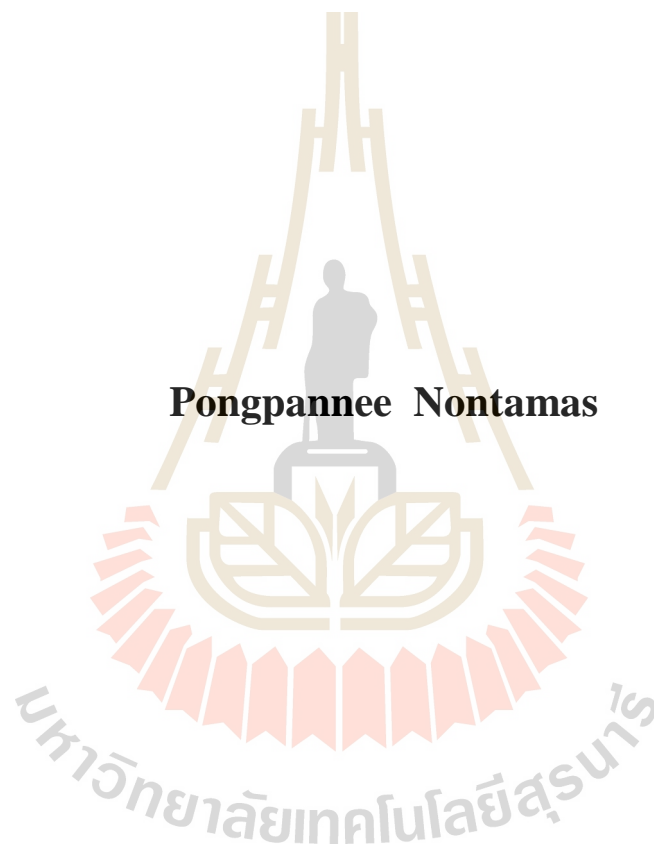


ผลของการตัดแปรพันผิวและการฉายรังสีซินโครตรอนต่อคุณสมบัติ
ของสตาร์ชซีเทรท้านทาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**EFFECT OF SURFACE MODIFICATION AND
SYNCHROTRON RADIATION ON PROPERTIES OF
RESISTANT CITRATE STARCH**



Pongpannee Nontamas

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

ผลของการตัดแปรพื้นผิวและการฉายรังสีซินโครตรอนต่อคุณสมบัติ
ของสตาร์ชซีเทรทด้านทาน

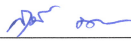
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. สุนันทา ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. มาโนชญ์ สุธีรวัดนานนท์)

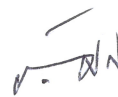
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(ศ. ดร. หนึ่ง เตียอำรุง)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ผ่องพรรณณี นนทมาศ : ผลของการตัดแปรพื้นผิวและการฉายรังสีซินโครตรอนต่อ
คุณสมบัติของสตาร์ชซิเตรทต้านทาน (EFFECT OF SURFACE MODIFICATION AND
SYNCHROTRON RADIATION ON PROPERTIES OF RESISTANT CITRATE
STARCH) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา, 98 หน้า.

การศึกษากการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ก่อนนำมาผลิตสตาร์ชซิเตรท เพื่อลดระยะเวลาใน
ขั้นตอนการบ่มในสารละลายกรดซิตริก โดยย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่อุณหภูมิ
55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น
20% (w/v) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาในสภาวะแห้งที่
อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการบ่มสตาร์ชตัดแปร
พื้นผิวที่ 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง มีปริมาณ RS ต่ำกว่าที่ได้ตัวอย่างควบคุม (68.08%) คือ 48.27% และ
27.71% ตามลำดับ แต่เมื่อลดระยะเวลาการบ่มสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวในสารละลายกรดจาก 6 เป็น 3
และ 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชต้านทานการย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) เพิ่มขึ้น
อยู่ในช่วง 62.58 - 75.39% สตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมีค่ากำลังการพองตัว และ
ความสามารถในการละลายมากกว่าสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชดิบ นอกจากนี้สตาร์ชซิเตรทจาก
สตาร์ชตัดแปรพื้นผิวยังคงไม่แสดงโปรไฟล์ความหนืดเช่นเดียวกับสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมจาก
สตาร์ชดิบ โดยลักษณะรูปร่างเม็ดสตาร์ชซิเตรทมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีบางเม็ดสตาร์ชซิเตรท
ที่ถูกทำลาย

ผลการฉายรังสีซินโครตรอนกับสตาร์ชดิบ และสตาร์ชซิเตรทที่ระดับพลังงาน 0 - 5,000
 mJ/cm^3 พบว่าปริมาณ RS ของทุกตัวอย่างต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี ยกเว้นสตาร์ชดิบที่ถูกฉาย
รังสีที่ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ แต่การลดลงของปริมาณ RS ของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชซิเตรทแตกต่างกัน คือ
เมื่อพลังงานรังสีที่ฉายให้แก่สตาร์ชดิบเพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 500 mJ/cm^3 ปริมาณ RS ของตัวอย่างจะ
ลดลง จาก 6.35% เป็น 2.80% แต่เมื่อเพิ่มพลังงานรังสีเป็น 1,000 และ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ ปริมาณ RS
เพิ่มจาก 4.42% เป็น 5.87% ในขณะที่ตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทมีปริมาณ RS ลดลงเมื่อระดับพลังงาน
รังสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณพลังงานของรังสีซินโครตรอนที่ฉายให้กับตัวอย่างทำให้ปริมาณน้ำตาล
รีดิวซ์ ค่ากำลังการพองตัว และความสามารถละลายเพิ่มขึ้นด้วย แต่โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ช
ดิบลดลง ส่วนของสตาร์ชซิเตรทก็ยังคงไม่แสดงโปรไฟล์ของความหนืด นอกจากนี้การฉายรังสีทำ
ให้ปริมาณผลึกมีค่าลดลง

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ผ่องพรรณณี นนทมาศ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุนันทา ทองทา

