์ชถูกทำลายภายหลังการดัดแปร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Donovan และคณะ (1983) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความร้อนของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นและมีค่าพลังงานเอนทาลปีลดลงภายหลังการดัดแปร โดยสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าพลังงานเอนทาลปีที่ลดลงมากกว่าสตาร์ชข้าวสาลี โดยให้เหตุผลว่า ผลของการดัดแปรทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลในส่วนอสัณฐาน ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกใหม่หรือเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกเดิม และเกิดโครงสร้างผลึกขนาดเล็กที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Miyoshi (2002) และ Lim และคณะ (2001) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า T_0, T_p และ T_c ที่สูงขึ้นภายหลังการดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด และค่าพลังงานเอนทาลปีมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรทำให้ส่วนผลึกของสตาร์ชเกิดการเสื่อมสลายโดยส่วนผลึกที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์จะเกิดการเสื่อมสลายได้โดยง่าย โมเลกุลของอะไมโลเพกตินที่เหลือจึงกลายเป็นโครงสร้างผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันสูงขึ้น และการเกิดเอนโดเทอร์มใหม่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนอสัณฐานที่อยู่ในโครงสร้างส่วนผลึก (intercrystalline

amorphous region) เปลี่ยนมาเป็นในส่วนของอสัณฐานแทน ซึ่งอาจทำให้สายโซ่สั้นๆใน โครงสร้างส่วนผลึกมีความเป็นอิสระมากขึ้นและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ สตาร์ชจึงมีความคงทน ต่อพลังงานความร้อนมากกว่าเดิม และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากการจัดเรียง ตัวใหม่ของอะไมโลเพกตินสายสั้นๆเมื่อได้รับพลังงานความร้อนและความชื้นในการดัดแปร ทำ ให้สตาร์ชมีความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้น (Lim และคณะ, 2001)

2.5.4 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ช

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นส่งผล ให้สตาร์ชข้าวมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) โดยสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ความ แตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) เซตแบค และความหนืด สุดท้าย (final viscosity) มีค่าลดลง (Anderson และคณะ, 2006; พิณทิพย์, 2547) และอุณหภูมิ เริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรที่ สูงขึ้น (พิณทิพย์, 2547)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Adebowale และคณะ (2003) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดของสตาร์ช ถั่วที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น พบว่าสตาร์ชถั่วที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) เพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น และ มีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกสภาวะในการดัดแปร ยกเว้นการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 24 และ 27 จะมีค่าความหนืดสูงสุดที่คงที่ ซึ่งเป็นผล มาจากการดัดแปรทำให้สตาร์ชมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น และการจัดเรียงตัวใหม่ภายในเม็ด สตาร์ชทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและภายในเม็ดสตาร์ชที่แข็งแรงกว่าเดิม และ สตาร์ชถั่วมีค่าความหนืดภายหลังการทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจับตัวกันใหม่ของโมเลกุลซึ่งทำให้เกิดตะกอนหรือเจล (BeMiller และคณะ, 1996) และสตาร์ชมีค่าเซตแบคที่ลดลง โดยค่าเซตแบคเป็นค่าที่ใช้บอกอัตราการเกิดรีโทรเกรเด ชันของสตาร์ช ส่วนค่าความหนืดต่ำสุด (breakdown) เป็นค่าที่วัดความอ่อนแอของสตาร์ช (Collado และคณะ, 2001) เมื่อสตาร์ชเกิดการพองตัวและถูกทำให้แตกออก โดยการดัดแปร สตาร์ชส่งผลให้สตาร์ชที่เกิดการพองตัวทนต่อแรงเฉือนและความร้อนมากยิ่งขึ้น

2.5.5 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ช

การพองตัวและการละลายของสตาร์ชสุกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสตาร์ชในการนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านการพองตัวและการละลายของสตาร์ชได้

Hoover และคณะ (1995) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 30 พบว่าค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมีค่าลดลงหลังการดัดแปร โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากการที่อะไมโลสรวมตัวกับลิปิดในสตาร์ชเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด ทำให้ยับยั้งการพองตัวของสตาร์ช และพบว่าในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีกำลังการพองตัวและการละลายที่ลดลงมากกว่าสตาร์ชข้าวโพดปกติ เนื่องมาจากอะไมโลเพกตินซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลในระหว่างการดัดแปร โดยเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของอะไมโลเพกติน ทำให้ยับยั้งการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ช

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Adebowale และคณะ (2003) และ Lawal (2005) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วและสตาร์ชโกโกแยมที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชโกโกแยมมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะเพิ่มความเป็นผลึกและการเปลี่ยนแปลงของแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลทำให้เกิดการจับตัวกันของเกลียวคู่ของสายอะไมโลเพกตินทำให้จำกัดการพองตัวและการละลาย และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Kulp และคณะ (1981) ที่พบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่สภาวะเดียวกัน โดยพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังการพองตัวของทั้งสองชนิดที่ลดลงตามสภาวะของการดัดแปรที่สูงขึ้น และพบการเปลี่ยนแปลงของค่าการละลายของสตาร์ชข้าวสาลีที่เพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรส่วนค่าการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น

Gunaratne และคณะ (2002) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากพืชหัวและราก ได้แก่ สตาร์ชทรูแยม สตาร์ชทาโร่ สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชนิวโกโกแยม ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 10 ชั่วโมง โดยมี

การปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 30 พบว่าค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อผ่านการดัดแปรซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงส่วนผลึกและอสัณฐานของสตาร์ช ปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ช การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับลิปิด และเกิดจากความเสถียรของเม็ดสตาร์ชลดลงจากการคลายตัวและแยกตัวของเกลียวคู่ เกิดความเสียหายของส่วนผลึก

Sair (1976) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100, 105 และ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 2, 4, 8, 12 และ 18 ชั่วโมงสำหรับสตาร์ชมันฝรั่ง ส่วนสตาร์ชข้าวโพดมีการให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 95, 105 และ 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยสตาร์ชทั้งสองชนิดมีการปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 หรือ 27 พบว่าค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น ส่วนค่าการละลายของสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่าการดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจะทำให้ค่าการละลายของสตาร์ชลดลงจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 30 ส่วนการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 105 องศาเซลเซียสจะไม่มีผลอย่างชัดเจนกับการเปลี่ยนแปลงของค่าการละลาย และการดัดแปรสตาร์ชทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าการละลายลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมินี้ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเสื่อมสลายบางส่วนในระหว่างการดัดแปร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

พิณทิพย์ (2547) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 แป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 90, 105 และแป้งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 60 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 105 และ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 และ 60 นาที โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 20 และ 25 พบว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวทั้งสี่ชนิดมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น โดยให้เหตุผลว่าการลดลงของกำลังการพองตัวในแป้งข้าวเหนียวพันธุ์กข 6 เกิดจากการคลายเกลียวของเกลียวคู่ในส่วนโครงสร้างผลึก ส่วนในแป้งข้าวจ้าวอาจเป็นผลมาจากการคลายเกลียวคู่ในส่วนโครงสร้างผลึกและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด

2.5.6 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อความใสของสตาร์ชสุก

ความใสของสตาร์ชเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของสตาร์ช เนื่องจากมีการใช้สตาร์ชในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น การผลิตไส้ขนมซึ่งแต่ละชนิดก็ต้องการความใสของสตาร์ชแตกต่างกันไป และอาหารบางชนิดเช่นน้ำสลัดต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดและขุ่น ซึ่งความใสของสตาร์ชขึ้นกับชนิดของสตาร์ช โดยคุณสมบัตินี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการดัดแปรสตาร์ช (Craig และคณะ, 1989)

Lawal (2005) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความใสของสตาร์ชโกโกแยมจากการวัดค่าการส่องผ่านของแสง (transmittance) โดยสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าความใสของสตาร์ชโกโกแยมมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรสตาร์ชที่สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ความใสของสตาร์ชลดลง ได้แก่ การพองตัวของเม็ดสตาร์ช การละลายของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ความยาวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพกติน พันธะภายในและภายนอกระหว่างโมเลกุล ปริมาณลิปิดในเม็ดสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ช ซึ่งมีผลกับความขุ่นของสตาร์ช โดยการลดลงของค่าความใสของสตาร์ชโกโกแยมที่ผ่านการดัดแปรเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสายของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่ละลายออกมาในระหว่างที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและเกิดการรวมตัวกันเป็นบริเวณหรือที่เรียกว่า junction zone ซึ่งบริเวณที่โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับและกระเจิงของแสง และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นนี้ยังส่งผลให้สตาร์ชเกิดมีการปรับปรุงความเป็นผลึกให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจำกัดการพองตัวของสตาร์ชจึงทำให้ค่าความใสของสตาร์ชมีค่าลดลง ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาของ Sair (1967) ที่ไม่พบความแตกต่างของค่าความใสของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 95 และ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 2, 4, 8, 16 และ 18 ชั่วโมง มีค่าความใสเพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

พิณทิพย์ (2547) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความใสของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวจ้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 105 และ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 และ 60 นาที โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 20 และ 25 พบว่าแป้งข้าวเหนียวพันธุ์กข 6 และแป้งขาวดอกมะลิ 105 มีค่าร้อยละการส่องผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยให้เหตุผลว่าเกิดจากขนาดหรือรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้เกิดการหักเหของแสงได้น้อยลง และแป้งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 60 มีค่าร้อยละการส่องผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด จึงมีผลทำให้ค่าร้อยละการส่องผ่านลดลง

2.5.7 ผลของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

Hoover และคณะ (1996) ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสในสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูง และสตาร์ชอะไมโลเมซวี ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง พบว่า สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยกรดมากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชถั่ว โดยสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชอะไมโลเมซมีการทนต่อการย่อยด้วยกรดเพิ่มขึ้นมากกว่าสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว จากงานวิจัยต่าง ๆกล่าวว่า การคงทนต่อการย่อยด้วยกรดเป็นผลมาจากการเกิดอะไมโลสลิปิดคอมเพล็กซ์ และระดับการเกิดปฏิกิริยาของสตาร์ชต่อเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะแตกต่างกันขึ้นกับปริมาณของลิปิด และ/หรือเกิดจากการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของสายโซ่ภายในโมเลกุลของสตาร์ชแกรนูล โดยสตาร์ชที่ต่างกันจะมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่แตกต่างกัน จากการศึกษาของ Kulp และคณะ (1981) ที่ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18 21 24 และ 27 พบว่า สตาร์ชมันฝรั่งจะมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากกว่าสตาร์ชข้าวสาลีในทุกสภาวะที่ทำการศึกษา

Gunaratne และคณะ (2002) ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในสตาร์ชจากรากและพืชหัวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 ระยะเวลาการให้ความร้อนนาน 10 ชั่วโมง พบว่าในสตาร์ชทุกชนิดมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเพิ่มมากขึ้น โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชทรูแยม สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชนิวโกโก้แยม โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกภายในสตาร์ช (Planchot และคณะ, 1997) ถ้าโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกเกิดการอ่อนแอจะทำให้การเข้าไปทำปฏิกิริยาของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสง่ายขึ้น ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาของ Kurakake และคณะ (1996) ที่ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น พบว่าสตาร์ชข้าวโพดภายหลังการดัดแปรมีร้อยละการย่อยสลายด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากกว่าสตาร์ชข้าวโพดปกติ เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Anderson และคณะ (2002) ที่ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นด้วยตู้อบลมร้อนและไมโครเวฟ พบว่าสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวภายหลังการดัดแปรมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลดลงในทุกสภาวะที่ทำการศึกษา

ระดับความชื้นที่ใช้ในการดัดแปรก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สตาร์ชมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่แตกต่างกัน จากการศึกษาของ Celia และคณะ (1996) ที่ศึกษาความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง และมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 18 24 และ 27 พบว่า สตาร์ชทั้งสอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ชนิดที่ระดับความชื้นในการดัดแปรร้อยละ 18 จะมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากกว่าสตาร์ชปกติ ซึ่งเกิดจากการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นร้อยละ 18 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและจัดรูปแบบใหม่ภายในแกรนูลซึ่งส่งผลทำให้โครงสร้างภายในสตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนสตาร์ชที่ระดับความชื้นในการดัดแปรร้อยละ 24 และ 27 จะมีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่น้อยกว่าสตาร์ชปกติ จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการดัดแปรทำให้โครงสร้างภายในสตาร์ชแกรนูลอ่อนแอกว่าเดิม

2.6 การใช้ประโยชน์ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

จากการศึกษาของ อโนชา และคณะ (2547) พบว่าสตาร์ชข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยรังสีไมโครเวฟสามารถนำไปใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็ง โดยมีการใช้แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรเป็นส่วนผสมในเส้นก๋วยเตี๋ยวเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ดียิ่งขึ้น โดยแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยรังสีไมโครเวฟจะมีคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาทิไนเซชันและค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรแทนแป้งข้าวเจ้าในสูตรน้ำแป้ง จะทำให้คุณสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเส้นก๋วยเตี๋ยวดีขึ้น และเมื่อนำเส้นที่ปรับปรุงมาผลิตเป็นผัดไทยแช่เยือกแข็ง พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวมีเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และจากการศึกษาการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวพาสเจอไรซ์โดยการใช้แป้งดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นและวิธีการใช้รังสียูวี ทดแทนแป้งข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นทำให้แป้งดัดแปรมีอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาทิไนเซชันสูงขึ้น แต่มีค่ากำลังการพองตัวและค่าความหนืดสูงสุดลดลง ส่วนแป้งดัดแปรสตาร์ชด้วยรังสียูวี โดยการปรับความชื้นของแป้งและฉายรังสียูวี พบว่าแป้งมีค่ากำลังการพองตัวและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลาทิไนเซชันไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง โดยการดัดแปรแป้งทั้งสองวิธีนี้ทำให้แป้งมีสีคล้ำขึ้น การทดแทนแป้งดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวพาสเจอร์ไรซ์มีค่าแรงตัดสูงกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ไม่ผสมแป้งดัดแปร ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผสมแป้งดัดแปรด้วยรังสียูวีนั้น เมื่อพาสเจอไรซ์แล้วมีค่าแรงตัดไม่แตกต่างจากเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งปกติ

Miyazaki และคณะ (2005) ศึกษาผลของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติของโดและขนมปัง พบว่าการทดแทนสตาร์ชดัดแปรที่ร้อยละ 20 จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและความคงตัวในการผสมของโด แต่จะทำให้ความยืดหยุ่นของโดลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชปกติ และปริมาตรของขนมปังที่มีส่วนผสมของสตาร์ชดัดแปรจะลดลงมากกว่าสตาร์ชปกติ แต่เมื่อมีการใช้สตาร์ชดัดแปรร่วมกับเนยขาว (shortening) จะช่วยให้สตาร์ชดัดแปรมีปริมาตรขนมปังมากกว่าเดิมและบริเวณขอบของขนมปังจะมีคุณภาพดีขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 3
วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัตถุดิบ

สตาร์ชข้าวเหนียวจากบริษัท กรุงเทพสตาชอินดัสเทรี่ยล จำกัด ซึ่งผ่านการสกัดโปรตีนออกแล้วและมีโปรตีนไม่เกินร้อยละ 0.5

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Sartorius, BP 3100S,Germany)

3.2.2 ตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิ (hot air oven) (WTB binder, Germany)

3.3.3 เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) (Newport Scientific, Model RVA-4, Australia)

3.3.4 เครื่องเคลือบทอง (sputter coater) (Cressington, 108, England)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

3.3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) (Camscan, MX 2000, England)

3.3.6 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Kendro, RC-6 Germany)

3.3.7 เครื่องวัดค่าพีเอช (standard pH meter) (PHM 210, France)

3.3.8 เครื่องกรอง (suction pump) (Eyela, Aspirator A-3S, Tokyo)

3.3.9 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (stuart Scientific, SBS 30, USA)

3.3.10 แท่นให้ความร้อนพร้อมระบบกวนด้วยแม่เหล็ก (Type M 22111, Thailand)

3.3.11 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) (Spectronic Unicam, GENESYS 10 UV, USA)

3.3.12 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter; DSC (Pyris1, USA)

3.3.13 เครื่องวัดสี (colorimeter)

3.3.14 เครื่อง X-ray Diffractometer (Bruker, D8 Advance, Germany)

3.3.15 ภาชนะสแตนเลสมีฝาปิดสนิททนความร้อน

3.3.16 ตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช

3.3.17 ถาดอลูมิเนียมขนาด 17×20 นิ้ว

3.3.18 ถุงพลาสติกทนความร้อนขนาด 6×8 และ 12×18 นิ้ว

3.3.19 เทอร์โมมิเตอร์

3.3.20 ไมโครมิเตอร์

3.3.21 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน

3.3.22 บีกเกอร์

3.3.23 ปิเปต

3.3.24 ขวดรูปชมพู่

3.3.25 หลอดทดลอง

3.3.26 แท่งแก้วกวน

3.3.27 กระบอกตวง

3.3.28 ขวดน้ำกลั่น

3.3.29 ขวดแก้ววัดปริมาตร (volumetric flask)

3.3.30 หลอดวัดค่าการดูดกลืนแสง (cuvette)

3.3.31 หลอดเหวี่ยง

3.3.32 กระดาษกรอง (whatman) เบอร์ 1

3.3.33 กรวยกรอง (funnel)

3.3.34 ที่คีบ (tongs และ forceps)

3.3.35 โถดูดความชื้น (desiccator)

3.3.36 ถ้วยอลูมิเนียมมีฝา (moisture can)

3.3.37 อลูมิเนียมฟอยด์

3.3.38 ชุดกรอง (suction flask และ buchner funnel)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

3.3 สารเคมี

3.3.1 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส

- อะไมโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง
- เอทานอลร้อยละ 95
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กรดแกลเซียลอะซีติก
- ไอโอดีน
- โปแตสเซียมไอโอไดด์

3.3.2 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดภายหลังถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมคลอไรด์
- โซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิคแอนไฮดรัส

- สตาร์ชมันฝรั่งที่ละลายน้ำได้ (Soluble potato starch)
- โซเดียมโปแทสเซียมทาเทรต
- กรดไดไนโตรซาลิคไซลิก
- น้ำตาลมอลโตสมาตรฐาน
- น้ำดีไอโอไนซ์ (Deionized water)
- น้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน
- ฟีนอล
- กรดซัลฟิวริก
- เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (Alpha-amylase from porcine pancreatic suspension in 2.9 M NaCl solution sontaining 3 mM $CaCl_2$) (Sigma Aldrich, Germany)

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การผลิตสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

3.4.1.1 ชั่งน้ำหนักสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณไม่เกินร้อยละ 13 (น้ำหนักแห้ง) 250 กรัม นำไปปรับความชื้นที่ระดับความชื้นต่างๆ คือร้อยละ 10 โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยการพ่นฝอยน้ำกลั่นลงในสตาร์ช

3.4.1.2 นำสตาร์ชที่ปรับความชื้นแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช และเก็บในถุงปิดสนิทนาน 2 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพให้ความชื้นกระจายอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นบรรจุสตาร์ชในภาชนะแสตนเลสที่ปิดสนิทและทนความร้อน

3.4.1.3 นำสตาร์ชเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 1)

3.4.1.4 เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำสตาร์ชดัดแปรที่ได้มาเทและเกลี่ยลงบนถาดอลูมิเนียมที่รองด้วยพลาสติกทนความร้อน ผึ่งที่อุณหภูมิห้องจนสตาร์ชมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 จากนั้นนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช และเก็บในภาชนะปิดสนิทเพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของสตาร์ชดัดแปรต่อไป

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 1 สภาวะการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่ระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาการให้ความร้อนต่างๆ

ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาการให้ความร้อน (ชั่วโมง)
1 (native starch)	-	-	-
2	10	100	1
3	10	100	4
4	10	120	1
5	10	120	4
6	20	100	1
7	20	100	4
8	20	120	1
9	20	120	4
10	30	100	1
11	30	100	4
12	30	120	1
13	30	120	4

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

3.4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

สตาร์ชแต่ละตัวอย่างจะผ่านการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติ (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก) ดังต่อไปนี้

3.4.2.1 ลักษณะปรากฏทางสัณฐานโดยใช้ Scanning Electron Microscopy (SEM) (Walker, 1976)

3.4.2.2 ปริมาณความชื้น โดยวิธีการอบแห้ง (AOAC, 1990)

3.4.2.3 สี โดยใช้ Colorimeter (Nollet, 1996) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนสีของสตาร์ชหลังการดัดแปร

3.4.2.4 การพองตัวและการละลาย (Leach et al., 1959)

3.4.2.5 ความใส (Craig et al., 1989)

3.4.2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยใช้ Rapid Visco Analyzer (RVA) (Newport Scientific Pty, Ltd., 1995)

3.4.2.7 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Perdon, 1999)

3.4.2.8 โครงสร้างภายใน โดยใช้ X-ray Diffraction (Shi and Seib, 1992) ปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

3.4.2.9 ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (susceptibility to enzyme digestion) (Dubois et al., 1956)

3.4.3 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ผลของความชื้น (ร้อยละ 10, 20 และ 30) อุณหภูมิ (100 และ 120 องศาเซลเซียส) ระยะเวลา (1 และ 4 ชั่วโมง) ที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการดัดแปรเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยการวางแผนการทดลองแบบ 3×2×2+1 Augmented Factorial Design วิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS รุ่น 8.1 (SAS Institute, NC, USA)

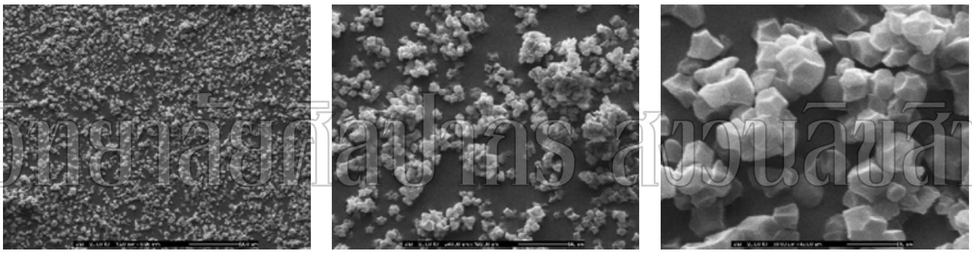
ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆได้แก่ ความชื้น (ร้อยละ 10, 20 และ 30) อุณหภูมิ (100 และ 120 องศาเซลเซียส) ระยะเวลา (1 และ 4 ชั่วโมง) ที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการดัดแปร โดยการวางแผนการทดลองแบบ 3×2×2 Factorial Design วิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS รุ่น 8.1 (SAS Institute, NC, USA)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อลักษณะปรากฏทางสัณฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)

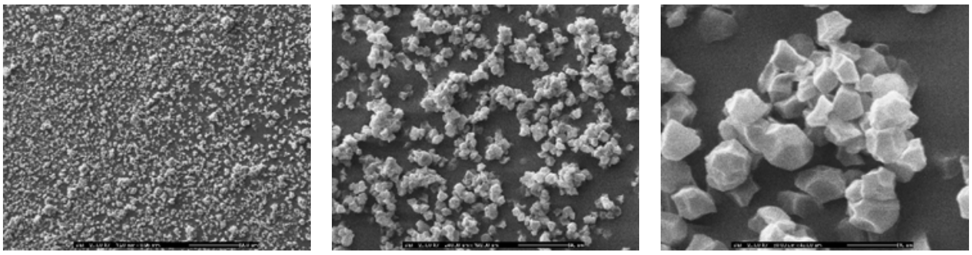
สตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะรูปร่างของสตาร์ชแกรนูลเป็นมุมหลายเหลี่ยมที่มีผิวหน้าเรียบและมีขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกันไป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกรนูลอยู่ในช่วง 3-9 ไมครอน แกรนูลมีการเกาะรวมกันไม่มากนัก ดังภาพที่ 4-1



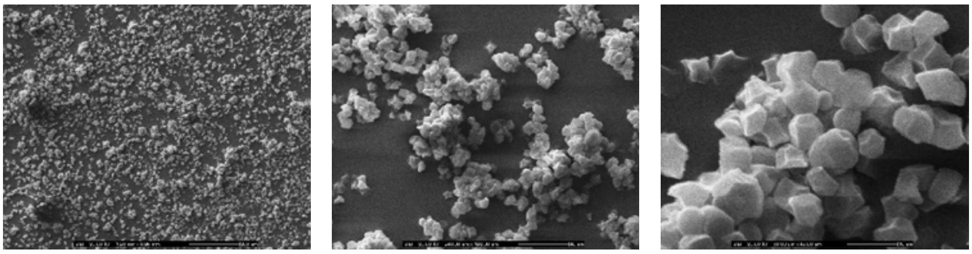
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-1 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวในทุกสภาวะที่ทำการศึกษา ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างของสตาร์ชแกรนูล โดยแกรนูลยังคงมีผิวหน้าเรียบและไม่พบความเสียหายที่ผิวหน้าของแกรนูล ดังภาพที่ 4-2 ถึง 4-11 แต่การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวในสภาวะที่สูงขึ้น พบว่าสตาร์ชแกรนูลมีการเชื่อมติดกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นจากการที่สตาร์ชบางส่วนเกิดเจลาทิไนเซชัน โดยพบการเกาะรวมกลุ่มกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 ดังภาพที่ 4-13 ซึ่งความชื้นหรือน้ำมีคุณสมบัติเป็นพลาสติไทเซอร์ในการเกิดกลาสทรานซิชัน โดยเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยางในการเกิดเจลาทิไนเซชัน

