

สถานะการผลิตและคุณสมบัติการทนความร้อนของสตาร์ชข้าวชีเตรท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

สภาวะการผลิตและคุณสมบัติการทนความร้อนของสตา์ชข้าวซีเตรท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ.ดร.จิรวัดน์ ขงสวัสดิกุล)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุนันทา ทองทา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.กล้าณรงค์ ศรีรอด)
กรรมการ

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ศุรวีร์ จำปาเทศ:สภาวะการผลิตและคุณสมบัติการทนความร้อนของสตาร์ชข้าวซีเตรท
(PRODUCTION CONDITIONS AND THERMAL STABILITY OF
CITRATE RICE STARCH) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร. สุนันทา ทองทา, 87 หน้า.

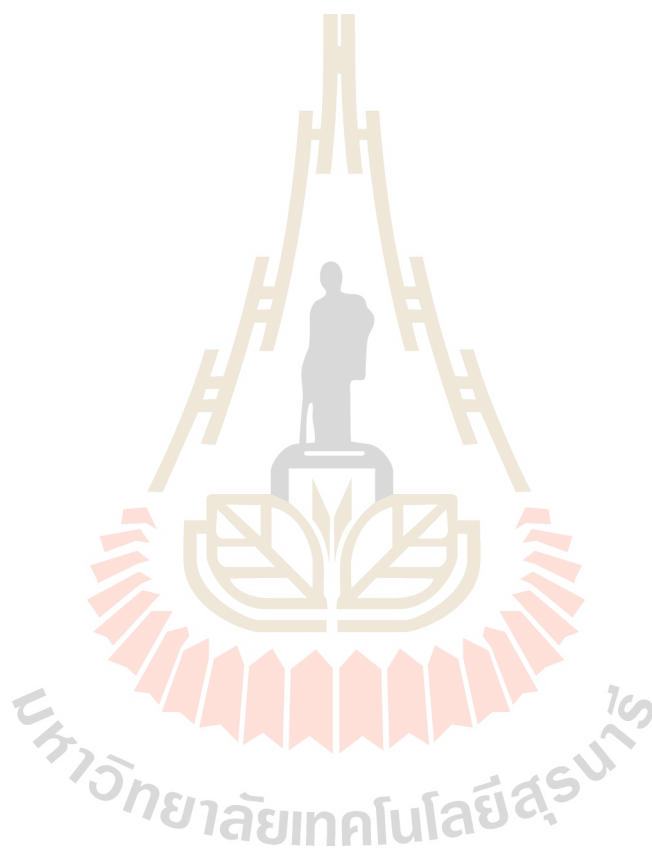
การศึกษาผลของสภาวะการบ่มต่อปริมาณสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) ของสตาร์ชข้าวซีเตรท ที่เตรียมจากการบ่มสตาร์ชข้าวกับสารละลายกรดซิตริกที่สภาวะการบ่มที่ อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 องศาเซลเซียส) เวลา 16 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียส เวลา 3-7 ชั่วโมง พบว่าสภาวะการบ่มไม่มีผลทำให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวซีเตรทแตกต่างกันซึ่งมีปริมาณ RS ในช่วง 45.15-71.95% รวมทั้งไม่มีผลทำให้ปริมาณกรดซิตริกเกาะเกี่ยว และสมบัติการเกิดเพสท์แตกต่างกัน การบ่มที่ อุณหภูมิห้อง มีผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water absorption index: WAI) ความสามารถในการละลาย (water solubility index: WSI) และค่าสมมูลเด็กโตรสมีค่ามากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่มีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและค่าความขาวน้อยกว่า ($P \leq 0.05$) รวมทั้งมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลายมากกว่าและสามารถทนความร้อนได้น้อยกว่าอีกด้วย

เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการบ่มที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณ RS และปริมาณกรดซิตริกเกาะเกี่ยวเพิ่มขึ้นจาก 53.54 เป็น 72.85% และเพิ่มจาก 12.06 เป็น 13.70% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีผลทำให้ค่า WAI WSI และค่าความขาว ลดลง รวมถึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการแตกตัวมากขึ้นด้วย

เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการบ่มที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีผลทำให้ปริมาณ RS และปริมาณกรดซิตริกเกาะเกี่ยว ของสตาร์ชข้าวซีเตรทมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 47.31 เป็น 66.86% และจาก 12.06 เป็น 13.20% ตามลำดับ แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีผล ทำให้ปริมาณกรดซิตริกเกาะเกี่ยวที่สภาวะการบ่มทั้งสองมีค่าลดลง และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นทำให้ค่า WAI WSI และค่าความขาวของตัวอย่างลดลง

การทดสอบการให้ความร้อนระบบต่าง ๆ พบว่าการให้ความร้อนกับสตาร์ชข้าวซีเตรทที่มี RS 72.26% ด้วยลูกกลิ้งและการนึ่งมีผลทำให้ปริมาณ RS ของตัวอย่างที่มีความชื้น 70% ลดลงต่ำที่สุด คือ 0.59% และ 1.91% ตามลำดับ รองลงมาคือการให้ความร้อนด้วยเตาอบที่มีการสูญเสียปริมาณ RS 44.30% ส่วนการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำเป็นเวลา 30 นาทีมีผลทำให้สูญเสียปริมาณ RS มากที่สุดคือ 66.97% นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนไม่แสดงสมบัติการเกิดเพสท์

เช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม โดยลักษณะรูปร่างเมล็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวชิตเรทหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง ด้วยลูกกลิ้ง และด้วยเตาอบ มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ไม่เหลือลักษณะ โครงสร้างของเมล็ดสตาร์ช นอกจากนี้การให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ มีผลทำให้ตัวอย่างเกิดผลึกแบบ Vh-type



SURAWEE JAMPATESH : PRODUCTION CONDITIONS AND

THERMAL STABILITY OF CITRATE RICE STARCH

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA TONGTA, Ph. D., 87 PP.

RESISTANT STARCH/ CITRATE STARCH/ THERMAL PROCESSES

The effect of incubation conditions on the resistant starch (RS) content of citrate rice starch was studied. The RS was prepared by incubation of rice starch with citric acid solution at room temperature ($28\pm 1^\circ\text{C}$) for 16 h and 50°C for 6 h prior to the actual reaction at $140\text{-}150^\circ\text{C}$ for 3-7 h. The results showed that the RS content of all of the rice starches from both of the incubation conditions ranging from 45.15 to 71.95% were not significantly different. In addition, the incubation conditions showed no effect on the bound citrate content and pasting properties. The water absorbability index (WAI), water solubility index (WSI) and dextrose equivalent (DE) of the citrate rice starches obtained from the incubation condition at room temperature were significantly higher than those of the starches incubated at 50°C . However, the melting temperature and whiteness were significantly lower ($P \leq 0.05$). In addition, the citrate rice starch granules incubated at room temperature were more disrupted and had less thermal stability.

When the reaction temperature increased from 140 to 150°C , the RS content and the bound citrate increased from 53.54% to 72.85% and 12.06 to 13.70%, respectively for the incubation at 50°C . In addition, the melting temperature of citrate rice starch was higher with the increased reaction temperature but a decrease in WAI, WSI, and whiteness was obtained. The citrate rice starch granules were more

disrupted as well.

As the reaction time increased from 3 to 7 h at the reaction temperature of 140°C for the incubation at 50°C, the RS content and bound citrate content increased from 47.31 to 66.86% and 12.06 to 13.20, respectively. However, the bound citrate content dropped from 13.70 to 11.66 when the reaction time increased from 3 to 7 h at the reaction temperature of 150°C. The longer reaction time resulted in the lower WAI, WSI, and whiteness of the samples.

After various heat treatments were carried out, the lowest loss of RS content of the citrate rice starch (72.26% RS) with 70% moisture content was found to be 0.59% loss in the drum drying process, following with 1.91% loss in the steaming processes. Furthermore, the baking process showed 44.30% RS loss and the highest loss of 66.97% was found in the autoclaving process. Moreover, the citrate rice starch obtained from all of the heating processes showed no pasting viscosity, similar to the control citrate starch. The granular shape of the rice citrate starch undergone the steaming, drum drying, and baking processes still unchanged, while it disappeared after autoclaving. These thermal processes also induced a Vh-crystalline type structure.

School of Food Technology

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ คำสั่งสอน ปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาในรั้วมหาวิทยาลัยแห่งนี้

ขอขอบพระคุณคุณวันชัย จอกกระโทก คุณศิริวิษ สุนทรานนท์ และเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1, 3 และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ด้วยดีตลอดการดำเนินการวิจัย

ขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร และสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ร่วมทุกข์ ร่วมสุข และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาวทั้งสองที่ให้ความรัก การดูแลเอาใจใส่ ให้การสนับสนุนการศึกษา และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมถึงญาติพี่น้องทุก ๆ คนที่เป็นกำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุรวีร์ จำปาเทศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช.....	5
2.2 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS).....	9
2.3 ประโยชน์ของ Resistant starch.....	11
2.4 สตาร์ชดัดแปรทางเคมี.....	12
2.4.1 ครอสลิงก์สตาร์ช (Cross-linked starch).....	12
2.4.2 สตาร์ชอะซิเตรท (Starch acetate).....	14
2.4.3 สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl starch).....	14
2.4.4 สตาร์ชซิเตรท (Citrate starch).....	15
2.5 กระบวนการให้ความร้อน (Thermal processing).....	18
2.5.1 การให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (Steam cooking).....	18
2.5.2 การให้ความร้อนด้วยหม้อความดันไอ (Autoclaving).....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer).....	21
2.5.4	การให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อน (Baking).....	21
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1	วัตถุประสงค์.....	23
3.1.1	การเตรียม Citrate starch.....	23
3.2	การวิเคราะห์ปริมาณซิเตรทเกาะเกี่ยว (Bound citrate content).....	23
3.3	การวิเคราะห์ปริมาณ Resistant starch (RS).....	24
3.4	ความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลาย.....	25
3.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืด (Pasting properties).....	25
3.6	การตรวจวัดค่า Dextrose equivalent (DE).....	26
3.7	การตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties).....	26
3.8	การวัดค่าสี.....	27
3.9	โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช (Micro structure of starch granules).....	27
3.10	X-ray Diffraction (XRD).....	27
3.11	การทดสอบการทนความร้อนด้วยการนึ่ง (Steaming).....	28
3.12	การทดสอบการทนความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ (Autoclaving).....	28
3.13	การทดสอบการทนความร้อนด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying).....	28
3.14	การทดสอบการทนความร้อนด้วยการอบ (Baking).....	29
3.15	การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	29
3.16	สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	29
4	ผลและวิจารณ์ผลวิจัย.....	30
4.1	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Bound citrate.....	30
4.2	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Resistant Starch (RS).....	32
4.3	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติด้านความหนืด.....	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อโครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช.....	38
4.5	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลาย.....	40
4.6	ผลของอุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	43
4.7	อุณหภูมิในการหลอมเหลว (DSC).....	46
4.8	ค่าสมมูลเดกซ์โตรอส (Dextrose equivalent : DE).....	48
4.9	ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความขาว (Whiteness).....	50
4.10	การทดสอบการทนความร้อน.....	54
4.11	ผลของการทดสอบการทนความร้อนต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	57
4.12	ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	60
4.13	ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านหนืดของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	62
4.14	ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	62
4.15	ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชข้าวคัดแปร.....	65
5	สรุปผลการวิจัย.....	67
	รายการอ้างอิง.....	69
	ภาคผนวก.....	77
	ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Bound citrate.....31
4.2	ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Resistant starch.....34
4.3	ค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวคิบและสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ.....37
4.4	ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ WAI และ WSI..... 42
4.5	อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ สภาวะต่าง ๆ.....49
4.6	ค่าสมมูลเด็คซ์โตรส(Dextrose equivalent: DE) ของตัวอย่างสตาร์ช ข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ.....51
4.7	ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ค่าความขาว..... 52
4.8	ผลการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่างๆ (Cooking processes) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวคัดแปร..... 59
4.9	อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ.....66

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน.....5
2.2	ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline structure) ของเม็ดสตาร์ช.....7
2.3	ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B.....8
2.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะ โครงสร้างผลึก แบบ A, B และ V_h9
2.5	ลักษณะโครงสร้างของ RS ₁ (a), RS ₂ (b), RS ₃ (c), RS ₄ (d) และ RS ₅ (e).....10
2.6	ปฏิกิริยาการเกิดครอสลิงกิงระหว่างสตาร์ชกับ POCl ₃ , STMP และ EPI.....12
2.7	ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับ ไวนิลอะซิเตทและ อะซิติกแอนไฮไดรด์.....15
2.8	ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์ฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับ โพรพิลีนออกไซด์.....15
2.9	การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก.....17
4.1	โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคั่วที่สภาวะ ในการต้ม 50°C 6 ชั่วโมง.....36
4.2	โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคั่วที่สภาวะ ในการต้ม 28°C 16 ชั่วโมง.....36
4.3	ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวคั่วที่สภาวะ การต้ม 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง.....39
4.4	ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวคั่วที่สภาวะ การต้ม 28 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง.....40
4.5	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคั่ว แปร ที่สภาวะการต้ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....44
4.6	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคั่ว แปร ที่สภาวะการต้ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....44

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.7	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวคิบบ และสตาร์ชข้าวคัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	45
4.8	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวคิบบ และสตาร์ชข้าวคัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	45
4.9	ค่าความขาวของตัวอย่างที่สภาวะในการบ่ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง.....	53
4.10	ค่าความขาวของตัวอย่างที่สภาวะในการบ่ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง.....	54
4.11	ผลการทดสอบการเกิดเจลลาติโนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน RVA, แล้ว autoclave 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง, และต้มประมาณ 3 ชั่วโมง.....	56
4.12	ผลการทดสอบการเกิดเจลลาติโนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน autoclave 121 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง.....	56
4.13	ลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน, b) สตาร์ชข้าวคัดแปร (40%mc), c) สตาร์ชข้าวคัดแปร (70%mc) ที่ให้ความร้อนด้วยการนึ่ง, d) สตาร์ชข้าวคัดแปร (70%mc) ให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ, e) สตาร์ชข้าวคัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่120°C, f) สตาร์ชข้าวคัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่140°C, g) สตาร์ชข้าวคัดแปร (50%mc) ให้ความร้อนด้วยเตาอบ.....	61
4.14	โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน และสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ	63
4.15	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ไม่ผ่าน การปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction).....	64
4.16	ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction).....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในใบ และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บสะสมอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับสตาร์ชจากพืชแตกต่างกันตามภูมิภาคในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพดและข้าวสาลีเป็นแหล่งให้สตาร์ชที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย, แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลังเป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกัญญา, 2546) ซึ่งสามารถสกัดเอาสตาร์ชออกมาได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง และต้นทุนต่ำ จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543) แต่เนื่องจากการใช้สตาร์ชดิบ (raw starch หรือ native starch) ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ มีข้อจำกัด เนื่องจากคุณสมบัติของสตาร์ชดิบ ได้แก่ ไม่สามารถทนต่อสภาวะการใช้ที่มีพีเอชเป็นกรด อุณหภูมิสูง และเครื่องมือที่มีแรงเฉือนสูง นอกจากนี้เมื่อเกิดเจลาติไนเซชันแล้วอาจเกิดโรโทรเกรดทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบหรือเกิดเจลแข็ง รวมถึงเมื่อเก็บนานขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดซินเนอร์เจซิส (syneresis) มีผลทำให้น้ำถูกบีบออกจากก้อนเจลาตินเป็นต้น (วรรณดา ตูลย์ชัย, 2551) ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาสตาร์ชดิบมาดัดแปรโดยวิธีทางเคมี ทางกายภาพ และการใช้เอนไซม์ โดยเป็นการทำให้โครงสร้างธรรมชาติของเม็ดสตาร์ชมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป ส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ตามที่ต้องการ เช่น ทำให้ความหนืดลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน นอกจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดีขึ้นนี้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ร่างกายจะได้รับ เนื่องจากสตาร์ชเป็นแหล่งพลังงานหลักของมนุษย์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสุขภาพโดยเฉพาะในเรื่องของระดับน้ำตาลในเลือดที่มีผลกระทบต่อผู้ที่ป่วยเป็นโรคเบาหวาน โรคอ้วน และไขมันอุดตันในเส้นเลือด เป็นต้น จึงได้มีการดัดแปรสตาร์ชที่สามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในร่างกายที่เรียกว่า Resistant Starch (RS) ที่ไม่ถูกย่อยในลำไส้เล็กแต่จะถูกหมักในลำไส้ใหญ่ ทำให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งลำไส้ ลดระดับน้ำตาลในเลือด เป็นอาหารของโพรไบโอติก ลดคอเลสเตอรอล ชะลอการจับตัวของไขมัน และเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุ เป็นต้น (Sajilata, Singhal, and Kulkarni, 2006 อ้างถึงใน Chung et al, 2008) โดยสตาร์ชทนย่อยนี้แบ่งออกเป็น 5 ชนิด ได้แก่ RS type 1, RS type 2, RS type 3, RS type 4 และ RS type 5

เมื่อเปรียบเทียบ RS ทั้ง 4 ชนิดพบว่า RS type 4 หรือ chemically modified starch มีความทนทานต่อเอนไซม์มากที่สุดในการทดลองแบบ in vitro (Mun and Shin, 2006) เนื่องจากว่าการดัดแปรสตาarch ทางเคมีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะภายในโครงสร้างของสตาarch ที่ตำแหน่ง α - (1, 2), α - (1, 3), และ α - (1, 6) ซึ่งช่วยขัดขวางไม่ให้เอนไซม์เข้าไปย่อยพันธะ α - (1, 4), และ α - (1, 6) จึงทำให้สตาarch ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้โดยมีการทดสอบการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาarch ฟอสเฟต สตาarch ไฮดรอกซีโพรพิล สตาarch อะซิเตท และสตาarch ซิเตรท แล้วพบว่าถูกย่อยได้ลดลง และพบว่าอัตราการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Han and Bemiller (2007) ในการทำสตาarch เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดซัคซินิก แอนไฮไดรด์ เพื่อดูผลของการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าสตาarch ดัดแปร มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 7.9% เป็น 25% แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลงซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ Chung และคณะ (2008) ที่ศึกษาผลของการดัดแปรสตาarch ข้าวโพดทางเคมี โดยการทำออกซิเดชัน (oxidation) อะซิทิเลชัน (acetylation) ไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropylation) และครอสลิงกิง (cross-linking) ต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แพนكريเอติกแอลฟาอะไมเลส (pancreatic α -amylase) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาแบบ wet reaction และเป็นการดัดแปรของสตาarch ในระดับที่ยอมรับทางการค้าพบว่าการทำออกซิเดชัน อะซิทิเลชัน ไฮดรอกซีโพรพิเลชัน และครอสลิงกิง (cross-linking) ที่มีค่า DS เท่ากับ 0.475, 0.482, 2.086, และ 0.137% มีปริมาณ RS เท่ากับ 35.1, 23.4, 34.2, และ 13.9% ตามลำดับ โดย Code of Federal Regulations (CFR)(2006) ได้กำหนดปริมาณสารเคมีที่อนุญาตให้ใช้ในการดัดแปรและเหลือตกค้างได้ดังนี้ การทำออกซิไดซ์สตาarch ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์คือเหลือไม่เกิน 0.055 ปอนด์ของคลอรีนต่อปอนด์ของสตาarch แห่ง การทำอะซิทิเลชันด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์ กำหนดให้มีหมู่อะซิติดได้ไม่เกิน 2.5% การทำไฮดรอกซีโพรพิเลชันใช้โพรพิลีนออกไซด์ได้ไม่เกิน 25% และการทำครอสลิงกิงด้วย sodium trimetaphosphate (STMP) ร่วมกับ sodium tripolyphosphate (STPP) จะต้องมีฟอสฟอรัสเหลือตกค้างได้ไม่เกิน 0.4% Klaushofer และคณะ (1978) ได้ศึกษาถึงการผลิตสตาarch ซิเตรทและการใช้ประโยชน์ โดยใช้กรดซิตริกในการดัดแปรสตาarch จากธัญพืชและจากส่วนรากพบว่าเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ที่ได้ทำการดัดแปรสตาarch ข้าวโพดด้วยกรดซิตริก ที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.09 เป็น 0.12 ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 37.8 เป็น 78.8% ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Shin และคณะ (2007) ในการผลิตสตาarch ข้าวด้วยกรดซิตริกที่ปริมาตรอุณหภูมิ และระยะเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jyothi และคณะ (2007) ในการดัดแปรสตาarch ซิเตรทจากสตาarch มันสำปะหลังโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ระดับของกรดซิตริกอุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ พบว่า

DS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอุณหภูมิ รวมถึงความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่า DS สูงสุดคือ 0.063 ทำให้ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยต่ำสุดคือ 586 กรัมต่อกิโลกรัมจากผลการศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า DS สูงขึ้นจะทำให้มีปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย

Schrijver และคณะ (1999) ได้ทำการทดสอบแบบ *in vitro* โดยให้หนูรับประทานสตาร์ช ชิเตรท พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพยาธิวิทยากับหนูเมื่อเปรียบเทียบกับ สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด การผลิตสตาร์ชตัดแปรทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกจำเป็นต้องมีการให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากว่าเป็น *dry reaction* ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสลายพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ช เพื่อให้สามารถสร้างพันธะใหม่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของสารเคมีที่ใช้ โดยต้องมีการบ่มสารละลายกรดและสตาร์ชเข้าด้วยกันเป็นระยะเวลาสั้นก่อนการทำปฏิกิริยาเพื่อให้กรดบางส่วนสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและเกิดปฏิกิริยาการแทนที่หรือพันธะเชื่อมข้ามระหว่างกรดกับสตาร์ชโมเลกุลในระหว่างการให้ความร้อน

อย่างไรก็ตามจากกรายงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสตาร์ชตัดแปรทางเคมีข้างต้นทั่วไปมีปริมาณ RS ที่ไม่สูงมากหรือในกรณีที่มีปริมาณสูงแต่ก็ยังใช้ระยะเวลาในการผลิตนาน ทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณสารเคมีที่ใช้ได้และปริมาณสารตกค้าง รวมถึงปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบ *wet reaction* ทำให้มีปริมาณน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิธีการในการผลิตสตาร์ชทนย่อยให้มีปริมาณ RS ที่สูงขึ้น พร้อมมีคุณสมบัติในการทนความร้อนได้ดี และลดระยะเวลาในการผลิตลง ช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งในการผลิต ใช้สารเคมีที่ปลอดภัยได้อย่างไม่จำกัด เช่นกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่มีความปลอดภัยต่อร่างกายและ USFDA ได้จัดประเภทว่าเป็น Generally Recognized as Safe (GRAS) คือเป็นสารที่สามารถใช้ได้อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้ยังมีราคาไม่แพง และสามารถจัดหาได้ง่าย ดังนั้นการนำกรดซัลฟิวริกมาใช้ในการผลิต RS ด้วยวิธี *dry reaction* จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งซึ่งจะทำให้ได้แป้งทนย่อยที่มีปริมาณ RS ที่สูง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรด้วยกรดซัลฟิวริกต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวตัดแปรทนย่อยต่อเอนไซม์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าวตัดแปรทนย่อยต่อเอนไซม์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการให้ความร้อนประเภทต่างๆ ต่อปริมาณ RS และคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชข้าวตัดแปรทนย่อยต่อเอนไซม์

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การตัดแปรรสตาร์ชด้วยวิธีทางเคมีโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซิตริกกับสตาร์ชข้าวที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ จะทำให้โครงสร้างของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยโครงสร้างของสตาร์ชได้น้อยลง ส่งผลให้สตาร์ชสามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสได้มากขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรรได้แก่ สภาพในการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อปริมาณกรดซิตริกเกาะเกี่ยวในสตาร์ชโมเลกุล (Bound citrate, BC) และปริมาณ resistant starch (RS) รวมถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการอีกทั้งศึกษาผลของกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อปริมาณ RS และคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชข้าวตัดแปรร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

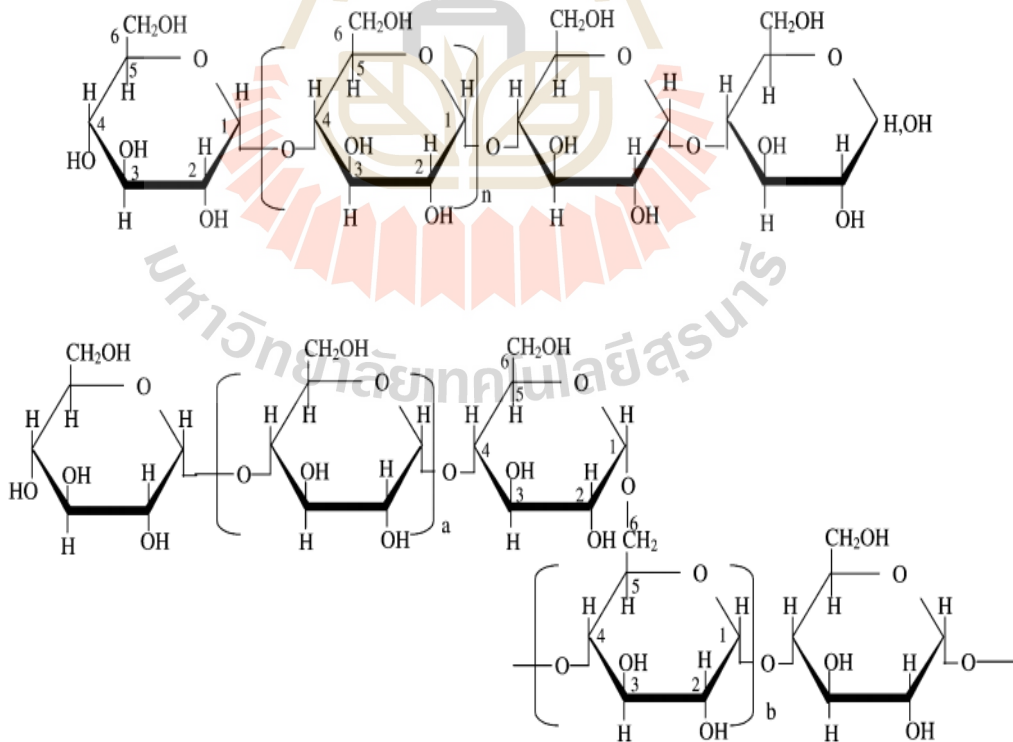
- 1.5.1 ทราบถึงผลของสภาพในการบ่ม อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชชนิดนี้เพื่อให้ได้ปริมาณ RS ที่สูง
- 1.5.2 ทราบถึงผลของกระบวนการแปรรูปอาหารที่ส่งผลให้ปริมาณ RS ลดลงน้อยที่สุดหลังจากผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ
- 1.5.3 สามารถนำความรู้เกี่ยวกับสภาวะการบ่มอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรรที่มีปริมาณ RS และทนความร้อนสูงในเชิงการค้าได้

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (reducing end group) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะมิโลเพกทิน (amylopectin) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2546) ดังรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

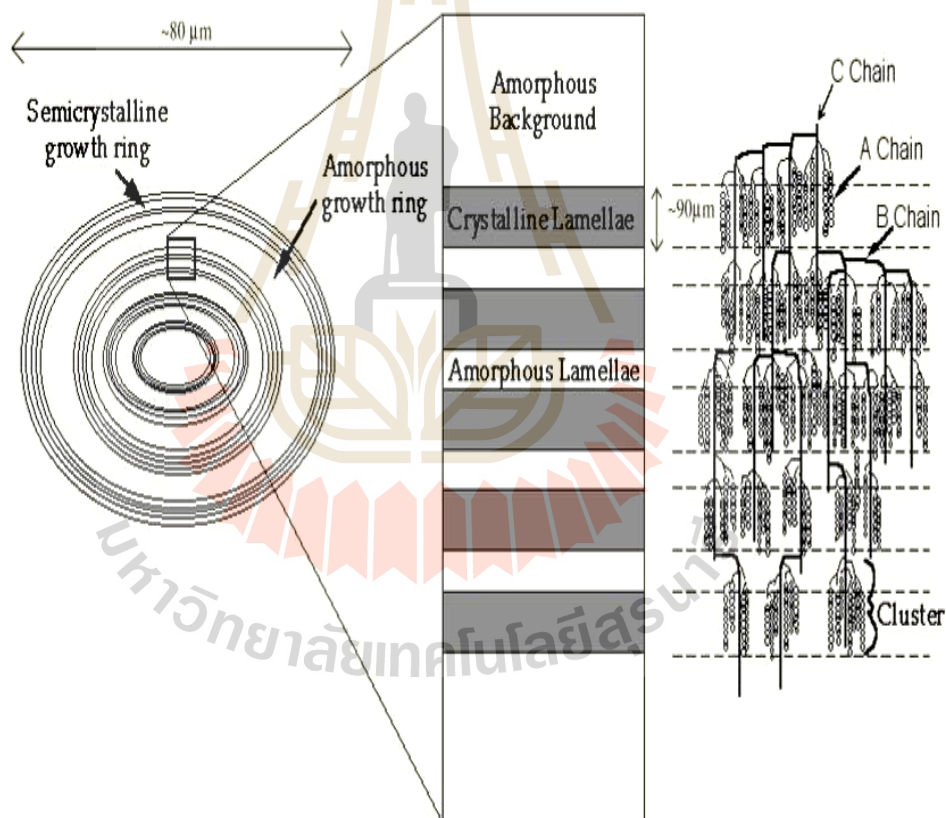
ที่มา : Tester et al. (2004)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 คาลตัน ประกอบด้วย กลูโคสประมาณ 1,000-6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และอาจพบ กิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Bul on et al.,1998; Hizukuri, 1985) อะมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีขนาดโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุล และมีค่าระดับขั้นของ พอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกัน ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดสตาร์ช ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช โดยอะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกตินบางส่วนกระจายอยู่ ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โครงสร้างของอะมิโล สมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย ซึ่ง ถ้าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500-160,000 คาลตัน จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็น ลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจงและอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler and Daniel, 1984)

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสที่มีขนาดใหญ่กว่าอะมิโลสหลายเท่า มี น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7 - 10^8 คาลตัน (Bul on et al.,1998) ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ กลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิดคือ สาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิคัล 1 หมู่ แสดงดังภาพที่ 2.2 ในอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะ ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้นสำหรับอะมิโลเพกตินของสตาร์ชข้าวสายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90% จะประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละ กลุ่ม (กล้าณรงค์ศรีรอดและเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2546)