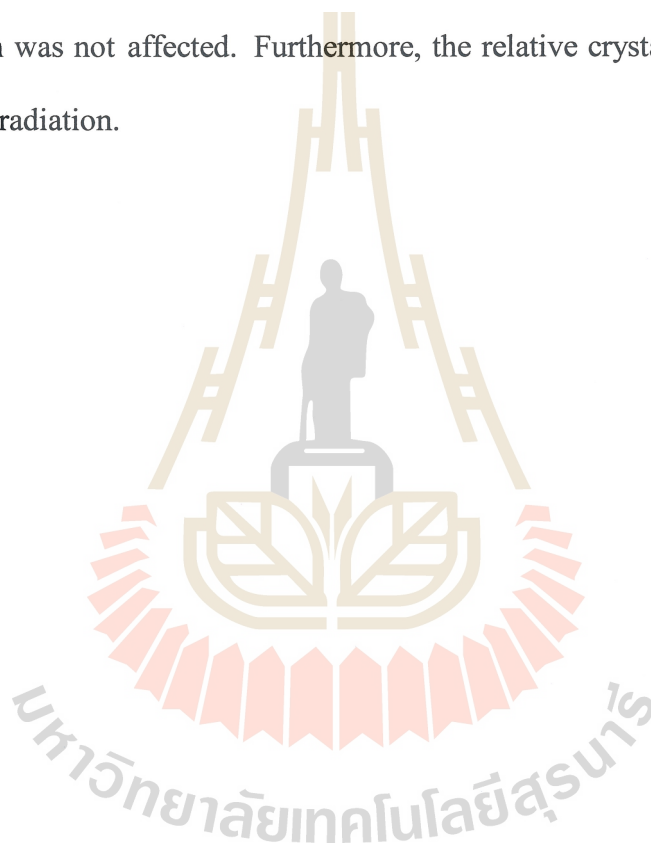
PONGPANNEE NONTAMAS : EFFECT OF SURFACE MODIFICATION
AND SYNCHROTRON RADIATION ON PROPERTIES OF RESISTANT
CITRATE STARCH. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA
TONGTA, Ph. D., 98 PP.

MODIFIED GRANULAR SURFACE/TAPIOCA STARCH/CITRATE STARCH/
SYNCHROTRON RADIATION/RESISTANT STARCH

The effect of starch surface modification using an enzyme for reducing the citric acid conditioning time of resistant citrate starch preparation was investigated. The modified surface starch was prepared by α -amylase hydrolysis at 55 °C for 0.5 and 1.0 h, then conditioned with 20% (w/v) citric acid solution at 50 °C for 6 h prior to the dry reaction at 150 °C for 3 h. The resistant starch (RS) content of surface modified citrate starch was lower than that of the control sample (68.08%) which were 48.27 and 27.71% for 0.5 and 1.0 h, respectively. When the conditioning time decreased from 6 to 3 and 1 h, the RS content was increased with the range of 62.58 - 75.35%. Swelling power and solubility of modified surface citrate starch were higher than those of citrate native starch. The modified surface citrate starches showed no pasting profile, similar to the citrate native starch. Moreover, the granular shape of all citrate starches remained unchanged, while some granules were disrupted.

Native and citrate tapioca starches were exposed to synchrotron radiation at the dose of 0 - 5,000 mJ/cm³. The RS content of all samples from both native and citrate tapioca starches were lower than that of the non-radiated samples, except for the radiated native starch at 5,000 mJ/cm³. The reduction of RS content between native and

citrate starches was different. For the native starch, the RS content decreased from 6.35 to 2.87% when exposed to the radiation dose at 0 - 500 mJ/cm³, and then increased from 4.42 to 5.78% at the dose of 1,000 and 5,000 mJ/cm³. However, the RS content of citrate starch decreased with increasing radiation dose. When the radiation doses were higher, reducing sugar content, swelling power and solubility were increased but the pasting profile of the native starch was lower, while the pasting viscosity of the citrate starch was not affected. Furthermore, the relative crystallinity decreased after synchrotron radiation.



School of Food Technology

Academic Year 2016

Student's Signature ศศิธรรัตน์ นพธาดา

Advisor's Signature ศาสตราจารย์ ดร. นพธาดา

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1 3 10 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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผ่องพรรณณี นนทมาศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายการอ้างอิง.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง.....	7
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช.....	7
2.2.1 อะมิโลส.....	8
2.2.2 อะมิโลเพคติน.....	9
2.3 ประเภทของสตาร์ช.....	12
2.4 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS).....	12
2.5 คุณสมบัติทางสรีระวิทยาของ RS.....	14
2.6 สตาร์ชดัดแปร.....	14
2.6.1 ความหมายของสตาร์ชดัดแปร.....	14
2.6.2 การดัดแปรสตาร์ช.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	การดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยเอนไซม์.....	15
2.8	สตาร์ชเชื่อมข้าม (Cross-linked starch)	16
2.9	ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช.....	18
2.9.1	ผลต่อลักษณะสีน้ำตาล	18
2.9.2	ผลต่อความหนืด	18
2.9.3	ผลต่อการเกิดเจลลิต์ในเซชัน	18
2.9.4	ผลต่อโครงสร้างผลึก.....	19
2.9.5	ผลต่อกำลังการพองตัวและค่าการละลาย.....	19
2.10	สตาร์ชซิเตรท (Citrated starch)	20
2.11	รังสีซินโครตรอน	22
2.12	การฉายรังสี	22
2.13	ผลของการฉายรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์	23
2.14	การฉายรังสีสตาร์ช.....	23
2.15	รายการอ้างอิง.....	26
3	ผลของการย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสต่อคุณสมบัติ	
	ทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชซิเตรท.....	32
3.1	บทคัดย่อ	32
3.2	บทนำ.....	32
3.3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	36
3.3.1	วัตถุประสงค์	36
3.3.2	การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์.....	36
3.3.3	การเตรียมสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลัง	36
3.3.4	การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	36
3.3.5	การวิเคราะห์ปริมาณ Resistant starch (RS)	37
3.3.6	การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (bound citrate, BC)	38
3.3.7	กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility)	38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.8	การวิเคราะห์ความหนืด	39
3.3.9	ลักษณะโครงสร้างผลึก.....	40
3.3.10	โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช	40
3.3.11	คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	40
3.3.12	การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	41
3.4	ผลการทดลองและวิจารณ์	41
3.4.1	ผลของความเข้มข้นของซิริทริกในการผลิตสตาร์ชซีเตรท.....	41
3.4.2	โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ชหลังการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์.....	42
3.4.3	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ หลังการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์.....	43
3.4.4	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชหลังผ่านการแช่ในสารละลายกรด.....	46
3.4.5	ผลของการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสตัดแปรพื้นผิวก่อนการผลิต สตาร์ชซีเตรท.....	47
3.4.6	การเกาะเกี่ยวของกรดซิริทริก (Bound citrate; BC) กับ โมเลกุลสตาร์ช.....	48
3.4.7	กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility).....	50
3.4.8	คุณสมบัติด้านความหนืด.....	51
3.4.9	โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบของสตาร์ชซีเตรท	53
3.4.10	ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรท	54
3.4.11	คุณสมบัติทางความร้อน.....	58
3.5	สรุปผลการทดลอง.....	61
3.6	รายการอ้างอิง.....	61
4	ผลของการฉายรังสีซินโครตรอนต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของ สตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรท.....	67
4.1	บทคัดย่อ	67
4.2	บทนำ.....	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	71
4.3.1	การเตรียมสตาร์ชซีเทรท.....	71
4.3.2	การฉายรังสีซินโครตรอน	72
4.3.3	การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	72
4.3.4	กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility).....	73
4.3.5	การวิเคราะห์ความหนืด.....	73
4.3.6	ลักษณะโครงสร้างผลึก	74
4.3.7	โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช	74
4.3.8	คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	74
4.3.9	การวิเคราะห์ปริมาณ resistance starch.....	75
4.3.10	การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	75
4.4	ผลการทดลองและวิจารณ์	76
4.4.1	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	76
4.4.2	กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย	77
4.4.3	ความหนืด	80
4.4.4	ลักษณะทางโครงสร้างผลึก	83
4.4.5	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช	84
4.4.6	คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	85
4.4.7	ปริมาณ resistant starch.....	90
4.5	สรุปผลการทดลอง	91
4.6	รายการอ้างอิง.....	92
5	บทสรุป	97
	ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