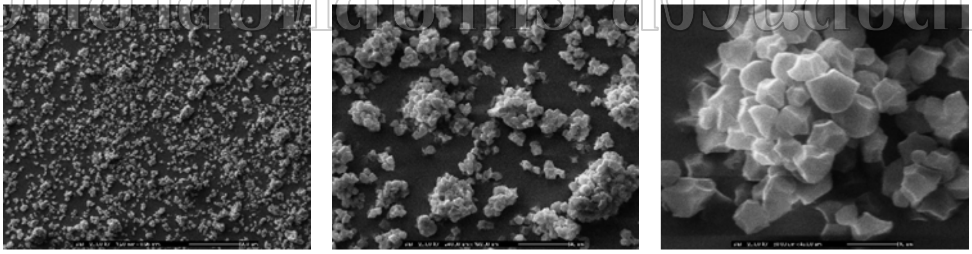


ภาพที่ 4-2 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

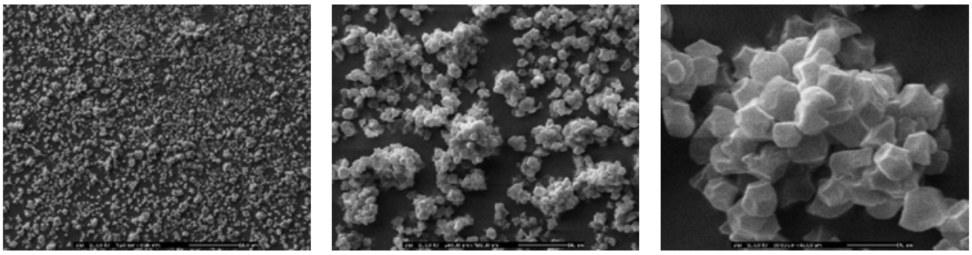


ภาพที่ 4-3 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

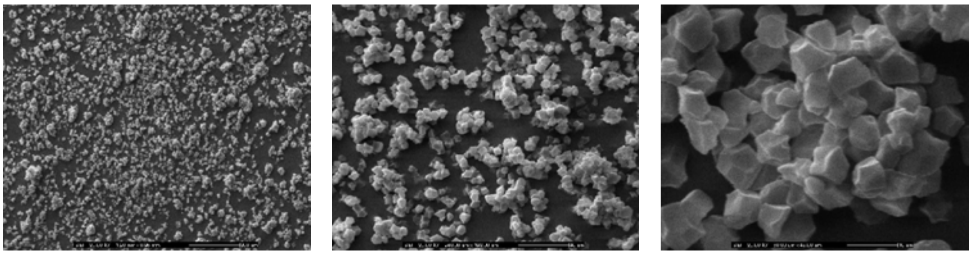
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



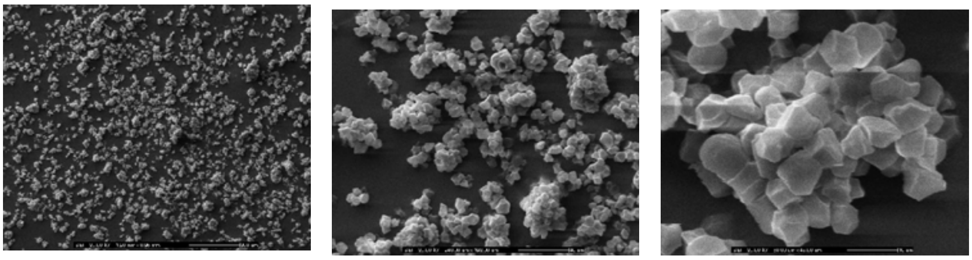
ภาพที่ 4-4 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4-5 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

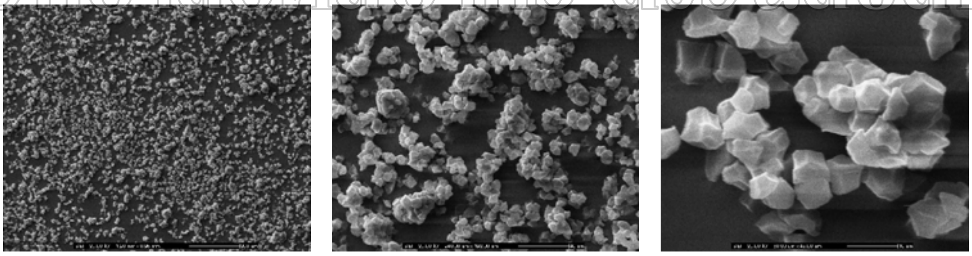


ภาพที่ 4-6 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

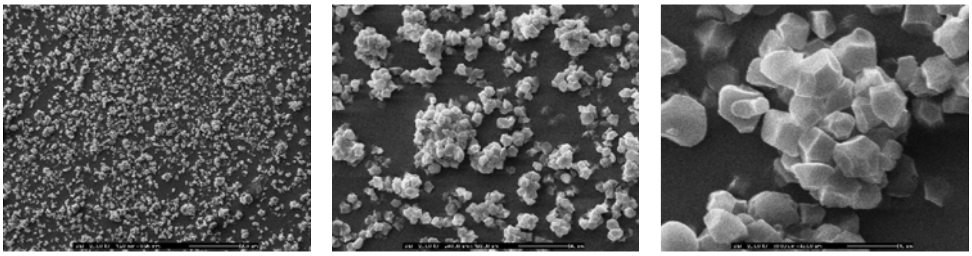


ภาพที่ 4-7 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

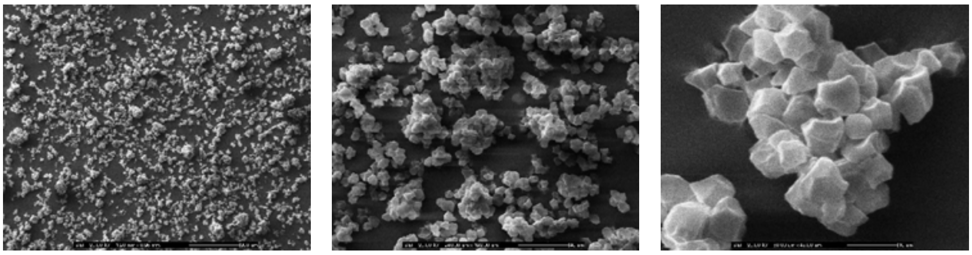
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



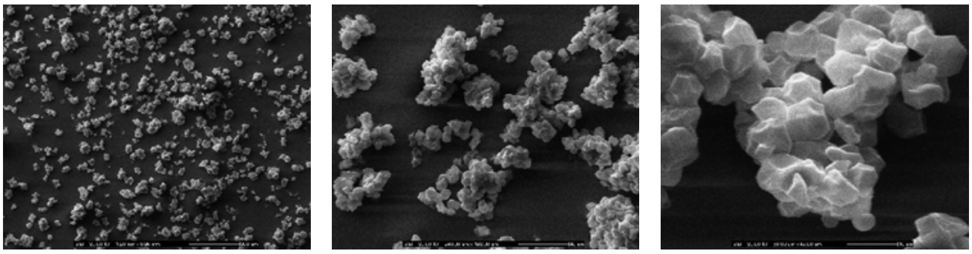
ภาพที่ 4-8 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4-9 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

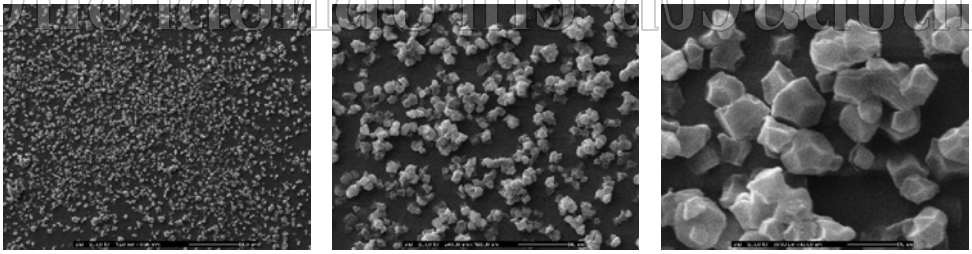


ภาพที่ 4-10 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4-11 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

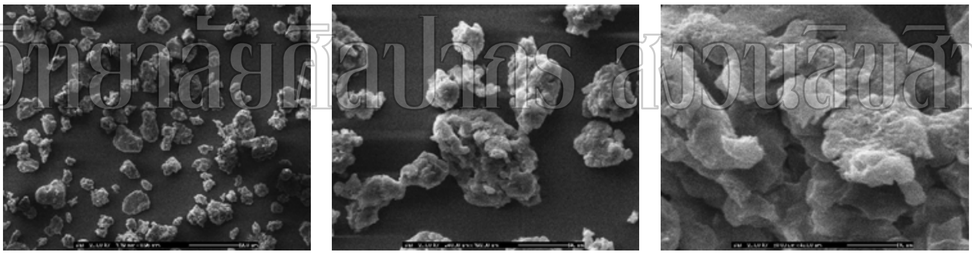
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-12 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-1 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ พิณทิพย์ (2547) และ Anderson และคณะ (2006) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น และการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว สตาร์ชอะไมโลเมซวี (Hoover และคณะ, 1996; Sair, 1967) สตาร์ชถั่ว (Adebowale และคณะ, 2003) สตาร์ชมันสำปะหลัง (Abraham, 1993; Gunaratne และคณะ, 2002) สตาร์ชข้าวสาลี (Kulp และคณะ, 1981) สตาร์ชทรูแยม สตาร์ชทาโร่ สตาร์ชนิวโกโกแยม และสตาร์ชมันฝรั่ง (Gunaratne และคณะ, 2002)

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะ 30-120-4 พบการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของแกรนูลเป็นอย่างมาก ดังภาพที่ 4-13 โดยพบว่าแกรนูลเกิดการเชื่อมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่และเกิดการสูญเสียรูปร่างของแกรนูลเดิม ไม่สามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกรนูลได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชในสภาวะที่รุนแรง โดยความร้อนและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลาสทรานซิชัน ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไทเซอร์ที่ดี ทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยางหรือการเกิดเจลาทิไนเซชัน โดยน้ำจะเป็นตัวหล่อลื่นและแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างภายในสตาร์ชแกรนูลและเข้าไปจับกับพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลสตาร์ชแกรนูล ส่วนความร้อนจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่าง ๆได้ดีขึ้น และความร้อนยังทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เต็มที่ ทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวและเกิดเจล แกรนูลจึงเกิดการหลอมรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

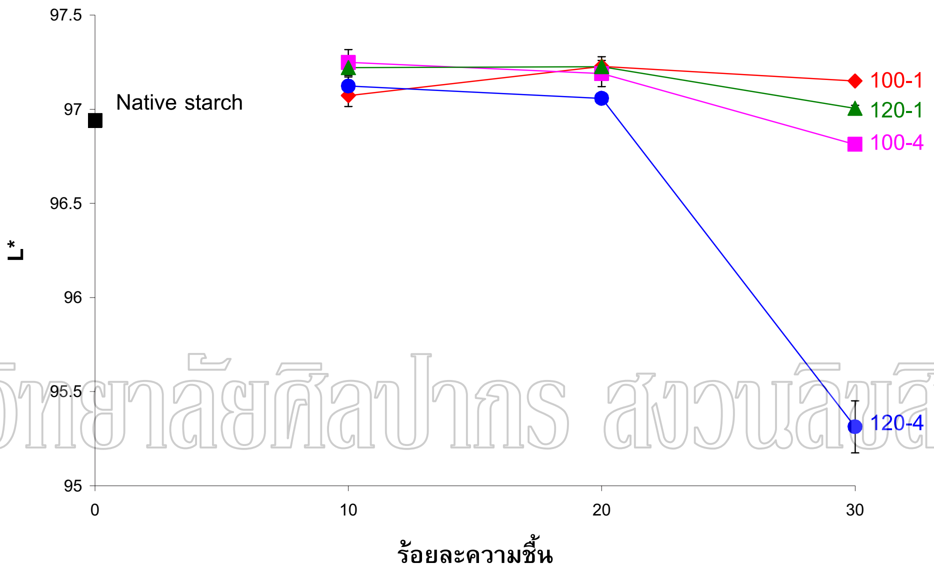


มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-13 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ

4.2 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงสี

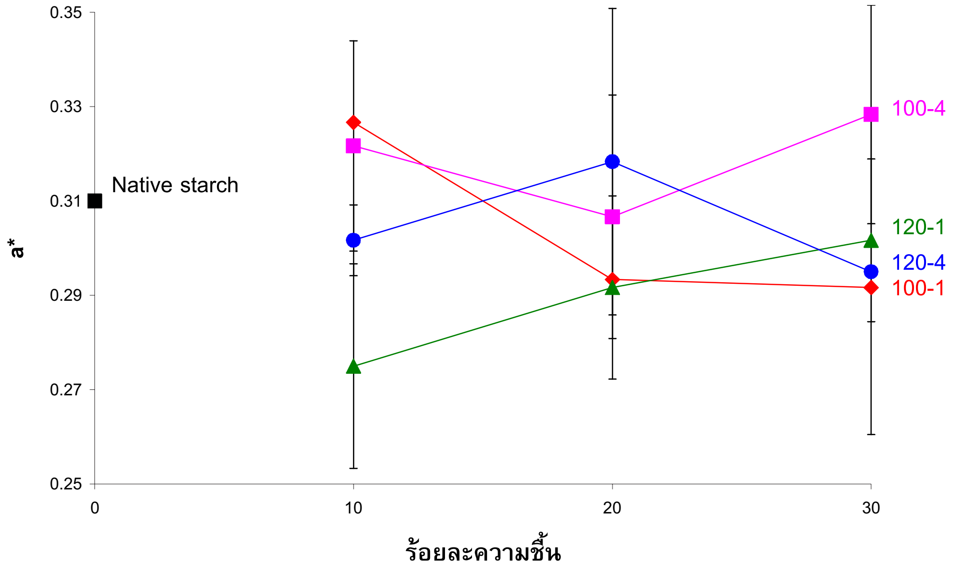
การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นส่งผลให้ค่าสี L*, a* และ b* ของสตาร์ชข้าวเหนียวเปลี่ยนแปลงดังตารางผนวกที่ ข-2 และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสีของสตาร์ชข้าวเหนียวดังภาพที่ 4-14 ถึง 4-16



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

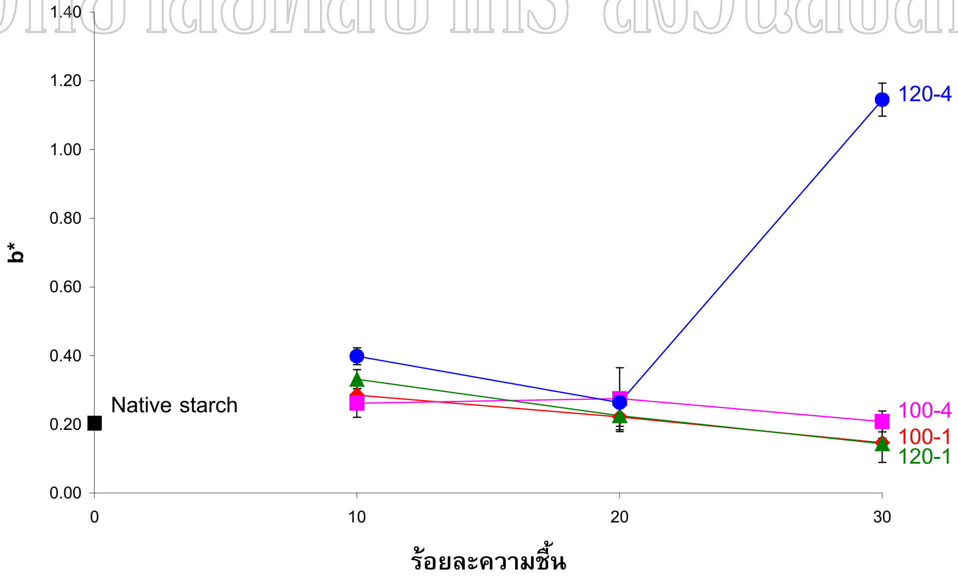
ภาพที่ 4-14 ค่าสี L* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ค่า L* เป็นค่าที่ใช้บอกความสว่างของสตาร์ช โดยพบว่าการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้ค่าความสว่างของสตาร์ชข้าวเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-4 และ 30-120-4 ที่มีค่าความสว่างลดลง ส่วนค่า a* เป็นค่าที่ใช้บอกความเป็นสีแดงหรือสีเขียวของสตาร์ช โดยค่า a* ที่เป็นค่าบวกจะใช้บอกความเป็นสีแดง และค่า a* ที่เป็นค่าลบจะใช้บอกความเป็นสีเขียวของตัวอย่าง จากการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรมีค่า a* เป็นค่าบวก และสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่า a* ที่ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ดังตารางผนวกที่ ข-2 และภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ค่าสี a* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

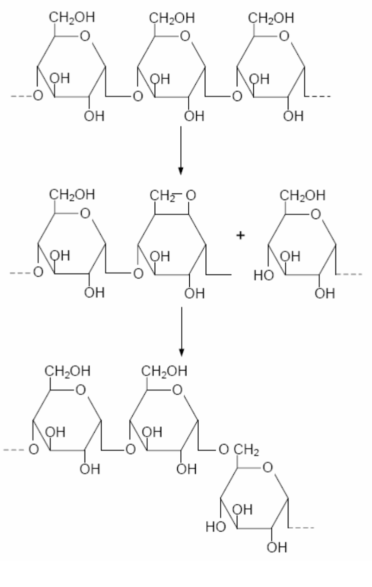


ภาพที่ 4-16 ค่าสี b* ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ค่าสี b* เป็นค่าที่ใช้บอกความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินของตัวอย่าง โดยค่า b* ที่เป็นค่าบวกจะบอกความเป็นสีเหลืองและค่า b* ที่เป็นค่าลบจะบอกความเป็นสีน้ำเงินของตัวอย่าง สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่า b* ที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงความเป็นสีเหลืองมากขึ้น ดังตารางผนวกที่ ข-2 และภาพที่ 4-16 ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Lu และคณะ, 1994 ที่พบการเปลี่ยนแปลงของแป้งข้าวที่มีสีเหลืองมากขึ้นภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น และจากการศึกษาของ พิณทิพย์ (2547) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า b* ในแป้งข้าวเหนียวมีแนวโน้มมากขึ้นแสดงว่าแป้งข้าวเป็นสีเหลืองเข้มมากขึ้น

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นอาจเกิดจากปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic browning) จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (dry heat) โดยตรงกับคาร์โบไฮเดรตโดยเฉพาะที่มีองค์ประกอบของ D-glucose เช่นสตาร์ช โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในสตาร์ช เกิดการทำลายพันธะ α-D-(1$\rightarrow$4)-glycosidic พร้อมกับการสร้างพันธะไกลโคซิดิกขึ้นมาใหม่ เช่นพันธะ α-D-(1$\rightarrow$6), β-D-(1$\rightarrow$6) เป็นต้น ดังภาพที่ 4-17 เป็นการแตกสลายพันธะโดยความร้อน เกิดเป็นวงแหวนที่เรียกว่า anhydro ring ชนิด 1,6-anhydro ซึ่งเป็นสารตัวกลางในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารที่มีพันธะคู่ภายในวงแหวน (Whister และคณะ, 1985) ซึ่งพันธะคู่ภายในโครงสร้างจะสามารถดูดซับแสงและทำให้เกิดสีขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-17 ตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis)
ที่มา : Horton (1965)

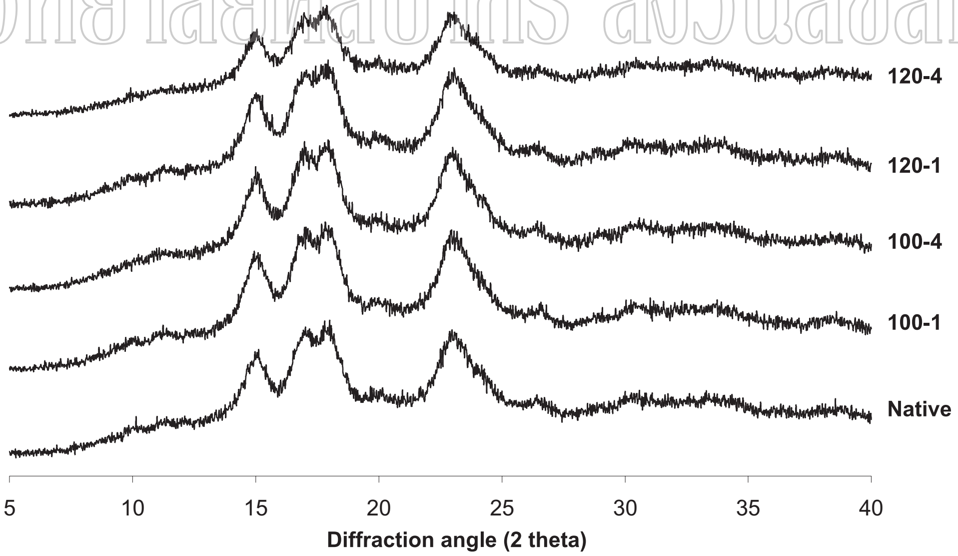
การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง (Horton, 1989) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Furan, 2-Furaldehyde, 2,5-Dimethylfuran โดยผลิตภัณฑ์ตั้งต้นเป็น 1,6-anhydro-β-D-glucopyranose และเกิดการเปลี่ยนรูป (isomerization) เป็นรูปแบบฟิวราโนส (Furanose) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้อีกเมื่อมีปัจจัยอื่น เช่นเมื่อมีการสูญเสียน้ำและฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะให้ผลิตภัณฑ์เป็น 2-furaldehyde และเมื่อมีการสูญเสียคาร์บอนมอนออกไซด์จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นฟูราน (Furan)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

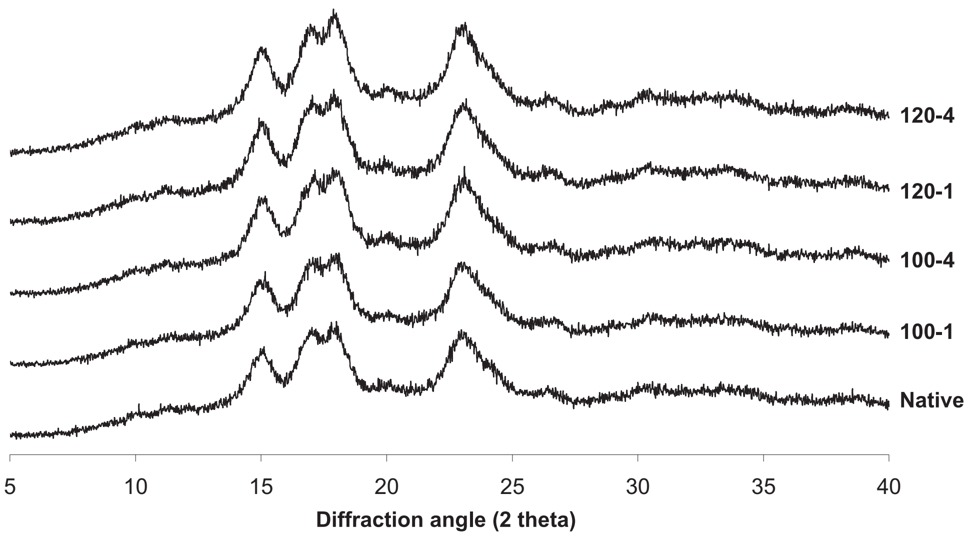
4.3 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

สตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch) เมื่อผ่านการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) พบว่าสตาร์ชมีรูปแบบผลึกเป็นแบบเอโดยจะปรากฏพีคหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา จำนวน 1 พีค ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17-18 องศาจำนวน 2 พีคเชื่อมต่อกัน และที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23 องศา จำนวน 1 พีค ซึ่งเป็นรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอและเป็นแบบที่พบมากที่สุดในสตาร์ชธัญพืช (Buleon และคณะ, 1998) และเมื่อดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นในทุกสภาวะที่ศึกษา พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวยังคงรักษารูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึก โดยจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดิมทั้ง 3 พีคดังภาพที่ 4-18 ถึง 4-20 แต่สตาร์ชดัดแปรมีการเปลี่ยนแปลงพีคของดิฟแฟรกโตแกรม โดยการดัดแปรบางสภาวะ เช่น ที่สภาวะ 10-120-4 และ 30-120-4 จะมีความหนาแน่นของพีคลดลงและจุดสูงสุดของพีคลดลง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

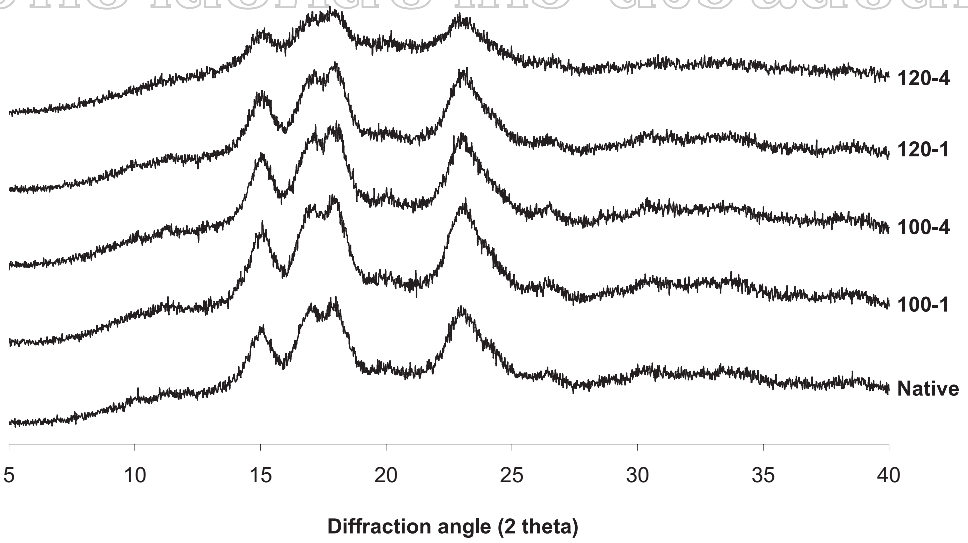


ภาพที่ 4-18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)