สตาร์ชในธรรมชาติทั่วไปจะอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กพบในพืชเมล็ด พืชหัว และ พืชราก ซึ่งมีขนาด รูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชนั้น ๆ (P rez and Bertoft, 2010; Srichuwong et al., 2005) โดยสตาร์ชข้าว (rice starch) เป็นสตาร์ชที่มีขนาดของ เม็ดสตาร์ช (starch granule) เล็กที่สุดในกลุ่มเมล็ดพืชจากธัญพืช ซึ่งจะมีความยาวของเม็ดสตาร์ชอยู่ ในช่วง 2-7 ไมโครอน (Vandeputte and Delcour, 2004) มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม มักเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150 ไมโครอน (Hayakawa, Seo, and Igaue, 1980) ซึ่ง องค์ประกอบหลักของสตาร์ชข้าวจะประกอบด้วยสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินใน ปริมาณที่แตกต่างกัน (อรอนงค์นัยวิกุล, 2547) ขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของข้าว เม็ดสตาร์ชมี การจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) คือ โครงสร้างส่วนอสัณฐาน (amorphous

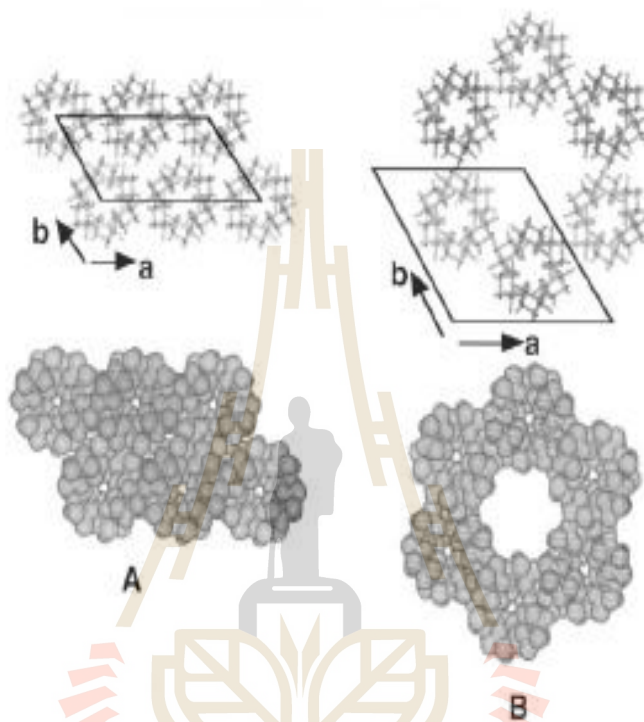
region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) โดยส่วนอัดแน่นของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (Jacobs and Delcour, 1998) ขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ต่อกันของคลัสเตอร์อะมิโลเพกติน (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า amorphous lamellae และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวม้วนคู่ (double helices) อย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณส่วนนี้ว่า crystalline lamellae แสดงดังภาพที่ 2.2 นอกจากนี้สตาร์ชข้าวยังประกอบไปด้วยองค์ประกอบรองได้แก่ ไลโปด, โปรตีน, แคลเซียม, โปแตสเซียม, แมกนีเซียม และโซเดียมที่อยู่ในรูปไอออน (Vandeputte and Delcour, 2004)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline structure) ของเม็ดสตาร์ช
ที่มา : Jacobs and Delcour (1998)

เม็ดสตาร์ชมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจัดเป็นผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้า

มีการเรียงตัวกันหลวม ๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (สตาร์ชจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.3 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (จากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V (Sevenou et al., 2002; Zobel, 1998)

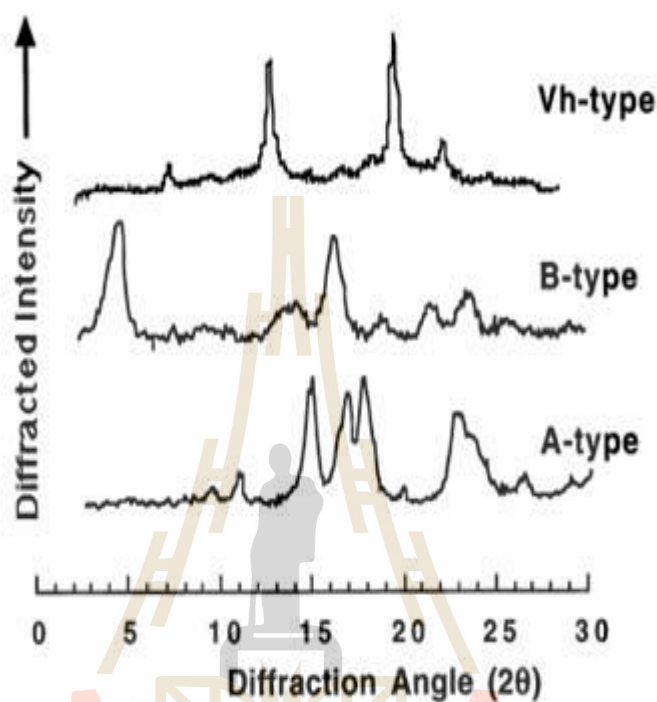


ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา : Buleon et al. (1998)

สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีกคู่ (doublet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ $17-18^\circ$ และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 23° แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6° ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17° แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 18° และมี doublet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 22 และ 24° ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากพืชหัว ส่วนสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือมี singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17.9° ตัวอย่างเช่น สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว รากลำต้น และสตาร์ชจากผลไม้บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะผลึกแบบ V ที่เกิดจากการรวมตัว

กันของอะมิโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 13 และ 20° (รูปที่ 2.4) (Buleon et al.,1998; Derycke et al., 2005)

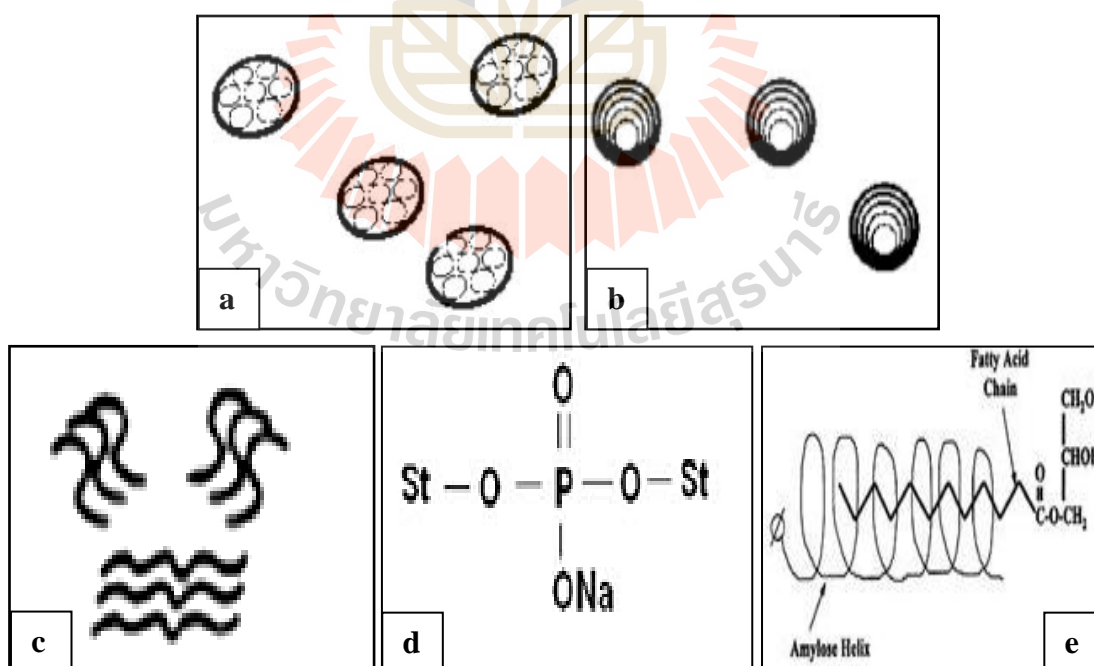


ภาพที่ 2.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A, B และ V_h
ที่มา : Buleon et al. (1998)

2.2 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS)

สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (enzymes-resistant starch หรือ resistant starch) เป็นสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -amylase และ pullulanase ได้ในเวลา 120 นาที (Englyst and Hudson 1992) โดย European Fair Concerted Action on Resistant Starch (EURESTA) ได้ให้คำจำกัดความว่าเป็นสตาร์ชหรือผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกดูดซึมและถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของคนร่างกายปกติ และถูกหมักด้วยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ (Englyst et al., 1992) RS สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทตามความสามารถในการต้านการย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก (Lunn and Buttriss, 2007; Sajilata et al, 2006; Thompson, 2000) ได้แก่ RS type I (RS_1) เป็น RS ที่อยู่ในเมล็ดพืชที่ถูกยึดหรือตรึงไว้ภายในเมล็ดพืชทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้

(รูปที่ 2.5a) พบทั่วไปในเมล็ด (grain และ seeds) ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารทั่วไป RS Type II (RS_2) เป็น RS ที่อยู่ในรูปสตาร์ชดิบ (native starch granule) เป็น ungelatinized starch (รูปที่ 2.5b) พบมากในสตาร์ชมันฝรั่ง (potato starch) และสตาร์ชกล้วยดิบ (green banana) เนื่องจากอยู่ในรูปที่เป็นผลึกที่เรียงตัวหนาแน่นทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้ RS Type III (RS_3) เป็น RS ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation Starch) โดยส่วนใหญ่เป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส (amylose retrogradation) (รูปที่ 2.5c) พบในอาหารที่ให้ความร้อนชื้น (moisture-heat foods) เช่น ขนมปัง มันฝรั่งที่สุกและเย็นลง (cooked and cooled potato) เป็นต้น RS Type IV (RS_4) เป็น RS ที่เกิดจากการดัดแปรสตาร์ชทางเคมี (chemical modified starch) เช่น การทำเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) อีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) และการทำครอสลิงก์ (cross-linking) (Ratnayake and Jackson, 2008; Sanzet al., 2009) (รูปที่ 2.5d) ซึ่งจะทำให้เกิดหมู่แทนที่หรือพันธะเพิ่มขึ้นภายในโครงสร้างของสตาร์ชทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้ โดยขอบเขตในการดัดแปรขึ้นอยู่กับ แหล่งของสตาร์ชที่ใช้ ชนิดของสตาร์ช ระดับการดัดแปร และวิธีที่ใช้ในการดัดแปร (Perry, 1999) และ RS Types V (RS_5) เป็น RS ที่อยู่ในรูปของ V-form (รูปที่ 2.5e) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylase-lipid complex) (Li et al., 2011)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของ (a) RS_1 , (b) RS_2 , (c) RS_3 (d) RS_4 และ (e) RS_5

ที่มา : ดัดแปลงจาก Sajilata et al.(2006) และ Singh et al. (2007)

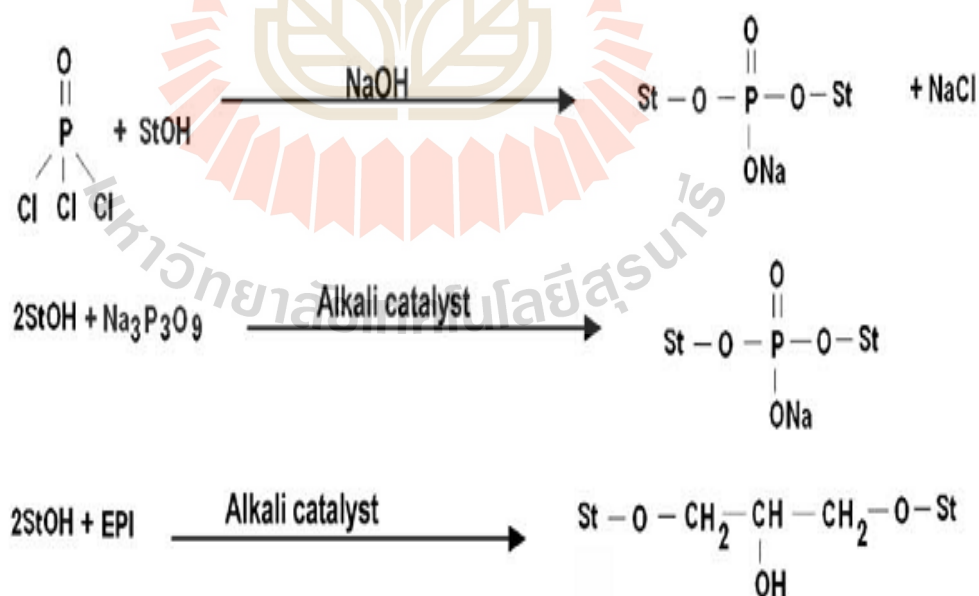
2.3 ประโยชน์ของ Resistant starch

จากคุณสมบัติของ RS ที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กจึงทำให้ RS มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร (dietary fiber) (Brouns et al, 2002; Hoebler et al, 1999) ซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่ดีให้กับจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ทำให้เกิดการหมักได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ (short-chain fatty acid, SCFA) ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดบิวทิริก (butyric acid) และกรดโพรพิโอนิก (propionic acid) (Sajilata et al, 2006) โดยกรดบิวทิริกที่เกิดขึ้นยังช่วยปรับสภาพตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์และยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติ (transformed cell) ในสิ่งมีชีวิต และช่วยเพิ่มการตายตามธรรมชาติของเซลล์ (apoptosis) ซึ่งจะมีบทบาทในการป้องกันโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ (Ranhotra, Gelroth, and Glaser, 1996) โดย Liu and Xu (2008) ได้รายงานว่าการรับประทานที่ได้รับ RS แบบแปรผันตามปริมาณที่รับประทาน (dose-dependently) สามารถยับยั้งการเกิดรอยโรคของมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Aberrant crypt foci, ACF) ในระยะเริ่มต้นได้ ทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารส่งผลให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย (Scholz-Ahrens et al., 2007) นอกจากนี้ยังมีบทบาทในการลดคอเลสเตอรอลในเส้นเลือดเนื่องจากมีปริมาณแคลอรีต่ำประมาณ 1.6-2.8 กิโลแคลอรีต่อกรัม จึงสามารถลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ และโรคเบาหวานได้ รวมถึงมีผลในการลดค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index) ของอาหารด้วย (Hoebler et al., 1999; Sajilata et al, 2006) ซึ่งจะช่วยป้องกันหรือลดภาวะโรคอ้วนได้ และเหมาะสมสำหรับผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน (Haralampu, 2000) นอกจากนี้การบริโภค RS หรือเส้นใยอาหารยังช่วยเพิ่มปริมาณออกจาระ เพิ่มความถี่ในการขับถ่ายและลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก โรคผนังลำไส้ใหญ่อักเสบ และยังช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดนิ่วในถุงน้ำดีรวมทั้งช่วยส่งเสริมลำไส้ในการดูดซึมแร่ธาตุได้ดีขึ้นอีกด้วย (Lopez et al., 2001; Sajilata et al, 2006) โดย RS₄ มีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์มากที่สุดในการทดลองแบบ *in vitro* เมื่อเปรียบเทียบกับ RS ชนิดอื่น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ชซึ่งช่วยขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ (Mun and Shin, 2006) จึงทำให้ RS₄ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งยังสามารถผลิตได้จากสตาร์ชและสารเคมีหลายชนิดดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำ RS ไปประยุกต์ใช้ในอาหารชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ขนมอบ และใช้เพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป

2.4 สตาร์ชตัดแปรทางเคมี

2.4.1 ครอสลิงสตาร์ช (Cross-linked starch)

โดยทั่วไปครอสลิงค์สตาร์ชเป็นสตาร์ชตัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multifunctional reagent) เรียกสารเคมีนี้ว่า cross-linking reagent เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันหรืออีเทอร์ริฟิเคชัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชดังแสดงในรูปที่ 2.6 พันธะโควาเลนต์จะช่วยให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช โดยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน (กล้าณรงค์ศรีรอดและเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2546) ส่งผลให้เมื่อให้ความร้อนแก่ครอสลิงค์สตาร์ช ถึงแม้ว่าพันธะไฮโดรเจนจะอ่อนตัวลง หรือ ถูกทำลาย แต่เม็ดสตาร์ชยังคงแข็งแรงอยู่ได้ด้วยพันธะที่เกิดจากการตัดแปรทางเคมี สภาวะที่ใช้ในการทำ ครอสลิงค์สตาร์ชมีหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่มาทำปฏิกิริยา ได้แก่ STMP STPP และ ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ (POCl_3) เป็นต้น โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาในสารละลายสตาร์ช ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 50 องศาเซลเซียสที่ช่วง พีเอชเป็นกลางถึงด่างอ่อน (Wurzburg,1986)



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดครอสลิงกิงระหว่างสตาร์ชกับ POCl_3 ,
STMP และ EPI

ที่มา : Singh et al. (2007)

ในปี 2006 Xiao-xi และคณะได้ศึกษาผลของการทำครอสลิงค์สตาร์ชด้วย POCl_3 ต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสในสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้ระดับความเข้มข้นของ POCl_3 ที่ 0.1-30 % พบว่า เมื่อระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังมากขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการย่อยของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีค่าลดลงเนื่องจากการทำครอสลิงค์จะทำให้เกิดพันธะภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นจึงทำให้ทนต่อการย่อยได้มากขึ้น

Hwang และคณะ (2006) ก็ได้ศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของสตาร์ชข้าวอะมิโลเพคตินสูงที่มีการดัดแปรด้วยการทำครอสลิงค์โดยใช้ POCl_3 ที่ระดับความเข้มข้น 0.002, 0.004, 0.006 และ 0.008 % ตามลำดับ พบว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของ POCl_3 เพิ่มขึ้นทำให้ระดับการเกิดครอสลิงค์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณ RS สูงมากขึ้นคือจาก 1.17 เป็น 2.47% ซึ่งเมื่อระดับการเกิดครอสลิงค์เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการพองตัวของ (Swelling) และความสามารถในการละลาย (Soluble) ของสตาร์ชลดลง เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปได้จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีค่าลดลง

ต่อมาในปี 2009 Khondkar และคณะทำการศึกษาสภาวะในการผลิตครอสลิงค์สตาร์ชระหว่างสาร STMP กับเจลาตินในข้าวโพดข้าวเหนียว (gelatinized waxy maize starch) และโลเมทอกซี เพคติน (low-methoxy pectin mixture) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (สตาร์ช:เพคติน = 3:2, 2:3) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียสและระยะเวลา 2-24 ชั่วโมง เพื่อดูผลของการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส โดยสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าการเกิดครอสลิงค์ระหว่างสตาร์ชและเพคตินที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลทำให้ตัวอย่างดังกล่าวถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้น้อยกว่าสตาร์ชดิบ โดยครอสลิงค์ที่มีอัตราส่วนของเพคตินมากกว่าจะถูกย่อยได้น้อยกว่า ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสตาร์ชกับเพคติน (heterologous cross-linked) ขึ้น จึงทำให้ขัดขวางการย่อยของเอนไซม์

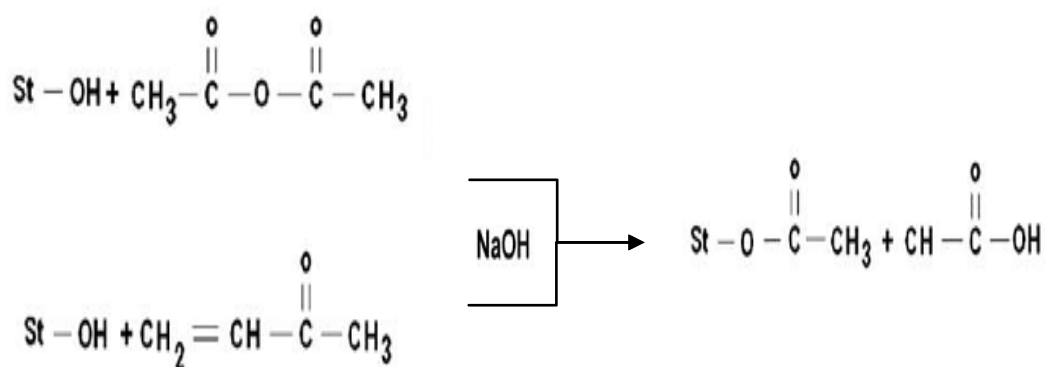
ในปี 2010 Koo และคณะได้ศึกษาผลของการทำครอสลิงค์ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชข้าวโพดโดยเตรียมจากการใช้สารผสมระหว่าง STMP/STPP ในอัตราส่วน 99 : 1 (w/w) ที่ระดับ 5-12% พบว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารผสมสูงที่สุดคือ 12 % นั้น สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการทำครอสลิงค์มีระดับครอสลิงค์สูงที่สุดคือ 99.1 % ตลอดจนมีปริมาณ RS คือ 58.68 % ซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดอีกด้วย จึงอาจสรุปได้ว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารเคมีในการทำครอสลิงค์ในสตาร์ชข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ระดับการเกิดครอสลิงค์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มสูงขึ้นด้วยนอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระดับครอสลิงค์ที่เพิ่มสูงขึ้นยังทำให้คุณสมบัติด้านการละลายของสตาร์ชข้าวโพดลดลงอีกด้วย

2.4.2 สตาร์ชอะซิเตท (Starch acetate)

สตาร์ชอะซิเตทเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ของสตาร์ชโพลิเมอร์ ที่หมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสเปลี่ยนเป็นหมู่อะซิเตทด้วยสารเคมี ได้แก่ กรดอะซิติก และอะซิติกแอนไฮไดรด์ในสภาวะต่างโดยระดับการแทนที่จะขึ้นอยู่กับสภาวะและชนิดของสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยา (รูปที่ 2.7) (Wurzbug, 1986) Shogren and Biswas (2006) ได้ศึกษาการเตรียมสตาร์ชอะซิเตทที่สามารถละลายน้ำได้ จากสตาร์ชข้าวโพดโดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียสและเวลา 4-7 นาที พบว่ามีค่า DS เท่ากับ 0.4-0.9 และมีความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องได้มากกว่า 90% ในปีเดียวกัน Shon and Yoo (2006) ได้ศึกษาผลของการทำอะซิเตชันต่อคุณสมบัติการไหลของสตาร์ชข้าวโพด โดยใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์ที่ระดับ 2, 4, 6, 8, และ 10% ในการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพด พบว่าเมื่อระดับของอะซิติกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่า DS สูงขึ้น เป็นผลทำให้ค่าการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชทำให้ความเป็นระเบียบของเม็ดสตาร์ชลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ง่ายขึ้นจึงทำให้มีค่าการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น

2.4.3 สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl starch)

สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลถูกผลิตขึ้นมาครั้งแรกเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide) ในสภาพสารละลายสตาร์ช โดยเกิดปฏิกิริยาการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (รูปที่ 2.8) โดยมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปประมาณ 5-7% เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งทำให้สตาร์ชที่ได้มีความทนต่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (cold-storage) มีความใส และมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2546; Wurzburg, 1986) ในปี 2007 Jyothi และคณะได้ศึกษาวิธีการเตรียมและคุณสมบัติของสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลจากมันสำปะหลัง โดยได้ทำการดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยโพรพิลีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 50, 100, 150 และ 200 กรัมต่อกิโลกรัมสตาร์ชพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์มากขึ้นมีผลทำให้ DS เพิ่มขึ้นจาก 0.259 เป็น 1.405 ซึ่งส่งผลให้สตาร์ชถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (digestibility) ลดลงจาก 840 เป็น 424 กรัมต่อกิโลกรัม ส่วนค่าการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโมเลกุลของสตาร์ชจึงทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความเป็นระเบียบลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้ามาได้ง่ายขึ้น จึงทำให้มีค่าการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับ

ไวนิล อะซิเตทและ อะซิติกแอนไฮไดรด์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Singh et al. (2007)



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างสตาร์ชกับ โพรพิลีนออกไซด์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Tharanathan (2005) และ Singh et al. (2007)

Ebihara และคณะ (2006) ได้ศึกษาการเตรียมไฮดรอกซีโพรพิล-ไดสตาร์ชฟอสเฟตที่ผลิตจากสตาร์ชมันฝรั่งที่ความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์เพื่อให้ได้ระดับการแทนที่ 2 ระดับ ได้แก่ high DS และ low DS และที่ degree of cross-linking (DC) 3 ระดับ คือ low DC, medium DC และ high DC พบว่าเมื่อระดับครอสลิงกิงและระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นคือ จาก 0.05 เป็น 0.23 ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 21.9 เป็น 63.1% และมีค่า swelling power เพิ่มขึ้นจาก 14.3 เป็น 17.1 แต่เมื่อระดับครอสลิงกิงเพิ่มขึ้น swelling power มีค่าลดลง

2.4.4 สตาร์ชซิเตรต (Citrate starch)

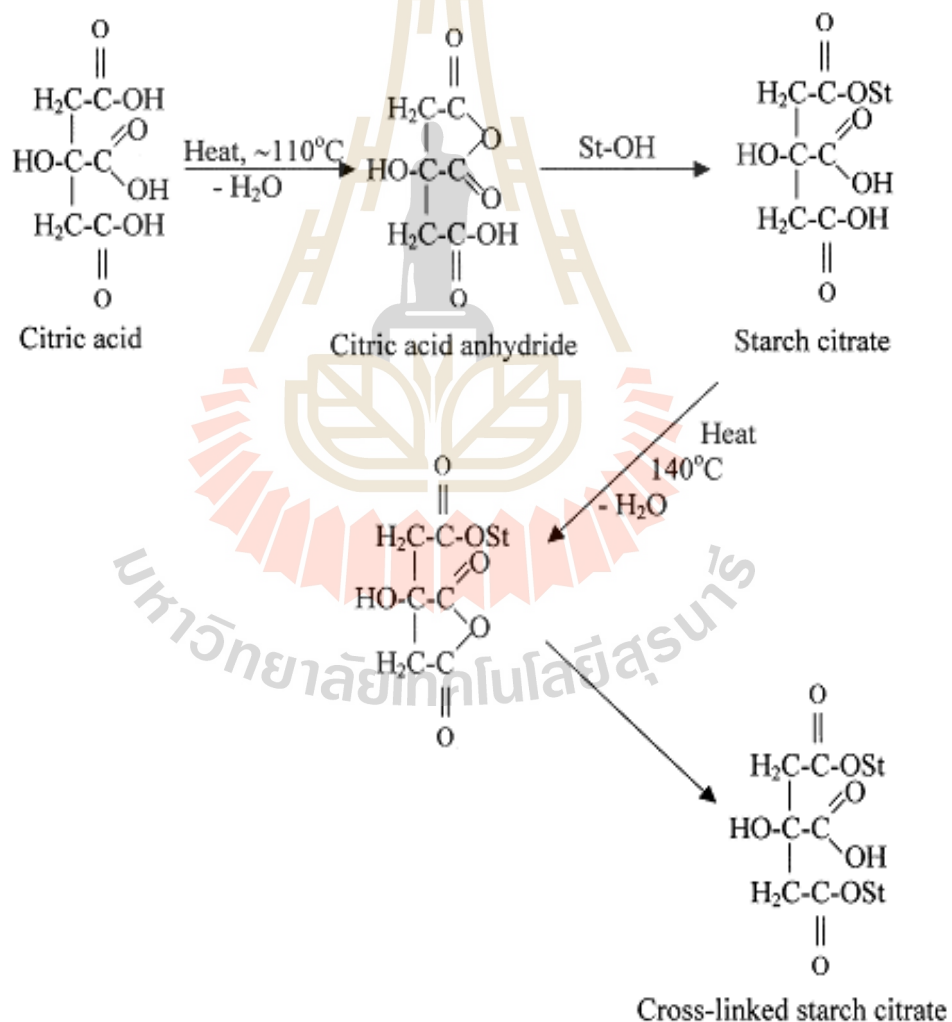
สตาร์ชซิเตรตสามารถผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก โดย USDA ได้จัดกรดซิตริกว่าเป็น Generally Recognized as Safe (GRAS) คือเป็นสารที่สามารถใช้ได้โดยไม่จำกัด และมีความปลอดภัยต่อร่างกายเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชซิเตรตมีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ของกรดใน

โครงสร้างของสตาร์ชเพิ่มขึ้น (Xie and Liu, 2004) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก เกิดขึ้นในสถานะแห้งที่มีการให้ความร้อน เมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจะสูญเสียโมเลกุลของน้ำไปและเปลี่ยนอยู่ในรูปของซิตริกแอนไฮไดรด์ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช โมเลกุลเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชและกรดซิตริกแสดงดังรูปที่ 2.9 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กรดซิตริกสูญเสียน้ำและอยู่ในรูปแอนไฮไดรด์มากขึ้น ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาหรือเกิดครอสลิงก์กับสตาร์ชโมเลกุลได้เป็นไดสตาร์ชซิเตรท (distarch citrate) (Xie and Liu, 2004; Xie et al., 2006; และ Chowdary and Enturi, 2011)

ในการผลิต resistant starch เพื่อให้ได้ระดับการแทนที่และปริมาณ RS ที่สูงขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี ระดับความเข้มข้น สถานะ วิธีการที่ใช้ และชนิดของสตาร์ช จากการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ได้รายงานว่าการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง (waxy corn), สตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสปกติ (normal corn), และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (high amylose starch) ที่ความเข้มข้นของกรดซิตริก 40% บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียสเวลา 3-9 ชั่วโมง พบว่า waxy corn มีค่า DS และปริมาณ RS สูงสุดคือ 0.16 และ 87.5% ตามลำดับ ส่วน high amylose starch และ normal corn starch มีค่าเท่า 0.14 กับ 86.4% และ 0.12 กับ 78.8% ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่า DS และปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชทำให้ช่องว่างการเข้ามาของแอนไฮม์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jyothi และคณะ (2007) ได้ทำการผลิตสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่กรดซิตริก 0.15-0.45 โมลต่อโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสอุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียสเวลา 3-7 นาที พบว่า DS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอุณหภูมิ รวมถึงความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น โดยสถานะที่มีค่า DS สูงสุด 0.063 คือใช้กรดซิตริก 0.45 โมล อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเวลา 7 นาทีเช่นเดียวกับการศึกษาของ Agboola และคณะ (1990) ในการผลิตสตาร์ชซิเตรทที่มีค่า DS ต่ำ จากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ 5, 10, 15 และ 20% พบว่ามีค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.002 เป็น 0.023

Shin และคณะ (2007) ได้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวให้มีปริมาณ SDS และ RS สูงด้วยกรดซิตริก โดยให้สตาร์ชกระจายตัวในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ปริมาตรต่างๆ (10, 20, 30, 40 และ 50 ml) จากนั้นนำไป autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 4, 35.5, 67, 98.5 และ 130 องศาเซลเซียสเวลา 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ 3 มิติ (response surface) เพื่อใช้คำนวณหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรพบว่าสถานะที่

เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรด้วยกรดซิตริกคือที่ระดับของกรดซิตริกเท่ากับ 2.62 มิลลิโมล ของกรดซิตริก ต่อ 20 กรัมสตาร์ชที่อุณหภูมิ 128.4 องศาเซลเซียส เวลา 13.8 ชั่วโมง มีค่า DS เท่ากับ 0.027 และ RS เท่ากับ 40% ตามลำดับ และเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย ต่อมา Kim และคณะ (2008) ได้ศึกษาสภาวะในการผลิตกลูตาเรทสตาร์ชเพื่อให้มีปริมาณ RS ที่สูง โดยใช้ความเข้มข้นของกรดกลูตาริกในช่วง 0.1-0.5 กรัมต่อกรัมสตาร์ช บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70-130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-9 ชั่วโมง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีระดับการแทนที่และปริมาณ RS ที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยสภาวะที่มีปริมาณ RS สูงสุดคือที่ 0.45 กรัมกรดต่อกรัมสตาร์ช อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสเวลา 7.5 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณ RS เท่ากับ 66%



ภาพที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยา ระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก

ที่มา : Tharanathan (2005)

2.5 กระบวนการให้ความร้อน (Thermal processing)

เนื่องจาก RS มีคุณสมบัติเป็นเส้นใยอาหารอีกชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในอาหาร ในปัจจุบันจึงได้มีการนำ RS มาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่อาหารที่มีความชื้นต่ำจำพวกผลิตภัณฑ์ขนมอบต่าง ๆ ได้แก่ ขนมปัง คุกกี้ และวฟเฟิล เป็นต้น รวมถึงอาหารที่มีความชื้นปานกลาง เช่น พาสตา เป็นต้น ซึ่งกระบวนการในการแปรรูปหรือผลิตอาหารต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านการใช้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติตามต้องการ ดังนั้นการใช้ความร้อนเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่งในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้เพื่อให้อาหารมีคุณภาพการบริโภคตามต้องการ โดยทั่วไปเราจะบริโภคอาหารที่ผ่านความร้อนแล้ว การใช้ความร้อนกับอาหารมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายจำเพาะเจาะจง ดังนั้นระดับความมากน้อยของความร้อนจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ กระบวนการที่ไม่รุนแรง (mild processes) เช่น การลวก การพาสเจอไรซ์ ทำให้คุณภาพการบริโภคเปลี่ยนไปไม่มากนัก สามารถใช้ร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น การแช่เยือกแข็ง และการบรรจุ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น ส่วนวัตถุประสงค์หลักของการใช้ความร้อนที่ค่อนข้างรุนแรง เช่น การอบ (baking) การย่าง (roasting) และการทอด (frying) คือ เน้นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเรื่องคุณภาพการบริโภคมากกว่าการถนอมรักษา โดยทั่วไปการอบ การย่าง และการนึ่งเป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส (วิล รังสาดทอง, 2543)

2.5.1 การให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (Steam cooking)

การให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนหรือการนึ่ง (steaming) คือ วิธีการทำอาหารให้สุกด้วยการใช้ความร้อนจากไอน้ำร้อนโดยตรงที่ได้จากการระเหยของการต้มน้ำเดือดอย่างต่อเนื่อง โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการนึ่งจะถูกวางไว้ในอุปกรณ์ที่มีฝาปิดมิดชิดเพื่อใช้แยกวัตถุดิบจากการสัมผัสกับน้ำโดยตรง การนึ่งโดยทั่วไปจะทำที่ความดันบรรยากาศ ที่ต้มด้วยไอน้ำ อุณหภูมิอยู่ ระหว่าง 100 - 105 องศาเซลเซียส ความร้อนจากไอน้ำจะถูกถ่ายเทไปยังผิวหนังของอาหารด้วยการพาความร้อน และเข้าสู่ภายในชิ้นอาหารด้วยการนำความร้อน โดยความร้อนจากการนึ่งเป็นความร้อนที่อ้อมด้วยน้ำ (moist heat) ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) และโปรตีนสูญเสียสภาพธรรมชาติ (protein denaturation) จึงทำให้อาหารสุก อาหารที่ผ่านการนึ่งให้สุกจะชุ่มชื้น ผิวนุ่ม ไม่เกิดชั้นผิวที่แห้งกรอบ (crust) เหมือนอาหารที่ผ่านการอบ (baking) ซึ่งใช้ความร้อนแห้ง (dry heat) หรือการทอด (frying) ซึ่งใช้น้ำมันเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน กระบวนการแปรรูปอาหารที่ใช้การนึ่งได้แก่ บะหมี่สำเร็จรูป (instant noodle), ปลาทูน่ากระป๋อง (canned tuna), ข้าวนึ่ง (parboiled rice) และ คิมฉ้า เช่น ขนมจีบ ซาลาเปา สะเก๋ เป็นต้น (Rahman, 1995; Toledo, 1999)

Tovar and Melito (1996) รายงานว่าสตาร์ชที่สกัดจากถั่วดำ ถั่วแดง และถั่วลิมาที่ผ่านการ

ให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 90 นาที พบว่ามีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากถั่วที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนจาก 2.2 เป็น 18.9%, จาก 1.7 เป็น 21.2% และจาก 2.0 เป็น 30.7% ตามลำดับ โดย RS ที่เกิดขึ้นจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสายอะมิโลสที่หลุดออกมาในระหว่างการให้ความร้อนภายในโครงสร้างของสตาร์ชถั่ว ในปี 1999 Wepner และคณะได้ศึกษาเคมิกสตาร์ชซีเตรทที่มีปริมาณ RS เริ่มต้น 34.1% เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตพาสต้า (7.5 และ 15% สตาร์ชซีเตรท) พบว่าการเคมิกซีเตรทสตาร์ช 15% ทำให้ปริมาณ RS ในพาสต้าดิบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5% แต่พาสต้ามีปริมาณ RS ลดลงเหลือ 1.88% หลังจากผ่านการถูกปรุงสุก โดยมีปริมาณการสูญเสีย (cooking loss) อยู่ในช่วง 3.8-8.2% ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ RS ในระหว่างกระบวนการผลิต ต่อมา Shin และคณะ (2007) ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยไอน้ำต่อปริมาณ SDS และ RS ของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดซิตริก พบว่าสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดซิตริกมีปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจาก 14.1 เป็น 23.0% แต่มีปริมาณ RS ลดลงจาก 40.0 เป็น 30.3% เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ในปี 2007 Sozer และคณะได้ศึกษาผลของการเคมิก RS₃ ลงในสปาเกตตี้เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร ต่อเวลาที่เหมาะสมในการปรุงสุกสปาเกตตี้ โดยพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการปรุงสุกคือ 13 นาที และเมื่อระยะเวลาในการปรุงสุกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการสูญเสีย (cooking loss) เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับสปาเกตตี้ที่ไม่ได้เคมิก RS ต่อมา Roopa and Premavalli (2008) ได้ศึกษาผลของกระบวนการปรุงสุกได้แก่ การต้มในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ เป็นเวลา 10 นาที, การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที และการอบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ต่อปริมาณ RS ของข้าวป้างสามง่าม (finger millet) รายงานว่าสตาร์ชข้าวป้างสามง่ามมีปริมาณ RS ลดลงหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้ การต้มทำให้ RS ลดลง 0.7%, หม้อนึ่งความดัน ทำให้ RS ลดลง 0.6% และการอบทำให้ RS ลดลง 0.5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบที่มีปริมาณ RS 1.0% ซึ่งกระบวนการปรุงสุกจะเพิ่มอัตราการย่อยของสตาร์ชโดยการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยโครงสร้างของสตาร์ชได้ง่ายขึ้น (Borner et al., 1989; Roder et al., 2009)

Ratnayake and Jackson (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อนและการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชของ RS 3 ชนิด ได้แก่ RS₂ (Novelose 240TM), RS₃ (Novelose 330TM), และ RS₄ (Fibersym 70TM) โดยการให้ความร้อนแก่ RS ในสภาพที่มีน้ำมากเกินพอ ที่อุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดสตาร์ชของ RS₂ และ RS₄ ไม่ถูกทำลายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างผ่านการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียสเมื่อตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (light microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (SEM) โดย 40-50% ของเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการพองตัวที่ผันกลับได้ ทั้งนี้ RS₂ ที่ถูกให้ความร้อนถึง 85 องศาเซลเซียสหลังผ่านการวิเคราะห์คุณสมบัติทาง

ความร้อนมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนเซชัน (T_p) และค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) เท่ากับ 103 องศาเซลเซียส และ 10.7 J/g ตามลำดับ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างผลึกเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ ส่วน RS₃ มีความทนทานต่อสถานะการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และมีการพองตัวบางส่วนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 85 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นผลึกของ RS₃ ลดลง และตัวอย่างที่ถูกให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 35 และ 75 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานเอนทาลปีลดลงจาก 17.75 J/g เป็น 14.20 J/g เมื่อถูกให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 80 และ 85 องศาเซลเซียสสำหรับ RS₄ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชหลังจากการให้ความร้อนถึง 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส เม็ดสตาร์ชเริ่มพองตัว และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส เม็ดสตาร์ชเกิดการสูญเสียรูปร่างธรรมชาติไป RS₄ มีความเป็นผลึกลดลงเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 35-85 องศาเซลเซียสเมื่อตรวจสอบด้วย DSC และ XRD แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่ทำให้ส่วนอสัณฐานเพิ่มขึ้น

2.5.2 การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดัน (Autoclaving)

Autoclave หรือหม้อนึ่งความดัน เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับนึ่งฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำร้อนและแรงดันสูงทำให้ของที่ผ่านการนึ่งแล้วอยู่ในสภาพปราศจากเชื้อจึงมักใช้เครื่องนี้ในการนึ่งฆ่าเชื้อของเสียทางชีวภาพเพื่อกำจัดและป้องกันการปนเปื้อนและนอกจากจะใช้ป้องกันการปนเปื้อนแล้ว หม้อนึ่งความดัน ยังสามารถใช้ฆ่าเชื้อตัวอย่างก่อนจะนำมาใช้ในการทดลองได้อีกด้วยหลักการทำงานของหม้อนึ่งความดัน เป็นกระบวนการทางกายภาพที่ทำให้ปราศจากเชื้อโดยการทำงานร่วมกันของไอน้ำ ความดัน และเวลา ซึ่งจะใช้ไอน้ำอ้อมตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยการใช้ความร้อนต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำที่ปิดสนิทจนทำให้ความดันในหม้อเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของไอน้ำก็จะเพิ่มขึ้นจากปกติด้วย โดยทั่วไปจะต้มน้ำเดือดจนกระทั่งความดันของไอน้ำภายในหม้ออยู่ที่ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมีอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จึงเริ่มจับเวลา ระหว่างนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิและความดันให้คงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาทีซึ่งในกระบวนการปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำจะใช้อุณหภูมิระหว่าง 121-134 องศาเซลเซียส โดยไอน้ำที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดจะต้องสัมผัสกับอุปกรณ์ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ (holding time) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอย่างน้อย 15 นาที ที่อุณหภูมิ 126 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 10 นาที และที่อุณหภูมิ 134 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 นาที (Papadimitriou and Barton, 2009; Yusoff, 2013)

จากการศึกษาของ Shin และคณะ (2007) เกี่ยวกับผลของการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันต่อปริมาณ SDS และ RS ของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรกรดซัลฟิวริก พบว่าเมื่อให้ความร้อนด้วย

หม่อนึ่งความดันสตาร์ชข้าวคั่วแปรด้วยกรดซัลฟิวริกมีปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจาก 14.1 เป็น 28.3% แต่มีปริมาณ RS ลดลงจาก 40.0 เป็น 17.1% เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

2.5.3 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

drum dryer เป็นหนึ่งในอุปกรณ์หลักทางการค้าที่ใช้ในการผลิตอาหารที่เป็นแหล่งของสตาร์ชต่าง ๆ ได้แก่ ธัญพืช พืชหัว และเมล็ดถั่ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ drum dryer กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะข้นหนืดตามธรรมชาติหลังจากการทำเข้มข้น เช่น มันฝรั่งบด นม อาหารเด็ก และเนื้อผลไม้บด เป็นต้น drum dryer จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของสตาร์ชดิบเนื่องจากความร้อนจากผิวหน้าของลูกกลิ้งที่ได้จากไอน้ำจะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลลิตินในชั้น และขณะที่ลูกกลิ้งหมุนไปจะมีการระเหยน้ำพร้อมไปด้วย สตาร์ชที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ฉาบอยู่บนผิวหน้าของลูกกลิ้งและถูกขูดออกไปด้วยใบมีด แล้วจึงนำแผ่นสตาร์ชที่ได้ไปบดเป็นผงร้อนผ่านตะแกรงตามขนาดที่ต้องการ (พรศักดิ์ มนต์ศิริเพ็ญ, 2543) Vatanasuchart และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อปริมาณ RS ของสตาร์ช สตาร์ช และเฟลก (flake) ที่สกัดจากกล้วยดิบ (green banana) และกล้วยห่าม (green to yellow banana) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กล้วยน้ำหว่า กล้วยหอม กล้วยไข่ และกล้วยเล็บมือนาง พบว่าสตาร์ช (starch) ที่สกัดจากกล้วยน้ำหว่าห่ามและแป้ง (flour) ที่ได้จากกล้วยน้ำหว่าดิบมีปริมาณ RS สูงสุด เท่ากับ 77.3 และ 58.1% ตามลำดับ ในขณะที่ flake ของกล้วยทุกชนิดที่ผ่านการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (flake, drum-dried) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณ RS ต่ำสุด คือใกล้เคียงกับ 1.0% เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนแบบลูกกลิ้งส่งผลให้สตาร์ชเกิดการเจลลิตินในเซชันและแห้งอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการแตกตัวหรือทำลายโครงสร้างของ RS ขึ้น เช่นเดียวกับ Parchure and Kulkarni (1997) ที่ได้ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปได้แก่ การต้ม (boiling), การปรุงด้วยความดัน (pressure cooking), การคั่ว (roasting), การเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion cooking), การทอด (frying), และการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวและสตาร์ชจากแวกซีอะมารานท์ (waxy amaranth starch) ได้รายงานว่า การให้ความร้อนโดยการ boiling และ pressure cooking ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของ RS₃ ขึ้นระหว่างการให้ความร้อน ในขณะที่การ drum drying, roasting, frying, และ extrusion ส่งผลให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชลดลงจากประมาณ 10% เหลือประมาณ 1.6%

2.5.4 การให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อน (Baking)

ในการอบอาหารนั้นอาหารจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีจากผนังเครื่องอบ การพาความร้อนจากอากาศที่หมุนเวียนและการนำความร้อนผ่านภาชนะที่มีอาหารวางอยู่ ความร้อนส่วนใหญ่

จะถ่ายเทไปยังอาหารโดยการนำความร้อน ส่วนการถ่ายเทความร้อนของอากาศ และไอน้ำใน เครื่องอบเกิดขึ้น โดยการพาความร้อน และเปลี่ยนเป็นการนำความร้อนที่ผิวหน้าของอาหารและผนัง เครื่องอบ ฟิล์มบางๆ ของอากาศเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนสู่อาหารและการเคลื่อนที่ของ ไอน้ำจากอาหาร ความเร็วของอากาศและคุณสมบัติผิวหน้าของอาหารจะเป็นตัวกำหนดความหนา ของชั้นฟิล์มนี้ กระแสการพาความร้อนส่งเสริมเกิดการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอในเตาอบ การนำความร้อนผ่านจานอบซึ่งสัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน(oven hearth)ในเตาอบจะเพิ่มความ แตกต่างของอุณหภูมิที่ด้านล่างของอาหารและทำให้เกิดการอบที่แตกต่างกัน อาหารมีค่าการนำ ความร้อนต่ำ จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนมีค่าต่ำและมีผลมากต่อเวลาใน การอบ ขนาดของชิ้นอาหารเป็นตัวกำหนดระยะทางที่ความร้อนต้องเคลื่อนที่จากผิวอาหารเข้าสู่ใจ กลางเพื่อให้เกิดการอบอย่างเพียงพอ ความชื้นที่ผิวหน้าจะระเหยและถูกกำจัดไปโดยความร้อนเมื่อ อาหารวางอยู่ในเตาอบ อากาศในเตาอบซึ่งมีความชื้นต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ และทำให้ความชื้นเคลื่อนที่จากใจกลางอาหารออกมายังที่ผิวอาหาร คุณสมบัติของอาหารและอัตรา การให้ความร้อนจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความชื้นที่เสียไป เมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในจะทำให้แนวของการระเหยเคลื่อนที่เข้าไปในอาหาร ทำให้ผิวอาหารแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิของลมร้อน (110-240 องศาเซลเซียส) จึงเกิดเปลือก แข็งด้านนอกขึ้น (วิไล รังสาตทอง, 2543)

Wepner และคณะ (1999) ได้ศึกษาการใช้สตาร์ชซีเทรทที่ผลิตจากสตาร์ชข้าวสาลี, สตาร์ชมันฝรั่ง, สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชข้าวโพด เพื่อเป็นส่วนผสมในขนมปังปิ้ง (10% สตาร์ชซีเทรท) และเวเฟอร์ (7.5 และ 15%สตาร์ชซีเทรท) เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร พบว่าขนมปังปิ้งที่เติมซีเทรท สตาร์ชจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลีมีปริมาณ RS สูงสุดคือ 4.45 และ 4.54% ตามลำดับ ส่วนเวเฟอร์ผลิตได้มีปริมาณ RS เท่ากับ 2.4% ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เติมสตาร์ชซีเทรทลงไป อย่างไรก็ตามการเติมซีเทรทสตาร์ชไม่ได้มีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นในระหว่างการอบ เนื่องจากกรดซิตริกที่จับกับสตาร์ชอย่างสมบูรณ์จึงไม่สามารถทำให้สตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เป็น RS ขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

สตาร์ชข้าวอะมิโลสสูงทางการค้า (บริษัท เชนอรัล ฟู้ด โปรดักส์ จำกัด, อําเภอสี่คิ้ว, จังหวัดนครราชสีมา), กรดซิทริกฟู้ดเกรด (บริษัทราม่า โปรดักชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร), เอนไซม์แพนกรีเอติกแอลฟา-อะไมเลส (α -amylase from porcine pancreas, A3176, E.C. 3.2.1.1, Sigma-Aldrich, USA), เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase from *Aspergillus niger*, A7095, E.C. 3.2.1.3, Sigma-Aldrich, USA), ชุดทดสอบ PGO เอนไซม์ (PGO enzyme kit P7119, Sigma-Aldrich, USA) และสารเคมีอื่นๆ ที่เป็นเกรดการวิเคราะห์

3.1.1 การเตรียม Citrate starch

เตรียมตามวิธีของ Klaushofer et al. (1978) โดยการนำสตาร์ชข้าว มาผสมให้เข้ากันกับ สารละลายกรดซิทริกความเข้มข้น 40% (ต่อ 100 กรัมสตาร์ช) ที่ปรับ พีเอช 3.5 ด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ในอัตราส่วนสตาร์ชข้าวต่อสารละลายกรดซิทริกเป็น 1:1 จากนั้นทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 องศาเซลเซียส) หรือที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ความชื้น $5 (\pm 1) \%$ นำมาบด แล้วทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-7 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้าง ด้วยน้ำกลั่น 3 ลิตรเพื่อกำจัดกรดที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก นำไปทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นบดและ ร่อนผ่านตะแกรงขนาด (mesh no. 100) < 0.15 มิลลิเมตร

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณซิเตรทเกาะเกี่ยว (Bound citrate content)

วิเคราะห์ตามวิธีของ Narkrugasa 1990 นำตัวอย่างสตาร์ชมาชั่งน้ำหนัก 0.45 กรัมใส่ลงใน ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 นอร์มอลปริมาตร 50 มิลลิลิตรคนให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็กกวนผสม (magnetic stirrer) ต้มในน้ำอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ได้ ปริมาตร 250 มิลลิลิตรแล้วปรับ พีเอชเป็น 8.5 ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 นอร์มอลจาก นั้นเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ปริมาตร 25 มิลลิลิตรและ murexide indicator 0.3 กรัมแล้ว

นำไปไตรตรึงกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.05 โมลาร์จนสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพู เป็นสีเหลือง นำไปคำนวณหาปริมาณชิเตรทเกาะเกี่ยว จากสูตร

$$\%BC = \frac{9.61 \times V \times 10}{W \times (100-M)}$$

เมื่อ	W	=	น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม (นน.เปียก)
	V	=	ปริมาตรของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)
	M	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่าง
	9.61	=	calibration factor

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณ Resistant starch (RS)

ปริมาณ RS วิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC method (2002) โดยมีการตัดแปลงเล็กน้อย โดยทำการชั่งตัวอย่างหนัก 100 มิลลิกรัม ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย โซเดียมมาลิเอทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ พีเอช 6.0 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยเอนไซม์ แพนครีเอติกแอลฟา-อะไมเลส (pancreatic α -amylase) 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) 3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปป่มใน shaking water bath (SW22, Julabo, USA) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยเขย่าตลอดเวลา จากนั้นเติมสารละลายเอทานอลเข้มข้น (99.8%) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Sorvall Legend Mach1.6 R Centrifuge, Thermo Electron LED GmbH, Germany) ที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาที ที่ทั้งส่วนใส และเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 50% ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 50% อีก 6 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาทีที่ทั้งส่วนใส และเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 50% ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 50% อีก 6 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาที ค่อย ๆ เทส่วนใสทิ้งและรอให้ตะกอนสแตร์ชแห้ง จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และนำไปเขย่าในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตรทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ พีเอช 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเอนไซม์ อะไมโลกลูโคซิเดส ความเข้มข้น 3,300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร นำไปป่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกลูโคสที่ถูกปลดปล่อยออกมา โดยชุดทดสอบ PGO เอนไซม์ (Sigma, P7119) และคำนวณปริมาณ RS จากสูตร

$$\text{ปริมาณ RS (กรัม/ 100 กรัมสตาร์ช)} = (F/W) \times (162/180) \times 100$$

เมื่อ F = ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

162/180 = แฟกเตอร์สำหรับเปลี่ยน free glucose เป็น anhydro-glucose

3.4 ความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลาย

ดัดแปลงจากวิธีของ Anderson และคณะ, 1969 และ Schoch, 1968 โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.5 กรัมลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร (ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว) เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากัน นำไปเขย่าใน shaking water bath (SW22, Julabo, USA) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm นาน 15 นาที เทส่วนใสในอูมิเนียมแคนที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และชั่งน้ำหนักส่วนใสก่อนไปทำการระเหยจนแห้ง ชั่งน้ำหนักส่วนตะกอนเพื่อใช้คำนวณหาความสามารถในการอุ้มน้ำ นำส่วนใสไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้นนำไปชั่งน้ำหนักของแข็งที่ละลายได้จากสูตรคำนวณหาความสามารถในการละลายเป็นร้อยละน้ำหนักของของแข็งที่ในส่วนใสที่สามารถละลายได้

$$\text{WAI(g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนสตาร์ชหลังการปั่นเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชแห้งเริ่มต้น}}$$

$$\text{WSI(\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง} \times 100)}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชแห้งเริ่มต้น}}$$

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืด (Pasting properties)

ทำตามวิธีของ Guha et al. (1998) โดยวัดความหนืดด้วยเครื่อง Rapid visco analyser (RVA) (RVA model 3-D, Newport Scientific Pty, Ltd., Australia) ใช้ตัวอย่างน้ำหนักแห้ง 3 กรัม ที่ความชื้น 14 % ใส่ใน aluminum RVA sample canister เติมน้ำกลั่นลงไปให้น้ำหนักรวมได้ 28 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่อง RVA แล้วตั้งโปรแกรมดังนี้ ใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียสตั้งแต่เวลา 0-1 นาทีโดย 10 วินาทีแรกใช้ความเร็ว 960 รอบต่อชั่วโมงแล้วลดลงเป็น 160 ต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่าง 1-4.45 นาทีและรักษาให้ อุณหภูมิคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2.30 นาทีแล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส

ในช่วงเวลาระหว่าง 7.50-11 นาทีรักษาให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 นาที ค่าที่บันทึกได้แก่ pasting temperature (Ptemp), peak viscosity(PV), Hot paste viscosity (HPV) (minimum viscosity at 50°C), Cool paste viscosity (CPV) (final viscosity at 50°C), breakdown (BD) (= PV - HPV) และ set back (SB) (= CPV - HPV) วัดตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

3.6 การตรวจวัดค่า Dextrose equivalent (DE)

ดำเนินการโดยหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic method (DNS method) ตามวิธีของ Miller (1959) โดยนำตัวอย่างปริมาตร 500 ไมโครลิตรใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตรเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค (KMS1, IKA Works, Inc., USA) นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แช่ในอ่างน้ำแข็งทันที เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทคจากนั้น นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (biochrom Liba S22, Biochrom Ltd, England) ที่ 540 นาโนเมตรการหากราฟมาตรฐาน (Standard curve) โดยใช้สารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ (20-200 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 500 ไมโครลิตรเติม DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตรเขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แช่ในอ่างน้ำแข็ง เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตรจากนั้น นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร คำนวณปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐานและคำนวณ DE ดังนี้

$$DE = (A \times 100) / \%solid$$

เมื่อ A คือ % reducing sugar ที่คำนวณจาก standard curve

3.7 การตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)(DSC1, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 7 มิลลิกรัมใส่ลงในถ้วยสแตนเลสขนาด 60 ไมโครลิตร (PerkinElmer DCS pan) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เติมน้ำกลั่นลงไปเพื่อให้มีความชื้นประมาณ 70% ปิดฝาถ้วยสแตนเลส แล้วนำไปอัดปิดฝาให้สนิทด้วยเครื่องอัดปิด นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียสที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำการวิเคราะห์และใช้ Indium เป็นสารมาตรฐานในการสอบเทียบอุณหภูมิ โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ทำการวิเคราะห์มีดังนี้ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o), อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak

temperature, T_p), อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c), ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_p$) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) โดยใช้โปรแกรมประมวลผล STAResoftware (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.8 การวัดค่าสี

วัดสีตัวอย่างสตาร์ชตัดแปรด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter (Minolta Colorimeter CR-300, Konica Minolta, Osaka, Japan) โดยแปรผลออกมาในระบบ CIELAB โดยวัดค่า L^* , a^* และ b^* เมื่อ $L^*=0$ มีสีดำ และ $L^*=100$ มีสีขาว, $a^*=-a^*$ มีสีเขียว และ $+a^*$ มีสีแดง, $b^*=-b^*$ มีสีน้ำเงิน และ $+b^*$ มีสีเหลืองคำนวณค่าความขาวดังนี้

$$\text{ค่าความขาว (Whiteness)} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

3.9 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช (Micro structure of starch granules)

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (JSM-6010LV, JEOL Ltd., USA) โดยการนำตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาว 2 หน้า ที่ติดอยู่บนแท่ง aluminum stub จากนั้นนำแท่ง aluminum stub ที่ติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง แล้วนำไปใส่ในตู้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kV และใช้กำลังขยายที่ 500 และ 1500 เท่า และบันทึกภาพลงในคอมพิวเตอร์

3.10 X-ray Diffraction (XRD)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วย Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line 2.2: SAXS โดยมใส่ตัวอย่างสตาร์ชปริมาณ 20 มิลลิกรัม ลงในวัสดุใส่ตัวอย่างซึ่งปิดด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมทั้งสองด้าน แล้วนำไปวิเคราะห์กำหนดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ 8 keV ในการวัดรังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวอนูวัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับสัญญาณ (image plate detector) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร แปรผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ด้วยโปรแกรม SAXSIT 3.52

3.11 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการนึ่ง (Steaming)

เตรียมตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทให้ได้รับความชื้น 40% และ 70% เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสข้ามคืน จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยการนึ่งให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 และ 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ RS ที่เหลือตามวิธีข้อ 3.3, วิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดตามวิธีข้อ 3.5, ตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อนตามวิธีข้อ 3.7, ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสตาร์ชแกรนูลตามวิธีข้อ 3.9, ตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกตามวิธีข้อ 3.10 และคำนวณปริมาณการสูญเสีย (%loss) ดังนี้

$$\text{โดย } \%loss = \frac{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน} - \text{ปริมาณ RS หลังให้ความร้อน} \times 100}{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน}}$$

3.12 การทดสอบการทนความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ (Autoclaving)

เตรียมตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทให้ได้รับความชื้น 70% เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสข้ามคืน จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Hiclave HA 300 MIV, Hirayama, Japan) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 และ 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ RS ที่เหลือตามวิธีข้อ 3.3, วิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดตามวิธีข้อ 3.5, ตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อนตามวิธีข้อ 3.7, ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสตาร์ชแกรนูลตามวิธีข้อ 3.9, ตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกตามวิธีข้อ 3.10 และคำนวณปริมาณการสูญเสีย (%loss)

$$\text{โดย } \%loss = \frac{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน} - \text{ปริมาณ RS หลังให้ความร้อน} \times 100}{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน}}$$

3.13 การทดสอบการทนความร้อนด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying)

เตรียมตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทให้ได้รับความชื้น 70% จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer, New Way manufacturing, Thailand) ที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 1.0 rpm ระยะห่างลูกกลิ้ง 0.02 นิ้ว แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ RS ที่เหลือตามวิธีข้อ 3.3, วิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดตามวิธีข้อ 3.5, ตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อนตามวิธีข้อ 3.7, ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสตาร์ชแกรนูลตามวิธีข้อ 3.9, ตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกตามวิธีข้อ 3.10 และคำนวณปริมาณการสูญเสีย (%loss)

$$\text{โดย } \%loss = \frac{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน} - \text{ปริมาณ RS หลังให้ความร้อน} \times 100}{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน}}$$

3.14 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการอบ (Baking)