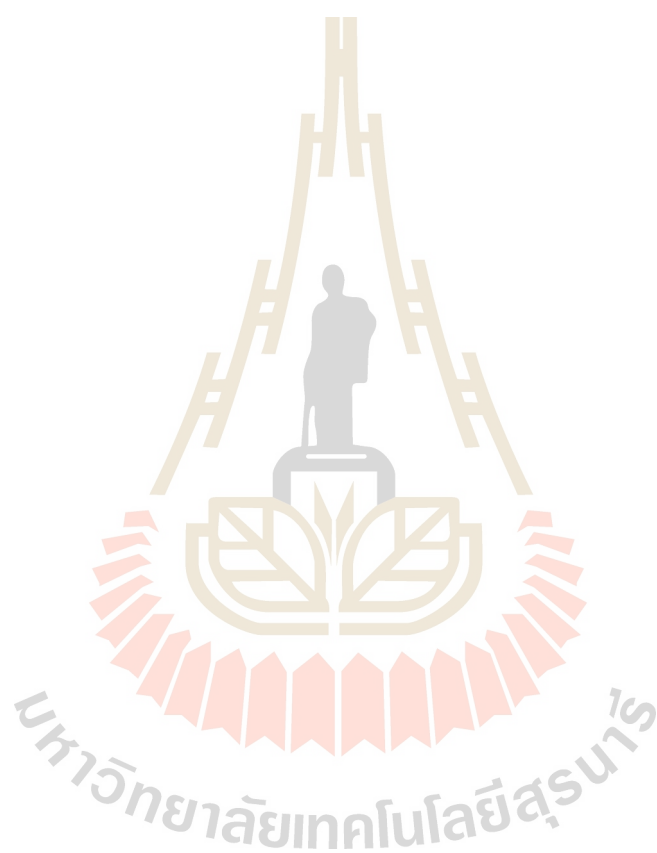
ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณ RS ของสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากการใช้กรดซिटริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	42
3.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและที่ผ่านการตัดแปร พื้นผิวด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส.....	44
3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวหลังผ่านการแช่ใน สารละลายกรดซिटริก	46
3.4 ปริมาณ RS และการเกาะเกี่ยวของกรดซिटริกกับโมเลกุลสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรท ที่ผลิตจากสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยเอนไซม์และแช่ในสารละลายกรดซिटริกใน ระยะเวลาต่าง ๆ.....	50
3.5 ความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรท	52
3.6 ปริมาณผลึก (Relative crystallinity) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ สตาร์ชซีเตรทที่ผลิตจากสภาวะต่าง ๆ.....	58
3.7 อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรท ที่ผลิตจากสภาวะ ต่าง ๆ.....	60
4.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทที่ผ่าน การฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับต่าง ๆ	76
4.2 ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับต่าง ๆ	80
4.3 ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชซีเตรทที่ ผ่านการฉายรังสีที่ระดับต่าง ๆ.....	82
4.4 ปริมาณผลึก (Relative crystallinity) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ สตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับต่าง ๆ	84
4.5 คุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและ สตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายด้วยรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.6 ปริมาณ RS ของตัวอย่างสสารไขมันสำปะหลังดิบและสสารซิติเรทที่ผ่าน การฉายด้วยรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ.....	89
---	----