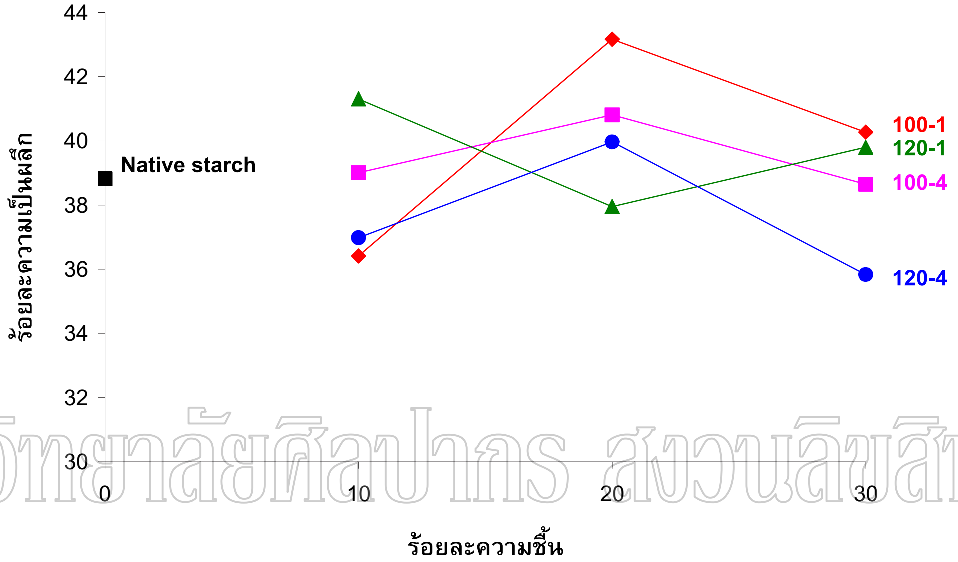
ภาพที่ 4-19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

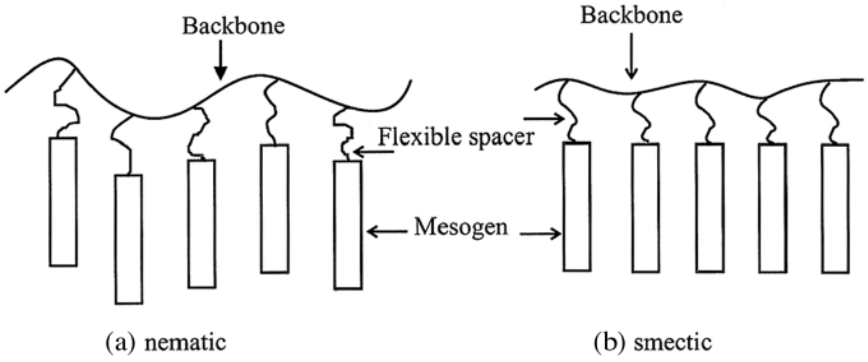
เมื่อวิเคราะห์ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรส่วนใหญ่จะมีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังตารางผนวกที่ ข-1 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นและร้อยละความเป็นผลึกให้ผลดังภาพที่ 4-21 โดยสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-1 มีร้อยละความเป็นผลึกมากที่สุด และการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 มีร้อยละความเป็นผลึกน้อยที่สุด



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-21 ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพีคและร้อยละความเป็นผลึกที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพกตินซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของสตาร์ช โดยโมเลกุลอะไมโลเพกตินจะเป็นส่วนที่แข็งเปรียบได้กับส่วน Mesogen และมีโซ่ข้างของโมเลกุลอะไมโลเพกตินที่ติดกับส่วนแบคโบนที่ยืดหยุ่นได้ที่เรียกว่า flexible spacers โดยโซ่ข้างของโมเลกุลอะไมโลเพกตินสามารถรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆโดยเกิดการพันกันเป็นเกลียวคู่เกิดเป็นโครงสร้างผลึก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนที่ยืดหยุ่นได้ (flexible spacers) เช่น ไม่เกิดความยืดหยุ่นหรือมีขนาดสั้นเกินไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากรูปแบบที่เป็นระเบียบคือ smetic ไปเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นระเบียบคือ nematic ดังภาพที่ 4-22 ซึ่งโครงสร้างแบบ smetic เป็นโครงสร้างที่อยู่ในส่วนลาเมลลาของพืช (Eliasson, 2004)



ภาพที่ 4-22 แบบจำลองโครงสร้างสายโซ่ในส่วนผลึกของสตาร์ช (a) แสดงโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบในส่วน nematic (nematic phase) และ (b) แสดงโครงสร้างในส่วน smetic (smetic phase)

ที่มา : Eliasson (2004)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การดัดแปรสตาร์ชทำให้การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่อะไมโลเพกตินภายในสตาร์ชซึ่งส่งผลให้การรวมตัวเป็นโครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง สตาร์ชดัดแปรที่มีร้อยละความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น (10-100-4, 10-120-1, 20-100-1, 20-100-4, 20-120-4, 30-100-1 และ 30-120-4) เนื่องจากการดัดแปรไม่ได้ทำให้เกิดการลดจำนวนของเกลียวคู่ในส่วนอะไมโลเพกตินแต่ยังทำให้เกิดการรวมตัวกันของเกลียวคู่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น (Eliasson, 2004) จากการศึกษาของ Tester และคณะ (2000) พบว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยการให้ความร้อนชื้นส่งผลให้โซ่ข้างของอะไมโลเพกตินในส่วนลาเมลลาเกิดการเชื่อมต่อกันมากขึ้นจึงทำให้เกลียวคู่มีความยาวเฉลี่ยมากขึ้นและยังทำให้ผลึกในส่วนที่ไม่สมบูรณ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในผลึก เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไทเซอร์ (plasticizer) ช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (t_g) สตาร์ชที่แห้งปราศจากน้ำจะมีผลทำให้ส่วนที่ยืดหยุ่นได้ (flexible spacer) ของอะไมโลเพกตินมีความยืดหยุ่นลดลง เกลียวคู่ไม่เกิดการเชื่อมต่อกันและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็น nematic phase ส่วนสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำภายในจะทำให้โซ่ข้างของอะไมโลเพกตินเกิดการเชื่อมต่อกันและรวมตัวกันเป็นเกลียวคู่ น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีในการที่จะผ่านเข้าไปในแกรนูลซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบจากที่ไม่เป็นระเบียบคือ nematic phase ให้เป็นรูปแบบที่มีความเป็นระเบียบคือ smetic phase มากขึ้น ผลึกจึงมีความสมบูรณ์มากขึ้น

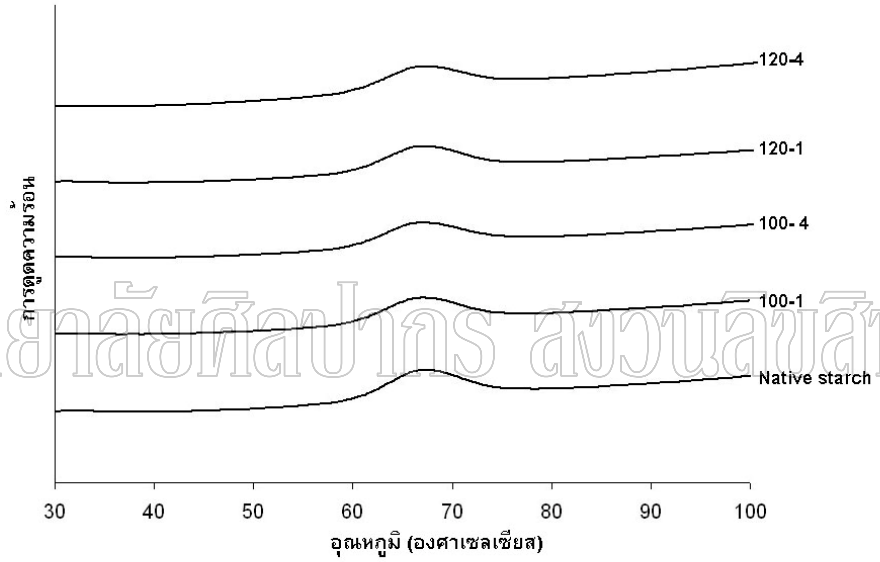
ดังเช่นในการดัดแปรสตาร์ชความชื้นและความร้อนที่สูงมาก ทำให้เกิดการแยกตัวกันของเกลียวคู่ระหว่างสายของอะไมโลเพกตินกับแบคโบน (backbone) และเกิดการเคลื่อนที่ได้ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม (Vermeylen และคณะ, 2006)

สตาร์ชดัดแปรที่มีค่าร้อยละความเป็นผลึกลดลง (10-100-1, 10-120-4, 20-120-1, 30-100-4 และ 30-120-4) อาจเกิดจากความชื้นหรือความร้อนที่มากเกินพอในการดัดแปรจะทำลายความเป็นผลึกของสตาร์ช (Takaya และคณะ, 2000) โดยโครงสร้างอะไมโลเพกตินถูกทำให้แตกสลายไปด้วยความร้อนในระหว่างการดัดแปร ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของอะไมโลเพกตินมีจำนวนลดลงและเกิดโมเลกุลขนาดเล็กของอะไมโลเพกตินเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนอะไมโลเพกตินที่ถูกทำให้แตกสลายนั้นเป็นสายโซ่ตรงด้านนอก หรือสายเอของโครงสร้าง (Lu และคณะ, 1996) ความร้อนทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ทำให้ความแข็งแรงของพันธะในการจับกันของโมเลกุลลดลง และน้ำจะทำลายความเป็นระเบียบของอะไมโลเพกติน (Adebowale และคณะ, 2005) ในการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะ 30-120-4 พบการเปลี่ยนแปลงร้อยละความเป็นผลึกที่ลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพีค โดยมีความหนาแน่นของพีคลดลงและมีการเชื่อมต่อกันของพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17-18 องศา มากขึ้น (ดังภาพที่ 4-21) ซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชที่สภาวะนี้เป็นสภาวะที่มีความชื้นและความร้อนสูงที่สุดในการดัดแปร ทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลาสทรานซิชัน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยางหรือการเกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน ทำให้ความเป็นผลึกของสตาร์ชลดลง รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

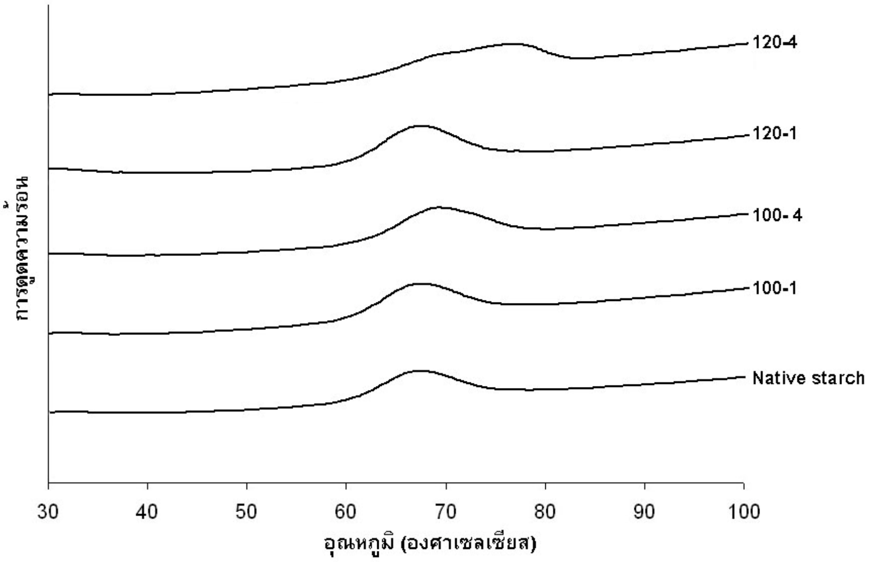
4.4 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

เมื่อสตาร์ชถูกให้ความร้อนที่มีน้ำปริมาณที่มากพอ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Diferential Scanning Calorimetry จะพบการเปลี่ยนแปลงของเอนโดเทอร์มเป็นรูปแบบการดูดความร้อน ซึ่งแสดงถึงการหลอมละลายในส่วนผลึกของสตาร์ช โดยสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีรูปแบบเอนโดเทอร์มดังภาพที่ 4-23 ถึง 4-25



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

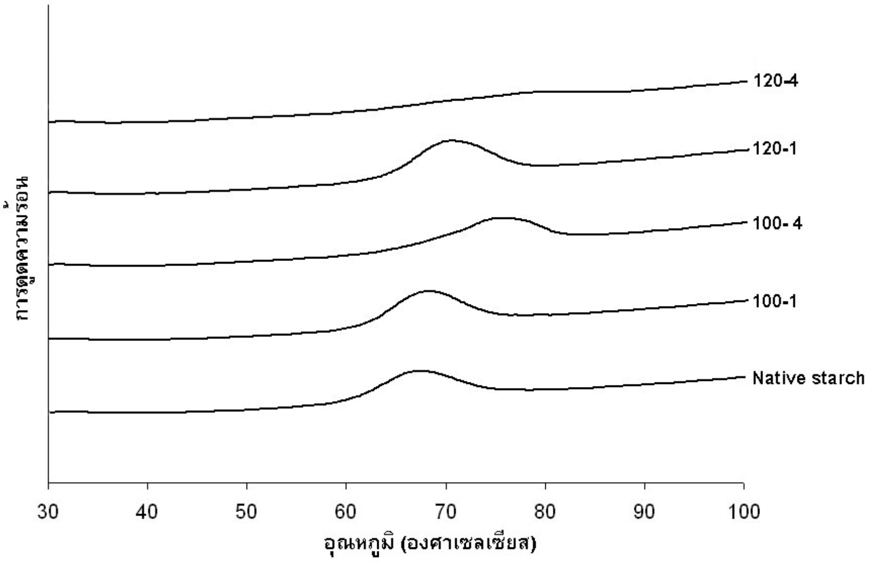
ภาพที่ 4-23 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)



ภาพที่ 4-24 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

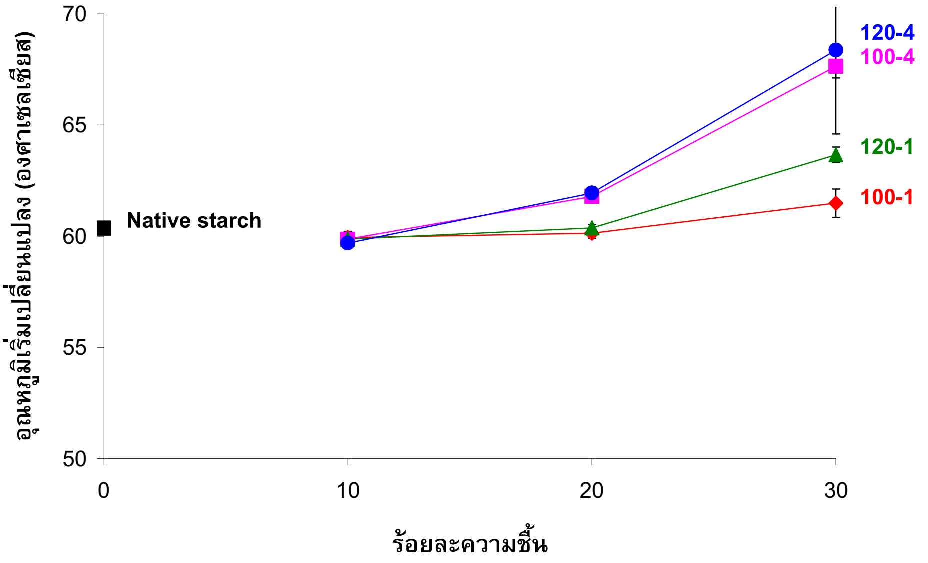
รูปแบบเอนโดเทอร์มของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรมีรูปแบบเป็นพีคเดี่ยว ในการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 จะพบความเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟโดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งของพีค และพบว่าในการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 เส้นกราฟมีลักษณะของพีคที่หายไปดังภาพที่ 4-25 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Lu และคณะ (1996) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของพีคที่หายไปของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวถูกทำลายได้โดยง่ายเมื่อมีการดัดแปรที่ความร้อนสูง



ภาพที่ 4-25 รูปแบบการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

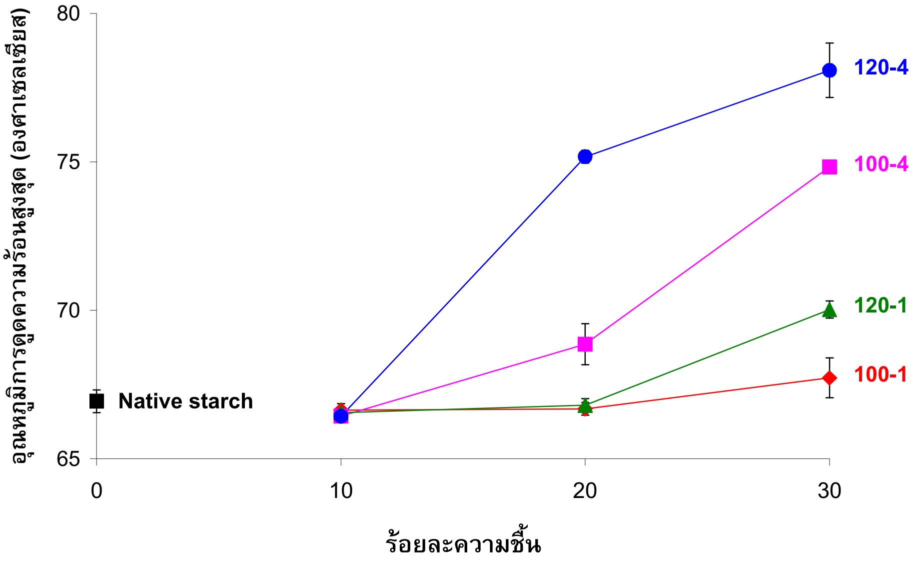
จากกราฟเอนโดเทอร์มของสตาร์ชที่ได้ทำให้ทราบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวส่งผลให้ค่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) อุณหภูมิการดูดความร้อนสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อมีการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 จากภาพที่ 4-26 ถึง 4-28 และตารางผนวกที่ ข-3 โดยพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า T_0, T_p และ T_c ที่สูงขึ้นมากกว่าที่สภาวะอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในแกรนูลสตาร์ชทั้งในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐานของสตาร์ช โดยการดัดแปรที่ใช้ความร้อนสูงร่วมกับการเติมน้ำทำให้เกิดการหลอมละลายของส่วนอสัณฐานและส่วนผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือการเกิดเจลาทิไนเซชัน เกลียวคู่ภายในโครงสร้างผลึกเกิดการแตกสลายและเกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่วนอสัณฐานเกิดการพองตัวและส่วนผลึกที่เหลือเกิดความเครียดส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และอาจเกิดจากการดัดแปรส่งผลให้เกิดการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะไมโลส ซึ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ภายในส่วนของอสัณฐาน จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ส่วนอสัณฐานเกิดการพองตัวและเกิดการทำลายโครงสร้างผลึกได้ (Hoover และคณะ, 1996)



ภาพที่ 4-26 อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

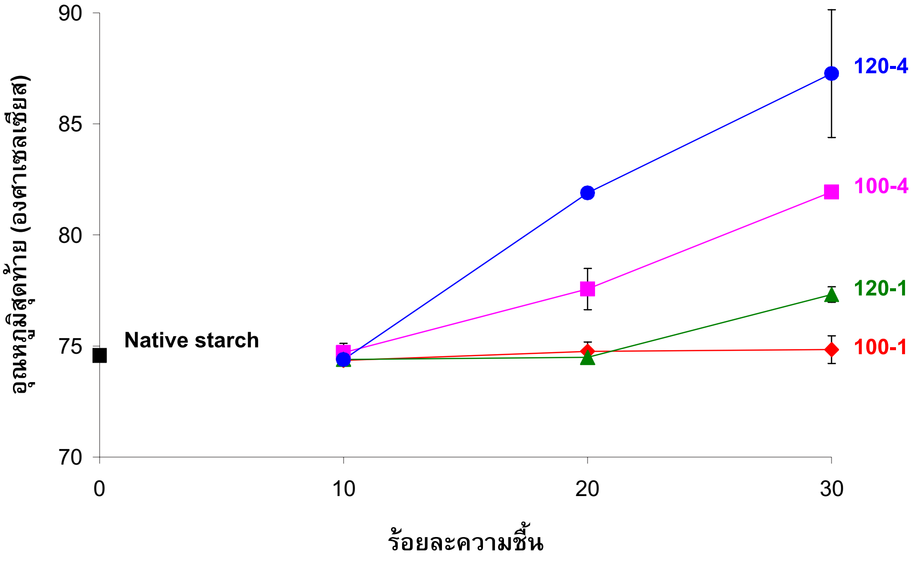
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ความแตกต่างกันของอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช เกิดจากปัจจัย 3 อย่างคือ (1) โครงสร้างโมเลกุลในส่วนอะไมโลเพกติน ได้แก่ความยาวของสายโซ่ และจำนวนกิ่งของอะไมโลเพกติน (2) ส่วนประกอบของสตาร์ช คือสัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน ปริมาณการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิปิด สายโซ่อะไมโลส และปริมาณฟอสฟอรัส (3) รูปแบบของแกรนูลสตาร์ช ซึ่งได้แก่สัดส่วนของส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน (Gunaratne และคณะ, 2002)



ภาพที่ 4-27 อุณหภูมิการดูดความร้อนสูงสุด (T_p) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

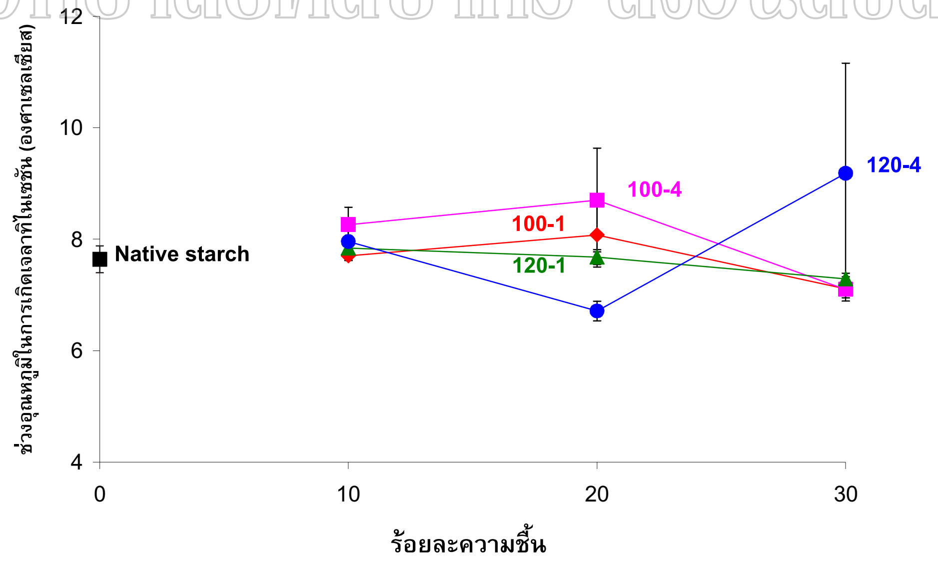
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



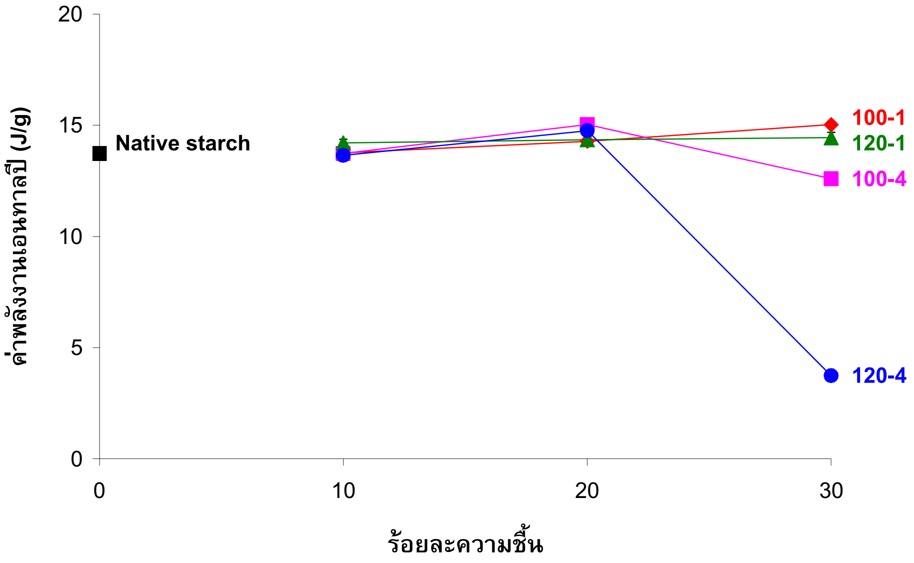
ภาพที่ 4-28 อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรไม่มีความแตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ดังตารางผนวกที่ ข-3 และภาพที่ 4-29 ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Hoover และคณะ (1996) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวในบางสภาวะของการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น โดยให้เหตุผลว่าการดัดแปรทำให้เกิดอันตรกิริยาของสายอะไมโลเพกตินแต่ไม่มีผลต่อการเกิดผลึกใหม่ ส่วนการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะ 20-100-4 และ 30-120-4 มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลในส่วนอสัณฐานในระหว่างการดัดแปรทำให้เกิดโครงสร้างผลึกใหม่หรือเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกเดิม และเกิดโครงสร้างผลึกขนาดเล็กที่มีความสมบูรณ์ขึ้นภายในแกรนูล (Donovan และคณะ, 1983) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Perera และคณะ (1997) ที่พบว่าช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นมีค่ากว้างขึ้น เนื่องจากต้องทำลายโครงสร้างผลึกจากการเกาะเกี่ยวกันของสายโมเลกุลระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส และ/หรือระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลเพกติน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีเสถียรภาพต่างกัน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-29 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)