เตรียมตัวอย่างสตาโรซซีเตรทาให้ได้รับความชื้น 50% นวดให้ตัวอย่างมีลักษณะคล้ายโดที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัดด้วยพิมพ์รูปร่างกลมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm ความหนา 0.5 cm จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยการอบในเตาอบ (DC22, Sveba Dahlen, Sweden) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ RS ที่เหลือตามวิธีข้อ 3.3, วิเคราะห์คุณสมบัติทางความเหนียวตามวิธีข้อ 3.5, ตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนตามวิธีข้อ 3.7, ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสตาโรซซีเตรทตามวิธีข้อ 3.9, ตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกตามวิธีข้อ 3.10 และคำนวณปริมาณการสูญเสีย (%loss)

$$\text{โดย } \%loss = \frac{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน} - \text{ปริมาณ RS หลังให้ความร้อน} \times 100}{\text{ปริมาณ RS ก่อนให้ความร้อน}}$$

3.15 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ RS และคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่าง วางแผนการทดลองแบบ Factorial Experiment in Completely Randomized Design (CRD) โดยมีปัจจัย 3 ปัจจัย คือ สภาวะในการบ่ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำการศึกษาสภาวะในการบ่ม 2 สภาวะ คือ สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 2 ระดับ คือ 140 และ 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ระดับ คือ 3, 5, และ 7 ชั่วโมง วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SPSS 10.01 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

3.16 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาหาร ณ อาคารเครื่องมือ 3 ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Bound citrate

จากการศึกษาผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ bound citrate ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าสภาวะในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้ปริมาณ bound citrate ของสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้เร็วและมากกว่าที่อุณหภูมิห้องจึงทำให้กรดไ้ใช้ระยะเวลาที่น้อยกว่าในการแทรกเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชซึ่งส่งผลให้ปริมาณกรดที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลสตาร์ชได้ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 3, 5 และ 7 ชั่วโมง ในการทำปฏิกิริยาที่ไม่มีผลทำให้ปริมาณ bound citrate ของสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่พบว่าผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีปฏิสัมพันธ์ (interaction effect) ที่ทำให้ปริมาณ bound citrate ของสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรมีค่าแตกต่างกัน ($P \leq 0.05$) โดยจะเห็นได้ว่า ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียสส่งผลให้ปริมาณ bound citrate มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12.06 เป็น 12.70% สำหรับสภาวะการบ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง และเพิ่มจาก 11.26 เป็น 13.10% สำหรับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง ตามลำดับ และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 140 องศาเซลเซียสเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณ bound citrate ของสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12.06 เป็น 13.20% และที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 11.26 เป็น 13.24% ตามลำดับ ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้กรดซัลฟิวริกสูญเสียโมเลกุลของน้ำไปและเปลี่ยนเป็นซัลเฟตไฮโดรเจนไอออนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของโมเลกุลสตาร์ชเกิดเป็น bound citrate ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่และพันธะเชื่อมข้ามระหว่างกรดซัลฟิวริกกับสตาร์ชได้มากขึ้น (Xie and Liu, 2004; Xie et al., 2006; และ Chowdary and Enturi, 2011) เช่นเดียวกับการทดลองของ Xie and Liu (2004) ที่ทำการดัดแปร normal corn starch ด้วยกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-9 ชั่วโมงได้ รายงานว่าระดับการแทนที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.09 เป็น 0.12 ตามอุณหภูมิและระยะเวลาใน

การทำปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Jyothi และคณะ (2007) ที่ทำการผลิตสตาร์ชชิตเรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อน ได้รายงานว่ามีอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นจาก 0.005 เป็น 0.062 นอกจากนี้ Narkrugs (1993) ที่ได้ศึกษาการเตรียมสตาร์ชชิตเรทด้วยวิธีไมโครเวฟจากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz เป็นเวลา 3, 5 และ 7 นาที พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ bound citrate เพิ่มขึ้นจาก 3.0 เป็น 8.7%

ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 150 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณ bound citrate มีค่าลดลงจาก 13.70 เป็น 11.66% สำหรับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง และจาก 13.10 เป็น 11.13% สำหรับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชและกรดซิตริกที่ทำปฏิกิริยากันเกิดการสลายตัวหรือแยกออกจากกัน จึงส่งผลให้ปริมาณ bound citrate มีค่าลดลง (Xie and Liu, 2004)

ตารางที่ 4.1 ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Bound citrate

Sample	Tempering Condition	Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	%BC
1	50°C, 6 h	140	3	12.06 ^c
2	50°C, 6 h	140	5	12.66 ^{b,c}
3	50°C, 6 h	140	7	13.20 ^{a,b}
4	50°C, 6 h	150	3	13.70 ^a
5	50°C, 6 h	150	5	12.70 ^{a,b}
6	50°C, 6 h	150	7	11.66 ^d
7	28°C, 16 h	140	3	11.26 ^d
8	28°C, 16 h	140	5	12.4 ^{b,c}
9	28°C, 16 h	140	7	13.24 ^{a,b}
10	28°C, 16 h	150	3	13.10 ^{a,b}
11	28°C, 16 h	150	5	12.69 ^{b,c}
12	28°C, 16 h	150	7	11.13 ^d

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

4.2 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ Resistant starch (RS)

จากผลการทดลองโดยการนำสตาร์ชข้าวที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 5% ไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 และ 150 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3-7 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรมีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม (เตรียมเหมือนกันแต่ไม่ได้กรดซิตริก) (ตารางที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาการแทนที่หรือเกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา (Kim et al., 2008; Xie and Liu, 2004) จึงส่งผลให้สตาร์ชข้าวคัดแปรมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียส (เวลา 3 ชั่วโมง) ส่งผลให้ปริมาณ RS ของสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 47.31 เป็น 71.06% และสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 45.15 เป็น 72.41% ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่ระหว่างกรดซิตริกกับสตาร์ชได้เป็น bound citrate มากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นอีกด้วย (Xie and Liu, 2004) ซึ่งทำให้สามารถขัดขวางการเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิติกที่ตำแหน่ง α - (1 - 4), และ α - (1 - 6) ของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเลส ทำให้สตาร์ชมีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น

ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง พบว่าทำให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่หรือพันธะเชื่อมข้ามระหว่างกรดซิตริกกับสตาร์ชโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น (Xie and Liu, 2004; Chowdary and Enturi, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ bound citrate (ตารางที่ 4.1) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 47.31 เป็น 66.86% สำหรับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง และจาก 45.15 เป็น 61.07% สำหรับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองของ Xie and Liu (2004) ที่ทำการคัดแปรมปกติ normal corn starch ด้วยกรดซิตริกและบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 3-9 ชั่วโมง ซึ่งรายงานว่ามีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 41.1 เป็น 78.8% และพบว่าเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง รวมทั้ง Jyothi และคณะ (2007) ได้ทำการผลิตสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อน และรายงานว่ามีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น ทำให้สตาร์ชซีเตรทถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง โดยที่ระดับ

การแทนที่สูงที่สุดคือ 0.063 ทำให้สตาโรซถูกย่อยลดลงจาก 762 กรัมต่อกิโลกรัมเป็น 586 กรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ Shin และคณะ(2007) ได้ผลิตสตาโรซซึเตรทที่มีทั้งองค์ประกอบของสตาโรซย่อยซ้ (SDS) และ RS จากสตาโรซซ้ โดยนำสตาโรซซ้มาผสมกับสารละลายกรดซึเตรทที่ความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยหม้อนิ่งความดันไอที่ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ซึ่งพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ ที่ความเข้มข้นกรดซึเตรท 2.62 มิลลิโมลต่อ 20 กรัม สตาโรซ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 128.4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13.8 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้ปริมาณสตาโรซย่อยซ้และ RS เท่ากับ 54.1 และ 28.1% ตามลำดับ สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 150 องศาเซลเซียสเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นไม่มีผลทำให้ปริมาณ RS แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของ bound citrate ขึ้น (Xie and Liu, 2004) ทั้งนี้ Wepner และคณะ (1999) ยังได้ทำการผลิตสตาโรซซึเตรทจากสตาโรซซ้ด้วยสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง และได้ปริมาณ RS เท่ากับ 50.5% ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณ RS ของสตาโรซซึเตรทดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับสตาโรซซ้ขาดแปร (55.06% RS) ที่ผลิตในสภาวะเดียวกัน

สำหรับสภาวะในการบ่มตัวอย่าง พบว่าไม่มีผลทำให้ปริมาณ RS ของสตาโรซซ้ขาดแปรทุกสภาวะแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าสภาวะการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สามารถทำให้เม็ดสตาโรซเกิดการพองตัวได้มากขึ้นจึงทำให้กรดซึเตรทสามารถแทรกเข้าไปภายในเม็ดสตาโรซได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาานกว่าที่จะทำให้กรดซึเตรทสามารถแทรกเข้าไปข้างในได้ จึงทำให้หลังจากทำปฏิกิริยาแล้วทำให้ปริมาณ RS ของสตาโรซซ้ขาดแปรจากทั้งสองสภาวะไม่แตกต่างกัน

4.3 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติด้านความหนืด

เมื่อนำตัวอย่างไปวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง RVA พบว่า สตาโรซซ้ขาดแปรทุกสภาวะรวมถึงตัวอย่างควบคุมที่อุณหภูมิ 140 และ 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 และ 7 ชั่วโมง มีค่าความหนืดต่ำกว่าสตาโรซซ้ขาดแปร (รูปที่ 4.1 และ 4.2 และตารางที่ 4.3) นอกจากนี้ตัวอย่างควบคุมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่อุณหภูมิและ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาโรซบางส่วนถูกทำลาย จึงส่งผลให้มีค่าความหนืดลดลง ในขณะที่สตาโรซซ้ขาดแปรทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 4.2 ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ

Resistant starch				
Samples	Incubation condition	Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	Resistant starch (%)
1	50°C, 6 h	140	3	47.31 ^{a,x}
2	50°C, 6 h	140	5	53.54 ^{a,y}
3	50°C, 6 h	140	7	66.86 ^{a,z}
4	50°C, 6 h	150	3	71.06 ^{b,x}
5	50°C, 6 h	150	5	72.85 ^{b,x}
6	50°C, 6 h	150	7	71.52 ^{b,x}
7	28°C, 16 h	140	3	45.15 ^{a,x}
8	28°C, 16 h	140	5	55.06 ^{a,y}
9	28°C, 16 h	140	7	61.07 ^{a,z}
10	28°C, 16 h	150	3	72.41 ^{b,x}
11	28°C, 16 h	150	5	73.55 ^{b,x}
12	28°C, 16 h	150	7	71.95 ^{b,x}
Control 140C, 3 h				14.82
Control 150C, 7 h				13.24
Native rice starch				13.49

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

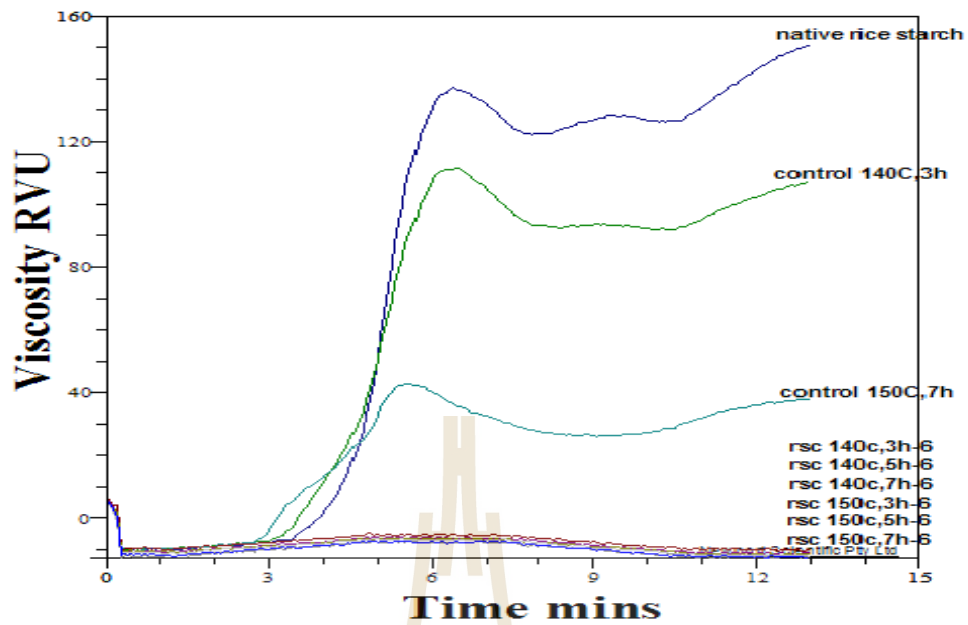
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ของเวลาในการทำปฏิกิริยา

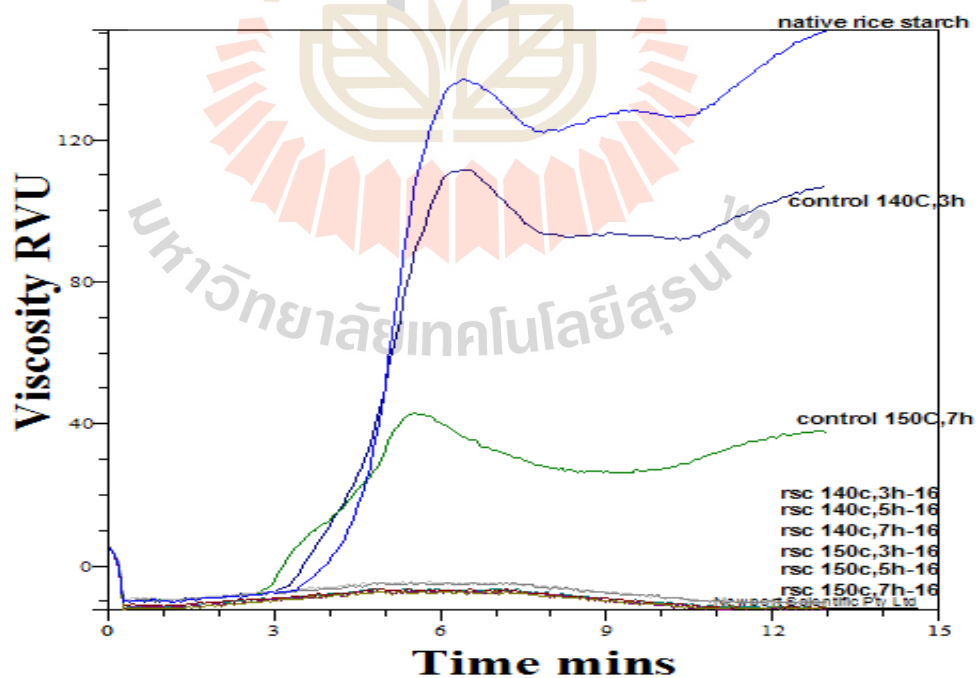
ไม่แสดงค่าความหนืดแต่อย่างใด จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ bound citrate และปริมาณ RS ที่มากขึ้น (ตารางที่ 4.1 และ 4.2) ส่งผลให้สตาร์ชข้าวคัดแปรไม่แสดงโปรไฟล์ (profile) ความหนืด(รูปที่ 4.1 และ 4.2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชข้าวคัดแปรมีการพองตัวต่ำและไม่เกิดเจลลาตินในเซชันขึ้นระหว่างการทดสอบด้วย RVA สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อสตาร์ชทำปฏิกิริยากับกรดซิตริกได้เป็น bound citrate ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช และเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดหมู่แทนที่ได้มากขึ้นและสามารถส่งเสริมให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นภายในโครงสร้างจำนวนมากจึงทำให้เม็ดสตาร์ชแข็งแรงมากขึ้น (Xie and Liu, 2004) นอกจากนี้

พันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้พันธะระหว่างสายโซ่สตาร์ชแข็งแรงมากขึ้นทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเคลื่อนที่ได้ช้าลงและลดการจับกัน (interactions) ระหว่างสตาร์ชโมเลกุลและน้ำซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยากจึงส่งผลให้สตาร์ชด้านการพองตัว และไม่เกิดเจลาติไนเซชัน (Jyothi et al., 2006; Majzoobi et al., 2009; Yussof et al., 2013) เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Xie and Liu (2004) ที่ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชซีเตรทที่ผลิตจาก normal corn starch กับ control (ตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีกรดซิตริก) ได้รายงานไว้ว่า สตาร์ชซีเตรททุกตัวมี peak viscosity ที่แบนราบและมีค่าความหนืดต่ำกว่า control และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shin และคณะ (2007) ในการผลิตสตาร์ชตัดแปรที่มีทั้งองค์ประกอบของสตาร์ชย่อยช้า (SDS) และ RS จากสตาร์ชข้าว โดยให้คาร์ชกระจายตัวในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ปริมาตร 26.2 ml จากนั้นนำไป autoclave ที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 128.4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 13.8 ชั่วโมง เพื่อให้สตาร์ชถูกย่อยบางส่วนและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ พบว่าสตาร์ชข้าวตัดแปรด้วยกรดซิตริกดังกล่าวไม่แสดงความหนืดและมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวดิบ

รพีพร อังกระษิ (2547) ที่ทำการตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยกรดซิตริก โดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อน เป็นเวลาดสั้น (5-15 นาที) ได้รายงานไว้ว่า สตาร์ชซีเตรทที่ได้มีค่าความหนืดสูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Jyothi และคณะ (2007) ที่ทำการผลิตสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้เครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อน เป็นเวลาดสั้น (5-15 นาที) ซึ่งรายงานไว้ว่า สตาร์ชซีเตรทที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับการแทนที่เท่ากับ 0.063 มีค่าความหนืดสูงสุด ทั้งนี้การศึกษาดังกล่าวเป็นการให้ความร้อนเพียงเวลาดสั้น ๆ ซึ่งทำให้เกิดระดับการแทนที่ที่ต่ำทำให้เม็ดสตาร์ชมีความเป็นระเบียบน้อยลงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่ายขึ้นจึงส่งผลให้พองตัวได้มากและเกิดเจลาติไนเซชันขึ้น



รูปที่ 4.1 โพรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวดัดแปร ที่สภาวะในการต้ม 50°C 6 ชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 และ 150°C เวลา 3 และ 7 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 โพรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะในการต้ม 28°C 16 ชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 และ 150°C เวลา 3 และ 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวคั่วแปรที่สภาวะต่าง ๆ

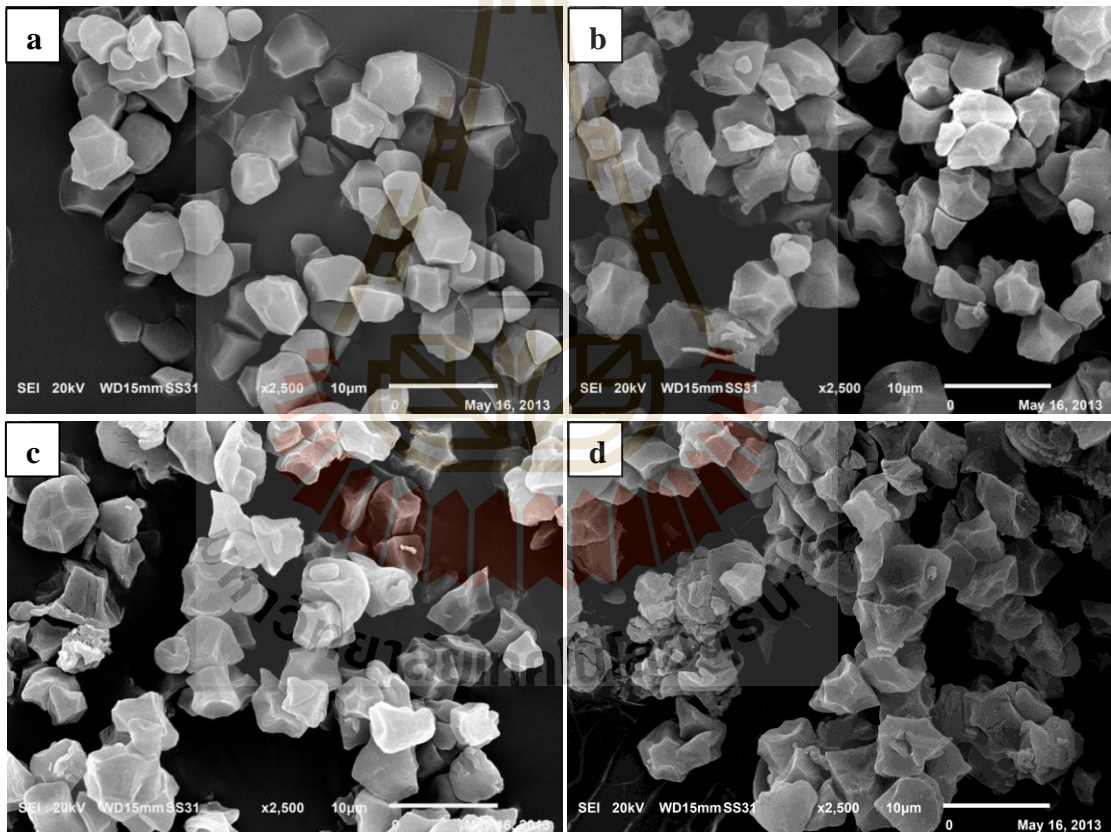
Samples	Peak1 (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Visc (RVU)	Setback (RVU)	Peak Time (min)	Pasting Temp (°C)
Temp 6,140C, 3 h	3.38	-8.79	12.17	-8.29	0.50	0.07	-
Temp 6,140C, 5 h	3.21	-11.33	14.54	-11.08	0.25	0.07	-
Temp 6, 140C, 5 h	3.00	-11.79	14.79	-11.54	0.25	0.07	-
Temp 6, 150C, 3 h	2.58	-12.17	14.75	-11.71	0.46	0.07	-
Temp 6, 150C, 5 h	2.83	-11.54	14.38	-11.29	0.25	0.07	-
Temp 6, 150C, 7 h	2.75	-12.54	15.29	-12.25	0.29	0.07	-
Temp 16, 140C, 3 h	3.92	-10.58	14.50	-10.21	0.38	0.07	-
Temp 16, 140C, 5 h	3.08	-10.13	13.21	-10.00	0.13	0.07	-
Temp 16, 140C, 7 h	2.88	-11.00	13.88	-10.71	0.29	0.07	-
Temp 16, 150C, 3 h	2.83	-11.50	14.33	-11.04	0.46	0.07	-
Temp 16, 150C, 5 h	2.79	-11.67	14.46	-11.50	0.17	0.07	-
Temp 16, 150C, 7 h	2.75	-12.17	14.92	-12.08	0.08	0.07	-
Control 140C, 3 h	111.42	91.83	19.58	107.25	15.42	6.47	77.50
Control 150C, 7 h	42.92	26.08	16.83	37.92	11.83	5.53	73.45
Native rice starch	137.00	122.08	14.92	151.00	28.92	6.40	84.00

4.4 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อโครงสร้างจุลภาคของ เม็ดสตาร์ช

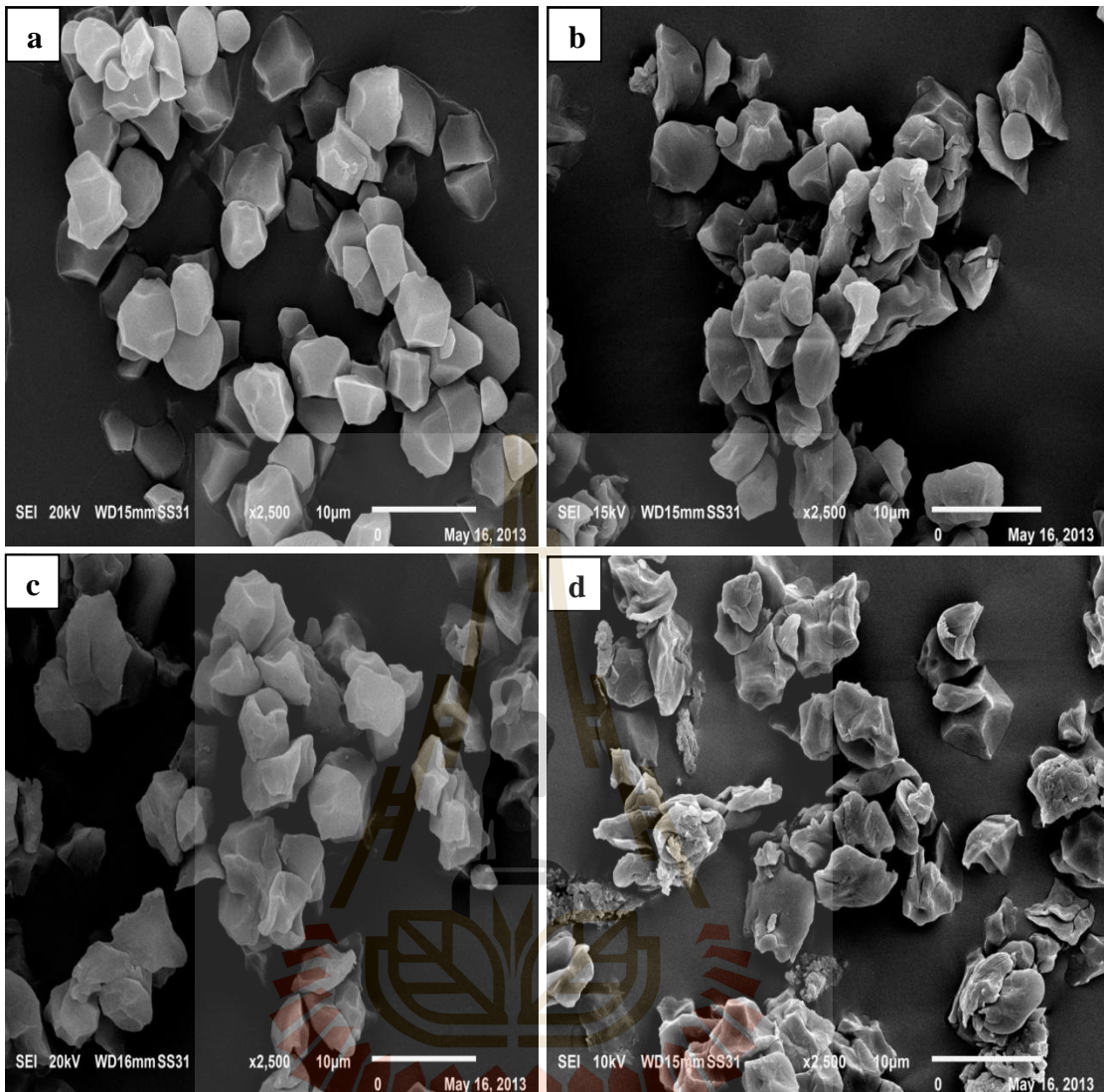
จากผลการทดลองหลังนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ผ่านการทำให้ปฏิกิริยาที่สภาวะต่าง ๆ ไปตรวจสอบดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่า เม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรทุกสภาวะยังคงมีลักษณะเป็นเม็ดสตาร์ชอยู่ แต่มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชข้าวคิบ (รูปที่ 4.3a-d และ 4.4a-d) โดยลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคิบจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม ไม่ยุบตัว ผิวเรียบ ในขณะที่เม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคัดแปรมีลักษณะยุบตัวเข้าตรงกลาง ผิวไม่เรียบ และมีชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ช หลุดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งทำให้สูญเสียรูปร่างตามธรรมชาติไป ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Xie และคณะ (2006) ที่ผลิตสตาร์ชซีเตรทจาก normal, waxy และ high amylose corn starch ซึ่งสตาร์ชซีเตรทดังกล่าวมีรูปร่างและลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชคิบ และเม็ดสตาร์ชบางส่วนมีรูปร่างเหมือนโดนัท (Doughnut shaped) โดย waxy corn starch มีจำนวนแกรนูลที่เป็นรูปโดนัทมากที่สุด Kim และคณะ (2008) ได้ศึกษาการผลิตสตาร์ชกลูตาเรทจากลูกเดือยและรายงานว่าสตาร์ชกลูตาเรทยังคงมีรูปร่างคล้ายกับตัวอย่างควบคุมแต่มีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่ถูกทำลายส่วน Shin และคณะ (2009) รายงานว่าสตาร์ชซีเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชข้าวที่ให้ความร้อนด้วย autoclave ที่ 121 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที แล้วนำไปทำแห้งที่ 128 องศาเซลเซียส เวลา 14 ชั่วโมง มีลักษณะรูปร่างเปลี่ยนไปจากสตาร์ชข้าวคิบคือมีเม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกทำลายและมีขนาดใหญ่ขึ้น Koo และคณะ (2010) ได้ผลิตสตาร์ชครอสลิงค์จากสตาร์ชข้าวโพดด้วยส่วนผสมระหว่าง STTP/STMP ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าครอสลิงค์เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างและลักษณะเปลี่ยนไปโดยมีผิวที่ขรุขระและยุบตัวเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสตาร์ชคิบ ส่วน Adibiyi และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตสตาร์ชซีเตรทจาก Tacca starch และ Omojola และคณะ (2012) ที่ผลิตสตาร์ชซีเตรทจาก Icacina starch เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของยารายานว่าสตาร์ชดังกล่าวมีรูปร่างลักษณะคล้ายสตาร์ชคิบแต่มีบางแกรนูลที่ถูกทำลายบางส่วน ทั้งนี้การเปลี่ยนลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวซีเตรทดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าในระหว่างการบ่มตัวอย่างในสารละลายกรด ทำให้กรดสามารถแทรกเข้าไปทำลายโครงสร้างส่วนอณูพื้นฐานและโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดสตาร์ชจึงทำให้เกิดการยุบตัว (Xie et al., 2006; Shin et al., 2009) หรือย่อยพื้นผิวรอบนอกของเม็ดสตาร์ชทำให้มีชิ้นส่วนหลุดออกมา

เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะในการบ่มพบว่าสตาร์ชข้าวคัดแปรที่บ่มอุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง มีการยุบตัวและสูญเสียรูปร่างมากกว่าสตาร์ชข้าวคัดแปรที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง (รูปที่ 4.3 และ 4.4) และเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้นจาก 140 องศาเซลเซียสเป็น 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาเพิ่มจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง ลักษณะเม็ดสตาร์ช

ของสสารที่เข้าตัดแปรมีการยุบตัวมากขึ้น และสูญเสียรูปร่าง อีกทั้งยังมีชิ้นส่วนของเม็ดสสารหลุดออกมาเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากในขั้นตอนการบ่มตัวอย่างมีกรดบางส่วนสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างอสัณฐานและผลึกบางส่วนของเม็ดสสาร (Xie et al., 2006; Shin et al., 2009) และเมื่อนำมาผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น กรดจึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาการแทนที่หรือเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างกรดและสสารโมเลกุลภายในโครงสร้างของเม็ดสสารเป็นจำนวนมากขึ้น จึงทำให้สูญเสียโครงสร้างเดิมที่เป็นระเบียบไป โดยยังอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น (รูป 4.3d และ 4.4d) ยิ่งส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เม็ดสสารขาดความเป็นระเบียบทำให้สูญเสียรูปร่างตามธรรมชาติไป และทำให้เกิดการยุบตัวของเม็ดสสาร และเกิดการกัดกร่อนพื้นผิวรอบนอกทำให้มีชิ้นส่วนหลุดออกมา