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน 8
2.2	ลักษณะ โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของสตาร์ช..... 10
2.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะ โครงสร้างผลึก แบบ A B และ Vh..... 11
2.4	ลักษณะ โครงสร้างผลึกชนิด A และ B 11
2.5	ลักษณะ โครงสร้างของสตาร์ชด้านทาน 13
2.6	ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชกับ $POCl_3$ STMP และ EPI 17
2.7	การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดซिटริกกับสตาร์ชเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท (mono-esterified) และสตาร์ชเชื่อมข้าม (di-esterified)..... 21
2.8	การเชื่อมข้ามและการแตกหักของสายสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสี 24
3.1	ลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 5,000 (2) เท่า..... 45
3.2	การเกาะเกี่ยวของกรดซิทริกกับ โมเลกุลสตาร์ช 49
3.3	โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านกระบวนการ สภาวะต่าง ๆ 53
3.4	ลักษณะแกนกลางของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสภาวะต่าง ๆ ที่ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า 55
3.5	ลักษณะแกนกลางของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสภาวะต่าง ๆ ที่ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 3,000 เท่า 56
3.6	ลักษณะ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซิเตรท 57
4.1	โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านการฉายรังสี ซินโครตรอนที่ปริมาณพลังงานในระดับต่าง ๆ 81
4.2	ลักษณะทาง โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซิเตรทที่ ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับ 0 – 5,000 mJ/cm ³ 86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ลักษณะเม็คสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	87
4.4 ลักษณะเม็คสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยนิยมปลูกมันสำปะหลังกันเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีการขยายพื้นที่การปลูกมันสำปะหลังปลูกอย่างรวดเร็วจนถึงปัจจุบันได้กลายเป็นแหล่งปลูกมันสำปะหลังที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวน สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ ๆ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และยังเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย แต่ตลาดส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังค่อนข้างจำกัด ทั้งมันเส้น มันอัดเม็ด และสตาร์ชมันสำปะหลัง อีกทั้งมีการแข่งขันโดยการตัดราคาของผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง เป็นเหตุให้ราคาหัวมันสำปะหลังสดที่เกษตรกรขายได้ค่อนข้างต่ำ (สำนักงานคณะกรรมการก้ำกักับการซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า, ออนไลน์, 2557) ในปัจจุบันจึงนิยมเพิ่มมูลค่าของสตาร์ชโดยการทำการตัดแปรรูปสตาร์ช เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าในกับผลิตภัณฑ์สตาร์ช และยังเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของสตาร์ชให้ตรงกับความต้องการนำไปใช้ของผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น เช่น ทำให้ความหนืดลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน (นิตยา รัตนาพานนท์, 2545) นอกจากนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ให้ดีขึ้นแล้ว สตาร์ชตัดแปรรูปกลุ่มหนึ่งยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยเฉพาะเรื่องของระดับน้ำตาลในเลือดที่มีผลกระทบต่อผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน โรคอ้วน และไขมันอุดตันในเส้นเลือด เป็นต้น เนื่องจากสตาร์ชตัดแปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ไม่ถูกดูดซึมและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กของมนุษย์ปกติ โดยจะผ่านเข้าไปถึงส่วนของลำไส้ใหญ่และถูกใช้เป็นสับสเตรท ในการหมักของจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่ จึงจัดได้ว่าเป็นพรีไบโอติกส์ (Englyst, Kingman, and Cummings, 1992) ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้สตาร์ชตัดแปรรูปจัดว่าเป็นสตาร์ชต้านทาน (Resistant starch, RS) ในอุตสาหกรรมสตาร์ชตัดแปรรูปในประเทศไทยใช้กระบวนการตัดแปรรูปสตาร์ช 3 วิธีคือการตัดแปรรูปทางกายภาพ (Physical modification) ทางเคมี (Chemical modification) และทางชีวภาพ (Biological modification) ซึ่งทำให้ได้สตาร์ชตัดแปรรูป 3 ประเภท คือสตาร์ชพรีเจลาติไนซ์ สตาร์ชตัดแปรรูปทางเคมีและอนุพันธ์ สตาร์ชจากการย่อย โดยสตาร์ชตัดแปรรูปที่มีความสำคัญและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรมมากที่สุด คือสตาร์ชตัดแปรรูปทางเคมี เนื่องจากการตัดแปรรูปสตาร์ชทางเคมีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะ

ภายในโครงสร้างของแป้งที่ตำแหน่ง α - (1, 2), α - (1, 3) และ α - (1, 6) ซึ่งช่วยขัดขวางไม่ให้เอนไซม์เข้าไปย่อยพันธะ α - (1, 4), และ α - (1, 6) จึงทำให้สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยมีการทดสอบการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชพอสเฟด สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชอะซิเตท และสตาร์ชซิเตรท พบว่าสตาร์ชถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารได้น้อยลง และอัตราการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) เพิ่มขึ้น หนึ่งในสตาร์ชดัดแปรทางเคมีที่น่าสนใจ คือสตาร์ชซิเตรท เนื่องจากเป็นสตาร์ชดัดแปรที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก ที่จัดว่าเป็นสารเคมีในกลุ่ม Generally Recognized as Safe (GRAS) คือเป็นสารเคมีที่ใช้ในอาหารได้อย่างปลอดภัยและใช้ได้ปริมาณที่ไม่จำกัด การผลิตสตาร์ชซิเตรทต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาในสถานะแห้งและใช้ความร้อนสูง ซึ่งจากการศึกษาวิจัยของ Xie and Liu (2004) ที่ศึกษาสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพด และข้าวโพดข้าวเหนียว โดยการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรดซิตริกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ (120 - 150 องศาเซลเซียส) ที่เวลาต่าง ๆ (3 - 9 ชั่วโมง) พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้ปริมาณ RS อยู่ในช่วง 37.8 - 78.8% และเมื่อผลิตสตาร์ชซิเตรทด้วยสถานะที่แตกต่างกัน โดยใช้การบ่มสตาร์ชในสารละลายกรดซิตริกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชถั่ว (pea starch) สตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชข้าวโพดมีปริมาณ RS ที่แตกต่างกัน คือ 50.2 45.9 57.5 และ 50.8% ตามลำดับ (Wepner, Berghofer, Miesenberger, Tiefenbacher, and NK Ng, 1999) โดยทั่วไปขั้นตอนการผลิต RS จะประกอบด้วย การบ่มสตาร์ชดิบในสารละลายกรดซิตริก การทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดสตาร์ชซิเตรทในสถานะแห้ง ซึ่งจากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าสถานะการผลิตมีอิทธิพลต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ได้ และหนึ่งในขั้นตอนผลิตสตาร์ชซิเตรทเพื่อให้ได้มีปริมาณ RS ที่สูงคือ ขั้นตอนการบ่มสตาร์ชในสารละลายกรดซิตริกเพื่อให้กรดซิตริกถูกดูดซับเข้าไปในเม็ดสตาร์ช ซึ่งกรดซิตริกจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับโมเลกุลสตาร์ชต่อไป แต่โดยทั่วไปสตาร์ชดิบจะเกิดการพองตัวได้ต่ำ ส่งผลให้สารละลายเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้น้อยหรืออาจจะต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มที่นานขึ้นเพื่อให้สารละลายเข้าไปได้ในปริมาณที่มากเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาให้ได้ปริมาณ RS สูง และจากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างระดับจุลภาคของสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปร่างเป็นทรงกลม ซึ่งมีปลายด้านหนึ่งถูกตัด และไม่ปรากฏรูพรุนที่ผิวของเม็ดสตาร์ช (Uthumporn, Zaidul, and Karim, 2010) ดังนั้นการทำให้เม็ดสตาร์ชมีช่องเปิดหรือมีรูพรุนที่พื้นผิวมากขึ้นจึงเป็นวิธีที่น่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารละลายให้เข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น โดยการดัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเพื่อให้มีพื้นที่ผิวหรือรูพรุนเพิ่มมากขึ้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี ทั้งวิธีการใช้เอนไซม์ย่อยเม็ดสตาร์ชบางส่วน การใช้สารเคมี เช่น กรด หรือ การใช้แรงทางกล เช่น การบด หรือ