ภาพที่ 4-30 พลังงานเอนทาลปี (ΔH) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

พลังงานเอนทาลปี (ΔH) เป็นพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกในการเกิดเจลาทิไนเซชัน โดยค่าเอนทาลปีสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร ดังตารางผนวกที่ ข-3 และภาพที่ 4-30 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Hoover และคณะ (1996) ที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น ซึ่งเกิดจากสายเกลียวคู่ในส่วนอะไมโลเพกตินไม่เกิดการเสื่อมสลายและไม่ถูกทำลายภายใต้สภาวะในการดัดแปร ถึงแม้ว่าการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-4 และ 10-120-1 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์โดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรทั้งสองสภาวะนี้มีร้อยละความเป็นผลึกที่มากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรที่สภาวะนี้ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลเพกตินและเกิดโครงสร้างของผลึกใหม่มากขึ้น แต่ผลึกที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์และถูกหลอมละลายได้เมื่อรวมตัวกับน้ำและความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ส่วนการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้ค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) มีค่าสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างส่วนอะไมโลเพกตินเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีจำนวนมากกว่าเดิม และการดัดแปรยังส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรงสมบูรณ์มากขึ้น ส่วนการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 พบว่ามีค่าเอนทาลปีที่ลดลง

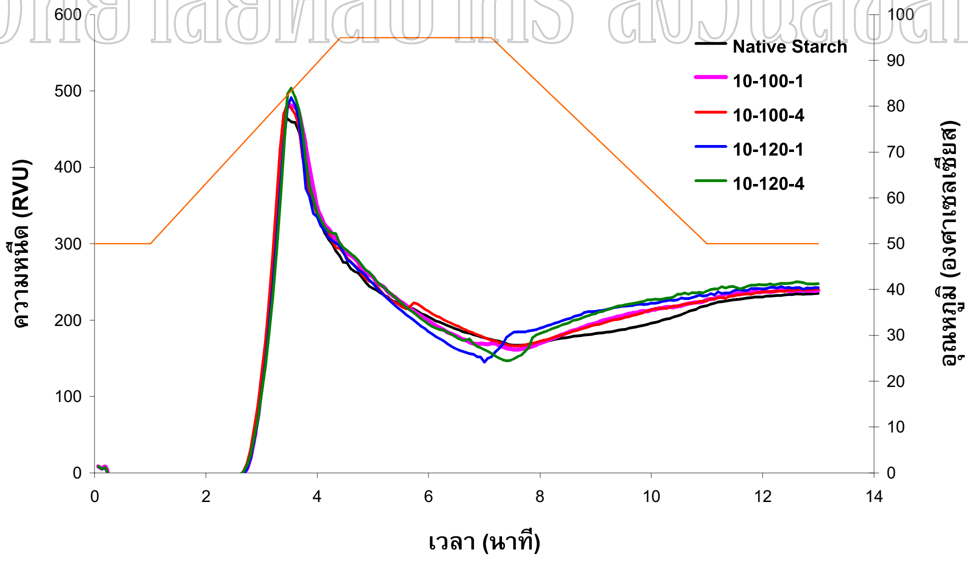
เป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรที่สภาวะนี้ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน (partial gelatinization) โครงสร้างในส่วนผลึกที่ไม่สมบูรณ์และส่วนอสัณฐานถูกทำลายในระหว่างการดัดแปร จึงทำให้มีจำนวนผลึกลดลงซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยพบว่าการดัดแปรที่สภาวะนี้ส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก (ตารางผนวก ข-1) และการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึกจากการเปลี่ยนแปลงของเกลียวคู่ในส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นผลึกโดยเกลียวคู่อาจเกิดการคลายตัวออกหรือหลอมละลายในระหว่างการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช (Adebowale และคณะ, 2003) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Donavan และคณะ, 1983; Stute 1992; Lu และคณะ, 1996; Perera และคณะ, 1997; Miyoshi, 2002 และ Gunaratne และคณะ, 2002 ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทาลปีที่ลดลงของสตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวโพด และแป้งข้าว ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

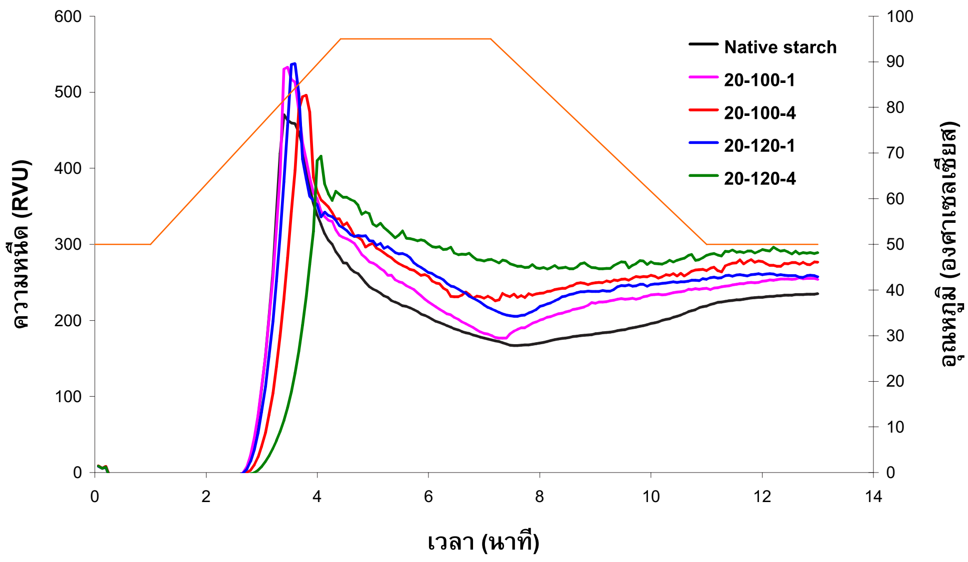
4.5 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

การดัดแปรสตาร์ชส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) ดังภาพที่ 4-31 ถึง 4-33 และตารางผนวกที่ ข-4 ซึ่งการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 และ 20 ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรดังตารางผนวกที่ ข-4 แต่เมื่อเพิ่มสภาวะในการดัดแปรที่สูงขึ้น คือที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิในการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง (20-120-4) จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดโดยอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีค่าสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามสภาวะของอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปรที่เพิ่มขึ้น (30-100-1, 30-100-4, 30-120-1 และ 30-120-4) เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นและค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดพบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้นตามสภาวะการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สูงขึ้น ดังภาพที่ 4-34

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

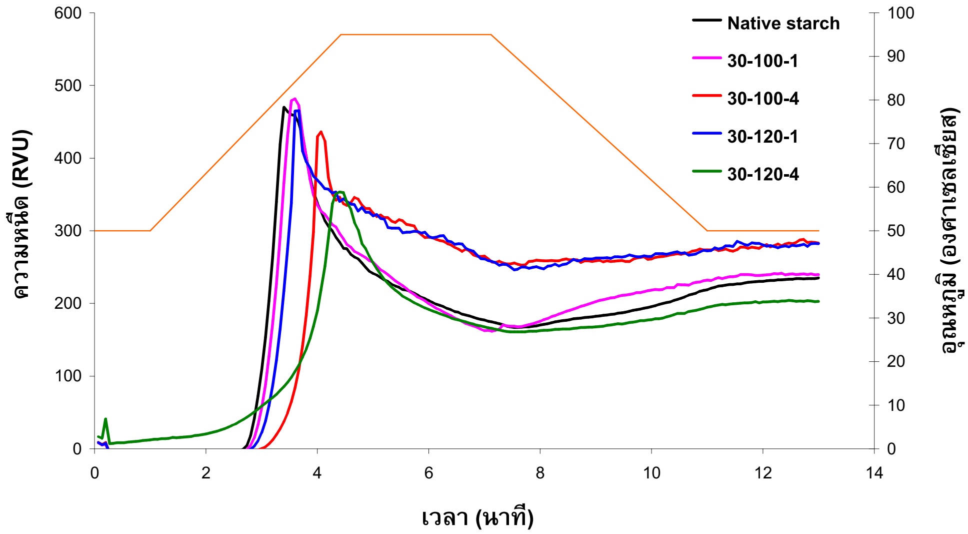


ภาพที่ 4-31 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

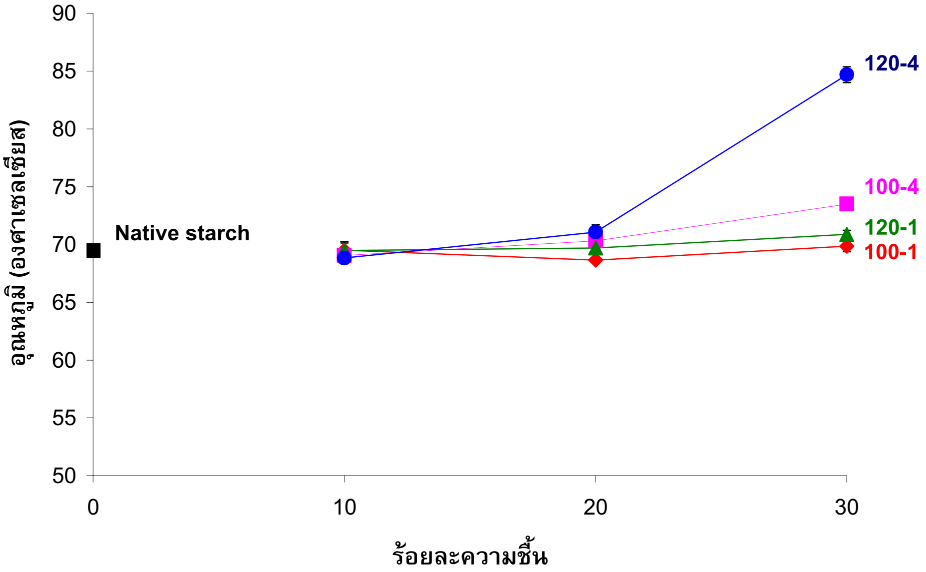


ภาพที่ 4-32 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-33 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA



ภาพที่ 4-34 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปร ที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการให้ความร้อนและความชื้นในการดัดแปรทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ทำให้ไม่เอื้ออำนวยต่อการเกิดเจลาทิไนเซชัน กล่าวคือ การดัดแปรทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอะไมโลเพกตินที่เป็นส่วนผลึกในสตาร์ชแกรนูลเกิดการคลายเกลียวของเกลียวคู่และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ส่งผลให้มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น (ผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น) แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลมีความแข็งแรงมากขึ้น ยากต่อการถูกทำลายจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำลายโครงสร้างภายในก่อนที่จะเกิดเจลได้ (Eliasson, 1980)

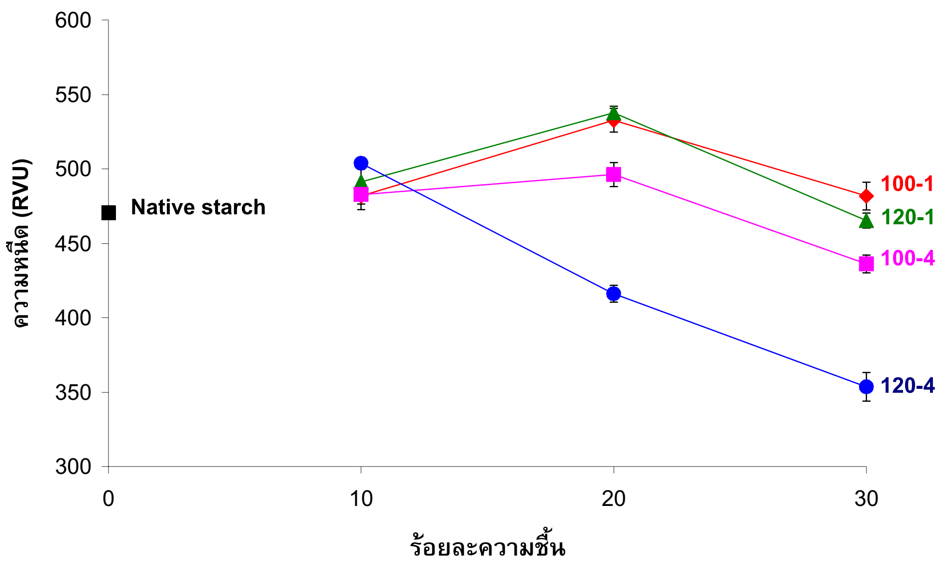
ปกติสตาร์ชแกรนูลตามธรรมชาติจะไม่ละลายในน้ำเย็นเนื่องจากมีการเรียงตัวกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นร่างแหผลึก แต่สตาร์ชสามารถละลายน้ำได้เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชที่มีน้ำปริมาณมากเกินพอ โมเลกุลของแป้งจะถูกกระทบกระเทือนพันธะไฮโดรเจนจะแยกออกจากกัน ทำให้มีบริเวณที่เกิดพันธะไฮโดรเจนรวมตัวกับน้ำได้ การซึมเข้าของน้ำทำให้สายโซ่ในโมเลกุลของสตาร์ชแยกออกจากกันจากการคลายเกลียวของเกลียวคู่ทำให้มีขนาดสั้นลง และความเป็นผลึกลดลง สตาร์ชจึงสามารถละลายน้ำได้เกิดการพองตัวและเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ คือมีการรวมตัวยึดกันระหว่างแกรนูลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเจลที่มีความหนืด หรือการเกิดเจลาทิไนเซชัน แต่การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียว

ซึ่งมีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง มีโครงสร้างผลึกจากอะไมโลเพกติน เมื่อมีการให้ความชื้นกับสตาร์ช น้ำจะไม่สามารถเข้าไปแทรกในโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงได้ และเมื่อมีการให้ความร้อนที่สูงจะทำให้น้ำในส่วนรอบ ๆผลึกนั้นเกิดการระเหยออกอย่างรวดเร็ว และความร้อนยังทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในผลึกเกิดความแข็งแรงจับกันแน่นมากยิ่งขึ้น ผลึกจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น และความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนในสตาร์ชแกรนูลยังมีผลมาจากการยึดเกาะกันระหว่างสายอะไมโลสและการจับกันของอะไมโลสกับลิปิดเกิดเป็นอะไมโลสลิปิดคอมเพล็ก น้ำจึงเข้ารวมตัวกับพันธะภายในโมเลกุลได้ไม่มากนักจึงทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวได้เล็กน้อย จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการที่จะทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดที่เพียงพอในการเกิดเจล ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Hoover และคณะ (1996) ที่พบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวสูงขึ้นตามสภาวะการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นที่สูงขึ้นและให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับสตาร์ชมันฝรั่ง (Kulp และคณะ, 1981; Lorenz และคณะ, 1982; Hoover และคณะ, 1994) สตาร์ชถั่ว (Hoover และคณะ, 1994; Adebowale และคณะ, 2003)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีค่าสูงขึ้นตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้นเนื่องจาก น้ำและความร้อนที่สูงจะมีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไซเซอร์ (plasticizers) ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature) ในการเปลี่ยนสถานะของส่วนประกอบภายในของสตาร์ชในส่วนของผลึกและส่วนอสัณฐานโดยน้ำจะเป็นตัวหล่อลื่นและแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างภายในสตาร์ชแกรนูลและเข้าไปจับกับพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลสตาร์ชแกรนูล ส่วนความร้อนจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่าง ๆได้ดีขึ้น และความร้อนยังทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เต็มที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยางหรือบางส่วนอาจเกิดการหลอมเหลวในส่วนของผลึกที่ไม่สมบูรณ์ในส่วนอะไมโลเพกติน โดยระยะเวลาการให้ความร้อนที่นานจะช่วยให้โครงสร้างภายในสตาร์ชในส่วนของอะไมโลเพกตินเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกที่มีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำให้สตาร์ชดัดแปรเกิดเจลได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

เมื่อสตาร์ชเริ่มเกิดเจลและมีการให้ความร้อนสูงขึ้นเรื่อย ๆ สตาร์ชแกรนูลจะเกิดการพองตัว โมเลกุลน้ำอิสระรอบ ๆเม็ดสตาร์ชลดลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากและเกิดความหนืดขึ้น เมื่อสตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้น การพองตัวของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆจนสตาร์ชเกิดการพองตัวอย่างเต็มที่จนเกิดความหนืดสูงที่สุด เรียกว่าค่า pasting temperature สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรส่งผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชมีค่าลดลงดังภาพที่ 4-35



ภาพที่ 4-35 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

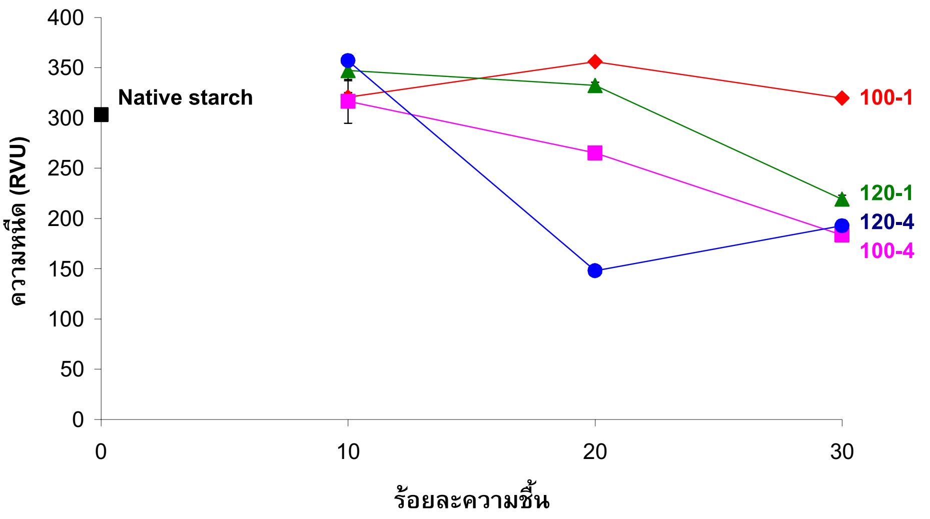
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะที่สูงขึ้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงจากผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสตาร์ชแกรนูลเมื่อได้รับความร้อนและความชื้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-4, 30-100-4, 30-120-1 และ 30-120-4 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางผนวกที่ ข-4) จากการให้ความร้อนกับสตาร์ชเพิ่มขึ้นจาก 50 องศาเซลเซียสเป็น 95 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ภายในแกรนูลสตาร์ช ทำให้มีความเป็นผลึกมากขึ้นภายหลังการดัดแปร ทำให้จำกัดการพองตัวซึ่งมีผลต่อค่าความหนืดของสตาร์ช (Lawal, 2005) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ สตาร์ชมันฝรั่ง (Stute, 1992) สตาร์ชโกโกแยม (Lawal, 2005) สตาร์ชถั่ว (Adebowale และคณะ, 2003) สตาร์ชข้าวโพด (Hoover และคณะ, 1994) สตาร์ชข้าวเหนียวและข้าวเจ้า (Anderson, และคณะ, 2002, 2006) แต่พบว่าสตาร์ชดัดแปรที่สภาวะ 10-100-1, 10-100-4, 10-120-1, 10-120-4, 20-100-1 และ 30-100-1 มีค่าความหนืดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อาจเป็นเพราะกำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-1, 10-100-4, 10-120-1, 10-120-4, 20-100-1 และ 30-100-1 ค่อนข้างมาก การที่สตาร์ชมีร้อยละการพองตัวที่มากเมื่อมีการให้

ความร้อนแก่สตาร์ชที่มีปริมาณน้ำมากพอโครงสร้างภายในของสตาร์ชจะจับกันอย่างหลวมๆ เกิดการพองตัวได้อย่างเต็มที่และเมื่อได้รับแรงเฉือนจากการกวนของเครื่อง RVA แรงเฉือนจะทำลายโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชทำให้สตาร์ชเกิดการแตกออกได้ง่ายจึงทำให้ค่าความหนืดต่ำกว่าสตาร์ชดัดแปร ส่วนสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่มีค่าการพองตัวที่ต่ำ เกิดการพองตัวน้อยกว่าเมื่อได้รับความร้อนและปริมาณน้ำที่มากพอ จะสามารถทนต่อแรงเฉือนได้มากกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ พิณทิพย์ (2547) ที่พบว่าแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น มีค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งจะลดลงก็ตาม

เมื่อสตาร์ชเกิดการพองตัวอย่างเต็มที่และมีความหนืดที่สูงขึ้น และสตาร์ชได้รับการกวนอย่างสม่ำเสมอจะทำให้แกรนูลถูกทำลายเกิดการแตกออกของแกรนูลสตาร์ช ส่วนของเหลวที่สามารถละลายได้ภายในจะถูกละลายออกมาทำให้สตาร์ชมีความหนืดต่ำ สตาร์ชที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างภายในจะทนต่อแรงเฉือนได้ดีกว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างที่อ่อนแอซึ่งวัดความแข็งแรงของสตาร์ชแกรนูลได้จากค่าความหนืดลดลง (breakdown) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความอ่อนแอของสตาร์ชแกรนูล (Collado และคณะ, 2001) โดยวัดการแตกสลายของสตาร์ชแกรนูลที่พองตัวเมื่อได้รับแรงเฉือนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าความหนืดลดลงที่มากแสดงว่าสตาร์ชมีความอ่อนแอมากกว่าสตาร์ชที่มีค่าความหนืดลดลงที่น้อยกว่า สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงที่ลดลง ดังภาพที่ 4-36

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

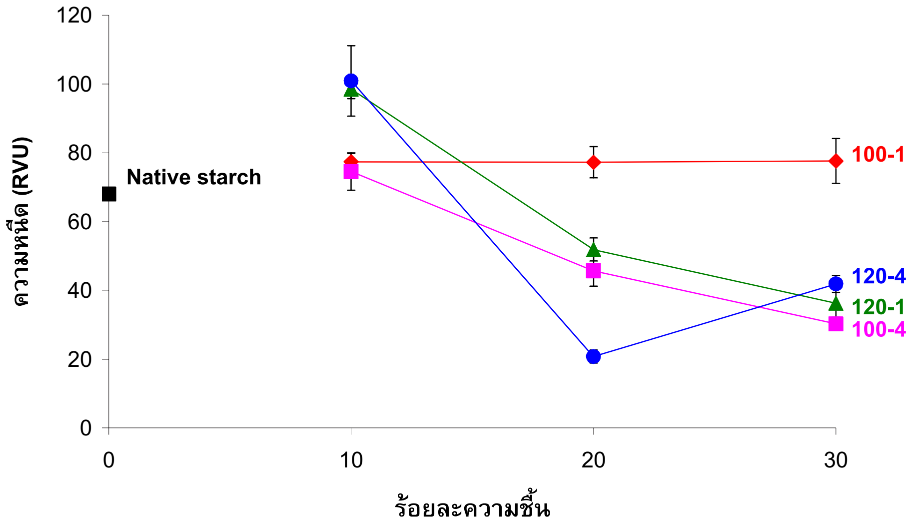


ภาพที่ 4-36 ความหนืดลดลง (breakdown) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีค่าความหนืดลดลงที่น้อยกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรซึ่งเป็นผลมาจากที่สภาวะการดัดแปรดังกล่าวทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรงมากขึ้นจากการที่ผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้นทำให้สตาร์ชทนต่อแรงเฉือนได้มากขึ้น และค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชดัดแปรที่สภาวะดังกล่าวมีค่าความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การดัดแปรสตาร์ชที่สภาวะดังกล่าวทำให้สตาร์ชซึ่งพองตัวเต็มที่มีความแข็งแรง ทนต่อแรงเฉือนและความร้อนได้มากขึ้น ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 มีแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงที่มากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวทำให้สตาร์ชเมื่อมีการพองตัวเต็มที่แล้วจะสามารถทนต่อความร้อนและแรงเฉือนได้น้อยลง อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอะไมโลเพกตินภายหลังการดัดแปรส่งผลให้แกรนูลที่พองตัวมีความเปราะบางมากขึ้น (พิณทิพย์, 2004) สอดคล้องกับการทดลองของ Anderson และคณะ(2002), (2006) ที่พบการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของค่าความหนืดลดลงในสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น และให้ผลเช่นเดียวกับ สตาร์ชโกโกแยม (Lawal, 2005) และสตาร์ชถั่ว (Adebowale และคณะ, 2003)

เมื่อสตาร์ชแกรนูลถูกทำให้แตกออกและความหนืดลดลงเรื่อยๆ และเมื่อลดอุณหภูมิจาก 95 เป็น 50 องศาเซลเซียส จะทำให้สตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้อีก วัดได้จากค่าเซตแบค ค่าเซตแบคเป็นค่าที่ใช้วัดการเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการขับน้ำออกของสตาร์ชซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย ความหนืดของสารละลายแป้งจึงเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่อุ้มน้ำได้ ความหนืดและความคงตัวมากขึ้น และมีลักษณะเป็นเจลเหนียว (กล้าณรงค์, 2546) ซึ่งค่าเซตแบคเป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดต่ำสุดและค่าความหนืดสุดท้าย สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง ดังภาพที่ 4-37

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-37 เซตแบค (setback) ของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