รูปที่ 4.3 ลักษณะเม็ดสสารของตัวอย่างสสารข้าวดิบและสสารข้าวตัดแปรที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ a) สสารข้าวดิบ, b) สสารข้าวตัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง, c) สสารข้าวตัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง และ d) สสารข้าวตัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคืบและสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวคืบ, b) สตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง, c) สตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง และ d) สตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง

4.5 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลาย

จากผลการทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปร พบว่าสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรทุกสภาวะมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการ

การละลายสูงกว่าสตาร์ชข้าวคืบและตัวอย่างควบคุม และสภาวะในการบ่มมีผลทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวคืบแปรแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสภาวะในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายมากกว่าสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากการบ่มสตาร์ชข้าวคืบกับสารละลายกรดเป็นระยะเวลาอันนานมีผลทำให้กรดสามารถแทรกเข้าไปย่อยโครงสร้างหรือกรัดร่อนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชบางส่วนดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างบริเวณพื้นผิวรอบนอกได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชสามารถดูดน้ำและอุ้มน้ำได้มากขึ้น และในขณะเดียวกันก็ทำให้โมเลกุลบางส่วนของสตาร์ชละลายออกมาด้วย

ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียส และเวลาจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง มีผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวคืบลดลง ($P \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.4) โดยสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีค่าลดลงจาก 5.92 เป็น 4.13 และจาก 2.39 เป็น 1.77% ตามลำดับ และที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงจาก 5.96 เป็น 4.42 และความสามารถในการละลายลดลงจาก 2.50 เป็น 1.95% ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Kim และคณะ (2008) ที่ศึกษาการผลิตสตาร์ชกลูตาเรทจากสตาร์ชลูกเดือย รายงานว่า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 75 เป็น 105 องศาเซลเซียส เวลาจาก 4.5 เป็น 7.5 ชั่วโมง ส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายของสตาร์ชกลูตาเรทลดลงจาก 8.12 เป็น 5.03 และจาก 1.25 เป็น 0.71% ตามลำดับ Jyothi และคณะ (2007) ยังรายงานว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายของสตาร์ชซีเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเทคนิคไมโครเวฟมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Koo และคณะ (2011) ที่ศึกษาการผลิตสตาร์ชครอสลิงค์จากสตาร์ชข้าวโพดด้วยสารผสมระหว่าง STMP/STPP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ รายงานว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชครอสลิงค์มีค่าลดลงจาก 33.51 เป็น 13.17 ตามระดับการเกิดพันธะเชื่อมข้าม (degree of cross-linking) ที่เพิ่มขึ้นจาก 51.3 เป็น 99.1% เช่นเดียวกับ Ebihara และคณะ (2006) ที่รายงานว่สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล ไดสตาร์ช ฟอสเฟต (Hydroxypropyl-Distarch Phosphate) จากสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงตามระดับการเกิดพันธะเชื่อมข้ามที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่หรือเกิด Bound citrate ได้มากขึ้นด้วย ทำให้ขีดขวางการจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับโมเลกุลของน้ำ จึงส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำและการละลายของสตาร์ชข้าวคืบแปรมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ RVA (รูปที่ 4.1 และ 4.2) ที่สตาร์ชข้าวคืบแปรทุกสภาวะไม่แสดงค่าความ

ชนิดซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นภายในโครงสร้างของสตาร์ชข้าวตัดแปรรวมถึงผลของ SEM ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ชยุบตัวมากขึ้นเนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมข้ามภายในโครงสร้างขึ้น

ตารางที่ 4.4 ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ WAI และ WSI

Samples	Incubation condition	Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	WAI	WSI (%)
1	50°C, 6 h	140	3	5.92 ^{A, a, x}	2.39 ^{A, a, x}
2	50°C, 6 h	140	5	5.52 ^{A, a, y}	2.27 ^{A, a, y}
3	50°C, 6 h	140	7	5.35 ^{A, a, z}	2.15 ^{A, a, z}
4	50°C, 6 h	150	3	4.64 ^{A, b, x}	2.10 ^{A, b, x}
5	50°C, 6 h	150	5	4.33 ^{A, b, y}	1.92 ^{A, b, y}
6	50°C, 6 h	150	7	4.13 ^{A, b, z}	1.77 ^{A, b, z}
7	28°C, 16 h	140	3	5.96 ^{B, a, x}	2.50 ^{B, a, x}
8	28°C, 16 h	140	5	5.80 ^{B, a, y}	2.30 ^{B, a, y}
9	28°C, 16 h	140	7	5.63 ^{B, a, z}	2.20 ^{B, a, z}
10	28°C, 16 h	150	3	4.79 ^{B, b, x}	2.22 ^{B, b, x}
11	28°C, 16 h	150	5	4.60 ^{B, b, y}	2.05 ^{B, b, y}
12	28°C, 16 h	150	7	4.42 ^{B, b, z}	1.95 ^{B, b, z}
Control 140C, 3 h				2.36	0.54
Control 150C, 7 h				2.28	0.50
Native rice starch				2.33	0.32

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ของสภาวะในการบ่ม

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

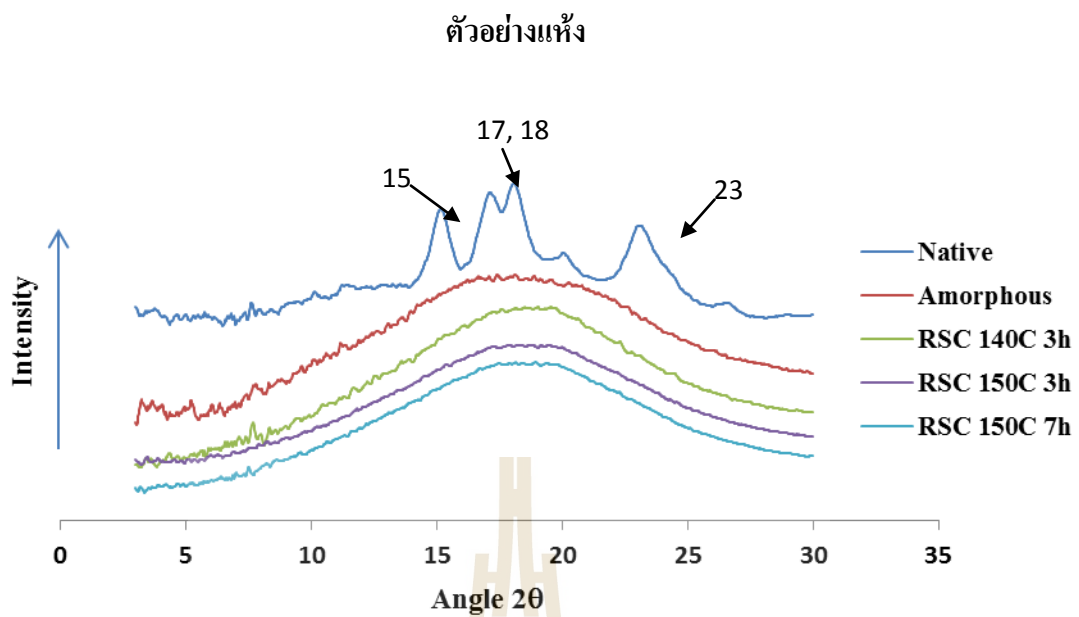
ของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

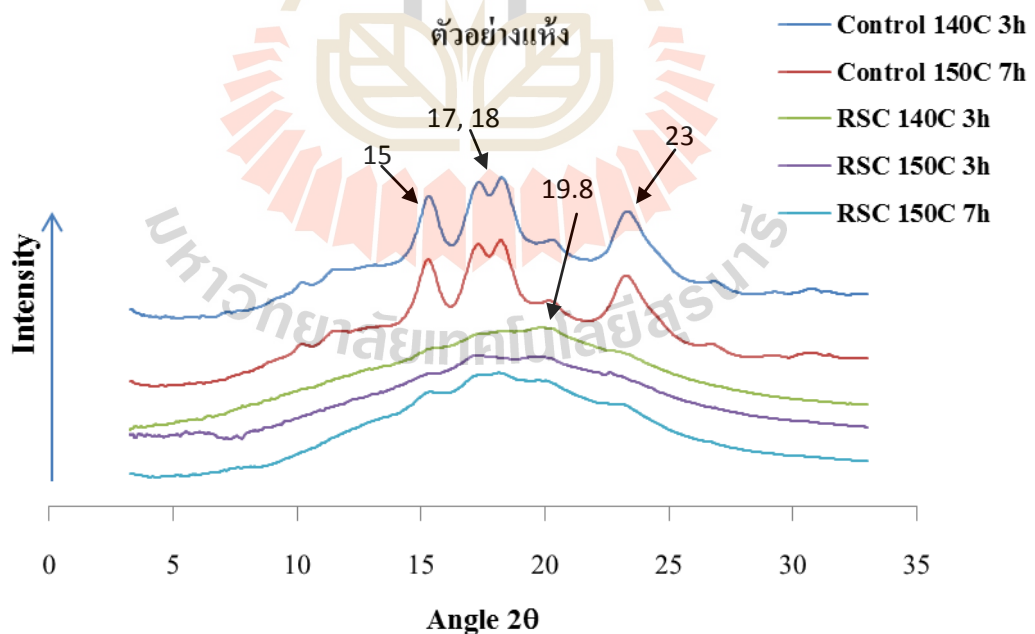
ของเวลาในการทำปฏิกิริยา

4.6 ผลของอุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ สตาร์ชข้าวคัดแปร

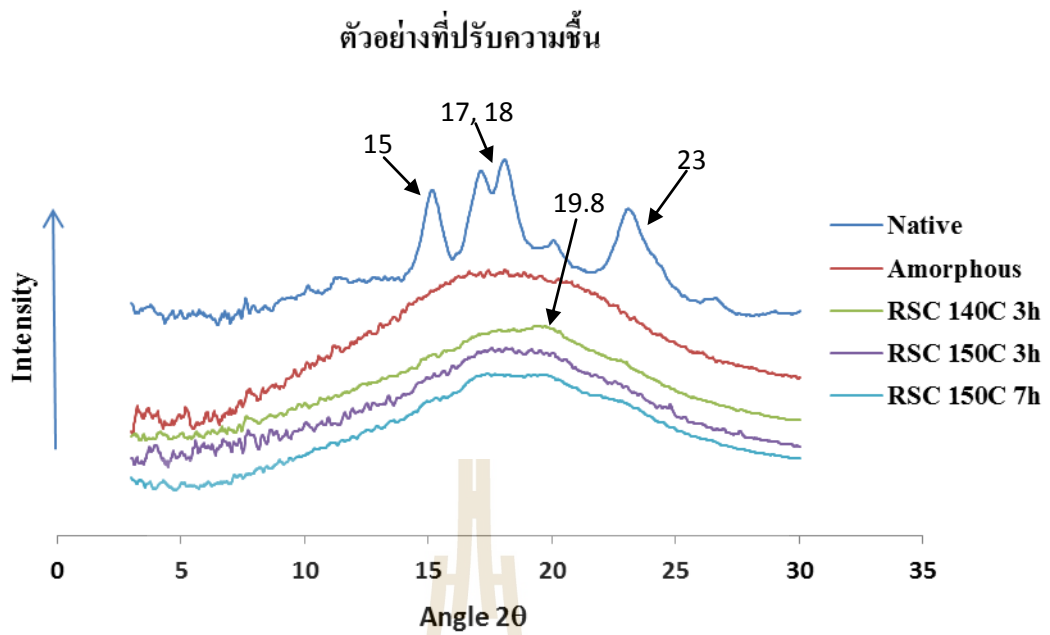
จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวคัดแปร ตัวอย่างควบคุมและสตาร์ชข้าวคัดแปร (ที่ไม่ผ่านการปรับความชื้นก่อนการวัด) ที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิห้อง เวลา 16 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า รูปแบบผลึกของสตาร์ชข้าวคัดแปรและตัวอย่างควบคุมปรากฏพีกคู่ (doublet peak) ที่ 2θ ที่ 17 และ 18° และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ 2θ ที่ 15 และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A-type และเป็นลักษณะผลึกที่พบได้ทั่วไปในสตาร์ชจากธรรมชาติ (Cheetham and Tao, 1998) ในขณะที่ตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แทบไม่หลงเหลือลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกอยู่เลยเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวคัดแปร โดยรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวคัดแปรมีรูปแบบคล้ายกับตัวอย่างอสัณฐาน (Amorphous) แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการบ่มตัวอย่าง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้กรดสามารถแทรกเข้าไปภายในโครงสร้างทั้งในส่วนของ ออสัณฐานและโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช, และผลของกรดและความร้อน (acid and heat treatment) ในระหว่างการเตรียมตัวอย่างไปทำลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ชหรืออาจเกิดจากผลของการเกิดการแทนที่หรือพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้น จึงทำให้เม็ดสตาร์ชแทบไม่หลงเหลือความเป็นผลึกเลย (Kim et al., 2008; Xie et al., 2006) เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Xiao-xi และคณะ (2006) ที่เตรียมสตาร์ชคอสติงก์จากสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยฟอสฟอริล คลอไรด์ (POCl_3) และรายงานว่าสตาร์ชคอสติงก์มีลักษณะโครงสร้างผลึกลดลงและสูญเสียความเป็นผลึกไปเมื่อระดับการเกิดพันธะเชื่อมข้าม (degree of cross-linking) เพิ่มขึ้นสูงสุด (จาก 3.70×10^{-5} เป็น 2.27×10^{-2}) และ Xie และคณะ (2006) ที่ผลิตสตาร์ชซีเตรทจาก normal, waxy, และ high amylose corn starch รายงานว่าสตาร์ชซีเตรทแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกที่น้อยมากหรือแทบไม่หลงเหลือความเป็นผลึกเลยเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ Kim และคณะ (2008) ยังได้รายงานว่าสตาร์ชลูกเต๋าสกัดจากสตาร์ชลูกเต๋ามีค่าความเป็นผลึกน้อยกว่าสตาร์ชลูกเต๋าคัดแปรและตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ยังแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A-type ที่ชัดเจนกว่าตัวอย่างที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง แต่มีปริมาณที่เหลืออยู่น้อยกว่าสตาร์ชข้าวคัดแปร และตัวอย่างควบคุม ซึ่งบ่งบอกถึงผลของสภาวะในการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานมีผลทำให้โครงสร้างผลึกส่วนใหญ่ของสตาร์ชลูกเต๋าทลายแต่ยังมีโครงสร้างผลึกหลงเหลือเพียงเล็กน้อยเนื่องจากใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส



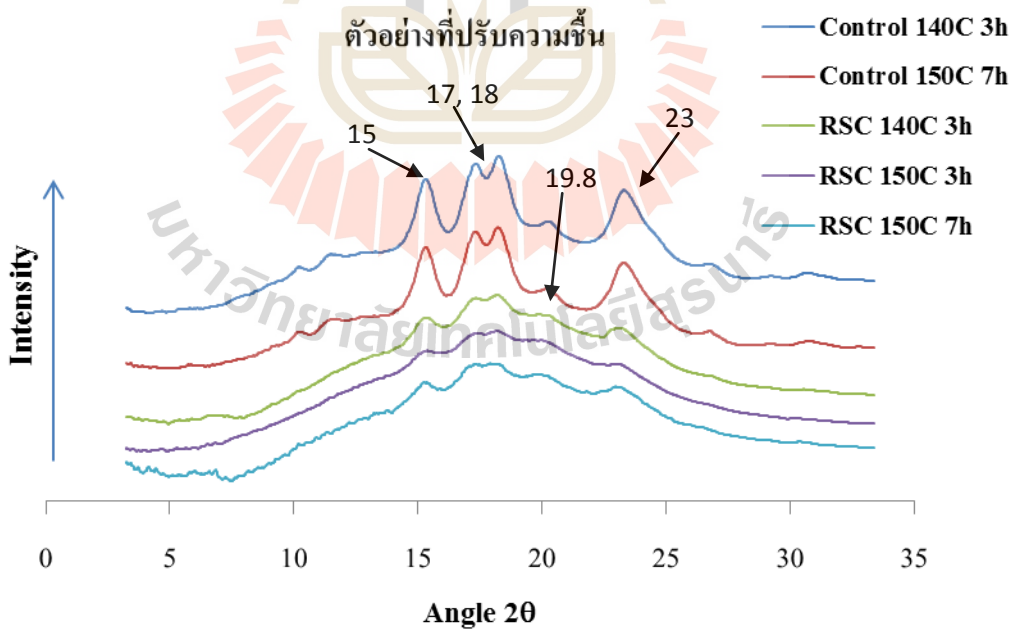
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.6 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวคัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.7 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวตัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.8 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) ของสตาร์ชข้าวดิบ และสตาร์ชข้าวตัดแปร ที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง (ไม่ได้ปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่างที่ผ่านการปรับความชื้นจนสมดุล (20%) ก่อนทำการตรวจสอบ โครงสร้างผลึก ปรากฏว่าสตาร์ชข้าวคั่วดิบและตัวอย่างควบคุมยังคงมีลักษณะ โครงสร้างผลึกที่ชัดเจนเหมือนรูปที่ 4.5 และ 4.6 ส่วนลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปร พบลักษณะพีกที่กว้างที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 17 และ 18° และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ 15 และ 23° (ตัวอย่าง RSC 150C 7h) แต่พีกเหล่านี้ไม่ชัดเจนเหมือนของสตาร์ชข้าวคั่วดิบ และมีพีกขนาดเล็ก ๆ ที่ 19.8° (ตัวอย่าง RSC 140C 3h) เพิ่มขึ้นมา พีกเหล่านี้มีลักษณะชัดเจนขึ้นหลังจากเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นระยะหนึ่ง (10 วัน) แสดงว่ามีผลึกปริมาณน้อยมากที่ไม่พบในตัวอย่างแห้ง แต่เมื่อเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น จึงมีปริมาณมากขึ้นทำให้สังเกตเห็นได้ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีผลึก A-type หลงเหลืออยู่ หรืออาจเกิด Vh-type ขึ้นในตัวอย่างสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปร โดยจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.8) ปรากฏพีกที่มีลักษณะชัดเจนกว่าตัวอย่างที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการยืนยันผลของการวัดตัวอย่างแห้งของการบ่มที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องยังมีโครงสร้างผลึกดั้งเดิม (A-type) เหลืออยู่มากกว่า จากการทดลองของ Le Bail และคณะ (1999) ที่ทำการศึกษาการเกิดโครงสร้างผลึกของ Amylose-lipid complexes ในสตาร์ชธัญชาติด้วยการใช้รังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction) ที่ความชื้นต่ำ (19-35%) และให้ความร้อนด้วย DSC ในช่วงอุณหภูมิสูง 150-170 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปศึกษาความเป็นผลึกด้วย Synchrotron XRD ได้รายงานว่าตัวอย่างที่ปรับความชื้นให้ได้ 19 % เมื่อถูกให้ความร้อนขึ้นถึง 150 องศาเซลเซียส ความเป็นผลึกแบบ A-type เริ่มลดลง และเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างไม่เหลือความเป็นผลึกแบบ A-type และเปลี่ยนเป็นแบบ Vh-type แสดงพีกที่ 2θ ที่ 7.4, 13.1 และ 19.8° และมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่สูงถึง 155 องศาเซลเซียสและอธิบายว่าขั้นตอนในการเกิด Amylose-lipid complexes เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชในสภาวะที่มีการให้ความร้อนสูงและมีความชื้นต่ำซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่โครงสร้างผลึกแบบ A-type จะถูกทำลาย ดังนั้นผลึกของสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่เกิดขึ้นจึงมีรูปผลึกแบบ Vh-type เนื่องจากปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 19.8° แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการทำปฏิกิริยาที่ความชื้นต่ำ (ประมาณ 5%) และอุณหภูมิสูง (140-150 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน (3-7 ชั่วโมง) ส่งผลให้เกิด Amylose-lipid complexes ขึ้น

4.7 อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Thermal transition)

จากการศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคั่วดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าตัวอย่างควบคุมมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำกว่าสตาร์ชข้าวคั่วดิบ ซึ่งให้เห็นว่าการบ่มและการให้ความร้อนกับสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้โครงสร้างผลึกบางส่วนของสตาร์ชข้าวคั่วถูกทำลายและผลึกมีความสมบูรณ์

น้อยกว่าของสตาร์ชข้าวคิบ ซึ่งสอดคล้องกับผล RVA ที่ตัวอย่างความคุ่มมีค่าความหนืดต่ำกว่า สตาร์ชข้าวคิบแต่สูงกว่าสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ไม่แสดงความหนืดเลย (รูปที่ 4.1 และ 4.2) สำหรับ อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรพบว่ามีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมและ สตาร์ชข้าวคิบ

นอกจากนี้ ยังพบว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง มี อุณหภูมิในการหลอมเหลวสองช่วง (ตารางที่ 4.5) คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (52.15-79.42°C) และช่วง อุณหภูมิสูง (168.25-181.34°C) ในขณะที่ตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงเพียงช่วงเดียวคือ 178-191 องศาเซลเซียสโดยช่วงอุณหภูมิใน การหลอมเหลวของตัวอย่างที่ต่ำนี้มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวคิบและตัวอย่างควบคุม รวมถึงมีช่วง T_o-T_c ที่กว้างกว่าอีกด้วย ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า สภาวะการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้เวลานานกว่าที่ กรดจะสามารถแทรกเข้าไปภายใน โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช จึงอาจทำให้สตาร์ชบางส่วนไม่ เกิดปฏิกิริยาและผลึกบางส่วนถูกทำลายด้วยกรด ส่งผลให้เกิดลักษณะของผลึกที่มีความแข็งแรงต่ำ และแตกต่างกันขึ้นจึงทำให้มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำและมีช่วง T_o-T_c ที่กว้างซึ่งสอดคล้องกับ ผลของ XRD ที่ตัวอย่างที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องยังคงหลงเหลือลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบ A-type ที่ชัดเจนอยู่ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในระหว่างการบ่มตัวอย่างเป็นเวลานานส่งผลให้กรด สามารถแทรกเข้าไปทำลายโครงสร้างผลึกบางส่วนของสตาร์ช และมีโครงสร้างสตาร์ชบางส่วนที่ ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา สูงขึ้น (140-150°C เวลา 3 ชั่วโมง) ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวทั้ง T_o , T_p และ T_c ของสภาวะ การบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 7 ชั่วโมง ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรสูงขึ้นด้วย

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรจะมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง กว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวคิบและตัวอย่างควบคุม แต่จะเห็นได้ว่ากลับมีค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) (อยู่ในช่วง 0.95-2.99 J/g) ที่ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวคิบและตัวอย่างควบคุมที่มีค่าพลังงานเอนทาลปีสูง ในช่วง 11.50-11.97 J/g ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงนั้นเกิดจาก Amylose-lipid complex ขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ โดยสามารถ อธิบายด้วยผลของ XRD ที่ตัวอย่างปรากฏพิคที่ตำแหน่ง 19.8° ขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิด Amylose-lipid complex จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ DSC มีอุณหภูมิในการหลอมที่สูงและมีค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ในการเปลี่ยนเฟสต่ำเนื่องจากสตาร์ชข้าวมีปริมาณไขมันอยู่น้อย (ตารางที่ 4.5) ดังเช่น การศึกษาของ Le Bail และคณะ (1999) ที่ศึกษาการเกิดโครงสร้างผลึกของ Amylose-lipid

complexes ในสสารซ์ธรรมชาติที่ความชื้นต่ำ (19-35% m) ด้วยการใช้อิเรกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction) ตามด้วยการให้ความร้อนด้วย DSC ในช่วงอุณหภูมิสูง 150-170 องศาเซลเซียส และรายงานว่าตัวอย่างที่ความชื้นต่ำหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 170 องศาเซลเซียส มีความเป็นผลึกเปลี่ยนจาก A-type เป็น Vh-type โดยมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงถึง 155 องศาเซลเซียส และได้อธิบายขั้นตอนในการเกิด Amylose-lipid complexes ว่าจะเกิดขึ้นภายในเม็ดสสารซ์ในสภาวะที่มีการให้ความร้อนสูงและมีความชื้นต่ำซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่โครงสร้างผลึกแบบ A-type จะถูกทำลาย นอกจากนี้ Shin และคณะ (2009) ได้ศึกษาการดัดแปรสสารซ์ข้าวด้วยกรดซิตริกโดยการนำสารแขวนลอยระหว่างกรดซิตริกกับสสารซ์ไปเข้า autoclave ที่ 121 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ก่อนนำไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 128 องศาเซลเซียส นาน 14 ชั่วโมง และพบว่าสสารซ์ข้าวดัดแปรที่ได้มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ Amylose-lipid complex ที่ 120°C ซึ่งสูงกว่าสสารซ์ข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม

4.8 ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (Dextrose equivalent : DE)

จากผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) ของตัวอย่างสสารซ์ข้าวดัดแปรในตารางที่ 4.6 พบว่าสสารซ์ข้าวดัดแปรทุกสภาวะมีค่า DE สูงกว่าตัวอย่างสสารซ์ข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม โดยค่า DE นี้ สามารถบ่งบอกถึงระดับการถูกย่อยของสสารซ์ให้เป็นน้ำตาลกลูโคสหรือเด็กซ์โตรส แสดงให้เห็นว่าสารละลายกรดและสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลา นานมีผลทำให้เกิดการทำลายหรือแตกตัวของเม็ดสสารซ์บางส่วน (เกิด acid hydrolysis และ thermolysis) จึงทำให้สสารซ์ข้าวดัดแปรมีค่า DE ที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM (รูปที่ 4.3 และ 4.4) สำหรับผลของสภาวะในการบ่มตัวอย่างพบว่า ทำให้ค่า DE ของตัวอย่างสสารซ์ข้าวดัดแปรแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยตัวอย่างสสารซ์ข้าวที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีค่า DE ต่ำกว่า ที่สภาวะในการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แสดงว่าสภาวะในการบ่มสสารซ์กับสารละลายกรดเป็นเวลานานมาก (16 ชั่วโมง) ส่งผลให้เม็ดสสารซ์บางส่วนเกิดการแตกตัวหรือถูกทำลายด้วยกรด (acid hydrolysis) ทำให้ได้โมเลกุลที่เล็กลงและเมื่อนำสสารซ์ดังกล่าวไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงคือ 140 และ 150 องศาเซลเซียสจึงส่งผลให้เกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ตัวอย่างดังกล่าวมีค่า DE สูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

Samples	First transition			$\Delta H(J/g)$	Second transition			$\Delta H(J/g)$
	$T_o (^{\circ}C)$	$T_p (^{\circ}C)$	$T_c (^{\circ}C)$		$T_o (^{\circ}C)$	$T_p (^{\circ}C)$	$T_c (^{\circ}C)$	
50°C, 6 h, 140C, 3 h	-	-	-	-	178.83 ^f	179.71 ^g	181.1 ^f	1.17
50°C, 6 h, 140C, 5 h	-	-	-	-	182.77 ^d	183.34 ^d	184.30 ^d	1.06
50°C, 6 h, 140C, 7 h	-	-	-	-	180.45 ^e	181.17 ^c	182.35 ^e	1.15
50°C, 6 h, 150C, 3 h	-	-	-	-	187.53 ^b	188.51 ^b	189.24 ^b	1.05
50°C, 6 h, 150C, 5 h	-	-	-	-	185.83 ^c	186.54 ^c	187.44 ^c	1.49
50°C, 6 h, 150C, 7 h	-	-	-	-	189.78 ^a	190.40 ^a	191.30 ^a	1.54
28°C, 16 h, 140C, 3 h	56.88 ^{c,d}	62.16 ^f	68.91 ^f	2.99	168.25 ⁱ	169.61 ^l	171.34 ⁱ	2.21
28°C, 16 h, 140C, 5 h	58.35 ^c	63.15 ^{e,f}	68.65 ^f	2.47	166.95 ^j	169.11 ^k	171.77 ⁱ	1.91
28°C, 16 h, 140C, 7 h	57.98 ^c	62.91 ^{e,f}	69.21 ^f	2.44	170.09 ^h	171.23 ^j	173.03 ^h	2.92
28°C, 16 h, 150C, 3 h	52.64 ^e	63.00 ^{d,e,f}	73.47 ^e	1.57	176.78 ^g	177.82 ^h	179.64 ^g	1.96
28°C, 16 h, 150C, 5 h	56.30 ^d	64.16 ^{d,e}	74.15 ^d	1.09	178.55 ^f	179.16 ^h	180.6 ^f	2.53
28°C, 16 h, 150C, 7 h	52.15 ^{d,e}	64.95 ^d	79.49 ^a	0.95	178.73 ^f	180.12 ^f	181.3 ^f	1.19
Control 140C, 3 h	67.90 ^a	72.50 ^b	77.44 ^b	11.50	-	-	-	-
Control 150C, 7 h	64.69 ^{a,b}	69.96 ^c	75.13 ^c	11.97	-	-	-	-
Native rice starch	70.31 ^a	74.38 ^a	78.95 ^a	11.51	-	-	-	-

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ค่า DE ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.6) กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียสส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า DE ลดลงจาก 0.84 เป็น 0.71 (สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง) เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นภายในโครงสร้างของสตาร์ชจึงทำให้เม็ดสตาร์ชแข็งแรงซึ่งสอดคล้องกับผลของ WAI ที่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียสขึ้นส่งผลให้ค่า WAI ลดลง (ตารางที่ 4.4) ในขณะที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียสส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า DE เพิ่มขึ้นจาก 0.85 เป็น 1.02 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในสภาวะการบ่มด้วยกรดเป็นเวลานานการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนเกิดการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (thermolysis) ที่ไปทำลายพันธะกลูโคซิดิกระหว่างสตาร์ชโมเลกุลทำให้ได้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นจึงส่งผลให้ค่า DE มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผล SEM ที่เม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีลักษณะขรุขระและพื้นผิวถูกทำลายกักร่อนจนมีชิ้นส่วนหลุดออกมามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.4)

4.9 ผลของสภาวะการบ่ม อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความขาว (Whiteness)