การโม่ได้อีกด้วย ซึ่งจากการทดลองของ Uthumporn et al. (2010) ได้มีการศึกษาลักษณะของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส พบว่าเม็ดสตาร์ชมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจากสตาร์ชดิบ เช่นเดียวกับการทดลองของ Sujka and Jamroz (2007) ที่พบว่า การย่อยสตาร์ชดิบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และกลูโคอะไมเลส ทำให้เม็ดสตาร์ชมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Fortuna, Juszczak, and Palasinski (1998 quoted in Sujka and Jamroz) ได้ดัดแปรพื้นผิวสตาร์ชด้วยวิธีทางกายภาพ โดยใช้วิธีการให้ความร้อน และไม่โครเวฟ วิธีทางเคมี โดยใช้ sodium trimetaphosphate และวิธีทางเอนไซม์ โดยใช้แอลฟา-อะไมเลส พบว่าวิธีการดัดแปรโดยใช้เอนไซม์ทำให้สตาร์ชหลังดัดแปรมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากที่สุด ซึ่งการที่เม็ดสตาร์ชมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สารละลายสามารถผ่านเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น เนื่องจากรูพรุนของพื้นที่ผิวจะมีผลต่อคุณสมบัติบางประการของวัสดุนั้น ๆ เช่น การดูดซับน้ำหรือสารละลาย การนำความร้อน การแพร่ของน้ำและสารละลาย เป็นต้น (Marousis and Saravacos, 1990)

การฉายรังสีเป็นหนึ่งในวิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อถนอมรักษาอาหาร แต่รังสีก็ยังทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยฉายรังสีไปยังพอลิเมอร์ พลังงานจากรังสีซึ่งถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเมอร์ได้ โดยมีปฏิกิริยาหลักเกิดขึ้นสองชนิด คือ การเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) และการแตกสลาย (Degradation) ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน จากการศึกษาผลของการฉายรังสีให้แก่สตาร์ชของ Chung, Lee, Kim, Lee, Byun, and Lim (2010) รายงานว่าการฉายรังสีแกมมาให้แก่สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 14.1 เป็น 30.4% เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lee, Ee, Chung, and Othman (2013) พบว่าการฉายรังสีแกมมาให้แก่สตาร์ชทำให้สตาร์ชมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นจาก 4.8 เป็น 20.9% (50 kGy) สตาร์ชข้าวโพดเพิ่มจาก 9.4 เป็น 17.0% (5 kGy) Hylon V เพิ่มจาก 29.0 เป็น 43.9% (50 kGy) และ Hylon VII เพิ่มขึ้นจาก 30.7 เป็น 43.1% (50 kGy) การฉายรังสีจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้ดัดแปรสตาร์ชเพื่อให้ได้สตาร์ชที่มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชดิบในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้สารเคมี อีกทั้งองค์การอนามัยโลก (WHO) และหน่วยงานพลังงานปรมาณูนานาชาติ (IAEA) ยังได้สรุปว่าการฉายรังสีอาหารใดก็ตามด้วยระดับรังสีไม่เกิน 10 kGy จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย และจะไม่มีรังสีตกค้างในอาหาร ดังนั้นในการทำวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่ศึกษาถึงวิธีที่จะลดระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรดซิตริก ซึ่งการดัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ก่อนสามารถทำให้สตาร์ชดิบมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้สารละลายสามารถแทรกผ่านเข้าสู่ภายในเม็ดสตาร์ชง่ายขึ้น และศึกษาผลคุณสมบัติของสตาร์ชชนิดเรททภายหลังการถูกฉายรังสี เพื่อใช้

เป็นแนวทางในการทำนายคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีสสารซซึเตรทเป็นส่วนประกอบที่อาจเปลี่ยนแปลงไปหลังผ่านการฉายรังสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการตัดแปรพื้นผิวโดยย่อด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และผลของการลดระยะเวลาการบ่มสสารซซึเตรทในสารละลายกรดซซึเตรทต่อปริมาณ RS คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสสารซซึเตรทที่ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการฉายรังสีซินโครตรอนต่อปริมาณ RS คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสสารซซึเตรทน้ำมันสำปะหลังดิบ และสสารซซึเตรท

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

การตัดแปรพื้นผิวสสารซซึเตรทน้ำมันสำปะหลังด้วยวิธีทางเอนไซม์ ทำให้สสารซซึเตรทมีรู หรือพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารละลายเข้าสู่ภายในเม็ดสสารซซึเตรทได้ง่ายขึ้น จึงสามารถช่วยลดระยะเวลาการแช่ในสารละลายกรดซซึเตรทในการผลิตสสารซซึเตรทลงได้ และทำให้สสารซซึเตรทที่ได้มีปริมาณ RS สูงขึ้น พร้อมทั้งทำให้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสสารซซึเตรทที่ได้เปลี่ยนแปลงไป

การฉายรังสีซินโครตรอนสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสสารซซึเตรทได้ และปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสสารซซึเตรทได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการตัดแปรพื้นผิวสสารซซึเตรทด้วยเอนไซม์ แล้วนำไปผลิตเป็นสสารซซึเตรทโดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาในการย่อยสสารซซึเตรทน้ำมันสำปะหลังดิบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และระยะเวลาในแช่สสารซซึเตรทในสารละลายกรดซซึเตรท ที่มีผลต่อปริมาณ RS รวมถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของสสารซซึเตรทที่ได้ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสสารซซึเตรทน้ำมันสำปะหลังดิบ และสสารซซึเตรทภายหลังจากการฉายรังสีซินโครตรอน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบผลของการตัดแปรพื้นผิวของสสารซซึเตรทต่อปริมาณ RS ของสสารซซึเตรท

1.5.2 ทราบผลปริมาณ RS ของสสารซซึเตรทที่ได้จากการเตรียมโดยแช่ในสารละลายกรดซซึเตรทที่ระยะเวลาต่าง ๆ และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของสสารซซึเตรทหลังการตัดแปรเป็นสสารซซึเตรทที่สภาวะต่าง ๆ

1.5.4 ทราบผลของการฉายรังสีซินโครตรอนต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทที่เกิดขึ้น และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของสตาร์ชที่หลังผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน

1.6 รายการอ้างอิง

นิธิยา รัตนานพนธ์. (2545). **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 504 หน้า.

สำนักงานคณะกรรมการกำกับการซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า. (2557). **มันสำปะหลัง** [ออนไลน์].
ได้จาก: http://www.aftc.or.th/itc/products_analyze.php?id=86&fgrp_id=6&fmnu_id=31

Chung, H-J., Lee, S-Y., Kim, J-H., Lee, J-W., Byun, M-W., and Lim, S-T. (2010). Pasting characteristics and in vitro digestibility of γ -irradiated RS 4 waxy maize starches. **Journal of Cereal Science**. 52(1): 53-58.

Englyst, H. N., Kingman, S., and Cummings, J. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46: 33-50.

Fortuna, T., Juszczak, L., and Palasinski, M. (1998). **Change in the granule porosity on modification of starch**. *Żywność Technologia Jakość*. 5(4): 124-130. Quoted in M. Sujka, and J. Jamroz (2007). Starch granule porosity and its changes by means of amylolysis. **International agrophysics**. 21(1): 107-113.

Lee, J.-S., Ee, M.-L., Chung, K.-H., and Othman, Z. (2013). Formation of resistant corn starches induced by gamma-irradiation. **Carbohydrate Polymers**. 97(2): 614-617.

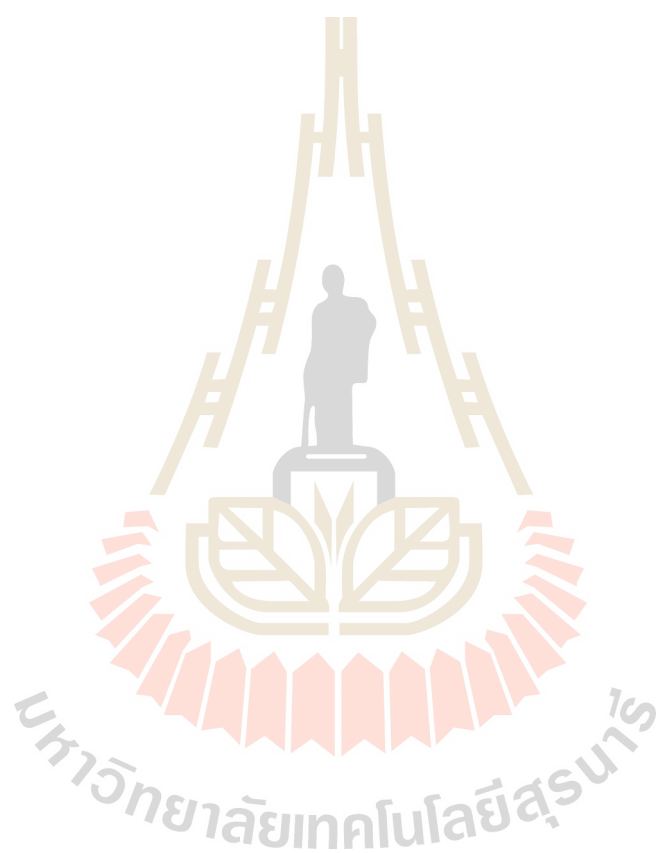
Marousis, S., and Saravacos, G. (1990). Density and porosity in drying starch materials. **Journal of Food Science**. 55(5): 1367-1372.

Sujka, M., and Jamroz, J. (2007). Starch granule porosity and its changes by means of amylolysis. **International agrophysics**. 21(1): 107.

Uthumporn, U., Zaidul, I. S., and Karim, A. (2010). Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Food and Bioproducts Processing**. 88(1): 47-54.

Wepner, B., Berghofer, E., Miesenberger, E., Tiefenbacher, K., and NK Ng, P. (1999). Citrate starch-application as resistant starch in different food systems. **Starch/Stärke**. 51(10): 354-361.

Xie, X. S., and Liu, Q. (2004). Development and physicochemical characterization of new resistant citrate starch from different corn starches. **Starch/Stärke**. 56(8): 364-370.



บทที่ 2

ปรีทศน์วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

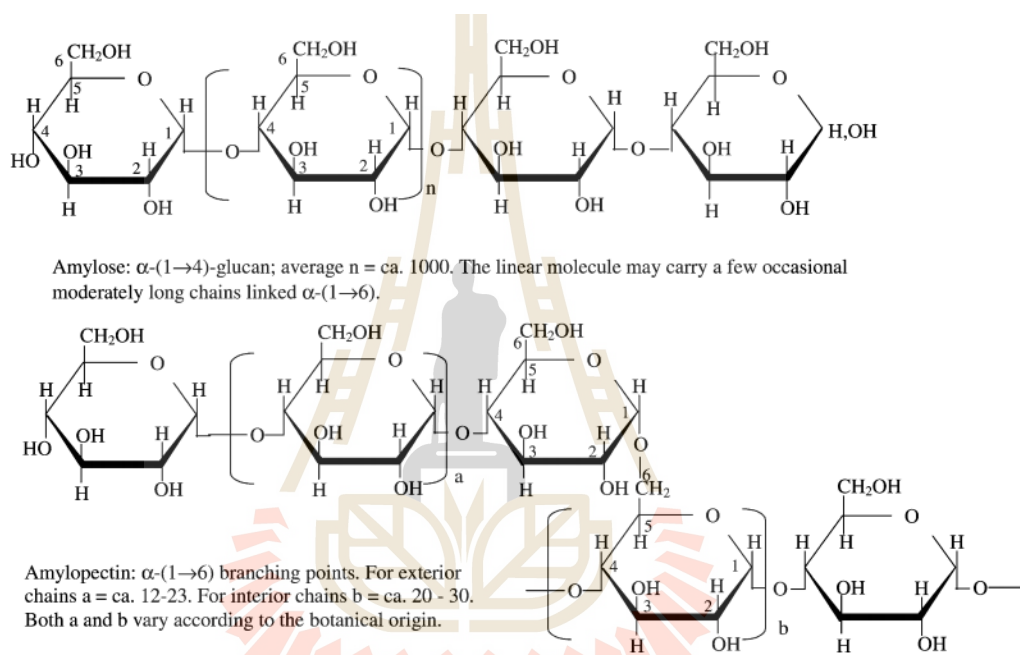
2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง

สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดเอาสตาร์ชออกจากหัวมันสำปะหลัง ซึ่งสตาร์ชที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว และมีความบริสุทธิ์สูง เม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 30 - 40 ไมโครเมตร เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ และมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ดสตาร์ช สตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินประมาณร้อยละ 13 - 28 และ 80 ตามลำดับ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) และเนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสต่ำ จึงทำให้มีการพองตัวและการละลายที่สูงกว่าสตาร์ชที่ได้จากธัญพืชชนิดอื่น ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้เพื่อช่วยในการยึดเกาะ การแข็งตัว หรือทำให้เกิดความเข้มข้นในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้สตาร์ชมันสำปะหลังยังสามารถนำมาทำเป็นสารให้ความหวาน เช่น กลูโคสไซรัป ฟรุกโตสไซรัป สารให้ความหวานที่มีพลังงานต่ำ เช่น น้ำตาลแอลกอฮอล์ต่าง ๆ และสารปรุงแต่งรส เช่น ผงชูรส เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากในสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสที่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีสมบัติบางอย่างไม่คงตัว เช่น เมื่อได้รับความร้อนจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง แต่ความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงเฉือนและความร้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำสตาร์ชมันสำปะหลังจากธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้โดยการนำสตาร์ชมันสำปะหลังไปผ่านกรรมวิธีการตัดแปรต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสตาร์ชให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น มีความหนืดสูงในช่วงที่กว้างขึ้น หรือมีความหนืดต่ำลงเกิดเจล และให้ความหนืดได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำลง คงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ในการแปรรูปและเก็บรักษา ซึ่งการตัดแปรสตาร์ชจะช่วยทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากและราคาถูก มีมูลค่าสูงขึ้น และยังมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นอีกด้วย (Light, 1990)

2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืช ซึ่งจะพบได้ในส่วนของคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว และยังเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานสูง

ของมนุษย์และสัตว์ โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน มีสูตรเคมีเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ และเป็นพอลิเมอร์ของโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วย พันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คืออะมิโลส (amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะมิโลเพคติน (amylopectin) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน
ที่มา: Tester, Karkalas, and Qi (2004)

2.2.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 - 6,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และอาจพบส่วนที่เป็นกิ่งก้านใน โมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Buléon, Colonna, Planchot, and Ball, 1998; Hizukuri, 1985) อะมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุล และมีค่าระดับชั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกัน โดยจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง $10^5 - 10^6$ คาลตัน ซึ่งตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช ซึ่งอะมิโลสบางส่วนจะอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก

(crystalline region) โครงสร้างของอะมิโลสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ และยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลอีกด้วย ซึ่งถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 - 160,000 ดาลตัน จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 ดาลตันจะมีโมเลกุลเป็นลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจงและอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whister and Deniel, 1984)

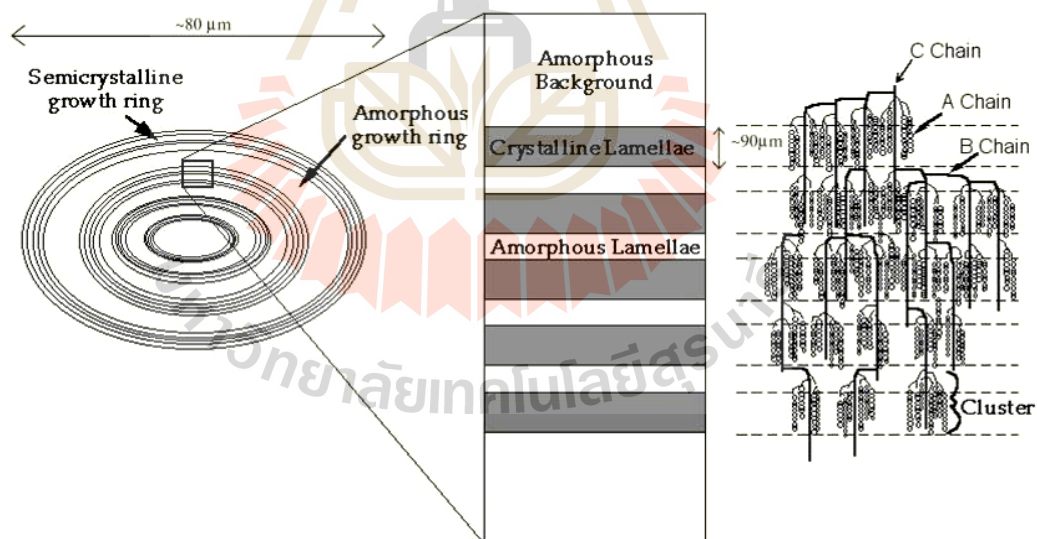
2.2.2 อะมิโลเพกติน

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสที่มีขนาดใหญ่กว่าอะมิโลสหลายเท่า โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7 - 10^9 ดาลตัน (Buléon et al., 1998) ส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 - 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ แสดงดังภาพที่ 2.2 ในอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