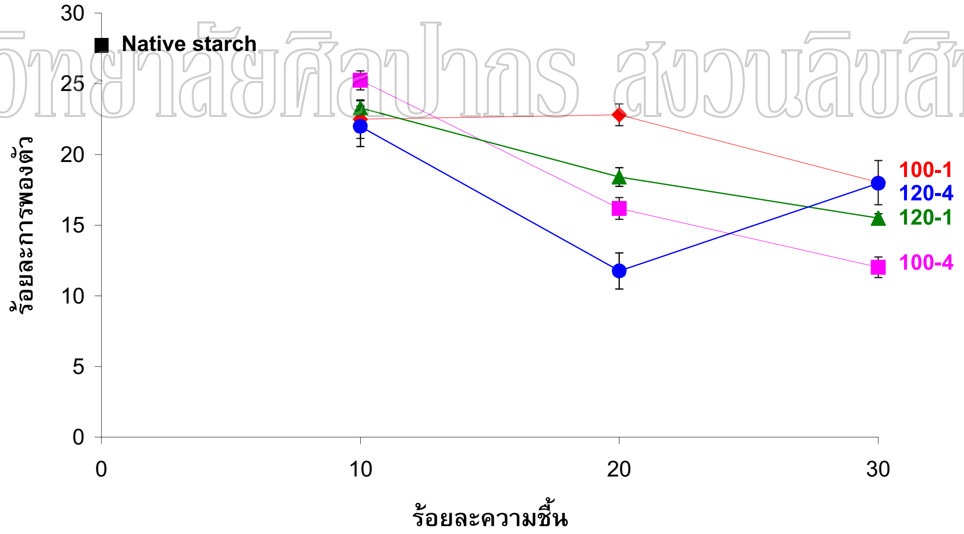
ค่าเซตแบคในการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 ทุกสภาวะของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และสูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร แสดงว่าในการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 ทำให้สตาร์ชสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai (2001) และ พิณทิพย์ (2547) ที่พบว่า การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวทำให้ความหนืดในช่วงทำให้เย็นของแป้งข้าวเหนียวมีค่าสูงขึ้น การที่สตาร์ชดัดแปรมีค่าเซตแบคที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรทำให้สตาร์ชเกิดความเสียหาย แกรนูลสตาร์ชถูกทำลายโครงสร้างผลึกถูกทำลายบางส่วน เมื่อมีการให้ความร้อนและน้ำในปริมาณที่มากพอในการวัดความหนืด น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปจับกับพันธะระหว่างสายของอะไมโลสกับอะไมโลสและอะไมโลสกับอะไมโลเพกตินภายในโมเลกุลได้มากขึ้น เมื่อมีการให้ความร้อนจะสามารถทำลายพันธะ ทำให้น้ำเข้าไปจับกับพันธะของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินอย่างหลวมๆ ทำให้เกิดการพองตัวและเกิดเจลาทิไนเซชัน เมื่อแกรนูลถูกทำให้แตกออกด้วยแรงเฉือน โครงสร้างภายในคือส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะถูกละลายออกมา เมื่อลดอุณหภูมิลงส่วนของอะไมโลสจะเข้ามาจับกัน ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ความหนืดสุดท้ายจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเซตแบคสูงขึ้น และพบว่าที่สภาวะในการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีแนวโน้มของค่าเซตแบคที่ลดลง แสดงถึงการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะดังกล่าวทำให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวที่ลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งที่สภาวะการดัดแปรดังกล่าวจะมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด และค่าความหนืดสูงสุดที่มากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่าน

การดัดแปร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การดัดแปรสตาร์ชทำให้สตาร์ชมีความแข็งแรงของสตาร์ชแกรนูลที่มากขึ้น น้ำจะแทรกซึมเข้าไปจับกับพันธะภายในยาก เกิดการละลายของส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพกตินน้อย ทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นไปได้ยากกว่าค่าเซตแบคจึงมีค่าที่ต่ำกว่า ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะที่รุนแรงที่สุดคือ 30-120-4 จะมีค่าเซตแบคที่สูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-4, 30-100-4 และ 30-120-1 แต่ยังต่ำกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร เป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นและความร้อนสูงร่วมกับระยะเวลาการให้ความร้อนที่นานทำให้สตาร์ชข้าวเหนียวเกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน (partial gelatinization) เมื่อมีการละลายน้ำและให้ความร้อนในการวัดความหนืด ทำให้สตาร์ชในส่วนที่เกิดเจลเกิดการรวมตัวกับน้ำได้ดีขึ้น เกิดการละลายของสารต่าง ๆภายในสตาร์ชแกรนูลได้ดีขึ้นซึ่งก็รวมถึงอะไมโลสที่มีการละลายมากขึ้น เมื่อสตาร์ชเกิดการพองตัวและแตกออกอะไมโลสจึงเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

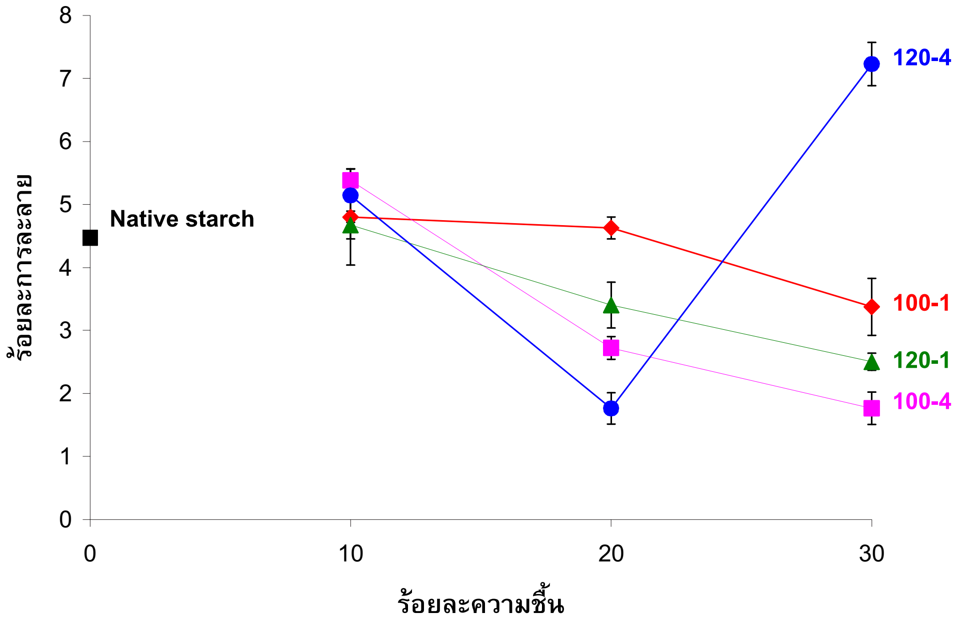
4.6 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อค่าการพองตัวและการละลาย

จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าสตาร์ชส่วนใหญ่มีค่าความหนืดสูงสุดที่อุณหภูมิช่วง 80-90 องศาเซลเซียส จึงได้ทำการศึกษาการพองตัวของสตาร์ชที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร โดยการดัดแปรสตาร์ชในทุกสภาวะของการศึกษาส่งผลให้ค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร จากตารางที่ พบว่า สตาร์ชดัดแปรมีค่าร้อยละการพองตัวที่ลดลงและแตกต่างกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายที่ระดับความชื้นต่าง ๆมีแนวโน้มที่ลดลงดังภาพที่ 4-38 ถึง 4-39



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-38 ร้อยละการพองตัวของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)



ภาพที่ 4-39 ร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Hoover และคณะ (1995) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าการพองตัวและค่าการละลายที่ลดลงในสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูงที่ดัดแปรด้วยความร้อนชื้น และพบว่าให้ผลเช่นเดียวกับสตาร์ชข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต โดยให้เหตุผลว่าค่าการพองตัวที่ลดลงเป็นผลมาจากการการรวมตัวกันของอะไมโลสและลิปิดเกิดเป็นอะไมโลสลิปิดคอมเพล็ก และเกิดจากการที่พันธะภายในสตาร์ชแกรนูลเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่มีความแข็งแรงมากกว่าเดิมโครงสร้างภายในแข็งแรงมากขึ้นทำให้จำกัดการพองตัวของสตาร์ช ซึ่งผลที่ได้เหมือนกันกับ สตาร์ชถั่ว (Adebowale และคณะ, 2003) สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียว (Anderson, 2002, 2006) และสตาร์ชมันฝรั่ง (Harry และคณะ, 1959)

เมื่อมีการให้ความร้อนกับสตาร์ชแกรนูลที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ จะเกิดการส่งผ่านของพลังงานความร้อนและความชื้นส่งผลให้แกรนูลเกิดการพองตัวซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียส่วนที่เป็นผลึกในสตาร์ชแกรนูลจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำเข้าไปได้ (Whister, 1964) ซึ่งอะไมโลเพกตินภายในสตาร์ชแกรนูลมีความสำคัญอย่างยิ่งกับการพองตัวของสตาร์ชธัญพืช (Lii และคณะ, 1990) โดยการพองตัวจะเกิดขึ้นในส่วนของอะไมโลเพกตินที่เป็นส่วนของผลึกที่ไม่สมบูรณ์และส่วนอสัณฐาน น้ำสามารถเคลื่อนที่เข้า

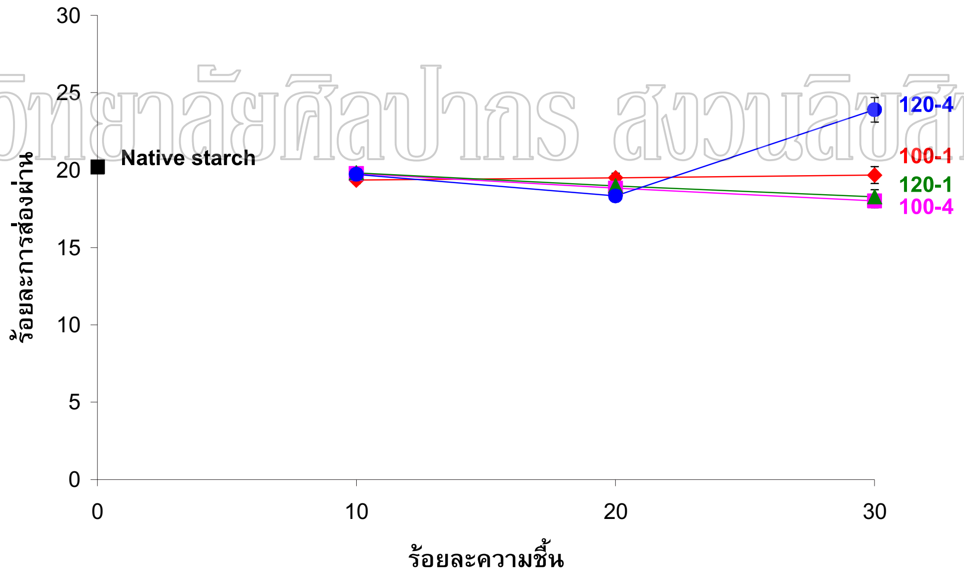
ไปจับกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินทำให้โครงสร้างภายในเกิดการขยายตัวออกเป็นโครงสร้างร่างแหและเกิดการพองตัว สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรความร้อนและความชื้นจะทำให้เกิดการแยกตัวของเกลียวคู่และทำลายโครงสร้างผลึกจึงเกิดการหลอมเหลวของผลึกที่ไม่สมบูรณ์และส่วนอสัณฐาน ทำให้ปริมาณผลึกที่ไม่สมบูรณ์และส่วนอสัณฐานลดลงจึงไม่มีบริเวณที่น้ำจะเข้าไปเชื่อมต่อระหว่างพันธะและเกิดการพองตัวได้ และการดัดแปรยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและแรงยึดเหนี่ยวภายในสตาร์ชแกรนูลทำให้เกิดการจับตัวของเกลียวคู่ของกลุ่มของสายอะไมโลเพกตินและอะไมโลสในส่วนของผลึกที่สมบูรณ์ ทำให้ผลึกมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งมีผลในการจำกัดการพองตัวและการละลาย และผลของการจับกันของอะไมโลสกับลิปิดเป็นอะไมโลสลิปิดคอมเพล็กทำให้ค่าการพองตัวลดลงในสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปร เมื่อสตาร์ชเกิดการพองตัวอย่างเต็มที่และได้รับอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดการละลายออกของส่วนประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ละลายออกมา ซึ่งเป็นส่วนของแข็งทั้งหมดในสารละลายและส่วนของอะไมโลสสายสั้นๆ สตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงจะมีความสามารถในการละลายที่สูงด้วย สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าการพองตัวและค่าการละลายที่ลดลง สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีแนวโน้มของค่าการละลายที่ลดลง (ภาพที่ 4-39) อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรทำให้โครงสร้างอะไมโลสภายในเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และมีความแข็งแรงมากกว่าเดิม ทำให้เกิดการละลายออกมาได้น้อย

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะ 30-120-4 มีค่าร้อยละการละลายที่สูงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชที่สภาวะนี้ทำให้สตาร์ชข้าวเหนียวเกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน (partial gelatinization) จากการเปลี่ยนแปลงของกลาสทรานซิชันในการใช้สภาวะในการดัดแปรที่สูงคือความชื้นและความร้อนซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไทเซอร์ (plasticizers) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในส่วนอะไมโลเพกตินทำให้ผลึกเกิดความเสียหายบางส่วน และบางส่วนอาจเกิดเป็นอะไมโลสเล็กๆจากการแตกสลายของอะไมโลเพกตินทำให้เกิดการละลายของอะไมโลสออกมามากกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร

4.7 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อความใสของสตาร์ชสุก

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นมีผลทำให้ความใสสตาร์ชสุกซึ่งวัดได้จากค่าร้อยละการส่องผ่าน (% Transmittance) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีค่าร้อยละการส่องผ่านที่ลดลงแตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางผนวกที่ ข-6 และการดัดแปรสตาร์ชที่ความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 ทำให้ค่าร้อยละการส่องผ่านมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4-40 แต่พบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่ระดับ 30-120-4 จะมีผลทำให้ค่าร้อยละการส่องผ่านเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-40 ความใสสตาร์ชสุกของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ความใสสตาร์ชสุกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการพองตัวของสตาร์ชสุก เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำมากพอ ความร้อนจะทำให้โครงสร้างภายในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเกิดการกระทบกระเทือน พันธะระหว่างโมเลกุลจะถูกแยกออกจากกัน ทำให้มีบริเวณที่เกิดพันธะไฮโดรเจนที่รวมตัวกับน้ำได้ การซึมเข้าของน้ำทำให้โมเลกุลของสตาร์ช

แยกออกจากกันและมีขนาดสั้นลง ส่วนที่เป็นผลึกลดลง สตาร์ชเกิดการพองตัวและเกิดเจลซึ่งแสงสามารถทะลุผ่านแกรนูลได้ ซึ่งการที่สตาร์ชเกิดการพองตัวมากจะทำให้แสงส่องผ่านได้มากแทนที่จะเกิดการสะท้อนกลับหรือกระจายของแสง (Craig และคณะ, 1989)

ความใสของสตาร์ชสุกยังสัมพันธ์กับการกระจายตัวของสตาร์ชและแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Bhandari และคณะ, 2002) การเกิดรีโทรเกรเดชันทำให้การส่องผ่านของแสงลดลงจากการที่โมเลกุลอะไมโลสเกิดการรวมตัวกันใหม่และมีความหนาแน่นของโมเลกุลมากขึ้นเมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการสะท้อนกลับและกระเจิงของแสง และการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลภายหลังการเกิดเพสต์ยังส่งผลให้ค่าร้อยละการส่องผ่านลดลง เนื่องจากการเกิดบริเวณที่โมเลกุลรวมตัวกันหรือ junction zone มีจำนวนมากก็มีผลทำให้เกิดการสะท้อนกลับและการกระเจิงของแสง ขนาดของแกรนูลที่พองตัวก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง โดยพบว่าการพองตัวของแกรนูลที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นแกรนูลชิ้นส่วนเล็กๆที่เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่หลังการเกิดเพสต์ จะมีผลทำให้ร้อยละการส่องผ่านลดลง เนื่องจากแกรนูลชิ้นส่วนเล็กๆจะทำให้เกิดการสะท้อนและกระเจิงของแสง เนื่องจากความแตกต่างของรูปร่างที่ผิดปกติของแกรนูลที่เกิดการพองตัว นอกจากนี้ความใสของสตาร์ชสุกยังขึ้นกับปัจจัยอีกหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้น ความเป็นกรดด่าง และการดัดแปรสตาร์ช (Bhandari และคณะ, 2002)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีความใสน้อยกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรเนื่องจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีการพองตัวที่มากกว่าสตาร์ชดัดแปร (ตารางผนวกที่ ข-6) ซึ่งการพองตัวของสตาร์ชสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการส่องผ่านของแสงและความใสของสตาร์ช และในการดัดแปรสตาร์ชความร้อนและความชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลและแกรนูลสตาร์ช ทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างภายในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน โดยการดัดแปรสตาร์ชทำให้โครงสร้างผลึกซึ่งเป็นส่วนอะไมโลเพกตินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ผลึกมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและทำลายส่วนอสัณฐานทำให้น้ำเข้าไปได้ยาก การพองตัวถูกจำกัด ส่งผลให้แสงส่องผ่านเข้าไปได้น้อย ค่าความใสจึงลดลง และความเสียหายของแกรนูลสตาร์ชหลังการดัดแปรยังส่งผลให้ความใสของสตาร์ชลดลงจากการพองตัวของแกรนูลสตาร์ชที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ขัดขวางการส่องผ่านของแสง และอาจเป็นผลมาจากการที่สตาร์ชเกิดการเย็นตัวลงเมื่อทำการวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง จะเกิดการรวมตัวกันใหม่ของโมเลกุลภายในแกรนูลสตาร์ชเกิดเป็นบริเวณที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมต่อกัน (junction Zone) ซึ่งส่งผลให้แสงส่องผ่านได้น้อยทำให้ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงลดลง

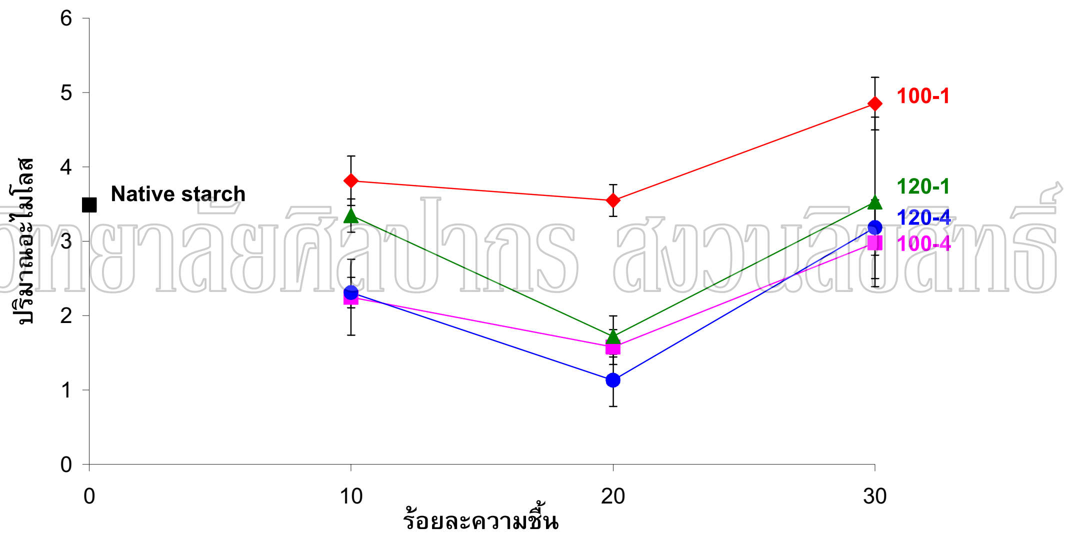
การดัดแปรสตาร์ชที่สภาวะ 30-120-4 มีค่าร้อยละการส่องผ่านที่มากที่สุด (ตารางผนวกที่ ข-6) ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าร้อยละการพองตัวของสตาร์ช (ตารางผนวกที่ ข-5) อาจเป็นผลมาจากการที่สตาร์ชได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ความชื้นสูง และระยะเวลาที่นาน ปริมาณน้ำที่มากจะเข้าไปจับกับพันธะภายในสตาร์ชได้เต็มที่และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการ

หลอมเหลวของส่วนอสัณฐานมาก ทำให้สตาร์ชเกิดเจลบางส่วน (partial gelatinization) ซึ่งสตาร์ชส่วนที่เกิดเจลจะสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าสตาร์ชดิบ ทำให้เกิดการละลายได้มากขึ้น (กล้าณรงค์, 2546) โครงสร้างภายในเมื่อดูดซับน้ำมากจะเกิดการขยายตัวของโครงสร้างได้มาก ทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้มาก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

4.8 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อปริมาณอะไมโลส

การดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงดังภาพที่ 4-41 แต่เมื่อพิจารณาปริมาณอะไมโลสดังตารางผนวกที่ ข-7 พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณอะไมโลสที่ไม่แตกต่างกันกับสตาร์ชปกติ ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 10-100-4 10-120-4 20-100-4 20-120-1 และ 20-120-4 ที่มีปริมาณอะไมโลสที่ลดลงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวปกติ และที่สภาวะ 30-100-1 มีปริมาณอะไมโลสที่มากกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาพที่ 4-41 ร้อยละอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

สตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณอะไมโลสลดลง อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลส โดยโมเลกุลอะไมโลสอาจเกิดการจับตัวกันและรวมตัวกันกับส่วนอะไมโลเพกตินเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ซึ่งสังเกตได้จากค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชที่สภาวะการดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4-21 หรืออาจเกิดจากการรวมตัวกันของอะไมโลสกับอะไมโลเพกตินทำให้ส่วนผลึกของอะไมโลเพกตินมีความเป็นผลึกที่แข็งแรงกว่าเดิม ส่วนปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการใช้ความร้อนและความชื้นในการดัดแปรทำให้สายโซ่ด้านนอกของอะไมโล

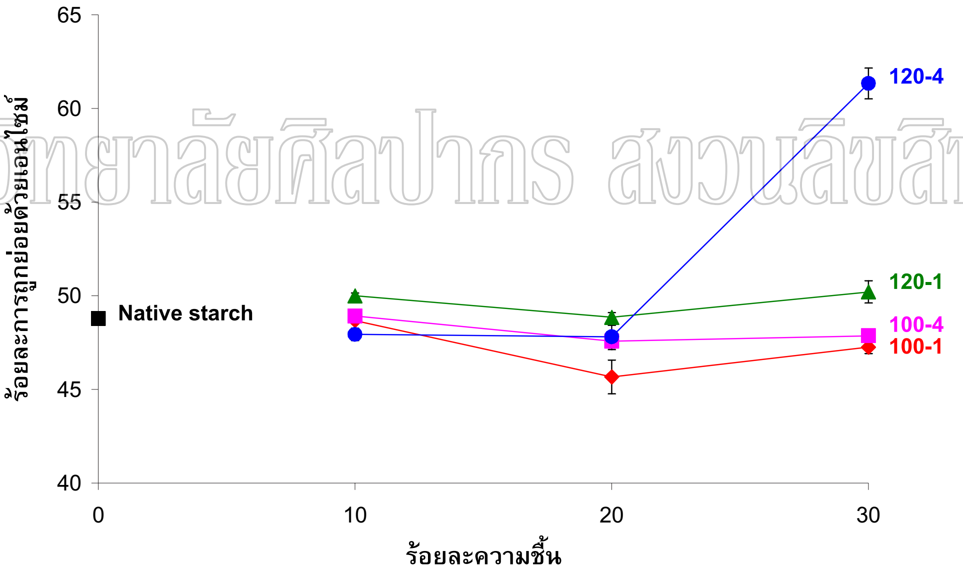
เพกติน ถูกทำลายเกิดเป็นสายโซ่สั้นๆ ซึ่งเป็นสายของอะไมโลสมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น (Lu และคณะ, 1996) ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Miyoshi (2002) ที่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้นภายหลังการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น และจากการศึกษาของ Leach และคณะ (1959) พบว่าการสูญเสียอะไมโลส จะลดลงเมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

4.9 ผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นต่อความคงทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น ส่งผลทำให้สตาร์ชมีความคงทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเปลี่ยนแปลงไป จากค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ดังภาพที่ 4-42 สตาร์ชข้าวเหนียวมีร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเพิ่มมากขึ้นตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-100-4 ที่มีค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลดลงมากกว่าที่สภาวะ 20-100-4 และในการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้สตาร์ชมีร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพที่ 4-42 ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10, 20 และ 30 และสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

การทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในการย่อยองค์ประกอบภายในสตาร์ชมี 3 ขั้นตอน (พักตร์ประไพ และคณะ, 2546) ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนเซชันทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ขั้นตอนถัดมาคือการเกิดลิเคอแฟคชัน (Liquefaction) เป็นขั้นตอนการลดความหนืดของสตาร์ชที่เกิดเจล โดยการย่อยโมเลกุลของ

สตาร์ชแบบสุ่มของลูกโซ่กลูโคส ทำให้แยกเป็นสายสั้นๆ โมเลกุลมีขนาดเล็กลง และความหนืดลดลง ขั้นตอนสุดท้ายเรียกว่า การเกิดแซคคาริฟิเคชัน (saccharification) เป็นขั้นตอนการย่อยแป้งให้เป็นโมเลกุลน้ำตาล ภายหลังจากการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือน้ำตาลที่มีโมเลกุลสูงกว่า ผลผลิตที่ได้คือกลูโคส มอลโตส หรือมอลโตไตรโอส และปัจจัยที่ทำให้สตาร์ชแต่ละชนิดมีความคงทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสแตกต่างกันขึ้นกับ ขนาดสตาร์ชแกรนูล, พื้นที่ผิว, ชนิดของหน่วยเซลล์ (แบบเอ, แบบบี หรือแบบเอบวกบี), สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน, ปริมาณการเกิดอะไมโลสลิปิดคอมเพล็กซ์, ความเป็นผลึกและการกระจายตัวของกิ่งอะไมโลเพกตินระหว่างส่วนอสัณฐานและส่วนผลึกภายในโครงสร้างของอะไมโลเพกติน (Holm และคณะ, 1983, Hoover และคณะ, 1991, Jane และคณะ, 1997 และ Planchot และคณะ, 1997)