จากผลการทดลองใน ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าสภาวะในการบ่มมีผลทำให้ค่าความขาวของสตาร์ชข้าวคัดแปรแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อสภาวะในการบ่มเพิ่มขึ้นคือที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ทำให้ค่าความขาวของสตาร์ชข้าวคัดแปรลดลงและมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม (140 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง) และสตาร์ชข้าวคิบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อบ่มสตาร์ชในสารละลายกรดเป็นเวลานานส่งผลให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเมื่อนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาอันจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาน้ำตาลทำให้ค่าความขาวลดลง เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียสหรือเวลาเพิ่มจาก 5-7 ชั่วโมงตามลำดับ ส่งผลทำให้ค่าความขาวของสตาร์ชข้าวคัดแปรมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวคิบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ในการคัดแปรสตาร์ชข้าวโพด 3 ชนิด คือ waxy corn, normal corn และ amylo maize corn starch ด้วยกรดซิตริก ที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 120-150 องศาเซลเซียสเวลา 3-9 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสีของสตาร์ชข้าวโพดมีสีเข้มขึ้นหลังจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 ค่าสมมูลเดกซ์โตรส (Dextrose equivalent: DE) ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวคัดแปรที่ สภาวะต่าง ๆ

Samples	Incubation condition	Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	DE
1	50°C, 6 h	140	3	0.84 ^{A, a}
2	50°C, 6 h	140	5	0.74 ^{A, a}
3	50°C, 6 h	140	7	0.73 ^{A, a}
4	50°C, 6 h	150	3	0.71 ^{A, b}
5	50°C, 6 h	150	5	0.69 ^{A, b}
6	50°C, 6 h	150	7	0.66 ^{A, b}
7	28°C, 16 h	140	3	0.85 ^{B, a}
8	28°C, 16 h	140	5	0.91 ^{B, a}
9	28°C, 16 h	140	7	0.97 ^{B, a}
10	28°C, 16 h	150	3	1.02 ^{B, b}
11	28°C, 16 h	150	5	1.05 ^{B, b}
12	28°C, 16 h	150	7	1.07 ^{B, b}
Control 140C, 3 h				0.53
Control 150C, 7 h				0.55
Native rice starch				0.51

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของสภาวะในการบ่ม
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

เวลา 7 ชั่วโมง ทำให้สตาร์ชที่ได้มีสีน้ำตาลมากขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Reddy and Yang (2010) ในการผลิตสตาร์ชฟิล์มจากกรดซัลฟูริก พบว่าที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการผลิตมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสตาร์ชฟิล์มทำให้มีสีเหลืองมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อ อุณหภูมิและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เรียกว่า คาราเมลไลเซชัน (caramelization) ซึ่งเกิดขึ้นกับสตาร์ชที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลจำนวนมาก โดยที่ความร้อนสูงจะทำให้เกิดการสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออกจากกัน (thermolysis) และจากนั้น เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาลขึ้น โดยปฏิกิริยาคารา

เมล็เซชันนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีน้ำตาลเป็นสารเริ่มต้นเท่านั้น (Ledl, 1993)นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยังทำให้เกิดการสูญเสีย น้ำของกรดซิทริกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของกรดที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated acid) ทำให้เกิดสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น (Andrews and Welch, 1989; Reddy and Yang, 2010)

ตารางที่ 4.7 ผลของสภาวะในการบ่ม อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความขาว

Samples	Incubation condition	Reaction temperature (°C)	Reaction time (h)	Whiteness Index
1	50°C, 6 h	140	3	95.80 ^{A, a, x}
2	50°C, 6 h	140	5	96.04 ^{A, a, x}
3	50°C, 6 h	140	7	95.37 ^{A, a, y}
4	50°C, 6 h	150	3	94.17 ^{A, b, x}
5	50°C, 6 h	150	5	94.23 ^{A, b, x}
6	50°C, 6 h	150	7	92.97 ^{A, b, y}
7	28°C, 16 h	140	3	94.84 ^{B, a, x}
8	28°C, 16 h	140	5	95.90 ^{B, a, x}
9	28°C, 16 h	140	7	94.45 ^{B, a, y}
10	28°C, 16 h	150	3	93.78 ^{B, b, x}
11	28°C, 16 h	150	5	93.29 ^{B, b, x}
12	28°C, 16 h	150	7	93.10 ^{B, b, y}
Control 140C, 3 h				98.25
Control 150C, 7 h				95.83
Native rice starch				98.60

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

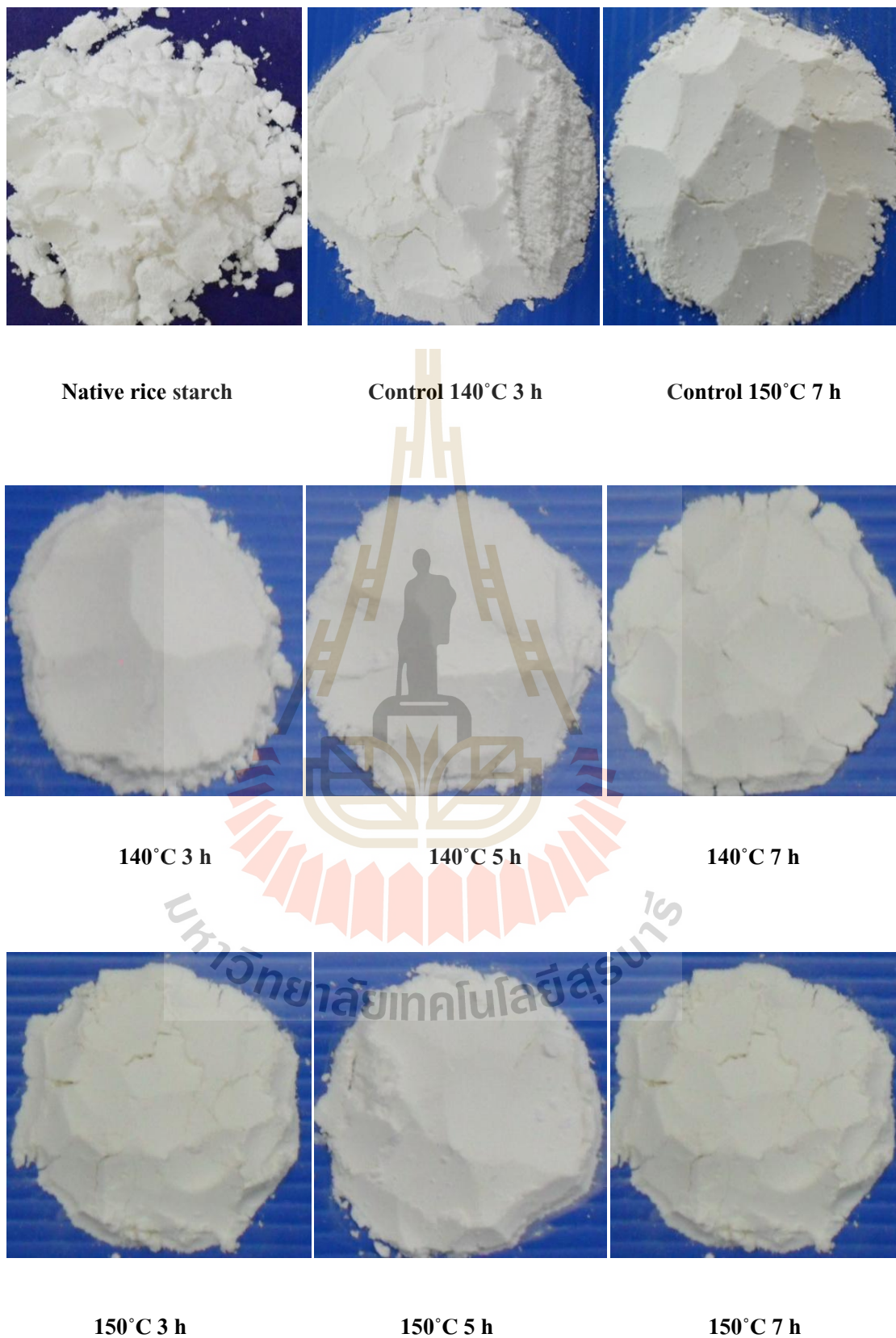
ของสภาวะในการบ่ม

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

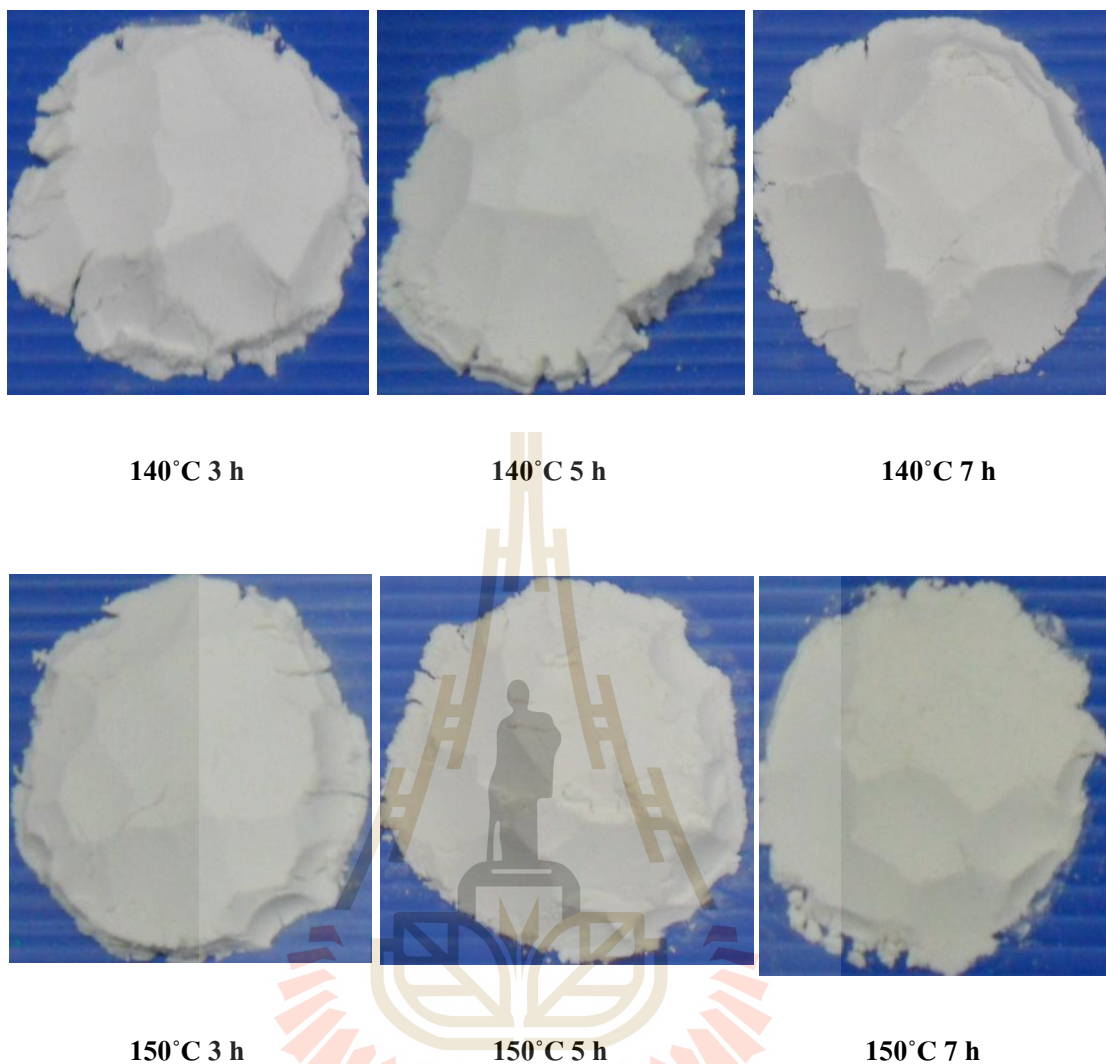
ของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ของเวลาในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.9 ค่าความขาวของตัวอย่างที่สภาวะในการต้ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง



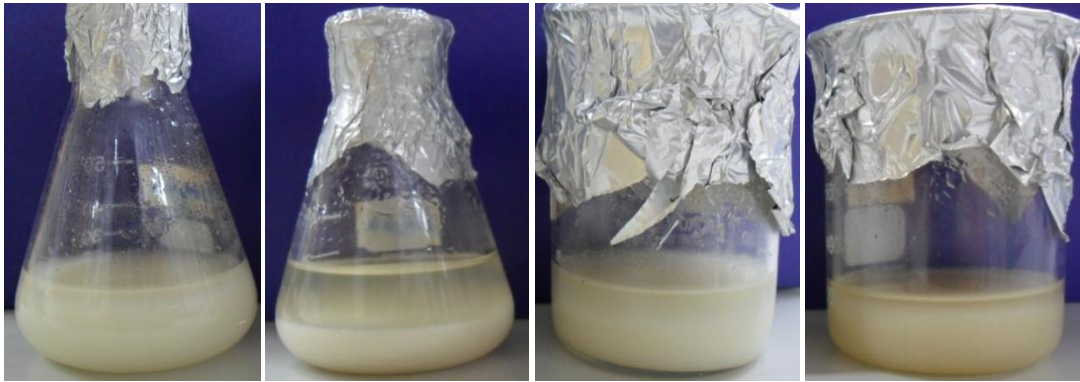
รูปที่ 4.10 ค่าความขาวของตัวอย่างที่สภาวะในการต้ม 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง

4.10 การทดสอบการทนความร้อน

หลังจากนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรที่สภาวะการต้มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง มาทดสอบการทนความร้อนโดย 1) นำไปผ่านเครื่อง RVA จากนั้นนำไปให้ความร้อนต่อด้วย autoclave ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และนำมาให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง 2) นำไปทดสอบการทนความร้อนด้วย autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เพียงอย่างเดียว พบว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรทุกสภาวะดังกล่าวไม่สามารถเกิดเจลาคติในเซชันได้หรือเกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยที่ตัวอย่างไม่เกิดลักษณะข้นเหนียวขึ้น (starch paste) กล่าวคือตัวอย่างสตาร์ชข้าว

ตัดแปรยังคงมีลักษณะแก่ฟองตัวและมีการแยกชั้นระหว่างน้ำกับสตาร์ช ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีการฟองตัวของเม็ดสตาร์ชมากกว่าสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM (รูปที่ 4.3 และ 4.4) ที่แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชข้าวตัดแปรดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างและพื้นผิวไม่เรียบรวมทั้งถูกกัดกร่อนจนมีชิ้นส่วนเล็กๆ หลุดออกมามากกว่า เช่นเดียวกับผลของ DE (ตารางที่ 4.6) ที่ตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรจากสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมงและนอกจากนี้ผลของ DSC (ตารางที่ 4.5) ของตัวอย่างดังกล่าวยังมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสภาวะบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง อีกด้วยแสดงให้เห็นว่าสภาวะการบ่มที่ใช้เวลานานขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกทำลายจึงส่งผลให้เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำมากเกินไปจึงทำให้เกิดการฟองตัวได้ง่ายขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำและสูง พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง สามารถทนความร้อนได้มากกว่าที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมงโดยตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง ยังคงเห็นการแยกชั้นระหว่างสตาร์ชกับน้ำได้อย่างชัดเจน ในขณะที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมงที่สตาร์ชมีการฟองตัวได้มากกว่าโดยอยู่ในรูปของสารแขวนลอยของสตาร์ชกับน้ำที่เกือบจะไม่เห็นการแยกตัวระหว่างสตาร์ชกับน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ RVA ที่แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาที่เพิ่มขึ้น (140-150 องศาเซลเซียส และ 3-7 ชั่วโมง) ส่งผลให้ตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรมีความหนืดต่ำลง (ตารางที่ 4.3) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งเสริมให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามภายในโครงสร้างของสตาร์ชข้าวตัดแปรมากขึ้น จึงส่งผลให้สตาร์ชด้านการฟองตัวและไม่เกิดเจลลาติในเซชันจึงสามารถทนต่อสภาวะการให้ความร้อนที่สูงและรุนแรงได้มากขึ้น



50°C 6h 140°C 3 h

50°C 6h 150°C 7 h

28°C 16h 140°C 3 h

28°C 16h 150°C 7 h

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการเกิดเจลาตินในเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน RVA, แล้ว autoclave 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง, และต้มประมาณ 3 ชั่วโมง



50°C 6h 140°C 3 h

50°C 6h 150°C 7 h

28°C 16h 140°C 3 h

28°C 16h 150°C 7 h

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการเกิดเจลาตินในเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน autoclave 121 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง

4.11 ผลของการทดสอบการทนความร้อนต่อปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชข้าว

ตัดแปร

หลังจากนำสตาร์ชข้าวตัดแปรที่เตรียมจากสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ไปผ่านการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ การนึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 30 นาที การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาที การผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และการอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาทีพบว่ากระบวนการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ มีผลทำให้ตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรทนต่อความร้อนแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยจะเห็นได้ว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรสามารถทนต่อการให้ความร้อนด้วยการนึ่งมากที่สุด ในขณะที่สามารถทนต่อการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำต่ำสุด

เมื่อพิจารณาถึงผลของกระบวนการให้ความร้อนที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณ RS พบว่าการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (70%mc, 121 องศาเซลเซียส, 10 นาที) มีผลทำให้สูญเสียปริมาณ RS เท่ากับ 52.11% ซึ่งมากกว่าการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (70%mc, 100 องศาเซลเซียส, 10 นาที) ที่มีปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 1.91% และการให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้ง (70%mc, 120 องศาเซลเซียส, 1 นาที) มีปริมาณการสูญเสียน้อยที่สุด คือ 0.59% สำหรับการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (40%mc, 100 องศาเซลเซียส, 10 นาที) พบว่ามีปริมาณการสูญเสียน้อยกว่าการให้ความร้อนด้วยเตาอบ (50%mc, 180 องศาเซลเซียส, 10 นาที) ที่มีปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 39.04% ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำเป็นการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิและความดันสูงแก่ตัวอย่าง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างสูงถึง 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานถึง 10 นาที อีกทั้งตัวอย่างมีการปรับให้ความชื้นสูงถึง 70% จึงทำให้อย่างเกิดการพองตัวได้มากขึ้นทำให้สูญเสียลักษณะโครงสร้างดั้งเดิม เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณ RS จึงส่งผลให้เอนไซม์สามารถแทรกเข้าไปย่อยพันธะภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายกว่าและมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่อุณหภูมิของตัวอย่างเพียง 90 องศาเซลเซียสและแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิของตัวอย่าง 118 องศาเซลเซียสซึ่งใช้เวลาเพียง 60 วินาที ที่ตัวอย่างสัมผัสกับผิวลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้สตาร์ชข้าวตัดแปรที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงและด้านการพองตัวจึงทนต่อความร้อนจากกระบวนการดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับ Roopa and Premavalli (2008) ที่รายงานว่าสตาร์ชข้าวป่าสามง่าม (finger millet) มีปริมาณ RS ลดลงหลังจากที่ผ่านกระบวนการการให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำมากเกินไป ด้วยการต้มด้วยหม้อนึ่งความดัน และด้วยการอบ ซึ่งกระบวนการให้ความร้อนจะเพิ่มอัตราการย่อยของสตาร์ชโดยการทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตินในเซชันส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยโครงสร้าง

ของสสารซึ่งได้ง่ายขึ้น (Bornet et al., 1989; Roder et al., 2009) นอกจากนี้ Shin และคณะ (2007) ที่ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและหม้อนึ่งความดันไอแก่สสารข้าวคั่วคั่วแปรด้วยกรดซิตริก รายงานว่าสสารข้าวคั่วคั่วแปรดังกล่าวมีปริมาณ RS ลดลง โดยการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอทำให้ปริมาณ RS ลดลงมากกว่าการให้ความร้อนด้วยการนึ่งโดยมีปริมาณ RS เหลืออยู่เท่ากับ 17.1 และ 30.3% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนที่มีปริมาณ RS เท่ากับ 40.0% โดย Vatanasuchart (2012) อธิบายว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้เม็ดสสารชุกทำลายและเกิดเจลาติโนเซชันขึ้นซึ่งส่งผลทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างหรือแตกตัวของ RS ในตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาผลของความชื้น จากตัวอย่างที่มีความชื้น 40 และ 70%mc ผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ 100 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที (ตารางที่ 4.8) จะพบว่าตัวอย่างที่มีความชื้นสูงกว่ามีการสูญเสียปริมาณ RS มากกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำคือมีปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 8.06% สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้น 70%mc (อุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ 96 องศาเซลเซียส) และเท่ากับ 2.19% สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้น 40%mc (อุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่ความชื้นสูงและมีการให้ความร้อนในเวลานาน ส่งผลให้เม็ดสสารเกิดการพองตัวได้มากขึ้น จึงทำให้เอนไซม์จากการวิเคราะห์สามารถแทรกเข้าไปทำลายพันธะภายในเม็ดสสารได้ง่ายกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำกว่า สำหรับผลของระยะเวลาในการให้ความร้อน จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนทั้งแบบการนึ่ง แบบหม้อนึ่งความดันไอ และด้วยเตาอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สูญเสียปริมาณ RS เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่ได้รับความร้อนเป็นเวลานานกว่าส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงกว่า (ตารางที่ 4.8) จึงทำให้สสารเกิดการพองตัวได้มากและถูกทำลายได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Alsaffar (2010) ที่ศึกษาผลของการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 และ 32 นาที และผลของความชื้นในช่วง 20-70%mc ต่อการย่อยของสสารในเม็ดข้าวสาลีได้รายงานว่าการให้ความร้อนที่ความชื้นสูงและเวลานาน ส่งผลให้สสารชุกย่อยได้มากกว่าสภาวะการให้ความร้อนที่ความชื้นต่ำและเวลาน้อย เพราะเมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปภายในเม็ดสสารได้มากขึ้นทำให้สสารเกิดการพองตัวได้มากขึ้น เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนแบบลูกกลิ้งที่เพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 140 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาเท่ากัน จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียปริมาณ RS มากกว่าคือ 6.34% ในขณะที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียเพียง 0.59% เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เม็ดสสารพองตัวได้มากจึงถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ง่ายขึ้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้สสารข้าวคั่วคั่วแปรจะมีการสูญเสียปริมาณ RS หลังจากผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แต่ปริมาณ RS ของตัวอย่างสสารข้าวคั่วคั่วแปรที่เหลืออยู่ยังคงมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลการศึกษาอื่นๆ ข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสสารข้าวคั่วคั่วแปรสามารถทนต่อ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ (Cooking processes) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวคัดแปร

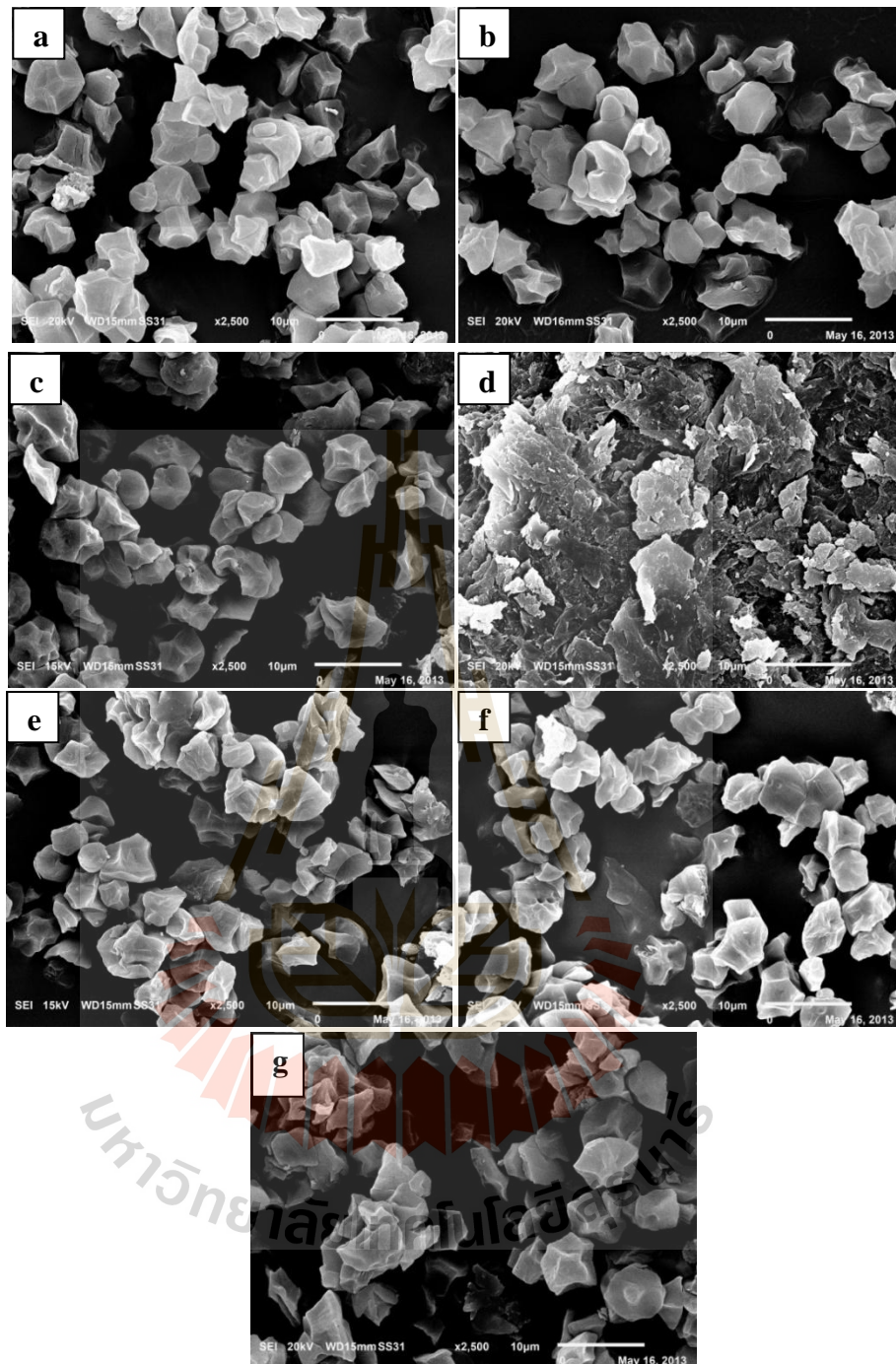
Samples	Cooking temperature (°C)	sample temperature (°C)	Cooking time (min)	RS (%)	Loss (%)
Steamed 40%mc	100	87	10	72.37 ^a ±0.38	0
Steamed 40%mc	100	94	30	70.68 ^b ±0.69	2.19
Steamed 70%mc	100	90	10	70.88 ^b ±0.88	1.91
Steamed 70%mc	100	96	30	66.44 ^c ±1.28	8.06
Autoclaved 70%mc	121	121	10	34.48 ^f ±0.57	52.11
Autoclaved 70%mc	121	121	15	23.78 ^g ±1.36	66.97
Drum dried 70%mc	120	118	1	71.83 ^a ±1.04	0.59
Drum dried 70%mc	140	138	1	67.68 ^c ±1.19	6.34
Baked 50%mc	180	86.8	5	42.91 ^d ±1.16	39.57
Baked 50%mc	180	98.8	10	43.28 ^d ±1.46	39.04
Baked 50%mc	180	99.4	15	43.28 ^d ±1.46	39.04
RS (uncooked)	-	-	-	72.26 ^a ±0.34	-

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

กระบวนการให้ความร้อนต่างๆ ได้ โดยเฉพาะการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและลูกกลิ้งที่ยังคงเหลือ RS ในปริมาณสูงมา

4.12 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวตัดแปรรูป

เมื่อนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรรูปที่ผ่านการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่างๆ มาตรวจสอบลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช พบว่าสตาร์ชข้าวตัดแปรรูปที่ผ่านการให้ความร้อนแต่ละสภาวะยังคงมีความเป็นแกรนูลเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 4.13) ยกเว้นที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ไม่มีความเป็นแกรนูลหลงเหลืออยู่ (รูปที่ 4.13d) เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอเป็นสภาวะที่รุนแรงสุดจึงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากจนทำให้เม็ดสตาร์ชแตกตัวในที่สุด โดย Aparicio-Saguilan และคณะ (2005) ได้รายงานว่า การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอแก่สตาร์ชกล้วยส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวหรือทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณ RS ที่มีปริมาณการสูญเสียมากที่สุด สำหรับสตาร์ชข้าวตัดแปรรูปที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาอบยังคงมีลักษณะของเม็ดสตาร์ชไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนแต่มีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่เกิดการยุบตัวเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.13g) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าการให้ความร้อนด้วยเตาอบซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูงแก่ตัวอย่าง จึงทำให้ความชื้นในตัวอย่งระเหยออกมาจากโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ชซึ่งอาจเป็นผลที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการยุบตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้นภายในโดยที่ไม่ได้ทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวจนเกิดเจลาตินเซชันขึ้น สตาร์ชจึงยังคงมีลักษณะเป็นแกรนูลอยู่ โดยสภาวะการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ความชื้น 40%mc ที่ยังคงมีลักษณะแกรนูลที่ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวตัดแปรรูปที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 4.13a) โดยเมื่อสภาวะในการให้ความร้อนที่รุนแรงขึ้นยิ่งส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสูญเสียลักษณะรูปร่างไปจากเดิมและพื้นผิวบางส่วนหลุดเป็นชิ้นเล็กๆ และเม็ดสตาร์ชบางส่วนมีลักษณะคล้ายรูปโดนัท (doughnut shape) โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ความชื้น 70%mc (รูปที่ 4.13c) ที่แกรนูลมีลักษณะเป็น doughnut shape มากที่สุด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ Kim และคณะ (2008) ที่ผลิตสตาร์ชกลูตาเรทจากลูกเดือยรายงานว่า หลังจากให้ความร้อนแก่สตาร์ชกลูตาเรทที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็น doughnut shape และอธิบายว่าที่สภาวะที่รุนแรงดังกล่าวส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและเกิดการยุบตัวของโครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบ



รูปที่ 4.13 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน, b) สตาร์ชข้าวคัดแปร (40%mc), c) สตาร์ชข้าวคัดแปร (70%mc) ที่ให้ความร้อนด้วยการนึ่ง, d) สตาร์ชข้าวคัดแปร (70%mc) ให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอล, e) สตาร์ชข้าวคัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่120°C, f) สตาร์ชข้าวคัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่140°C, g) สตาร์ชข้าวคัดแปร (50%mc) ให้ความร้อนด้วยเตาอบ