จากการวิเคราะห์ความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและสตาร์ชข้าวเหนียวปกติจากค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าสตาร์ชดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 และ 20 มีค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์น้อยกว่าสตาร์ชปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อาจเนื่องมาจากการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้เกิดการเรียงตัวใหม่ภายในโมเลกุลสตาร์ชทำให้สตาร์ชมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าเดิม (Celia และคณะ, 1995) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ช (ตารางผนวกที่ ข-1) โดยสตาร์ชที่มีร้อยละความเป็นผลึกมาก โครงสร้างภายในมีความแข็งแรงจึงทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่สภาวะ 30-120-1 และ 30-120-4 มีความคงทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลดลง จากค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากความชื้นซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติไทเซอร์ (plasticizer) ในการเปลี่ยนสถานะของโครงสร้างภายในจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยางหรือการเกิดเจลาทิไนเซชัน ส่งผลให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยาและเกิดการย่อยได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Celia และคณะ (1995) ที่พบว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวที่ระดับความชื้นที่ร้อยละ 27 สตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากกว่าสตาร์ชดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 24 และร้อยละ 18 ตามลำดับ โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากการดัดแปรที่ความชื้นสูงทำให้เกิดการทำลายแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลสตาร์ช ส่งผลให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสูงกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร อาจเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดความเสียหายที่บริเวณผิวของสตาร์ชแกรนูล ทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น (Planchot และคณะ, 1997) และการดัดแปรสตาร์ชอาจทำให้เกิดการทำลายเกลียวคู่และส่วนอสัณฐานถูกทำลาย ซึ่งการที่เกลียวคู่ถูกทำลายจะทำให้เกิดการคลายเกลียวของเกลียวคู่ ส่งผลให้บริเวณแอคทีฟไซต์

(Active site) ของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ได้ง่ายขึ้น (Gunaratne และคณะ, 2002) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Anderson และคณะ (2002) ที่ศึกษาความคงทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมากขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นส่งผลให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพต่างๆดังนี้

5.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่าการดัดแปรสตาร์ชไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงขึ้นและระดับความชื้นที่สูงขึ้นจะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเกาะรวมตัวกันมากขึ้น

5.2 การเปลี่ยนแปลงสีของสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่าการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี (colorimeter) โดยสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้นในทุกสภาวะที่ทำการศึกษา ยกเว้นที่สภาวะ 30-100-4 และ 30-120-4 ที่มีค่าความสว่างลดลง ส่วนค่าสี a* พบว่าสตาร์ชดัดแปรมีค่า a* ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวปกติ และพบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีความเป็นสีเหลืองมากขึ้นจากค่า b*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

5.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึก โดยยังคงรักษารูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอและปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดิมทั้ง 3 พีค แต่สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรบางสภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของพีคของดิฟแฟรกโตแกรมโดยมีความหนาแน่นของพีคลดลงและจุดสูงสุดของพีคลดลง และเมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของสตาร์ชดัดแปรพบว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นและลดลงกว่าสตาร์ชข้าวเหนียวปกติโดยสตาร์ชดัดแปรที่สภาวะ 20-100-1 มีร้อยละความเป็นผลึกมากที่สุด และที่สภาวะ 30-120-4 มีร้อยละความเป็นผลึกน้อยที่สุด

5.4 การเปลี่ยนแปลงการเกิดเจลาทิไนเซชันเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวปกติและสตาร์ชดัดแปรมีรูปแบบเอนโดเทอร์มแบบดูดความร้อนเป็นพีคเดี่ยว และในการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 จะพบความเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟโดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งของพีค ส่วนการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 เส้นกราฟมีลักษณะของพีคที่หายไป และการดัดแปรสตาร์ชยังส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) อุณหภูมิการดูดความร้อนสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ที่มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อมีการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 โดยพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่าน

การดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า T_0, T_p และ T_c ที่สูงขึ้นมากกว่าที่สภาวะอื่นๆ ส่วนช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรพบว่าไม่มีความแตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวปกติ และค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกในการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร และการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ส่งผลให้ค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) มีค่าสูงขึ้น ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ที่มีค่าพลังงานเอนทาลปีน้อยกว่าสตาร์ชปกติ

5.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) พบว่าสตาร์ชดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 และ 20 มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ไม่แตกต่างจากสตาร์ชปกติ แต่สตาร์ชดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น และการดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวที่สภาวะที่สูงขึ้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Through) ความหนืดลดลง (breakdown) เซตแบค (setback) มีแนวโน้มลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น

5.6 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ช พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรในทุกสภาวะมีค่าร้อยละการพองตัวที่น้อยกว่าสตาร์ชปกติ และมีค่าลดลงเรื่อยๆตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น ส่วนค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเหนียวดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าสตาร์ชปกติ และการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีค่าร้อยละการละลายที่น้อยกว่าสตาร์ชปกติ ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ที่มีค่าร้อยละการละลายมากที่สุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

5.7 การเปลี่ยนแปลงความใสของสตาร์ช พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 มีความใสไม่แตกต่างกับสตาร์ชปกติ และสตาร์ชดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 มีแนวโน้มของความใสลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 30-120-4 ที่มีความใสมากที่สุด

5.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นและลดลง โดยการดัดแปรที่สภาวะ 20-120-4 มีปริมาณอะไมโลสน้อยที่สุด และที่สภาวะ 30-100-1 มีปริมาณอะไมโลสมากที่สุดและมากกว่าสตาร์ชปกติ

5.9 ความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส พบว่าความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 มีแนวโน้มน้อยกว่าสตาร์ชปกติ ส่วนที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่สภาวะ 30-120-1 และ 30-120-4 ที่มีความคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลดลงอย่างมาก

ข้อเสนอแนะ

การดัดแปรสตาร์ชข้าวเหนียวด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นเป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการดัดแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียว โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาที่ใช้ในการดัดแปร ในการนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมจึงควรมีการศึกษาปัจจัยร่วมต่างๆนี้ให้หลากหลายยิ่งขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารและอุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้สตาร์ชข้าวเหนียวหรือสามารถใช้สตาร์ชข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบทดแทนได้

การศึกษานี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชชนิดอื่นๆด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น และควรมีการทดลองการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้มั่นใจว่าสตาร์ชดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ และในอุตสาหกรรมการดัดแปรสตาร์ชควรมีการศึกษาวิธีการให้ความร้อนต่างๆ เช่น การให้ความร้อนโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟหรือการใช้รังสีอินฟราเรด เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ความนำและการพาความร้อน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 303 หน้า.

พักตร์ประไพ ประจำเมือง และ วิชัย ลีลาวัชรมาศ. 2546. เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง. วารสารศูนย์บริการวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 ประจำเดือน ตุลาคมถึงธันวาคม.

พิณทิพย์ รัมภกาภรณ์. 2547. การดัดแปรสตาร์ชข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2538. เคมีทางธัญญาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อโนชา สุขสมบูรณ์, พัลลภ ไพพงศ์, กรกช หล่อโลหการ, กิตติญาณ์ เชี่ยวเชิงค้า, มนต์ราม อินทรศิริ และ อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. งานวิจัยด้านพืช. การใช้ประโยชน์จากสตาร์ชข้าว. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Adebowale, O.K. and Lawal, S.O. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. Food Hydrocolloids 17: 265-272.

Anderson, K.A. and Guraya, S.H. 2006. Effeect of microwave heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches. Food Chemistry 97: 318-323.

Anderson, K.A., Guraya, S.H., James, C. and Salvaggio, L. 2002. Digestibility and pasting properties of rice starch heat-moisture treated at melting temperature (T_m). Starch/Starke 54: 401-409.

Atwell, W.A., Hoseney, R.C. and Lineback, D.R. 1980. Debranching of wheat amylopectin. Cereal Chemistry 57: 12.

BeMiller, J.N. and Whistler, R.I. 1996. Carbohydrates In O.R. Tennema (Ed.). Food Chemistry. New York. Marcel Dekker. 157-224.

Biliaderis, C.G., Maurice, T.J. and Vose, J.R. 1980. Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. Journal Food Science 45: 1669.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Bogracheva, T., Wang, T., Morris, V.J., Ring, S.G. and Hedley, C.L. 1998. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization. Biopolymer 45: 323-332.

Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. International Journal of Biological Macromolecules 23: 85-112.

Chen, J-J., Lai, M-F.V. and Lii, C-Y. 2003. Effects of compositional and granular properties on the pasting viscosity of rice starch blends. Starch/Starke 55: 203-212.

Chungcharoen, A. and Lund, B.D. 1987. Influence of solutes and water on rice starch gelatinization. Cereal Chemistry 64(4): 240-243.

Collado, L.S., Mahesa, L.B., Oates, C.G. and Corke, H. 2001. Bihon-type noodles from heat-moisture treated sweet potato starch. Journal of Food Science 66: 604-609.

Craig, A.S.S., Maningat, C.C., Seib, A.P. and Hoseney, C.R. 1989. Starch paste clarity. Cereal Chemistry 66(3): 173-182.

Donovan, W.J., Lorenz, K. and Kulp, K. 1983. Differential scanning calorimetry of heat-moisture treated wheat and potato starches. Cereal Chemistry 60(5): 381-387.

Eliasson, A.C. 2004. Starch in Food: Structure, Function and Applications. Woodhead Publishing Limited. England.

Eliasson, A.C. and Gudmundsson, M. 1996. Starch: physicochemical and functional aspects. In Carbohydrates in Foods. Marcel Dekker. New York.

Farhat, A.I., Protzmann, J., Becker, A., Neale, R. and Hill, E.S. 2001. Effect of the extent of conversion and retrogradation on the digestibility of potato starch. Starch/Starke 53: 431-436.

Fitzgerald, M.A., Martin, M., Ward, R.M., Park, W.D. and Shead, H.J. 2003. Viscosity of rice flour: a rheological and biological study. Journal Agricultural Food Chemistry, 51: 2295-2299.

Gerard, C., Barron, C., Colonna, P. and Planchot, V. 2001. Amylose determination in genetically modified starches. Carbohydrate Polymer 44: 19-27.

Gunaratne, A. and Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymer 49: 425-437.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Hamaker, R.B. and Griffin, K.V. 1993. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. Cereal Chemistry 70(4): 377-380.

Han, X.Z. and Hamaker, B.R. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. Journal of Cereal Science 34: 279-284.

Hermans, H.P. and Weidinger, A. Quantitative x-ray investigations on the cryatallinity of cellulose fibers: a background analysis. Journal of Applied Physics 19:491-506.

Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin and its significance. Carbohydrate Research 147: 342-347.

Holm, J., Bjorck, I., Ostrowska, S., Eliasson, A.C., Asp, N. G., Larrson, K. and Lundquist, L. 1983. Digestibility of amylase-lipid complexes in vitro and in vitro. Starch 35: 294-297.

Hoover, R. and Hadziyev. D. 1981. Characterization of potato starch and its monoglyceride complex. Starch/staerke 33: 290.

Hoover, R. and Manule, H. 1996. The Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches. Journal of Cereal Science 23: 153-162.

Hoover, R. and Sosulski, F.W. 1991. Composition, structure, functionality and chemical modification of legume starches. A review. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology 69: 79-92.

Hoover, R. and Vasanthan, T. 1994. Effect of heat moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal; tuber and legume starches. Carbohydrate Research 252: 33-53.

Imbery, A., Buleon, A., Tran, V. and Perez, S. 1991. Recent advances in knowledge of starch structure. Starch 43: 375-384.

Jacobs, H. and Delcour, A.J. 1998. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: review. Journal of Food Chemistry 46: 2895-2905.

Jacobs, H., Mischenko, N., Koch, H.J.M., Eerlingen, C.R., Delcour, A.J. and Reynaers, H. 1998. Evaluation of the Impact of annealing on gelatinization at intermediate water content of wheat and potato starches: a differential scanning calorimetry and snmall angel x-ray scattering study. Carbohydrate Research 306: 1-10.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Jane, J.L., Wang, K.S. and Mcpherson, A.E. 1997. Branch structure difference in starches of A and B-type X-ray pattern revealed by their Naegeli dextrins. Carbohydrate Research 300: 219-227.

Juliano, B.O. 1998. Varietal impact on rice quality. Cereal Food World 43: 207-222.

Kasemsuwan, T. and Jane, L. 1996. A quantitative method for the survey of starch phosphate derivatives and starch phospholipids by 31P nuclear magnetic resonance spectroscopy. Cereal Chemistry 73: 702-707.

Karim, A.A., Norziah, M.H. and Seow, C.C. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. Journal of Food Chemistry 71: 9-36.

Katz, J.R. and Van Itallie, T.B. 1930. Abhandlungen zur physikalischen Chenie der Starke und der Brotbereitung. Z.Physikal Chem 150: 90-99.

Kawabata, A., Takase, N., Miyoshi, E., Sawayama, S., Kimura, T.S. and Kudo, K. 1994. Microscopic observation and x-ray diffractometry of heat/moisture-treated starch granules. Starch/Stake 46: 463-469.

Kennedy G, Burlingame, B. 2003. Analysis of food composition data on rice from a plantgenetic resources perspective. Food Chemistry 80: 589±596.

Kerr, R.W. and Cleveland, F.C. 1962. Thickening agent and method of making the same. U.S.patent no. 3,021,222.

Krueger, B.R., Walker, C.E., Knutson, C.A. and Inglett, G.E. 1987. Differential scanning calorimetry of raw and annealed starch isolated from normal and maize genotypes. Cereal Chemistry 54: 187.

Kulp, K. and Lorenz, K. 1981. Heat-moisture treatment of starches. I. Physicochemical properties. Cereal Chemistry 58: 46-48.

Lawal, S.O. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. International Journal of Biological Macromolecules 37: 268-277.

Lii, C-Y., Lai, M-F.V. and Shen, M-C. 2004. Changes in retrogradation properties of rice starches with amylose content and molecular properties. Cereal Chemistry 81(3): 392-398.

Lii, C.Y., Lai, V.M.F., Lu, S. and Tsai, M.L. 1998. Correlation between the physical property, eating quality and the molecular structure of rice-starchy systems. Zywnosc Technologia Jakosc (Poland) 4: 72-86.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Lii, C.Y., Tsai, M.L. and Tseng, K.H. 1996a. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. Cereal Chemistry 73: 415±420.

Lim, S.T., Chang, H.E. and Chung, J.H. 2001. Thermal transition characteristics of heat-moisture treated corn and potato starches. Carbohydrate Polymer 46: 107-115.

Lim, S.T., Kasemsuwan, T. and Jane, J. 1994. Characterization of phosphorus in starch by 31P-nuclear magnetic resonance spectroscopy. Cereal Chemistry 71: 488.

Lorenz, K. and Kulp, K. 1982. Cereal and root starch modification by heat-moisture treatment.I.Physico-chemical properties. Starch/Starke 34: 50-54.

Lu, S., Chen, Y.N. and Lii, C.Y. 1997. Correlation between the fine structure, physicochemicalproperties, and retrogradation of amylopectins from Taiwan rice varieties. Cereal Chemistry 74: 34-39

Lu, S., Chen, Y.N. and Lii, C.Y. 1996. Gel-chromatography fractionation and thermal characterization of rice starch affected by hydrothermal treatment. Cereal Chemistry 73: 5-11.

Mahanta, C.L. and Bhattachacharya, K.R. 1989. Thermal degradation of starch in parboiled rice. Starch/Staerke 41:9.

Maningat, C.C. 1986. Chemical modification of wheat starch. Ph.D. dissertation. Kansas State University, Manhattan. KS.

Maruta, I., Kurahashi, Y., Takano, R., Hayashi, K., Yoshino, Z., Komaki, T. and Hara, S. 1994. Reduced-pressurized heat-moisture treatment: a new method for heat-moisture treatment of starch. Starch/Starke 5: 177-181.

Mellies, R.L., Yeats, T.E., Mehltretter, C.L. and Senti. F.R. 1961. Preparation and physical characteristics of cross-linked hypochlorite-oxidized corn starch. Starch/Staerke 13: 114.

Miyazaki, M. and Morita, N. 2005. Effect of heat-moisture treated maize starch on the properties of dough and bread. Food Research International 38: 369-376.

Miyoshi, E. 2002. Effects of heat-moisture and lipids on gelatinization and retrogradation of maize and potato starches. Cereal Chemistry 79(1): 72-77.

Morikawa, K. and Nishinari, K. 2000. Rheological and DSC studies of gelatinization of chemically modified starch heated at various temperatures. Carbohydrate Polymer 43: 241-247.

Morrison, W.R. and Azudin, M.N. 1987. Variation in the amylose and lipid contents and some physical properties of rice starches. Journal of Cereal Science 5: 35±39.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Morrison, W.R., Milligan, T.P. and Azudin, M.N. 1984. A relationship between the amylose and lipid contents of starches from diploid cereals. Journal of Cereal Science 2: 257-260.

Morrison, W.R., Tester, F.R., Snape, E.C., Law, R. and Gidley, J.M. 1993. Swelling and gelatinization of cereal starches. IV. Some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy and normal barley starches. Cereal Chemistry 70(4): 385-391.

Murugesan, G. and Bhattcharya, K.R. 1989. The nature of starch in popped rice. Carbohydrate Polymer 10: 215.

Nakazawa, F., Noguchi, S., Takahashi, J. and Takada, M. 1984. Gelatinization and retrogradation of rice starch studies by differential scanning calorimetry. Agriculture Biological Chemistry 48: 201.

Ott, M. and Hester, E.E. 1965. Gel formation as related to concentration of amylose and degree of starch swelling. Cereal Chemistry 42: 476-484.

Patel, K.B., Saibene, D. and Seetharaman, K. 2006. Restriction of starch granule swelling by iodine during heating. Cereal Chemistry 83(2): 173-178.

Perera, C., Hoover, R. and Martin, A.M. 1997. The effect of hydroxypropylation on the structure and physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. Food Research International 30: 235-337.

Perera, C. and Hoover, R. 1999. Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native, defattes and heat-moisture treated potato starches. Food Chemistry 64: 361-375.

Planchot, V., Colonna, P., Buleon, A. and Gallant, D. 1997. Amylolysis of starch granules and α-glucan crystallites. In R. J. Frazier, A. M. Donald & P. Richmond, Starch structure and functionality. Cambridge, UK. 141-152.

Qi, X., Tester, R.F., Snape, C.E. and Ansell, R. 2003. Molecular basis of the gelatinization and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. Journal of Cereal Science 37: 363-376.

Qit, X., Tester, F.R., Snape, E.C. and Ansell, R. 2003. Molecular basis of the gelatinization and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. Journal of cereal science 37: 363-376.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Sair, L. 1966. Heat-moisture treatment of starch. Cereal Chemistry 44: 8-26.

Schoch, T.J. 1942. Fractionality of starch by selective precipitation with butanol. J.Am.Chem.Soc 64: 2957.

Shin, S., Byun, J., Park, K.H. and Moon, T.W. 2004. Effect of Partial Acid Hydrolysis and Heat-Moisture Treatment on Formation of Resistant Tuber Starch. Cereal Chemistry 81(2): 194-198.

Sievert, D. and Pomeranz, Y. 1989. Enzyme-resistance starch. I. Characteristic and evaluation by enzymatic, thermoanalytical, and microscopic methods. Cereal Chemistry 66(4): 342-347.

Singh, V., Okadome, H., Toyoshima, H., Isobe, S. and Ohtsubo, K. 2000. Thermal and physicochemical properties of rice grain, flour and starch. Journal Agriculture of Food Chemistry 48: 2639-2647.

Slade, L., Lade, L. and Levine, H. 1988. Non-equilibrium melting of native granular starch. Part I. Temperature location of the glass transition associated with gelatinization of A-type cereal starches. Carbohydrate Polymers 8:183-208.

Sodhi, N.S. and Singh, N. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. Food Chemistry 80: 99-108.

Stevens, D.J. and Elton, G.A.H. 1971. Thermal properties of the starch/water system. I. Measurement of heat of gelatinization by differential scanning calorimetry. Starke 23:8.

Takaya, T., Sano, C. and Nishinari, K. 2000. Thermal studies on the gelatinization and retrogradation of heat-moisture treated starch. Carbohydrate Polymer 41: 97-100.

Tester, F.R. and Morrison, R.W. 1990a. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. Journal of Cereal Chemistry 67(6): 551-557.

Tester, F.R. and Morrison, R.W. 1990b. Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starches. Journal of Cereal Science 67(6): 558-563.

Tester, F.R., Karkalas, J. and Qi, X. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture: review. Journal of Cereal Science 39: 151-165.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Vandeputte, G.E., Derycke, V., Geeroms, J., Delcour, J.A. 2003b. Rice starches, II. Structural aspects provide insight in swelling and pasting properties. Journal of Cereal Science 38: 53-59.

Vermeylen, R., Goderis, B. and Delcour, J.A. 2006. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. Carbohydrate Polymer 64: 364-375.

Waigh, A.T., Hopkinson, I. and Donald, M.A. 1997. Analysis of the native structure of starch granules with x-ray microfocus diffraction. Macromolecule 30: 3813-3820.

Wang, Y.J. and Wang, L.F. 2002. Structures of four waxy rice starches in relation to thermal, pasting and textural properties. Journal of Cereal Chemistry 79: 252-256.

Yanagisawa, T., Domon, E., Fujita, M., Kiribuchi-Otobe, C. and Takayama, T. 2006. Starch pasting properties and amylose content from 17 waxy barlay lines. Cereal Chemistry 83(4): 354-357.

Yano, M., Okuno, K., Kawakami, J., Satoh, H. and Omura, T. 1985. High amylose mutants of rice, Oryza sativa L. Theor Appl Genet 69: 253-257.

Zeleznak, J.K. and Hoseney, C.R. 1987. The grass transition in starch. Cereal Chemistry 64(2): 121-124.

Zobel, H.F. 1988. Starch crystal transformations and their industrial importance. Starch/Starke 40(1): 1-7.

Zhou, Z.K., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. 2002. Composition and functional properties of rice. International Journal of Food Science and Technology 37: 849-868.

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990)

นำภาชนะใส่ตัวอย่างที่ทำด้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาไปอบด้วยตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียสข้ามคืนและนำมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักภาชนะด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน ใส่สตาร์ชลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักประมาณ 2 กรัมด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอนของสตาร์ช นำไปอบโดยเปิดฝาในตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียสข้ามคืนจนน้ำหนักคงที่ นำออกมาจากตู้อบ ทำการปิดฝาทันทีและนำไปใส่ในโถดูดความชื้น 2 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งบันทึกค่า และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามสูตร

ร้อยละความชื้น = (น้ำหนักสตาร์ชที่หายไป/น้ำหนักสตาร์ชก่อนอบ) × 100

2. การตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (Walker, 1976)

2.1 นำสตาร์ชตัวอย่างติดกระจายลงบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่งอลูมิเนียม (aluminium stub)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

2.2 นำแท่งอลูมิเนียมที่ติดสตาร์ชตัวอย่างแล้วนำเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อเคลือบทองลงที่ผิวของสตาร์ชสำหรับช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

2.3 วางแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบทองแล้วลงในช่องสำหรับใส่แท่งอลูมิเนียมภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.4 ตรวจดูลักษณะรูปร่างและเลือกบริเวณที่จะบันทึกภาพของเม็ดสตาร์ชโดยควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลท์ ใช้กำลังขยายที่ 100, 500 และ 2000 เท่าตามลำดับ

3. ค่าสี (Nollet, 1996)

ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสีโดยนำตัวอย่างสตาร์ชบรรจุในภาชนะใสทรงกระบอกสำหรับวัดสีของเครื่อง และบันทึกค่าของสีที่วัดในระบบ Hunter เป็น L, a และ b

4. ปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส

ชั่งอะไมโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง 0.040 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆอย่าให้อะไมโลสเกาะผนังขวด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ 9 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กลงไปในขวดวัดปริมาตร กวนของเหลวบนแท่นนาน 10 นาที นำแท่งแม่เหล็กออกและล้างส่วนที่ติดมาให้กลับไปในขวดด้วยน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันดี

4.2 การเตรียมตัวอย่าง

เช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส ยกเว้นการชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง แทนอะไมโลสบริสุทธิ์

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ปิเปตสารละลายจากข้อ 4.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตรและสารละลายไอโอดีน (เตรียมโดยละลายไอโอดีน 0.2 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที และทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่สารตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแบลงค์ วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบลงค์ให้เท่ากับ 0

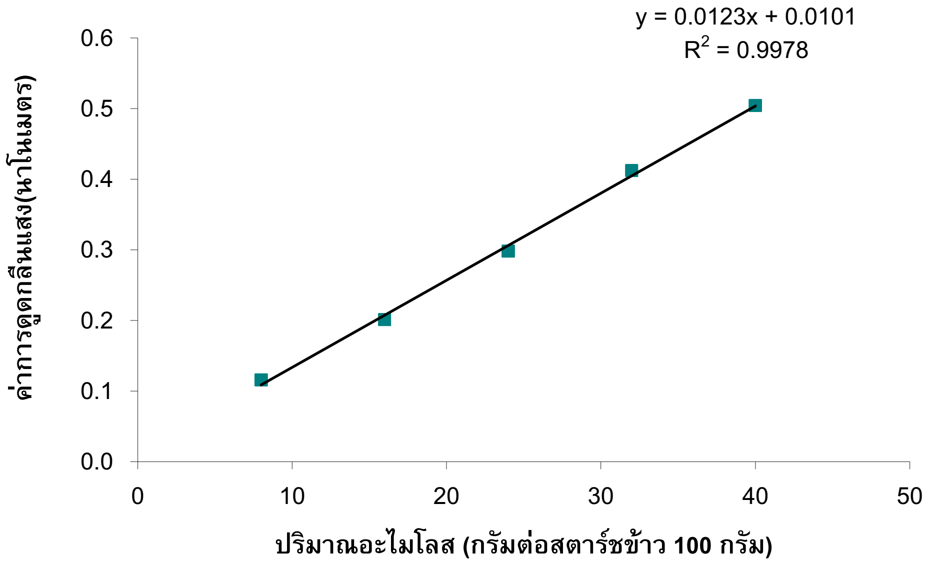
4.3 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐานจากข้อ 4.1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ และปิเปตสารละลายไอโอดีนเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันดี วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรและวาดกราฟระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อแป้งข้าว 100 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 8, 16, 24, 32 และ 40) กับค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลงค์ (แสดงดังภาพผนวกที่ ก-1)

4.4 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณอะไมโลส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณตัวอย่าง 0.1000 กรัมของแต่ละตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วอ่านค่าเป็นร้อยละของอะไมโลสต่อสตาร์ชข้าว 100 กรัม

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ภาพผนวกที่ ก-1 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

5. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Cheetham และคณะ, 1998)

5.1 การเตรียมสตาร์ชก่อนการวิเคราะห์

ชั่งสตาร์ชประมาณ 7 กรัมใส่ลงในจานแก้ว (Petri dish) และเกลี่ยสตาร์ชให้ทั่ว นำจานแก้ววางเรียงในโถดูดความชื้น (desiccator) เปล่าที่มีน้ำกลั่นอยู่ด้านล่างของภาชนะนาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างสตาร์ชที่จะนำไปวิเคราะห์มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 13-14)

5.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer

5.2.1 บรรจุสตาร์ชที่ปรับความชื้นแล้วลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่างโดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ

5.2.2 นำตัวอย่างใส่เข้าเครื่อง โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ คือใช้เป้าหมาย (target) เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลท์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 5.00 ถึง 40.00 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศา 2 ต่อวินาที

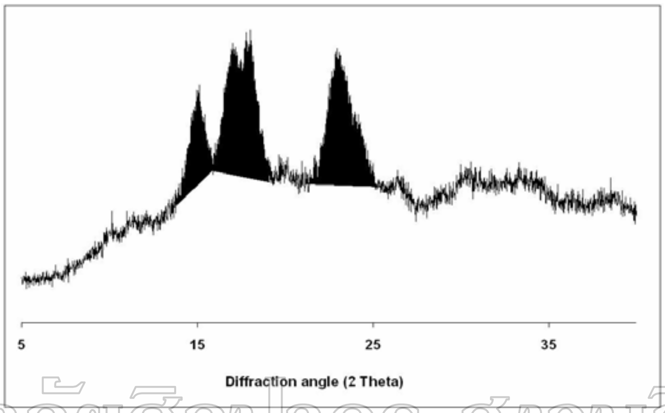
5.2.3 บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (Relative crystallinity) จากสมการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Cheetam และคณะ (1998) ดังนี้คือ

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

ค่าของพื้นที่ใต้พีค (A) และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B) สามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่อง ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก-2

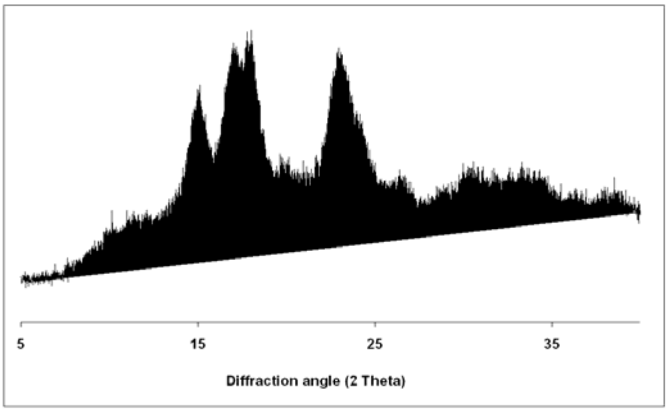
5.3 สถานที่วิเคราะห์

ห้องปฏิบัติการเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



ก)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



ข)

ภาพผนวกที่ ก-2 ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง X-ray diffractometer ก) แสดงพื้นที่ใต้พีค (A), ข) แสดงพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B)

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

6.1 นำตัวอย่างสตาร์ชไปหาปริมาณความชื้นตามวิธี AOAC (1990)

6.2 คำนวณน้ำหนักของสตาร์ชที่ใช้และปริมาตรน้ำตามสูตร

$$\text{ปริมาณแป้ง} = \frac{100 \times 4 \text{ กรัม (น้ำหนักแห้ง)}}{(100 - \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นของสตาร์ช})}$$

ปริมาณน้ำ = 25 + 4 - ปริมาณแป้งที่คำนวณได้

6.3 ชั่งตัวอย่างสตาร์ชและเติมน้ำตามที่คำนวณไว้ลงในภาชนะอลูมิเนียม และใส่ใบพัดกวน (paddle) หมุนใบพัดกวนในลักษณะทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกาจนสารละลายสตาร์ชผสมกันดี

6.4 ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามโปรแกรม STD1 ดังนี้

เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 960 รอบต่อนาที

เวลา 10 วินาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

เวลา 1 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที และเริ่มให้ความร้อน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

เวลา 4 นาที 42 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีจนถึง

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

เวลา 11 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีจนถึง

เวลา 13 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

ผลที่ได้จะได้ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำให้เย็น (trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และการคืนตัว (setback)

7. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Carorimeter (DSC) (ดัดแปลงจากกล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543 และ Baker และคณะ, 1998)

7.1 วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 3.5 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำร้อยละ 70 ของน้ำหนักทั้งหมดโดยใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็ก (microsyring) ใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม (DSC pan) ปิดฝาและตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Carorimeter (DSC) โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส คงไว้ 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที คำนวณหาค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_0, T_{p1}, T_{p2} และ T_c; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลาทิไนเซชัน ($\Delta H_{gelatinization}$; J/g)

7.2 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันและค่าเอนทาลปีการเกิดเจลาทิไนเซชัน

การคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_0, T_{p1}, T_{p2} และ T_c; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลาทิไนเซชัน ($\Delta H_{gelatinization}$; J/g) จะสามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่อง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8. การวิเคราะห์ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Susceptibility to enzyme digestion) ของสตาร์ช

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

8.1.1 การเตรียมสารเคมี

8.1.1.1 สารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ พีเอช 6.9 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ชั่งโซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิกแอนไฮดรัส 0.138 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ จากนั้นปรับพีเอชเป็น 6.9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ในอ่างน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (สารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้น้ำดีไอโอไนซ์ (deionized water) เป็นตัวทำละลาย)

8.1.1.2 สารละลายสตาร์ชมันฝรั่งเข้มข้นร้อยละ 1.0 ชั่งสตาร์ชมันฝรั่งที่ละลายน้ำได้ (Soluble potato starch) 0.250 กรัมใส่บีกเกอร์ เติมสารละลายข้อ 8.1.1.1 พอท่วม ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน จากนั้นนำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ

100 องศาเซลเซียส จับเวลาขณะเดือด 15 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอโอไนซ์

8.1.1.3 สารละลายโซเดียมโปแทสเซียมทาเทรตเข้มข้น 5.3 โมลาร์ ชั่งโซเดียมโปแทสเซียมทาเทรต 37.396 กรัมใส่บีกเกอร์ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ พอท่วมเป็นตัวทำละลาย ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน นำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนแต่ห้ามให้สารละลายเดือด เมื่อสารละลายเข้ากันดีทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ที่ทำละลายด้วยน้ำดีไอโอไนซ์ที่เตรียมไว้

8.1.1.4 สารละลายกรดไดไนโตรซาลิคไซลิกเข้มข้น 96 มิลลิโมลาร์ ชั่งกรดไดไนโตรซาลิคไซลิก 0.548 กรัมใส่บีกเกอร์ เติมน้ำดีไอโอไนซ์พอท่วม ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน นำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนแต่ห้ามให้สารละลายเดือด เมื่อสารละลายละลายเข้ากันดี ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอโอไนซ์

8.1.1.5 สารละลายสี ผสมสารละลายข้อ 8.1.1.3 ปริมาตร 8 มิลลิลิตรและสารละลายข้อ 8.1.1.4 ปริมาตร 20 มิลลิลิตรเข้าด้วยกัน จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 40 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอโอไนซ์ ผสมให้เข้ากันดีและเก็บสารละลายในขวดสีชาโดยสารละลายสีที่เตรียมนี้มีอายุการใช้งานได้ 6 เดือน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.1.1.6 สารละลายมอลโตสมาตรฐานเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) นำผงมอลโตสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมงก่อนการนำมาใช้เพื่อไล่ความชื้น ชั่งมอลโตส 0.050 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอโอไนซ์

8.1.1.7 สารละลายเอนไซม์พอร์ซีนแพนคริเอติกแอลฟาอะไมเลส เตรียมสารละลายเอนไซม์พอร์ซีนแพนเครียสแอลฟาอะไมเลสให้มีความเข้มข้น 1 หน่วย เอนไซม์พอร์ซีนแพนเครียสอัลฟาอะไมเลสต่อ 1 มิลลิลิตรในน้ำดีไอโอไนซ์เย็น (1ยูนิตต่อมิลลิลิตร)

8.1.2 วิธีการวิเคราะห์แอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

การวิเคราะห์แอคติวิตีของเอนไซม์จะปิเปตสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังตารางผนวกที่ ก-1 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด จำนวน 4 หลอด (หลอดที่ 1-3 เป็นหลอดทดสอบ และหลอดที่ 4 เป็นหลอดแบลงค์) และทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

กำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (Unit enzyme) หมายถึงปริมาณเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสตาร์ชมอลโตส 1.0 มิลลิกรัม ในเวลา 3 นาที ที่พีเอช 6.9 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ ก-1 วิธีการวิเคราะห์แอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

วิธีการทดลอง	หลอดทดสอบ (มิลลิลิตร)	หลอดแบลงค์ (มิลลิลิตร)
8.1.2.1 ปิเปตสารละลายสตาร์ชมันฝรั่ง (ข้อ 8.1.1.2) และแช่หลอดทดลองในอ่างน้ำเย็นนาน 3 นาที	1.00	1.00
8.1.2.2 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.7) เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ทิ้งให้ทำปฏิกิริยานาน 3 นาทีโดยมีการเขย่าหลอดทดลองตลอดเวลา	1.00	---
8.1.2.3 ปิเปตสารละลายสี (ข้อ 8.1.1.5)	1.00	1.00
8.1.2.4 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.7) ปิดฝาหลอดทดลองและรีบนำไปต้มในอ่างน้ำเดือนทันที นาน 15 นาที เมื่อครบเวลานำหลอดทดลองมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง	---	1.00
8.1.2.5 ปิเปตน้ำดีไอโอไนซ์ใส่หลอดทดลอง เขย่าสารละลายให้เข้ากันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่าแบลงค์เป็น 0	9.00	9.00

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.1.3 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

การเตรียมกราฟมาตรฐานจะปิเปตสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก-2 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิดจำนวน 6 หลอด

เขียนกราฟมาตรฐานมอลโตส ระหว่างปริมาณมอลโตส หน่วยเป็นมิลลิกรัม (คิดเป็น 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมมอลโตส) กับค่าการดูดกลืนแสง (แสดงดังภาพผนวกที่ ก-3)

ตารางผนวกที่ ก-2 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

วิธีการทดลอง	หลอดสารละลายมาตรฐานที่					
	1	2	3	4	5	แบลงค์
8.1.3.1 สารละลายมอลโตสบริสุทธิ์ (ข้อ 8.1.1.2)	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 8.1.1.5) ปิดฝาหลอดทดลองและนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที เมื่อครบเวลานำหลอดทดลองมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8.1.3.4 ปิเปตน้ำดีไอโอไนซ์ เขย่าสารละลายให้เข้ากันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบลงค์เป็น 0	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.1.4 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณมิลลิกรัมมอลโตส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดแอคติวิตีของเอนไซม์ (ข้อ 8.1.2) เทียบกับกราฟมาตรฐานมอลโตสแล้วคำนวณค่าเป็นปริมาณมิลลิกรัมของมอลโตส

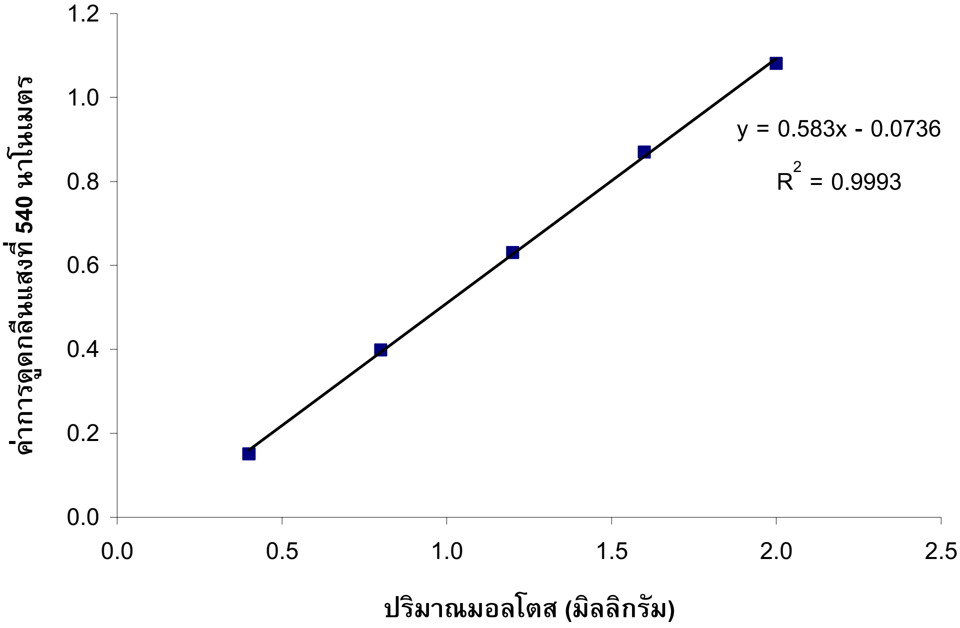
8.1.5 การคำนวณค่าแอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส คำนวณจาก

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

A = มิลลิกรัมมอลโตสจากการย่อยด้วยเอนไซม์

B = ปริมาตรเอนไซม์ที่ใช้ (ในหน่วยมิลลิลิตร)

df = อัตราการเจือจาง (dilution factor)



ภาพผนวกที่ ก-3 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าแอคติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.2 การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Li และคณะ, 2003)

8.2.1 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 100 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดทดลองที่มีฝาเกลียวปิด (screw cap tube) ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.006 โมลาร์ พีเอช 6.9 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน

8.2.2 นำหลอดทดลองแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนาน 10 นาที

8.2.3 ปิเปตสารละลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 31.68 ไมโครลิตร (ใช้เอนไซม์ 5 หน่วยต่อมิลลิกรัมสตาร์ชตัวอย่าง โดยเอนไซม์ที่ใช้มีแอคติวิตีจำเพาะ (specific activity) เท่ากับ 1,122 หน่วยต่อมิลลิกรัมโปรตีน และมี 32 มิลลิกรัมโปรตีนต่อมิลลิลิตร) นำหลอดทดลองแช่ในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสที่มีการเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที นาน 6 ชั่วโมง

8.2.4 เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที แยกส่วนใสด้านบนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่อไป ส่วนสตาร์ชที่เหลือด้านล่างนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 3 ครั้ง และเอทานอลร้อยละ 95 ซ้ำ 2 ครั้ง

8.3 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก (Dubois และคณะ, 1956)

8.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานกลูโคส

8.3.1.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) จากนั้นนำสารละลายกลูโคสมาเจือจางอีกครั้งให้เป็นความเข้มข้นร้อยละ 0.01

8.3.1.2 ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสให้มีความเข้มข้นต่างๆดังแสดงในตารางผนวกที่ ก-3

ตารางผนวกที่ ก-3 การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

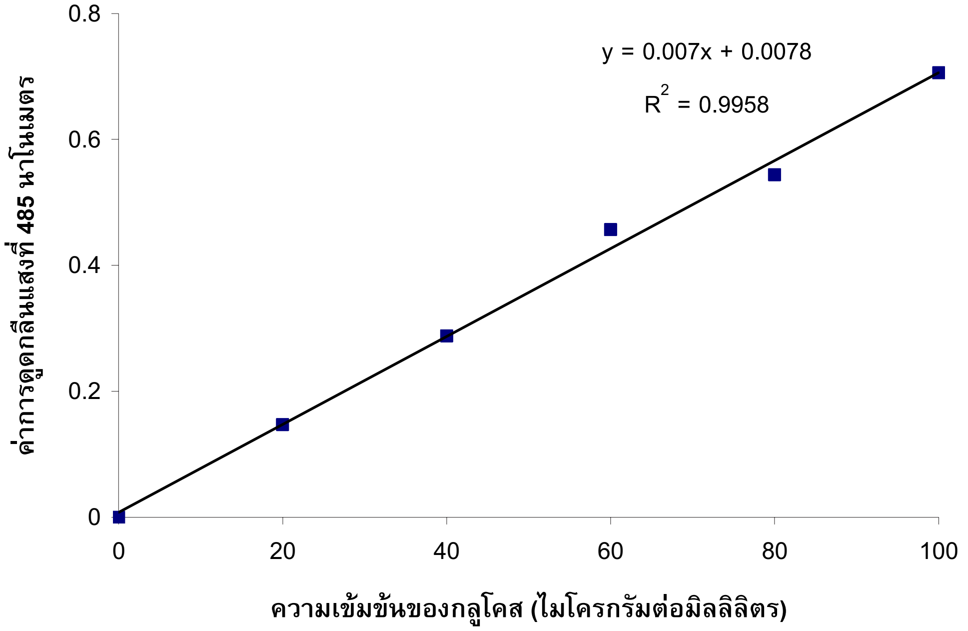
หลอดที่	ปริมาตรสารละลายกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 0.01 ที่ต้องปิเปต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่นที่ต้องเติม (มิลลิลิตร)	คิดเป็นความเข้มข้นของกลูโคส (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)
1	0	1.0	0
2	0.1	0.8	20
3	0.4	0.6	40
4	0.6	0.4	60
5	0.8	0.2	80
6	1.0	0	100

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.3.1.3 ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมกันอย่างรวดเร็ว

8.3.1.4 ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 30 นาที

8.3.1.5 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำตาลในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (ดังภาพผนวกที่ ก-4)



ภาพผนวกที่ ก-4 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

8.3.2.1 ทำการเจือจางให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

8.3.2.2 ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำตามขั้นตอนในข้อ 8.3.1.3 ถึง 8.3.1.5

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคสและคำนวณความเข้มข้นของกลูโคสทั้งหมด (ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด) ในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (1 มิลลิลิตรของสารละลาย) โดยคูณอัตราการเจือจาง (dilution factor) ของตัวอย่างสตาร์ช จากนั้นคูณด้วย 1,000 เพื่อปรับหน่วยให้เป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และคูณด้วย 10 มิลลิลิตรของสารละลาย (มาจากการใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในการทำละลาย 100 มิลลิกรัมสตาร์ชแห้งในช่วงขั้นเริ่มต้นการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในข้อ 8.2.1) เพื่อจะคำนวณค่าปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสทั้งหมดในหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อการย่อยสตาร์ชแห้ง 100 มิลลิกรัมด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ซึ่งก็คือค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ช (% enzyme hydrolysis) ของสตาร์ชดัดแปร (Hoover และคณะ, 1996b)

9. การวิเคราะห์ค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลาย (ดัดแปลงจากวิธีการของ Leach และคณะ, 1959)

นำภาชนะใส่ตัวอย่างที่ทำด้วยอลูมิเนียม (moisture can) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสข้ามคืนจนน้ำหนักคงที่และนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นชั่งสตาร์ชจำนวน 0.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในหลอดสำหรับเหวี่ยง และเติมน้ำกลั่นจำนวน 25 มิลลิลิตรทำการปิดฝาแล้วนำไปวางบนเครื่องเขย่าซึ่งอยู่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีโดยเขย่าหลอดทดลองที่ความเร็ว 140 รอบต่อนาที จากนั้นนำหลอดไปหมุนเหวี่ยงที่ 15,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที และทำการดูดน้ำตอนบนทั้งหมดออกใส่ภาชนะใส่ตัวอย่างที่ทำด้วยอลูมิเนียม (moisture can) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสข้ามคืนจนน้ำหนักคงที่และนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งและบันทึกค่า ส่วนที่เหลือที่ได้จากการอบจะแสดงถึงจำนวนของสตาร์ชที่ละลายน้ำ นำหลอดเหวี่ยงที่มีสตาร์ชสุกด้านล่างมาชั่งน้ำหนักจะเป็นส่วนของแป้งที่พองตัว คำนวณค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายตามสูตร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง}}$$

$$\text{ร้อยละการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของสตาร์ชที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

10. การวิเคราะห์ความใส หรือค่าร้อยละการส่องผ่าน (Craig และคณะ, 1989)

ชั่งน้ำหนักสตาร์ช 0.05 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในหลอดทดลองที่มีฝาปิดขนาด 10 มิลลิลิตรและใส่น้ำกลั่นปริมาณ 5 มิลลิลิตร นำหลอดทดลองไปวางในอ่างน้ำเดือดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีโดยเขย่าหลอดทดลองที่ความเร็ว 140 รอบต่อนาที นำหลอดทดลองออกมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (ใช้เวลาประมาณ 30 นาที) จากนั้นนำไปวัดร้อยละการส่องผ่านของแสง (% transmittance) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลงค์

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-1 ร้อยละความเป็นผลึก (% Relative crystallinity) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก (% Relative crystallinity)
Native starch	38.82
10-100-1	36.41
10-100-4	39.01
10-120-1	41.31
10-120-4	36.98
20-100-1	43.17
20-100-4	40.81
20-120-1	37.95
20-120-4	39.97
30-100-1	40.27
30-100-4	38.65
30-120-1	39.80
30-120-4	35.83

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-2 ค่าสี L*, a*, b* ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
Native starch	96.94 ± 0.01[g]	0.31 ± 0.00[abcd]	0.20 ± 0.03[f]
10-100-1	97.07 ± 0.06[de]	0.33 ± 0.02[ab]	0.29 ± 0.04[d]
10-100-4	97.25 ± 0.07[a]	0.32 ± 0.02[ab]	0.26 ± 0.04[de]
10-120-1	97.22 ± 0.03[a]	0.29 ± 0.02[de]	0.33 ± 0.03[c]
10-120-4	97.12 ± 0.05[cd]	0.30 ± 0.01[bcd]	0.40 ± 0.02[b]
20-100-1	97.22 ± 0.01[a]	0.29 ± 0.01[cde]	0.22 ± 0.04[ef]
20-100-4	97.19 ± 0.07[ab]	0.31 ± 0.03[abcd]	0.28 ± 0.09[d]
20-120-1	97.23 ± 0.05[a]	0.29 ± 0.02[de]	0.23 ± 0.03[ef]
20-120-4	97.06 ± 0.03[ef]	0.32 ± 0.03[abc]	0.26 ± 0.01[de]
30-100-1	97.15 ± 0.01[bc]	0.29 ± 0.03[de]	0.12 ± 0.01[g]
30-100-4	96.81 ± 0.02[h]	0.33 ± 0.02[a]	0.21 ± 0.03[f]
30-120-1	97.01 ± 0.02[f]	0.30 ± 0.02[bcd]	0.14 ± 0.02[g]
30-120-4	95.31 ± 0.14[i]	0.30 ± 0.03[cde]	1.15 ± 0.05[a]