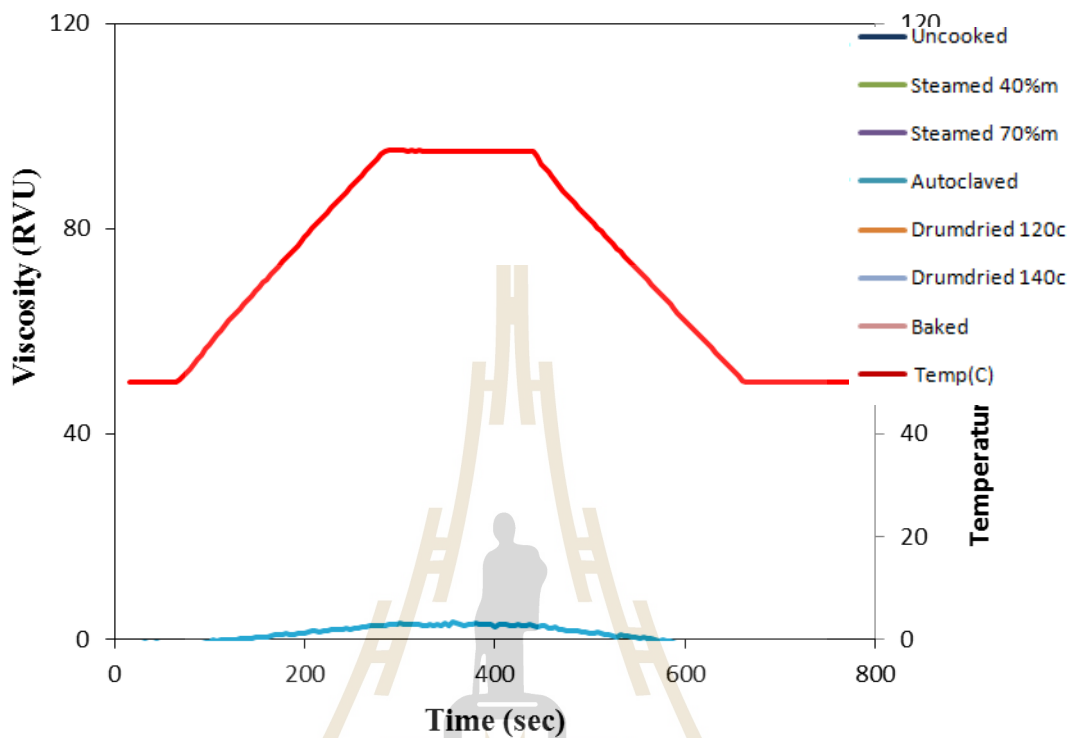
4.13 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านหน้าของสตาร์ชข้าวตัดแปร

จากผลการศึกษาคณสมบัติของสตาร์ชข้าวตัดแปรที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แสดงโปรไฟล์ความหนืดไม่ต่างจากสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน แสดงว่ากระบวนการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ ไม่สามารถทำลายพันธะเชื่อมข้ามภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชได้หรือทำลายได้เพียงบางส่วนจึงทำให้สตาร์ชสามารถต้านการพองตัวในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนส่งผลให้โปรไฟล์ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM ของสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ ยังคงมีลักษณะเป็นแกรนูลอยู่ ยกเว้นที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่มีทั้งผลของความดันและอุณหภูมิที่สูงและเป็นสภาวะที่รุนแรงจนทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการแตกตัวจนไม่เหลือความเป็นแกรนูลอยู่เลย โดย Ozturk และคณะ (2009) ได้รายงานว่าการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอแก่สตาร์ชส่งผลกระทบให้เกิดการแตกตัวของเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นไปและส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเนื่องจากสตาร์ชได้รับทั้งความร้อนและความดันระหว่างการให้ความร้อนจึงทำให้มีความหนืดลดลง จึงอาจอธิบายได้ว่าสาเหตุที่สตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอไม่แสดงความหนืด ในขณะที่ไม่หลงเหลือความเป็นแกรนูลอยู่เลยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ให้ความร้อนสภาวะอื่นๆ ที่ยังคงมีความเป็นแกรนูล แต่ไม่แสดงความหนืด เพราะเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย

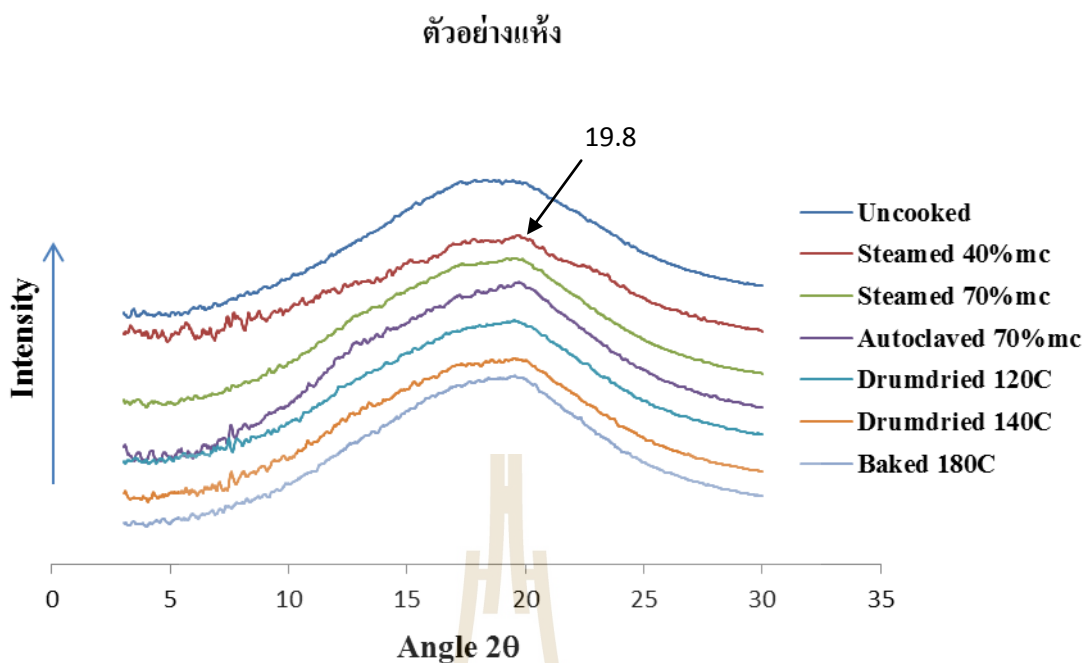
4.14 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวตัดแปร

จากผลการทดลองหลังนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยกระบวนการแตกต่างกัน ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค SynchrotronXRD พบว่า สตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ พบพีคที่ชัดเจนมากกว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 (ทั้งตัวอย่างที่ปรับและไม่ได้ปรับความชื้นก่อนการวิเคราะห์) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกพบว่าสตาร์ชข้าวตัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนยังคงมีลักษณะผลึกเหมือน A-type เล็กน้อย คือปรากฏพีคคู่ (doublet peak) กว้างๆ ที่ 2 θ ที่ตำแหน่ง 17 และ 18° ในขณะที่สตาร์ชข้าวตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนทุกสภาวะแสดงลักษณะความเป็นผลึกแบบ Vh-type คือมีพีคชัดเจนที่ 2 θ ที่ 19.8° แสดงให้เห็นว่ากระบวนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ ส่งเสริมให้เกิดการจัดเรียงตัวของ Amylose-lipid complexes ขึ้น เนื่องจากเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง(100-180°C) ในสภาวะที่มีน้ำปานกลางและมาก อาจทำให้มีอะมิโลสอิสระบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชได้ง่าย จึงทำให้สามารถรวมตัวกับไลปิดที่มีอยู่ได้ง่ายขึ้น (Le Bail et al., 1999; Shin et al., 2009) ซึ่งจะสังเกตได้จากพีคของตัวอย่างสตาร์ชข้าวตัด

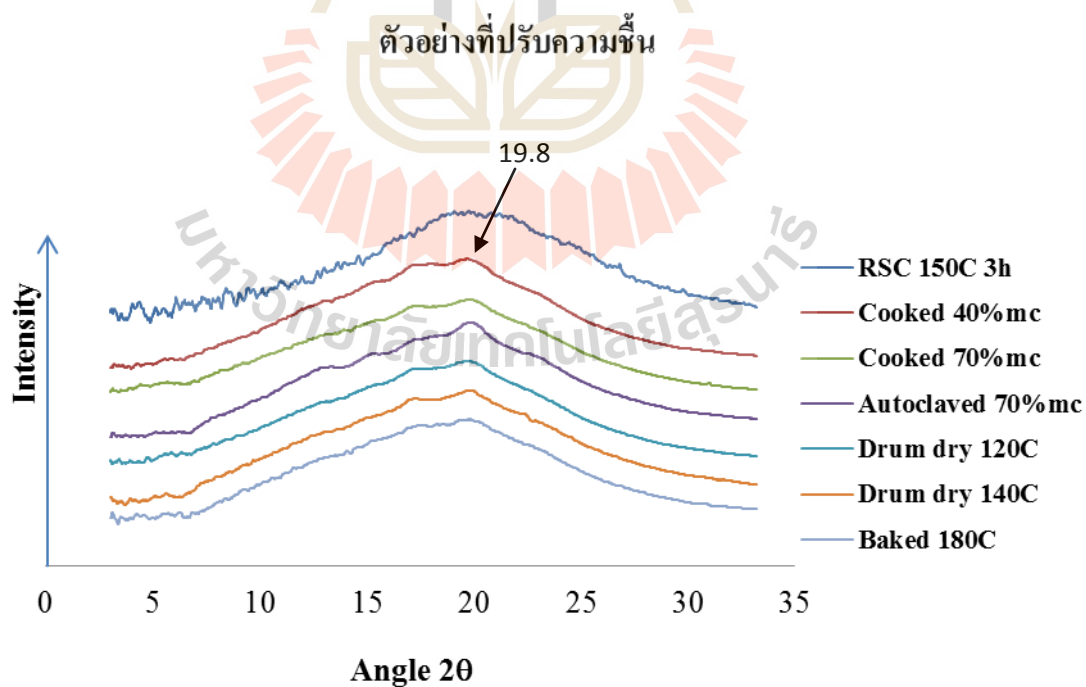
แปรรูปที่ผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะที่ชัดเจนกว่าสตาร์ชข้าวคั่วแปรรูปที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 4.15 และ 4.16)



รูปที่ 4.14 โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวคั่วแปรรูปที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน และสตาร์ชข้าวคั่วแปรรูปที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.15 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ไม่ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเคี่ยวบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)



รูปที่ 4.16 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวคัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเคี่ยวบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

4.15 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชข้าว

ดัดแปร

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC ของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน คือมีอุณหภูมิในช่วง 173-175 องศาเซลเซียส ในขณะที่สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีอุณหภูมิในช่วง 187-189 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่สตาร์ชข้าวดัดแปรผ่านการให้ความร้อนในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงความชื้นสูง ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชสูญเสียความแข็งแรงไปบางส่วน กล่าวคืออาจเกิดการแตกตัวระหว่างหมู่แทนที่หรือ bound citrate กับสตาร์ชโมเลกุลไป จึงทำให้มีหมู่ OH อิสระในโมเลกุลของสตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ที่มีการปรับให้มีความชื้นมากเกินไปก่อนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนในระบบที่มีน้ำมากเกินไปจึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปจับกับโมเลกุลของสตาร์ชได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยการที่อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนดังกล่าวมีค่าสูง เนื่องจากเกิด amylose-lipid complex ขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาและกระบวนการให้ความร้อนในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่ลักษณะ โครงสร้างผลึกของตัวอย่างดังกล่าวมี peak เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 19.8° (รูปที่ 4.16) Chatakanonda et al. (2000) รายงานว่า ครออสลิงค์สตาร์ชที่ผลิตด้วย STMP จากสตาร์ชข้าวที่เปอร์เซ็นต์ครออสลิงค์ 9.2, 26.2 และ 29.2% มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่าสตาร์ชข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม โดยอุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าสูงขึ้นตามระดับการเกิด ครออสลิงค์ซึ่งยืนยันได้ว่าการเกิดครออสลิงค์ขึ้นภายในสตาร์ชโมเลกุลส่งผลให้สตาร์ชด้านการพองตัวจึงทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตในเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น และนอกจากนี้ยังเกิด amylose-lipid complex ขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 90-110 องศาเซลเซียส แต่มีพีค endotherm ขนาดเล็กกว่าสตาร์ชข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเกิดครออสลิงค์ด้วย STMP หรือการทำครออสลิงค์ที่สภาวะอื่นๆ มีผลที่ทำให้เกิด amylose-lipid complex ที่มีขนาดเล็กและไม่คงตัวขึ้น จึงส่งผลให้สตาร์ชดัดแปรด้วยสารเคมีมีค่าพลังงานเอนทาลปีต่ำกว่าสตาร์ชดิบ

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตรัซข้าวคัดแปรที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ

Sample	Cooking temperature (°C)	Cooking time (min)	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
Steamed 40%mc	100	30	173.20 ^c	174.11 ^c	175.40 ^c	1.09
Steamed 70%mc	100	30	172.87 ^c	174.01 ^c	174.90 ^c	0.77
Autoclaved 70%mc	121	15	175.25 ^b	176.57 ^b	177.83 ^b	1.04
Drum dried 70%mc	120	1	173.78 ^c	174.57 ^c	175.67 ^c	1.16
Drum dried 70%mc	140	1	173.73 ^c	174.58 ^c	175.77 ^c	1.06
Baked 50%mc	180	15	173.65 ^c	174.47 ^c	175.85 ^c	0.59
Uncooked			187.53 ^a	188.51 ^a	189.24 ^a	1.05

^{a-c} Mean values follow by different letters within the same column are significantly different ($p < 0.05$)

บทที่ 5

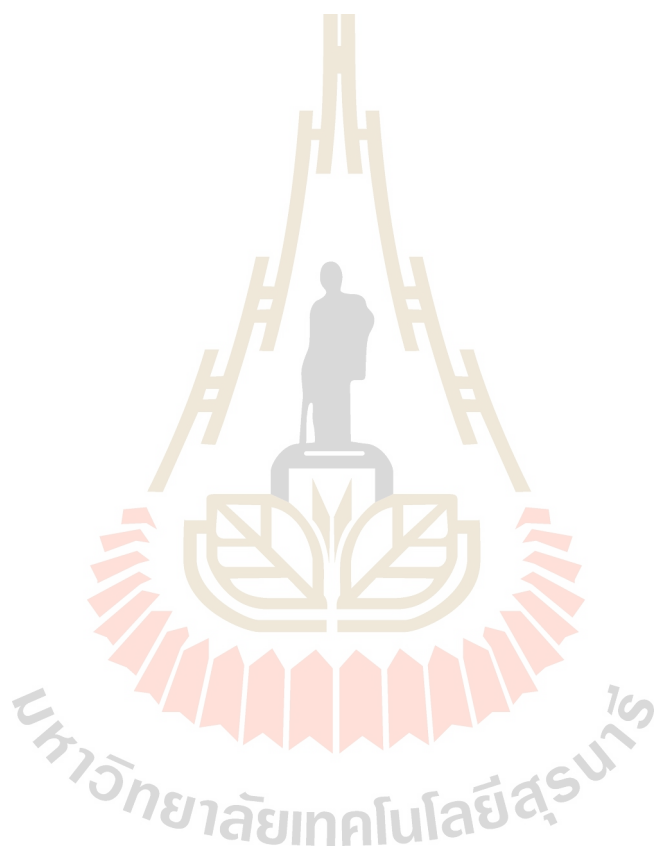
สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมสตาร์ชข้าวตัดแปรด้วยกรดซิตริกที่สภาวะต่างๆ นั้น พบว่าการใช้สภาวะบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถลดระยะเวลาในการบ่มจาก 16 ชั่วโมง เป็น 6 ชั่วโมงได้ เนื่องจากสภาวะในการบ่มไม่มีผลทำให้ปริมาณ bound citrate, ปริมาณ RS, คุณสมบัติด้านความหนืด, ความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายแตกต่างกัน แต่สภาวะในการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีผลทำให้ค่า DE มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีผลต่อลักษณะและรูปร่างของสตาร์ชข้าวตัดแปรที่เปลี่ยนแปลงไปและถูกทำลายมากกว่า คือเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างและพื้นผิวที่ไม่เรียบรวมถึงมีชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชหลุดออกมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบ่มตัวอย่างสตาร์ชกับสารละลายกรดเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้เกิด acid hydrolysis

สำหรับสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 150 องศาเซลเซียส และเวลาที่เพิ่มจาก 3 เป็น 7 ชั่วโมง (ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส) มีผลทำให้ปริมาณ bound citrate และปริมาณ RS เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิด bound citrate และพันธะเชื่อมข้ามเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้มีปริมาณ RS ที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ RVA ที่ไม่แสดงความหนืด และค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายที่ลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อมข้ามทำให้เม็ดสตาร์ชด้านการพองตัว จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสตาร์ชข้าวตัดแปรแสดงให้เห็นว่าสามารถลดระยะเวลาในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรได้ด้วยการลดระยะเวลาในการบ่มโดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติที่ต้องการแตกต่างจากสภาวะการบ่มที่เวลานาน และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณ RS สูงคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 150 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง

สตาร์ชข้าวตัดแปรสามารถทนต่อสภาวะในการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและแบบลูกกลิ้งได้ดี เนื่องจากสูญเสียปริมาณ RS น้อยมาก เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยการอบและหม้อนึ่งความดันไอที่มีการสูญเสียปริมาณ RS มากที่สุด ซึ่งทำให้ทราบว่าความร้อนและความดันไอปริมาณสูงมีผลต่อการทำลายโครงสร้างของสตาร์ชข้าวตัดแปรมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ไม่เหลือความเป็นเม็ดสตาร์ช และการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงสูงทำให้เกิด Amylose-lipid complexes ขึ้นในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลของ DSC ที่ตัวอย่างมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูง

ดังนั้นสสารข้าวตัดแปรที่ได้ จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นปานกลางถึงสูง ด้วยกระบวนการให้ความร้อนแบบการนึ่งและแบบลูกกลิ้ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้ยังคงหลงเหลือ RS ในปริมาณที่สูง



รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 303 หน้า.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 292 หน้า.
- นิธิยา รัตนานนท์. (2545). เคมืออาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 504 หน้า.
- พรศักดิ์ มนต์ศิริเพ็ญ. (2534). การทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอก. วารสารอาหาร. 3:178-181.
- รพีพร อังคุระยี่. (2547). การพัฒนากระบวนการผลิตสตาร์ชชิตเรตแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยเทคนิคไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 82 หน้า.
- วรรณมา ตูลยชัย. (2551). เคมืออาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 166 หน้า.
- วิไล รังสาทอง. (2543). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, พิมพ์ครั้งที่ 1 เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัลส์ พับลิเคชัน, กรุงเทพฯ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 366 หน้า.
- Adebiyi, A. B., Omojola, M. O., Orishadipe, A. T., Afolayan, M. O. and Olalekan, D. (2011). TACCA starch citrate-A potential pharmaceutical excipient. **Archives of Applied Science Research**. 3(6):114-121.
- Agboola, S. O., Akingbala, J. O. and Oguntmein, G. B. 1990. Production of low substituted cassava starch acetates and citrates. **Starch/Stärke**. 43:13-15.
- Alsaffar, A. A. (2010). Effect of thermal processing and storage on digestibility of starch in whole wheat grains. **Journal of Cereal Science**. 52:480-485.
- Andrews, B. A. K. and Welch, C. M. (1989). Efficient ester cross-link finishing for formaldehyde-free durable press cotton fabrics. **American Dyestuff Reporter**. 78(6):15-23.
- AOAC Method. 2002.02. AACC Report: The definition of dietary fiber: **Cereal Food World**. 46:112-126.

- Aparicio-Saguilan, A., Flores-Huicochea, E., Tovar, T., Garcia-Suarez, F., Guiterrez meraz, F. and Bello-Perez, L. A. (2005). Resistant starch-rich powdered prepared by autoclaving of native and lintnerized banana starch: Partial characterization. *Starch/Stärke*. 57:405-412.
- Brouns, F., Kettlitz, B. and Arrigoni, E. (2002). Resistant starch and the butyrate revolution. **Trends in Food Science and Technology**. 13:251-261.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules : structure and biosynthesis. **International Journal of Biological Macromolecules**. 23:85-112.
- CFR. 2006. Code of federal regulations. Food starch modified. title 21. chapter 1, part 172, Sec. 172.892. In food additives permitted for direct addition to food for human consumption. Washington, DC:US GPO.
- Chatakanonda, P., Varavinit, S. and Chinachoti, P. (2000). Relationship of gelatinization and recrystallization of cross-linked rice to glass transition temperature. **Cereal Chemistry**. 77:315-319.
- Cheetham, N. W. H. and Tao, L. (1998). Variation in crystalline type with amylase content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydrate Polymers**. 36:277-284.
- Chowdary, K. P. R. and Enturi, V. (2011). Enhancement of dissolution rate and formulation development of efavirenz tablets employing starch citrate-a new modified starch. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**. 1(5):119-123.
- Chung, H. J., Shin, D. H. and Lim, S. T. 2008. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starch. **Food Research International**. 4:579-585.
- Derycke, V., Vandeputte, G. E., Vermeylen, R., De Man, W., Goderis, B., Koch, M. H. J. and Delcour, J. A. (2005). Starch gelatinization and amylose-lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. **Journal of Cereal Science**. 42(3):334-343.
- Ebihara, K., Nakai, Y. and Kishida, T. (2006). Hydroxypropyl-distarch phosphate from potato starch increase fecal output, but does not reduce zinc, iron, calcium, and magnesium absorption in rats. **Journal of Food science**. 71(2):163-168.
- Englyst, H. N., and Hudson, G. J. (1992). The classification and measurement of dietary carbohydrates. **Food Chemistry**. 57:15-21

- Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**. 46:S33-S50.
- Euresta (European Flair Concerted Action on resistant starch). Department of Human Nutrition, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, (1992). **Newsletter III** 7.
- Han, J. A. and Bemiller, J. N. 2007. Preparation and physical characteristics of slowly digestion modified food starch. **Carbohydrate polymers**. 74:787-796.
- Haralampu, S. G. (2000). Resistant starch-a review of the physical properties and biological impact of RSIII. **Carbohydrate Polymers**. 41:285-292.
- Hayakawa, T., Seo, S. W. and Igaue, I. (1980). Electron microscopic observation of rice grain. I. Morphology of rice starch. **Journal of the Japanese Society of Starch Science**. 27:173-179.
- Hizukuri, S. (1985). Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and crystalline structure of starch granule. **Carbohydrate Research**. 141:295-306.
- Hoover, H., and Vasanthan, T. (1994). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physiochemical properties of cereal, legume, and tuber starches. **Carbohydrate Research**. 252:33-53.
- Hoebler, C., Karinthe, A., Chiron, H., Champ, M. and Barry, J.L. (1999). Bioavailability of starch in bread rich in amylose: metabolic response in healthy subjects and starch structure. **European Journal of Clinical Nutrition**. 53:360-366.
- Hwang, D. K., Kim, S. W., Kim, J. H., Ryu, J. H., Yoo, S. H., Park, C. S., Kim, B. Y. and Baik, M. Y. 2009. In-vitro digestibility of hydroxypropylated and cross-linked waxy and non waxy rice starches. **Starch/Stärke**. 61:20-27.
- Hung, P. V. and Morita, N. (2005). Thermal and rheological properties of dough and bread as affected by various cross-linked corn starch substitutions. **Starch/Stärke**. 57(11):540-546.
- Jacobs, H., and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modification of granular starch, with retention of the granular structure: A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46:2895-2905.

- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N., Shreckumar, J. N. and Rajasetharam, K. N. (2007). Studies on the properties of citrate derivatives of cassava starch (*Manihot esculenta* Crantz) starch synthesized by microwave technique. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 87:871-879.
- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N. and Rajasetharam, K. N. (2007). Studies on the synthesis and properties of hydroxypropyl derivatives of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 87:1964-1972.
- Kim, M. J., Choi, S. J., Shin, S. I., Sohn, M. R., Lee, C. J., Kim, Y., Cho, W. I. and Moon, T. W. (2008). Resistant glutarate starch from adlay: Preparation and properties. **Carbohydrate polymers**. 67:366-374.
- Khondkar, D., Tester, R. F. and Karkalas, J. (2009). Effect of cross-linking on the resistance to enzymatic hydrolysis of waxy maize starch and low-methoxy pectin. **Food Hydrocolloids**. 23(2):387-393.
- Klaushofer, H., Berghofer, E. and Steyrer, W. 1978. Starch citrate - production and technical application properties. **Starch/Stärke**. 30:47-55.
- Koksel, H., Masatcioglu, T., Kahraman, K., Ozturk, S. and Basman, A. (2008). Improving effect of lyophilization on functional properties of resistant starch preparations formed by acid hydrolysis and heat treatment. **Journal of Cereal Science**. 47:275-282.
- Koo, S. H., Lee, K. Y. and Lee, H. G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. **Food Hydrocolloids**. 24:619-625.
- Le Bail, P., Bizot, H., Ollivon, M., Keller, Bourgaux, G. and Buleon, A. (1999). Monitoring the crystallization of amylose-lipid complexes during maize starch melting by synchrotron X-Ray diffraction. **Biopolymers**. 50:99-110.
- Ledl, F. (1993). Browning : Nonenzymatic. In Encyclopedia of Food Science, **Food Technology and Nutrition** 1:494-499 (Macare, R., Robinson, R. K., and Sadler, M. J. eds.), Academic Press, London.
- Li, S., Gao, Q. and Ward, R. (2011). Physicochemical properties and in vitro digestibility of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch. **Starch/Stärke**. 63:171-178.
- Lopez, H. W., Levrat-Verny, M. A., Coudray, C., Besson, C., Krespine, V., Messenger, A., Demigne, C. and Remesy, C. (2001). Class 2 resistant starches lower plasma and liver lipids and improve mineral retention in rats. **Journal of Nutrition**. 131:1283-1289.

- Lunn, J. and Buttriss, J. L. (2007). Carbohydrates and dietary fibre. **Nutrition Bulletin**. 32:21-64.
- Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalain, J. and Tongdang, T. (2009). Physico-chemical properties of phosphoryl chloride cross-linked wheat starch. **Iranian Polymer Journal**. 18(6):491-499.
- Mun, S. H. and M. Shin. (2006). Mild hydrolysis of resistant starch from maize. **Food Chemistry**. 96:115-121.
- Narkruga, W. (1993). Study on the feasibility of starch citrate production by microwave technique. In The Proceeding of the 31th Kasetsart University Annual Conference during 2nd-7th Feb 1993 at Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (in Thai).
- Omojola, M. O., Orishadipe, A. T., Afolayan, M. O. and Adebisi, A. B. (2012). Preparation and physicochemical characterization of icacina starch citrate - a potential pharmaceutical / industrial starch. **Agriculture and Biological Journal of North America**. 3(1):11-16.
- Ozturk, S., Koksel, H., Kahraman, K. and Ng, P. K. W., (2009). Effect of debranching and heat treatments on formation and functional properties of resistant starch from high amylose corn starches. **European Food Research and Technology**. 229:115-125.
- Papadimitriou, E. K. and J. R. Barton. (2009). Report: Factors affecting the content of potentially toxic elements in the biodegradable fraction of autoclaved household waste. **Waste Management and Research**. 27(7):685-692.
- Parchure, A. A. and Kulkarni, P. R. (1997). Effect of food processing treatments on generation of resistant starch. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**. 48:257-260.
- Perez, S. and Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch/Stärke**. 62:389-420
- Perry, N. K., Wepner, B., Berghofer, E., Miesenberger, E., and Tiefenbacher, K. (1999). Citrate Starch-Application as Resistant Starch in Different Food System. **Starch/Stärke**. 51:354-361.
- Rahman, S. (1995). Food properties handbook. CRC Press. New York.
- Ranhotra, G. S., Gelroth, J. A. and Glaser, B. K. (1996). Energy value of resistant starch. **Journal of Food Science**. 61(2):453-5.
- Ratnayake, W. S. and Jackson, D. S. (2008). Thermal behavior of resistant starches RS2, RS 3,

- and RS 4. **Journal of Food Science.**73(5):356-366.
- Reddy, N. and Yang, Y. (2010). Citric acid cross-linking of starch films. **Food Chemistry.** 118(3):702-711.
- Roder, N., Gerard, C., Verel, A. et al. (2009). Factors affecting the action of α -amylase on wheat starch: Effects of water availability. An enzymic and structural study. **Food Chemistry** 113:471-478.
- Roopa, S. and Premavalli, K. S. (2008). Effect of processing on starch fractions in different varieties of finger millet. **Food Chemistry.** 106:875–882.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant Starch-A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.** 5:1-17.
- Sanz, T., Salvador, A., Baixauli, R. and Fiszman, S. M. (2009). Evaluation of four types of resistant starch in muffins. II. Effects in texture, colour and consumer response. **European Food Research and Technology.** 229(2):197-204.
- Schrijver, R. D., Berghofer, E. and Wepner, B. 1999. Feeding trials with citrate starch using hypercholesterolemic rats, unpublished work.
- Sevenou, O., Hill, S. E., Farhat, I. A. and Mitchell, J. R. (2002). Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy. **International Journal of Biological Macromolecules.** 3:79-85.
- Shin, S. I., Lee, C. J., Kim, M. J., Choi, S. J., Choi, H. J., Kim, Y. and Moon, T. (2009). Structural characteristics of low-glycemic response rice starch produced by citric acid treatment. **Carbohydrate Polymers.** 78:588-595.
- Shin, M. J., Lee, C. J., Kim, D. I., Lee, H.A., Cheon, J. J., Chung, K.M., Park, C.S., Kim, C.H. and Moon, T. W. (2007). Formation, characterization, and glucose response in mice to rice starch with low digestibility produced by citric acid treatment. **Journal of Cereal Science.** 45:24-33.
- Shin, S. I., Kim, H. J., Ha, H. J., Lee, H. S., and Moon, T. W. (2005). Effect of hydrothermal treatment on formation and structural characteristics of slowly digestible non-pasted granular sweet potato starch. **Starch/Stärke.** 57:421-430.
- Shogren, K. L. and Biswas, A. (2006). Preparation of water-soluble and water swelling starch acetates using microwave heating. **Carbohydrate Polymers.** 64:16-21.