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
: [abcd...] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-3 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Carolimetry (DSC) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (องศาเซลเซียส)				เอนทาลปี
	T_0	T_p	T_c	(T_c-T_0)	(ΔH; J/g)
Native starch	60.36 ± 0.17^{def}	66.94 ± 0.38^{f}	74.58 ± 0.14^{d}	7.64 ± 0.24^{cdef}	13.73 ± 0.29^{d}
10-100-1	59.95 ± 0.27^{ef}	66.65 ± 0.21^{f}	74.35 ± 0.15^{d}	7.70 ± 0.08^{cde}	13.75 ± 0.12^{d}
10-100-4	59.86 ± 0.25^{f}	66.44 ± 0.14^{f}	74.70 ± 0.42^{d}	8.26 ± 0.31^{abc}	13.73 ± 0.10^{d}
10-120-1	59.86 ± 0.25^{f}	66.56 ± 0.08^{f}	74.40 ± 0.17^{d}	$7.84 \pm 0.22b^{cde}$	14.20 ± 0.16^{c}
10-120-4	59.70 ± 0.18^{f}	66.43 ± 0.00^{f}	74.39 ± 0.23^{d}	$7.96 \pm 0.23b^{cde}$	13.64 ± 0.08^{d}
20-100-1	60.14 ± 0.22^{ef}	66.68 ± 0.22^{f}	74.76 ± 0.42^{d}	8.08 ± 0.57^{bcd}	14.28 ± 0.21^{c}
20-100-4	61.79 ± 0.33^{cd}	68.86 ± 0.69^{d}	77.56 ± 0.92^{c}	8.70 ± 0.93^{ab}	15.03 ± 0.23^{a}
20-120-1	60.37 ± 0.16^{def}	66.80 ± 0.22^{f}	74.48 ± 0.28^{d}	7.68 ± 0.13^{cde}	14.34 ± 0.19^{c}
20-120-4	61.94 ± 0.23^{c}	75.17 ± 0.22^{b}	81.88 ± 0.04^{b}	6.71 ± 0.18^{f}	14.76 ± 0.15^{b}
30-100-1	61.49 ± 0.64^{cde}	67.72 ± 0.67^{e}	74.83 ± 0.62^{d}	7.11 ± 0.22^{ef}	15.03 ± 0.02^{a}
30-100-4	67.64 ± 0.52^{a}	74.83 ± 0.08^{b}	81.93 ± 0.18^{b}	7.10 ± 0.15^{ef}	12.59 ± 0.12^{e}
30-120-1	63.66 ± 0.35^{b}	70.02 ± 0.29^{c}	77.32 ± 0.35^{c}	7.29 ± 0.10^{def}	14.44 ± 0.23^{c}
30-120-4	68.37 ± 3.77^{a}	78.08 ± 0.91^{a}	87.26 ± 2.88^{a}	9.18 ± 1.98^{a}	3.74 ± 0.08^{f}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: $^{abcd...}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-4 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบค ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (RVU)				
		ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	เซตแบค
Native starch	69.48 ± 0.03^{ef}	470.46 ± 8.04^{e}	167.02 ± 3.29^{g}	303.44 ± 4.84^{d}	235.03 ± 3.11^{g}	68.01 ± 2.49^{c}
10-100-1	69.51 ± 0.72^{ef}	481.92 ± 9.30^{d}	161.22 ± 2.34^{i}	320.70 ± 4.71^{c}	238.61 ± 1.71^{gh}	77.39 ± 2.46^{b}
10-100-4	69.06 ± 0.45^{efg}	482.81 ± 6.36^{d}	166.20 ± 3.05^{gh}	316.61 ± 21.84^{c}	240.76 ± 4.83^{fg}	74.56 ± 5.46^{bc}
10-120-1	69.48 ± 0.65^{ef}	491.35 ± 9.73^{cd}	144.23 ± 1.25^{j}	347.13 ± 10.25^{a}	242.73 ± 3.74^{ef}	98.50 ± 2.70^{a}
10-120-4	68.84 ± 0.38^{fg}	503.79 ± 3.92^{b}	146.69 ± 3.89^{j}	357.10 ± 0.88^{a}	247.63 ± 2.62^{de}	100.94 ± 10.24^{a}
20-100-1	68.65 ± 0.04^{g}	532.75 ± 7.96^{a}	176.64 ± 2.83^{f}	356.11 ± 1.50^{a}	253.88 ± 8.27^{cd}	77.24 ± 4.53^{b}
20-100-4	70.32 ± 0.61^{de}	496.19 ± 8.12^{bc}	231.01 ± 3.33^{d}	265.18 ± 1.68^{e}	276.72 ± 4.20^{b}	45.71 ± 4.50^{de}
20-120-1	69.69 ± 1.05^{de}	537.71 ± 4.43^{a}	205.42 ± 2.85^{e}	332.29 ± 3.28^{b}	257.29 ± 3.62^{c}	51.87 ± 3.35^{d}
20-120-4	71.08 ± 0.65^{c}	416.13 ± 5.69^{g}	268.18 ± 3.32^{a}	147.95 ± 2.35^{h}	288.93 ± 4.41^{a}	20.75 ± 1.87^{h}
30-100-1	69.85 ± 0.49^{de}	481.79 ± 9.33^{d}	162.02 ± 4.56^{hi}	319.77 ± 1.90^{c}	239.65 ± 1.86^{gh}	77.63 ± 6.52^{b}
30-100-4	73.50 ± 0.00^{b}	436.13 ± 6.03^{f}	252.57 ± 2.04^{b}	183.56 ± 1.79^{g}	282.80 ± 1.93^{ab}	30.23 ± 0.87^{g}
30-120-1	70.88 ± 0.35^{c}	465.34 ± 5.00^{e}	246.11 ± 3.96^{c}	219.23 ± 3.78^{f}	282.35 ± 2.68^{ab}	36.24 ± 4.03^{fg}
30-120-4	84.69 ± 0.67^{a}	353.61 ± 9.56^{h}	160.83 ± 1.90^{i}	192.78 ± 4.14^{g}	202.71 ± 9.35^{h}	41.88 ± 2.44^{ef}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: $^{abcd...}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-5 ร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ร้อยละการพองตัว	ร้อยละการละลาย
Native starch	27.71 ± 0.32[a]	4.47 ± 0.85[d]
10-100-1	22.49 ± 1.36[c]	4.80 ± 0.76[bcd]
10-100-4	25.24 ± 0.67[b]	5.38 ± 0.08[b]
10-120-1	23.30 ± 0.49[c]	4.67 ± 0.22[cd]
10-120-4	21.98 ± 1.43[c]	5.14 ± 0.42[bc]
20-100-1	22.81 ± 0.76[c]	4.63 ± 0.18[cd]
20-100-4	16.18 ± 0.77[e]	2.72 ± 0.18[f]
20-120-1	18.40 ± 0.66[d]	3.40 ± 0.36[e]
20-120-4	11.76 ± 1.28[e]	1.76 ± 0.25[g]
30-100-1	18.02 ± 1.56[d]	3.38 ± 0.45[e]
30-100-4	12.02 ± 0.73[e]	1.77 ± 0.26[g]
30-120-1	15.49 ± 0.31[e]	2.50 ± 0.14[f]
30-120-4	17.96 ± 0.35[d]	7.23 ± 0.34[a]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

: [abcd…] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข-6 ร้อยละการส่องผ่าน (% Transmittance) ของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ร้อยละการส่องผ่าน (% Transmittance)
Native starch	22.20 ± 0.12^{b}
10-100-1	19.35 ± 0.24^{cde}
10-100-4	19.78 ± 0.37^{bc}
10-120-1	19.83 ± 0.15^{bc}
10-120-4	19.73 ± 0.34^{bc}
20-100-1	19.50 ± 0.29^{cd}
20-100-4	18.83 ± 0.36^{ef}
20-120-1	18.98 ± 0.36^{de}
20-120-4	18.33 ± 0.29^{fg}
30-100-1	19.68 ± 0.55^{bc}
30-100-4	18.00 ± 0.43^{g}
30-120-1	18.28 ± 0.46^{fg}
30-120-4	23.90 ± 0.79^{a}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
: $^{abcd...}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ข-7 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าวเหนียวโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
Native starch	3.49 ± 0.18[bc]
10-100-1	3.82 ± 0.33[b]
10-100-4	2.25 ± 0.51[d]
10-120-1	3.35 ± 0.23[bc]
10-120-4	2.31 ± 0.21[d]
20-100-1	3.55 ± 0.21[bc]
20-100-4	1.58 ± 0.24[e]
20-120-1	1.72 ± 0.28[de]
20-120-4	1.13 ± 0.35[e]
30-100-1	4.85 ± 0.36[a]
30-100-4	2.98 ± 0.48[c]
30-120-1	3.53 ± 1.14[cb]
30-120-4	3.18 ± 0.37[bc]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
: [abcd…] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข-8 ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร (Native starch)

ตัวอย่าง	ร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส
Native starch	48.79 $\pm$ 0.29[h]
10-100-1	48.68 $\pm$ 0.49[c]
10-100-4	48.92 $\pm$ 0.11[c]
10-120-1	50.00 $\pm$ 0.15[b]
10-120-4	47.94 $\pm$ 0.34[i]
20-100-1	45.67 $\pm$ 0.90[e]
20-100-4	47.58 $\pm$ 0.44[d]
20-120-1	48.85 $\pm$ 0.25[c]
20-120-4	47.82 $\pm$ 0.61[d]
30-100-1	47.26 $\pm$ 0.35[d]
30-100-4	47.87 $\pm$ 0.17[d]
30-120-1	50.21 $\pm$ 0.59[b]
30-120-4	61.34 $\pm$ 0.82[a]

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
: [abcd…] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางผนวกที่ ค-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความสว่าง (L*) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: L

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	18.99908194	1.72718927	517.77	<.0001*
Error	60	0.20015000	0.00333583		
Corrected Total	71	19.19923194			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	L Mean
0.989575	0.059561	0.057757	96.97097

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	1.34558611	0.67279306	201.69	<.0001*
moist*temp	2	2.54650833	1.27325417	381.69	<.0001*
moist*time	2	3.91488611	1.95744306	586.79	<.0001*
temp*time	1	1.54586806	1.54586806	463.41	<.0001*
moist	2	5.77701944	2.88850972	865.90	<.0001*
temp	1	1.54001250	1.54001250	461.66	<.0001*
time	1	2.32920139	2.32920139	698.24	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

color L*

The GLM Procedure

Dependent Variable: color L*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	0.14133472	0.14133472	45.81	<.0001*
time effect	1	0.14133472	0.14133472	45.81	<.0001*
moist effect	2	0.08185278	0.04092639	13.26	<.0001*
control vs rest	1	17.80917959	17.80917959	5772.11	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความเป็นสีแดง (a*) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: a*

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	0.01788194	0.00162563	3.10	0.0024*
Error	60	0.03148333	0.00052472		
Corrected Total	71	0.04936528			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	a Mean
0.362237	7.527571	0.022907	0.304306

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	0.00458611	0.00229306	4.37	0.0169*
moist*temp	2	0.00505833	0.00252917	4.82	0.0114*
moist*time	2	0.00025278	0.00012639	0.24	0.7867
temp*time	1	0.00000139	0.00000139	0.00	0.9591
moist	2	0.00016944	0.00008472	0.16	0.8513
temp	1	0.00361250	0.00361250	6.88	0.0110*
time	1	0.00420139	0.00420139	8.01	0.0063*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

color a*

The GLM Procedure

Dependent Variable: color a*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	0.00568889	0.00568889	11.75	0.0011*
time effect	1	0.00568889	0.00568889	11.75	0.0011*
moist effect	2	0.00353611	0.00176806	3.65	0.0314*
control vs rest	1	0.00061709	0.00061709	1.27	0.2632

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: b*

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	4.78601528	0.43509230	272.45	<.0001*
Error	60	0.09581667	0.00159694		
Corrected Total	71	4.88183194			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	b Mean
0.980373	12.35401	0.039962	0.323472

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	0.78120278	0.39060139	244.59	<.0001*
moist*temp	2	0.78300278	0.39150139	245.16	<.0001*
moist*time	2	1.04045278	0.52022639	325.76	<.0001*
temp*time	1	0.49170139	0.49170139	307.90	<.0001*
moist	2	0.30308611	0.15154306	94.90	<.0001*
temp	1	0.64033472	0.64033472	400.97	<.0001*
time	1	0.74623472	0.74623472	467.29	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

color b*

The GLM Procedure

Dependent Variable: color

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	0.03920000	0.03920000	25.49	<.0001*
time effect	1	0.03920000	0.03920000	25.49	<.0001*
moist effect	2	0.04343333	0.02171667	14.12	<.0001*
control vs rest	1	4.48615385	4.48615385	2917.46	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: to

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	400.9152632	36.4468421	28.20	<.0001*
Error	36	46.5314805	1.2925411		
Corrected Total	47	447.4467437			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	t Mean
0.896007	1.831816	1.136900	62.06408

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	1.2335352	0.6167676	0.48	0.6244
moist*temp	2	5.5704995	2.7852497	2.15	0.1306
moist*time	2	64.6982555	32.3491277	25.03	<.0001*
temp*time	1	0.8704853	0.8704853	0.67	0.4172
moist	2	261.6833207	130.8416603	101.23	<.0001*
temp	1	3.1028670	3.1028670	2.40	0.1300
time	1	63.7563000	63.7563000	49.33	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

t0

The GLM Procedure

Dependent Variable: t0

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	11.2995317	11.2995317	9.45	0.0038*
time effect	1	11.2995317	11.2995317	9.45	0.0038*
moist effect	2	8.6198120	4.3099060	3.61	0.0366
control vs rest	1	179.6320038	179.6320038	150.26	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุด (T_p) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: tp

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	755.1232257	68.6475660	398.65	<.0001*
Error	36	6.1992698	0.1722019		
Corrected Total	47	761.3224955			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	t Mean
0.991857	0.596907	0.414972	69.52040

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	21.8136645	10.9068323	63.34	<.0001*
moist*temp	2	25.0489402	12.5244701	72.73	<.0001*
moist*time	2	126.5716340	63.2858170	367.51	<.0001*
temp*time	1	17.4279152	17.4279152	101.21	<.0001*
moist	2	302.6494082	151.3247041	878.76	<.0001*
temp	1	47.1379060	47.1379060	273.74	<.0001*
time	1	214.4737577	214.4737577	1245.48	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

tp

The GLM Procedure

Dependent Variable: tp

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	67.4241317	67.4241317	396.40	<.0001*
time effect	1	67.4241317	67.4241317	396.40	<.0001*
moist effect	2	34.0618918	17.0309459	100.13	<.0001*
control vs rest	1	332.4755822	332.4755822	1954.69	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: tc

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	778.1919637	70.7447240	83.04	<.0001*
Error	36	30.6692908	0.8519247		
Corrected Total	47	808.8612545			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	t Mean
0.962083	1.193708	0.922998	77.32190

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	12.6160329	6.3080164	7.40	0.0020*
moist*temp	2	32.6310663	16.3155331	19.15	<.0001*
moist*time	2	140.9578315	70.4789158	82.73	<.0001*
temp*time	1	16.7974172	16.7974172	19.72	<.0001*
moist	2	276.7171278	138.3585639	162.41	<.0001*
temp	1	44.8514000	44.8514000	52.65	<.0001*
time	1	253.6210880	253.6210880	297.70	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

tc

The GLM Procedure

Dependent Variable: tc

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	73.9834680	73.9834680	93.90	<.0001*
time effect	1	73.9834680	73.9834680	93.90	<.0001*
moist effect	2	26.5465564	13.2732782	16.85	<.0001*
control vs rest	1	446.5255717	446.5255717	566.75	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c-T_0) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: tc-T0

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	21.85618150	1.98692559	4.38	0.0004*
Error	36	16.31292650	0.45313685		
Corrected Total	47	38.16910800			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	t Mean
0.572614	8.628525	0.673154	7.801500

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	6.31648962	3.15824481	6.97	0.0028*
moist*temp	2	10.80448054	5.40224027	11.92	0.0001*
moist*time	2	2.47456404	1.23728202	2.73	0.0787
temp*time	1	0.00580800	0.00580800	0.01	0.9105
moist	2	0.58657662	0.29328831	0.65	0.5295
temp	1	0.02842133	0.02842133	0.06	0.8037
time	1	1.63984133	1.63984133	3.62	0.0652

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

tc-T0

The GLM Procedure

Dependent Variable: tc-T0

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	0.15221269	0.15221269	0.36	0.5520
time effect	1	0.15221269	0.15221269	0.36	0.5520
moist effect	2	0.54098904	0.27049452	0.64	0.5328
control vs rest	1	8.39399219	8.39399219	19.85	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: ΔH

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	418.8722332	38.0792939	1569.03	<.0001*
Error	36	0.8736965	0.0242693		
Corrected Total	47	419.7459297			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	H Mean
0.997919	1.171729	0.155786	13.29542

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	40.9558685	20.4779342	843.78	<.0001*
moist*temp	2	60.5544255	30.2772128	1247.55	<.0001*
moist*time	2	121.6352347	60.8176173	2505.94	<.0001*
temp*time	1	27.8617687	27.8617687	1148.02	<.0001*
moist	2	86.5554807	43.2777403	1783.23	<.0001*
temp	1	28.7835188	28.7835188	1186.00	<.0001*
time	1	52.5259363	52.5259363	2164.29	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ΔH

The GLM Procedure

Dependent Variable: ΔH

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	2.1922201	2.1922201	76.09	<.0001*
time effect	1	2.1922201	2.1922201	76.09	<.0001*
moist effect	2	7.3961762	3.6980881	128.35	<.0001*
control vs rest	1	398.6147480	398.6147480	13834.7	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: pasting temperature

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	857.9526562	77.9956960	237.16	<.0001*
Error	36	11.8393750	0.3288715		
Corrected Total	47	869.7920313			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	p Mean
0.986388	0.804346	0.573473	71.29688

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	72.2879167	36.1439583	109.90	<.0001*
moist*temp	2	89.3637500	44.6818750	135.86	<.0001*
moist*time	2	189.7329167	94.8664583	288.46	<.0001*
temp*time	1	31.1213021	31.1213021	94.63	<.0001*
moist	2	286.6962500	143.3481250	435.88	<.0001*
temp	1	63.1354688	63.1354688	191.98	<.0001*
time	1	125.6150521	125.6150521	381.96	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

pasting temperature

The GLM Procedure

Dependent Variable: pasting temperature

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	5.8800000	5.8800000	19.37	<.0001*
time effect	1	5.8800000	5.8800000	19.37	<.0001*
moist effect	2	3.2801042	1.6400521	5.40	0.0085*
control vs rest	1	793.3541026	793.3541026	2612.83	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: peak viscosity

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	114961.1010	10451.0092	190.50	<.0001*
Error	36	1974.9533	54.8598		
Corrected Total	47	116936.0543			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	p Mean
0.983111	1.564942	7.406741	473.2917

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	5235.80112	2617.90056	47.72	<.0001*
moist*temp	2	9482.00647	4741.00323	86.42	<.0001*
moist*time	2	19518.22860	9759.11430	177.89	<.0001*
temp*time	1	6490.47053	6490.47053	118.31	<.0001*
moist	2	36912.09622	18456.04811	336.42	<.0001*
temp	1	6879.87741	6879.87741	125.41	<.0001*
time	1	30442.62068	30442.62068	554.92	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

peak viscosity

The GLM Procedure

Dependent Variable: peak viscosity

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	11451.54083	11451.54083	205.93	<.0001*
time effect	1	11451.54083	11451.54083	205.93	<.0001*
moist effect	2	2042.65690	1021.32845	18.37	<.0001*
control vs rest	1	61848.82254	61848.82254	1112.22	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดลดลง (breakdown) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: breakdown

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	247259.1065	22478.1006	405.99	<.0001*
Error	36	1993.1935	55.3665		
Corrected Total	47	249252.2999			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	b Mean
0.992003	2.658724	7.440866	279.8660

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	20665.65909	10332.82954	186.63	<.0001*
moist*temp	2	23586.15195	11793.07598	213.00	<.0001*
moist*time	2	40044.86478	20022.43239	361.63	<.0001*
temp*time	1	308.30672	308.30672	5.57	0.0238
moist	2	91307.93703	45653.96851	824.58	<.0001*
temp	1	9125.94630	9125.94630	164.83	<.0001*
time	1	62220.24060	62220.24060	1123.79	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

breakdown

The GLM Procedure

Dependent Variable: breakdown

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	34428.90377	34428.90377	650.73	<.0001*
time effect	1	34428.90377	34428.90377	650.73	<.0001*
moist effect	2	21220.57292	10610.28646	200.54	<.0001*
control vs rest	1	34246.79883	34246.79883	647.29	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-12 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าเซตแบค (setback) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: setback

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	31428.00640	2857.09149	127.45	<.0001*
Error	36	807.02030	22.41723		
Corrected Total	47	32235.02670			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	s Mean
0.974964	7.751928	4.734684	61.07750

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	1692.45732	846.22866	37.75	<.0001*
moist*temp	2	5318.85195	2659.42598	118.63	<.0001*
moist*time	2	2008.74980	1004.37490	44.80	<.0001*
temp*time	1	1149.15041	1149.15041	51.26	<.0001*
moist	2	17243.61545	8621.80773	384.61	<.0001*
temp	1	353.81880	353.81880	15.78	0.0003
time	1	3661.36268	3661.36268	163.33	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

setback

The GLM Procedure

Dependent Variable: setback

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	2063.120752	2063.120752	97.45	<.0001*
time effect	1	2063.120752	2063.120752	97.45	<.0001*
moist effect	2	3367.538804	1683.769402	79.53	<.0001*
control vs rest	1	1687.408296	1687.408296	79.70	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-13 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: final viscosity

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	27173.99831	2470.36348	110.84	<.0001*
Error	36	802.36088	22.28780		
Corrected Total	47	27976.35918			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	f Mean
0.971320	1.854976	4.720996	254.5044

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	11036.88904	5518.44452	247.60	<.0001*
moist*temp	2	1724.45138	862.22569	38.69	<.0001*
moist*time	2	4140.32499	2070.16249	92.88	<.0001*
temp*time	1	4124.22302	4124.22302	185.04	<.0001*
moist	2	5900.17076	2950.08538	132.36	<.0001*
temp	1	38.64635	38.64635	1.73	0.1962
time	1	209.29277	209.29277	9.39	0.0041*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

final viscosity

The GLM Procedure

Dependent Variable: final viscosity

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	1097.10563	1097.10563	51.46	<.0001*
time effect	1	1097.10563	1097.10563	51.46	<.0001*
moist effect	2	2585.41033	1292.70516	60.64	<.0001*
control vs rest	1	10960.87319	10960.87319	514.15	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่ากำลังการพองตัว (swelling power) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: swelling power

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	865.5064729	78.6824066	85.71	<.0001*
Error	36	33.0482250	0.9180062		
Corrected Total	47	898.5546979			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	s Mean
0.963221	5.095457	0.958126	18.80354

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	81.7915292	40.8957646	44.55	<.0001*
moist*temp	2	74.9219792	37.4609896	40.81	<.0001*
moist*time	2	111.8451042	55.9225521	60.92	<.0001*
temp*time	1	6.3875021	6.3875021	6.96	0.0122*
moist	2	491.3364542	245.6682271	267.61	<.0001*
temp	1	20.6063021	20.6063021	22.45	<.0001*
time	1	78.6176021	78.6176021	85.64	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

swelling power

The GLM Procedure

Dependent Variable: swelling power

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	10.47200833	10.47200833	12.24	0.0012*
time effect	1	10.47200833	10.47200833	12.24	0.0012*
moist effect	2	68.22341250	34.11170625	39.88	<.0001*
control vs rest	1	10.15920577	10.15920577	11.88	0.0014*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: amylose leaching

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	118.8564667	10.8051333	87.54	<.0001*
Error	36	4.4434000	0.1234278		
Corrected Total	47	123.2998667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	a Mean
0.963963	8.898005	0.351323	3.948333

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	26.17640417	13.08820208	106.04	<.0001*
moist*temp	2	24.60790417	12.30395208	99.69	<.0001*
moist*time	2	23.23007917	11.61503958	94.10	<.0001*
temp*time	1	14.04003333	14.04003333	113.75	<.0001*
moist	2	29.29142917	14.64571458	118.66	<.0001*
temp	1	1.38040833	1.38040833	11.18	0.0019*
time	1	0.13020833	0.13020833	1.05	0.3112

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

amylose leaching

The GLM Procedure

Dependent Variable: amylose leaching

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	1.51585208	1.51585208	8.91	0.0049*
time effect	1	1.51585208	1.51585208	8.91	0.0049*
moist effect	2	0.54727917	0.27363958	1.61	0.2131
control vs rest	1	45.46260401	45.46260401	267.27	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-16 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความใส (Clarity) ของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: clarity

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	102.0225000	9.2747727	53.59	<.0001*
Error	36	6.2300000	0.1730556		
Corrected Total	47	108.2525000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	c Mean
0.942449	2.131964	0.415999	19.51250

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	38.15291667	19.07645833	110.23	<.0001*
moist*temp	2	16.41125000	8.20562500	47.42	<.0001*
moist*time	2	14.56291667	7.28145833	42.08	<.0001*
temp*time	1	15.41333333	15.41333333	89.07	<.0001*
moist	2	9.51125000	4.75562500	27.48	<.0001*
temp	1	5.07000000	5.07000000	29.30	<.0001*
time	1	2.90083333	2.90083333	16.76	0.0002*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

clarity

The GLM Procedure

Dependent Variable: clarity

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	0.18750000	0.18750000	1.17	0.2868
time effect	1	0.18750000	0.18750000	1.17	0.2868
moist effect	2	4.39291667	2.19645833	13.66	<.0001*
control vs rest	1	81.41852564	81.41852564	506.43	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: amylose

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	51.03195000	4.63926818	21.76	<.0001*
Error	36	7.67555000	0.21320972		
Corrected Total	47	58.70750000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	a Mean
0.869258	16.18743	0.461746	2.852500

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	0.57713750	0.28856875	1.35	0.2712
moist*temp	2	1.76933750	0.88466875	4.15	0.0239
moist*time	2	0.09135417	0.04567708	0.21	0.8082
temp*time	1	3.93307500	3.93307500	18.45	0.0001*
moist	2	21.65633750	10.82816875	50.79	<.0001*
temp	1	4.80067500	4.80067500	22.52	<.0001*
time	1	18.20403333	18.20403333	85.38	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

amylose

The GLM Procedure

Dependent Variable: amylose

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	16.72060208	16.72060208	83.84	<.0001*
time effect	1	16.72060208	16.72060208	83.84	<.0001*
moist effect	2	4.63415000	2.31707500	11.62	0.0001*
control vs rest	1	0.34207067	0.34207067	1.72	0.1980

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเหนียว

The GLM Procedure

Dependent Variable: enzyme hydrolysis

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	11	693.2219417	63.0201765	250.27	<.0001*
Error	36	9.0652500	0.2518125		
Corrected Total	47	702.2871917			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	e Mean
0.987092	1.017000	0.501809	49.34208

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moist*temp*time	2	115.4052667	57.7026333	229.15	<.0001*
moist*temp	2	145.5543167	72.7771583	289.01	<.0001*
moist*time	2	102.9260667	51.4630333	204.37	<.0001*
temp*time	1	9.3104083	9.3104083	36.97	<.0001*
moist	2	145.5456167	72.7728083	289.00	<.0001*
temp	1	135.7441333	135.7441333	539.07	<.0001*
time	1	38.7361333	38.7361333	153.83	<.0001*

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

enzyme hydrolysis

The GLM Procedure

Dependent Variable: enzyme hydrolysis

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
temp effect	1	1.0443000	1.0443000	4.37	0.0432
time effect	1	1.0443000	1.0443000	4.37	0.0432
moist effect	2	0.5452125	0.2726062	1.14	0.3302
control vs rest	1	627.7255442	627.7255442	2625.24	<.0001*

หมายเหตุ : *คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวธนาพร ฤทธิชัยฤกษ์
ที่อยู่ 50 ถ.คุรุสามัคคี ต.ปากช่อง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา 30130
โทรศัพท์ 044-313875

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2547 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2549 ผู้ช่วยอาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์