- Shon, K. J. and Yoo, B. (2006). Effect of acetylation on rheological properties of rice starch. **Starch/Stärke**. 58:177-185.
- Singha, J., Kaur., L. and McCarthy, O.J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications-a review. **Food Hydrocolloids**. 21:1-22.
- Siljestrom, M., Eliasson, A.-C., and Bjorck, I. (1989). Characterization of resistant starch from autoclaved wheat starch. **Starch/Stärke**. 41:147-151.
- Sozer, N., Dalgic, A. C. and Kaya, A. (2007). Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. **Journal of Food Engineering**. 81:476-484.
- Srichuwong, S., Sunarti, T. C., Mishima, T., Isono, N. and Hisamatsu, M. (2005). Starches from different botanical sources I : Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. **Carbohydrate Polymers**. 60:529-538.
- Tester, R. F., Karkalas, J. and Qi, X. (2004). Starch structure and digestibility enzyme substrate relationship. **World's Poultry Science Journal**. 60:185-195.
- Tharanathan, R. T. (2005). Starch-value addition by modification. **Food Science and Nutrition**. 45:371-384.
- Thompson, D. B. (2000). Strategies for the manufacture of resistant starch. **Trends in Food Science and Technology**. 11:245-253.
- Toledo, R. T. (1999). Fundamentals of food process engineering. Aspen Publishers, Inc. MD.
- Tovar, J. and Melito, C. (1996). Steam cooking and dry heating produce resistant starch in legumes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 44:2642-2645.
- Vandeputte, G. E. and Delcour, J. A. (2004). From sucrose to starch granule to physical behaviour: a focus on rice starch. **Carbohydrate Polymer**. 58:245-66.
- Vatanasuchart, N., Niyomwit, B. and Narasri, W. (2012). Resistant Starch, Physicochemical and Structural Properties of Bananas from Different Cultivars with an Effect of Ripening and Processing. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 46: 461-472.
- Wepner, B., Berghofer, E., Ella Miesenberger, W., Karl Tiefenbacher, K. and Perry N. K. (1999). Citrate Starch- Application as Resistant Starch in Different Food Systems. **Starch/Stärke**. 51(10):354-361.

- Whister, R. L., and Deniel, J. R. (1984). Molecular structure of starch. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, and E. F. Paschall (Eds.). **Starch : chemistry and technology**. (pp.153-178). 2nd Ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Wurzburg, O. B.(1986). *Modified Starches: Properties and Uses*. Florida: **CRC Press**.
- Xiao-xi, L., Chen, L., Lin, L. and Bing, L. (2006). Effect of cross-linking of POCl₃ on in vitro Digestibility and Formation of Enzyme Resistant Starch of Tapioca Starch. **Institute of Light Industrial and Chemical Engineering**, 27:64-68.
- Xie, X., Liu, Q., & Cui, S. W. (2006). Studies on the granular structure of resistant starches (type 4) from normal, high amylose and waxy corn starch citrates. **Food Research International**. 39(3):332-341.
- Xie, X. and Liu, Q. 2004. Development and Physicochemical Characterization of New resistant Citrate Starch from Different Corn Starch. **Starch/Stärke**. 56:364-370.
- Yue P., and Waring, S. (1998). Functionality of resistant starch in food applications. **Food Australia**. 50(12):615-21.
- Yussof, N. S., Utra, U., and Alias, A. K. (2013). Hydrolysis of native and cross-linked corn, tapioca, and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Starch/Stärke**. 65:285-295
- Zobel, H. F. (1988). Molecules to granules: A comprehensive starch review. **Starch/Stärke**. 40(2):44-50.



การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบด้วยแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบลมร้อน ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัมห่อให้มิดชิดและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเก็ต
4. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ในขวดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมันพร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควมแน่นและเปิดสวิตซ์ให้ความร้อนโดยใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง
6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว
7. คำนวณปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

2. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัมห่อให้มิดชิดใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 15-20 มิลลิลิตรและสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสจนได้สารละลายใสปล่อยให้เย็น
5. จัดอุปกรณ์การกลั่นแล้วเปิดสวิตซ์ไฟและเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควมแน่น

6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตรซึ่งบรรจุกรดบอริก(ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตรและน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดเรียบร้อยแล้วไปกรองรับของเหลวที่กั่นได้ โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควมแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้
7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนักและทำการกั่นที่ประมาณ 10 นาทีล้างปลายอุปกรณ์ควมแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
8. โดเตรทสารละลายที่กั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัลจนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. ทำแบลนด์และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง
10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

$$\text{ปริมาณ โปรตีน(\%)} = \frac{(A-B)N \times 1.4 \times F}{W}$$

- เมื่อ A = ปริมาตรกรดที่ใช้โดเตรทตัวอย่าง(มิลลิลิตร)
 B = ปริมาตรกรดที่ใช้โดเตรทกับ blank (มิลลิลิตร)
 N = ความเข้มข้นของกรด(นอร์มัล)
 F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25
 W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น(กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโนส

ทำตามวิธี Colorimetric ของ Juliano (1971) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และใช้อะมิโนสบริสุทธิในการสร้างกราฟมาตรฐาน

- วิธีการ
1. ชั่งแป้งหนัก 0.1000 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
 2. เติมเอธานอลความเข้มข้น 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตรเขย่าเบา ๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัว
 3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาตร 9 มิลลิลิตร
 4. นำไปต้มให้ความร้อนในน้ำเดือดนาน 10 นาที ทิ้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
 5. ดูดสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมได้มา 5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรดอะซิดิกความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร

และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที

6. นำไปวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตรแล้วปรับเครื่องด้วยแบลนด์ให้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0

7. นำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัมเตรียมเป็นสารละลายเป็งเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทิ้งไว้ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน แล้วดูดสารละลายอะมิโลสมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตรจากนั้นเติมกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตรตามลำดับเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวดแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสง

8. คำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน แล้วแสดงค่าเป็น % โดยน้ำหนัก

4. การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Ash)

วิธีการ

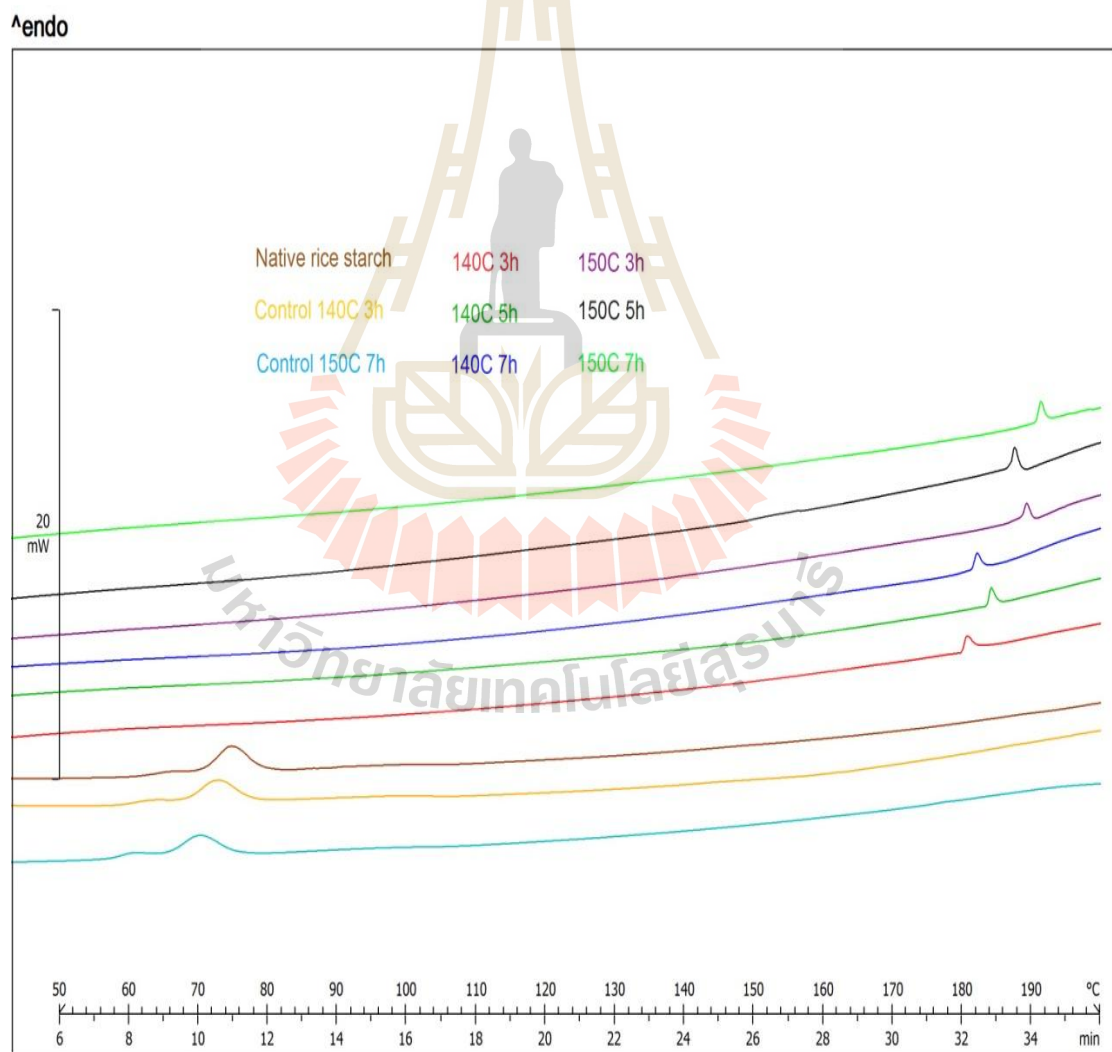
- นำถ้วยเปล่าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างใส่ลงในถ้วยที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 2 กรัม แล้วนำไปทำการเผาบนเตาไฟฟ้าจนหมดควัน
- นำตัวอย่างที่เผาไล่ควัน แล้วไปเผาต่อในเตาเผา (Muffer furnace) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง แล้วปิดสวิทช์เตาเผา เปิดฝาเตาออกรอจนอุณหภูมิภายในเตาลดเหลือประมาณ 100 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันมิให้ถ้วยสัมผัสอากาศเย็นกะทันหัน ซึ่งอาจทำให้ถ้วยแตกได้
- นำถ้วยออกมาใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก
- คำนวณปริมาณเถ้าจากสูตร

$$\% \text{ เถ้า} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

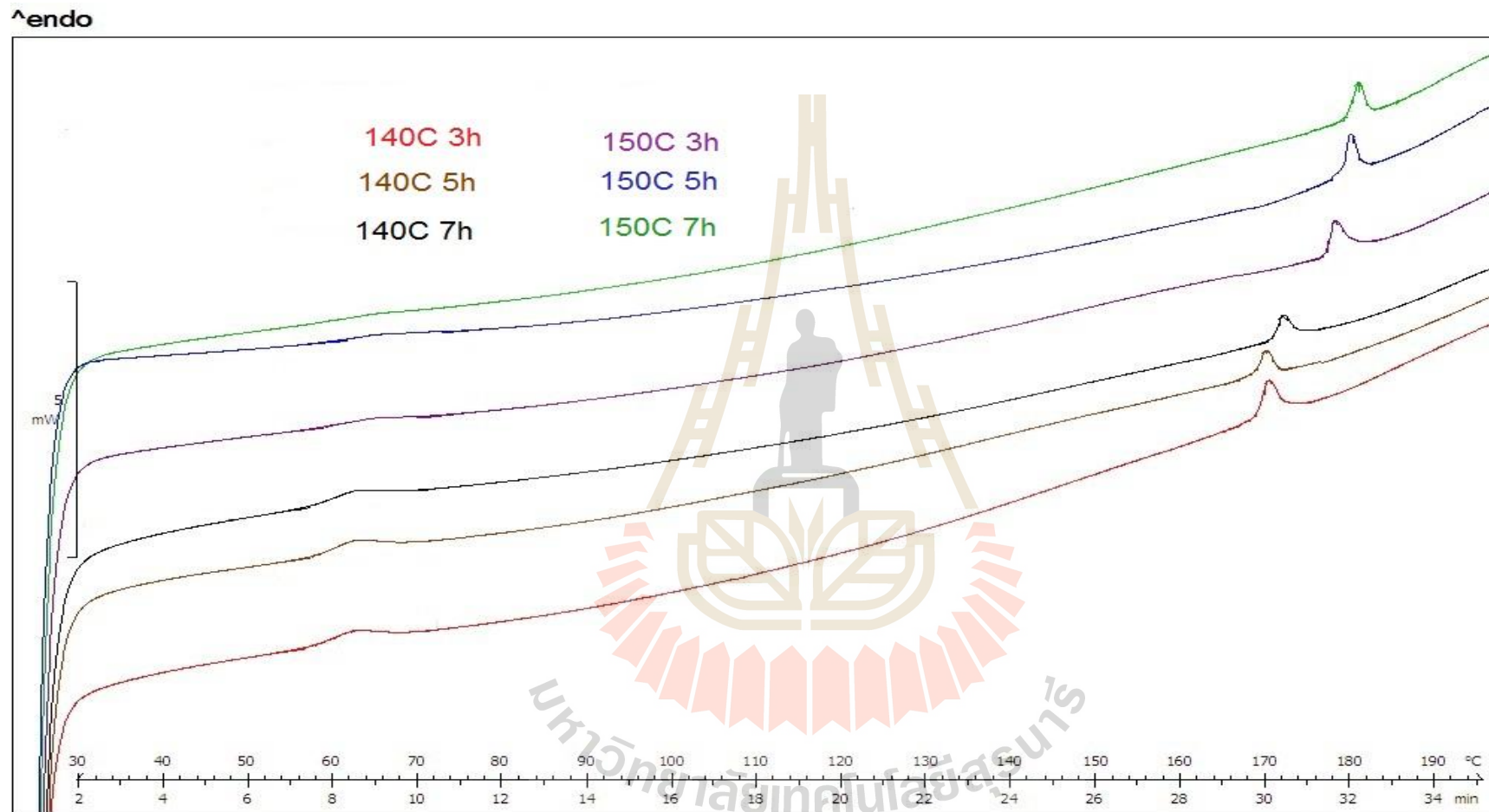
- เมื่อ W1 คือ น้ำหนักถ้วย
 W2 คือ น้ำหนักถ้วย + น้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา

ตารางภาคผนวกที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว

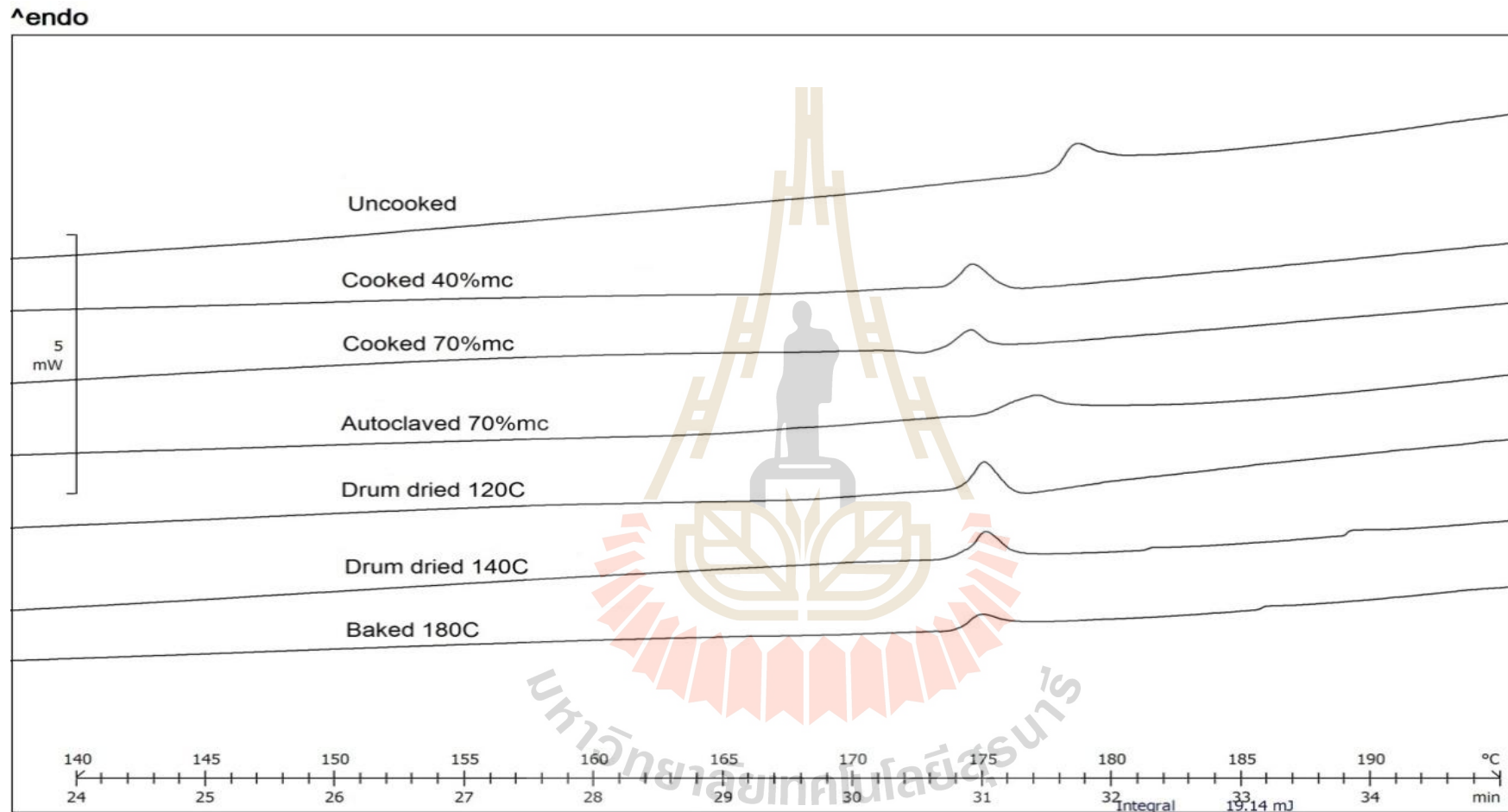
ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (%)			
	อะมิโลส	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
สตาร์ชข้าว	29.26	0.72	0.75	0.047



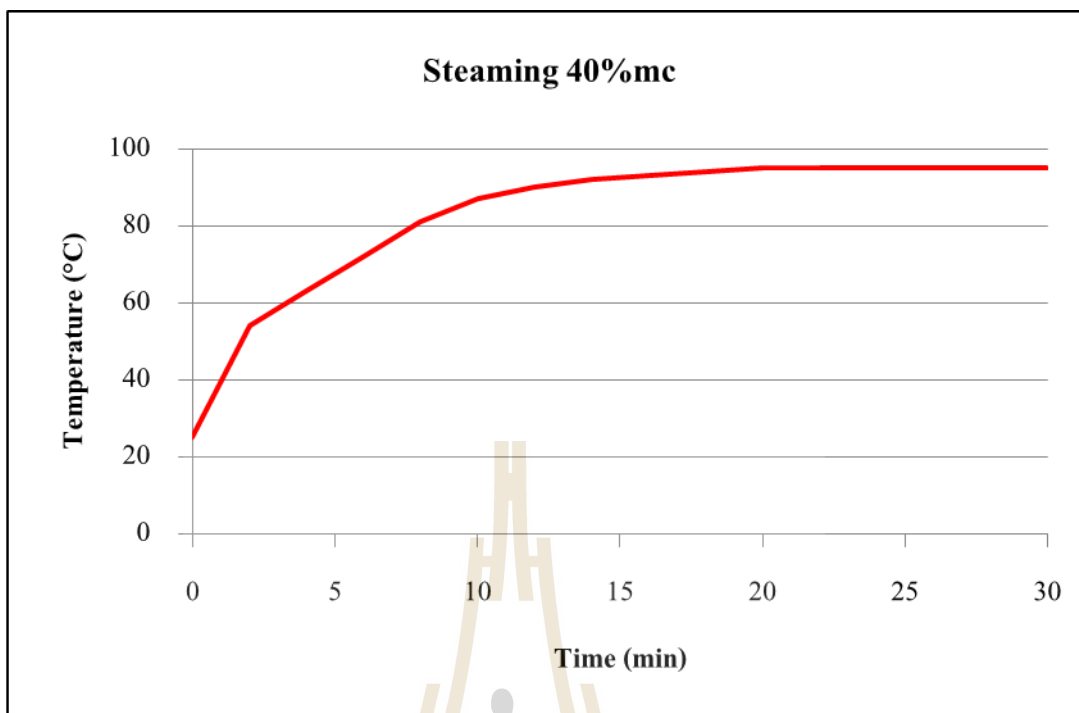
รูปภาคผนวกที่ 1 เทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง



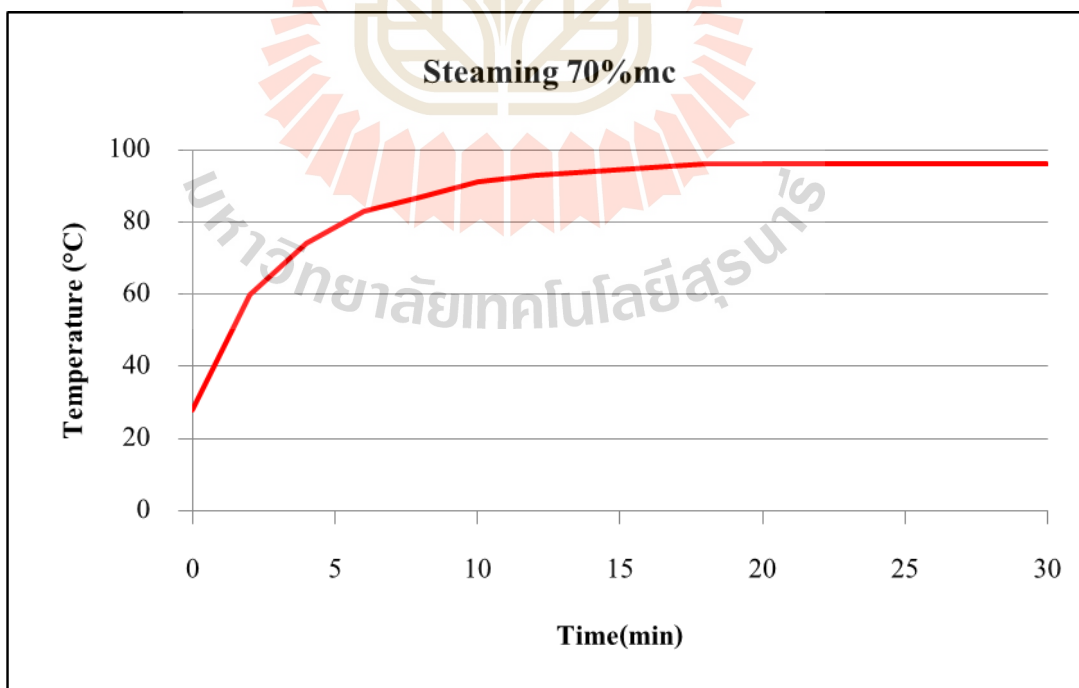
รูปภาคผนวกที่ 2 เทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างที่สภาวะการป้อน 28 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง



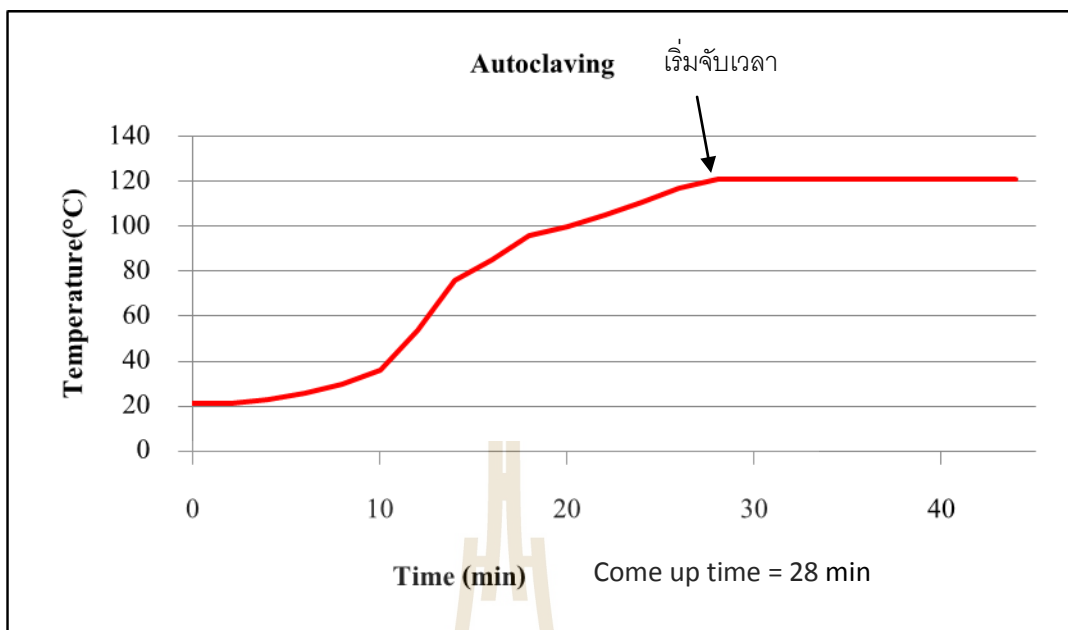
รูปภาคผนวกที่ 3 เทอร์โมแกรม DSC ของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ



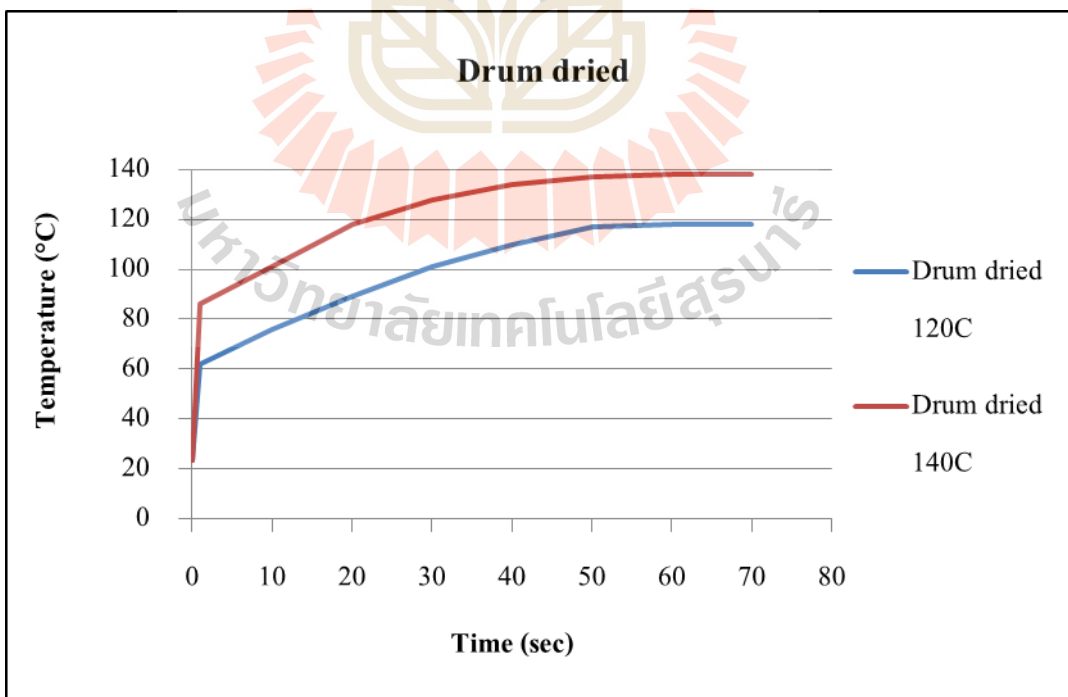
รูปภาคผนวกที่ 4 รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีความชื้น 40% ที่ให้ความร้อนด้วยการนึ่ง



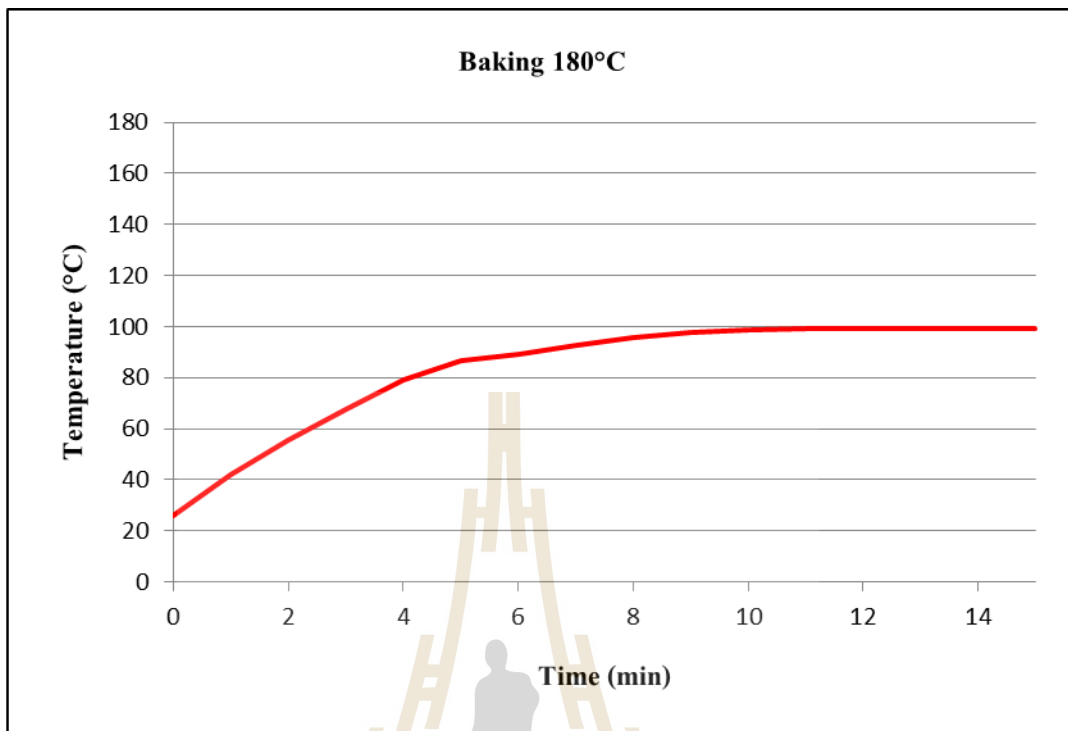
รูปภาคผนวกที่ 5 รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีความชื้น 70% ที่ให้ความร้อนด้วยการนึ่ง



รูปภาคผนวกที่ 6 รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีความชื้น 70% ที่ให้ความร้อนด้วยหม้อไอน้ำความดันไอ



รูปภาคผนวกที่ 7 รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีความชื้น 70% ที่ให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้ง



รูปภาคผนวกที่ 8 รูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีความชื้น 50% ที่ให้ความร้อนด้วยเตาอบ

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุรวีร์ จำปาเทศเกิดเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่อำเภอเนินขามคำสร้อย จังหวัดมุกดาหาร เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนบ้านคำสร้อย (ชั้นประถมศึกษา 1-4) และย้ายเข้าศึกษาต่อจนจบการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านบะ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนคำสร้อยพิทยาสรรค์ในปี พ.ศ. 2547 จากนั้นเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2551 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