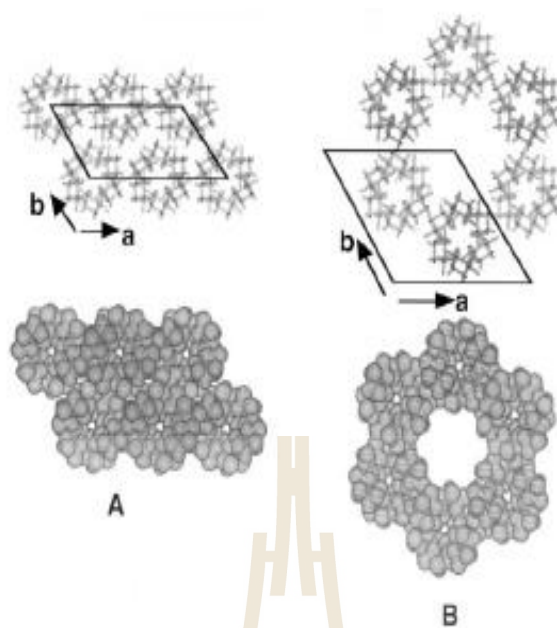
สตาร์ชในธรรมชาติโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก สามารถพบได้ในเมล็ด หัว และรากของพืชชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช ซึ่งมีเม็ดสตาร์ชจะมีขนาด รูปร่างและลักษณะคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชนั้น ๆ (Pérez and Bertoft, 2010; Srichuwong, Sunarti, Mishima, Isono, and Hisamatsu, 2005) ภายในเม็ดสตาร์ชจะมีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) คือมีโครงสร้างที่เป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) โดยส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (Jacobs and Delcour, 1998) ขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ต่อกันของคลัสเตอร์อะมิโลเพกติน (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า amorphous lamellae และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวม้วนคู่ (double helices) อย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณส่วนนี้ว่า crystalline lamellae แสดงดังภาพที่ 2.2 โดยเม็ดสตาร์ชจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวม ๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B

(สตาร์ชจากพืชหัว) ดังภาพที่ 2.3 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แบ่งจากพืชตระกูลถั่ว) และสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขี้จะมึรูปแบบผลึกเป็นแบบ Vh (Sevenou, Hill, Farhat, and Mitchell, 2002; Zobel, 1988)

สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกันซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ 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 กล่าวคือจะมี singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17.9° ตัวอย่างเช่น สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว รากลำดั้น และสตาร์ชจากผลไม้บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะผลึกแบบ Vh ที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะมิโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 13 และ 20° (ภาพที่ 2.4) (Buléon et al., 1998)

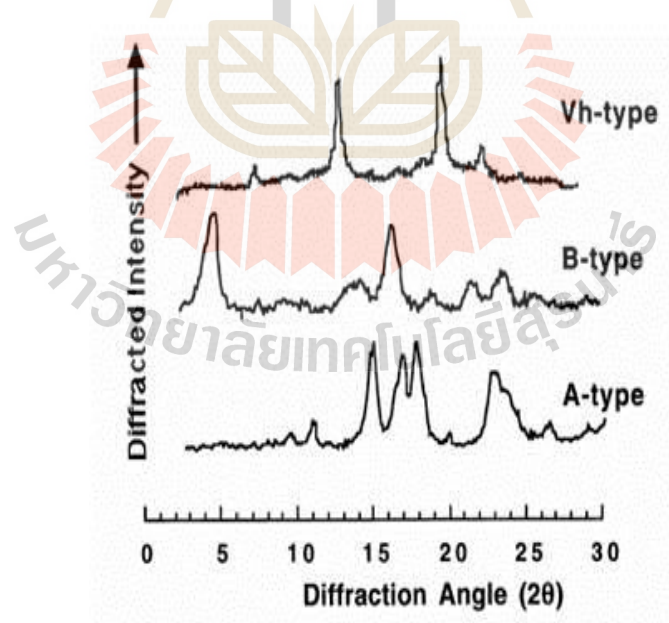


ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของสตาร์ช
ที่มา: Jacobs and Delcour (1998)



ภาพที่ 2.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A B และ Vh

ที่มา: Buléon et al. (1998)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา: Buléon et al. (1998)

2.3 ประเภทของสตาร์ช

กระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ชเกิดขึ้นตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก โดยฟันจะทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร เพื่อย่อยขนาดของชิ้นอาหารให้เล็กลง และคลุกเคล้าชิ้นอาหารที่ถูกบดกับน้ำลาย ซึ่งในน้ำลายจะมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ชอยู่ เรียกว่าเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) โดยเอนไซม์นี้จะทำหน้าที่ย่อยสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงเป็นเด็คซ์ตริน (dextrin) แต่การย่อยที่เกิดขึ้นภายในปากจะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ จึงทำให้เกิดการย่อยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหาร ซึ่งมีเอนไซม์อะไมเลสอยู่ แต่เอนไซม์ภายในกระเพาะอาหารจะไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากสภาพที่เป็นกรดสูงในกระเพาะอาหาร ดังนั้นจึงไม่เกิดกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร แต่จะเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส หรือการแตกตัวของคาร์โบไฮเดรต ทำให้คาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ชมีขนาดโมเลกุลเล็กลง จากนั้นกระบวนการย่อยสตาร์ชที่แท้จริงจะเกิดที่ลำไส้เล็ก ซึ่งมีสภาพเป็นด่างที่เหมาะสมกับสภาวะการย่อย ทำให้ลำไส้เล็กสามารถย่อยสตาร์ชจนสุดท้ายได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่สามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ดังนั้นในเชิงโภชนาการสตาร์ช (nutritional starch) โดยทั่วไปจะแบ่งสตาร์ชออกได้เป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย ได้แก่ สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) (Englyst, Kingman, and Cummings, 1992)

2.4 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS)

สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (enzymes-resistant starch หรือ resistant starch) ตามนิยามของ EURESTA (European Resistant Starch Research Group) ได้ให้คำจำกัดความของ RS ว่าเป็นสตาร์ชหรือผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่มีความสามารถต้านทานต่อสภาวะการย่อยในลำไส้เล็กของมนุษย์ และเมื่อสตาร์ชชนิดนี้ถูกส่งต่อมายังลำไส้ใหญ่จะสามารถเป็นสารตั้งต้นให้แก่จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ได้ และทำให้เกิดกระบวนการหมักขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการหมักนั้นคือ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid; SCFA) (Nugent, 2005) สามารถแบ่ง RS ได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

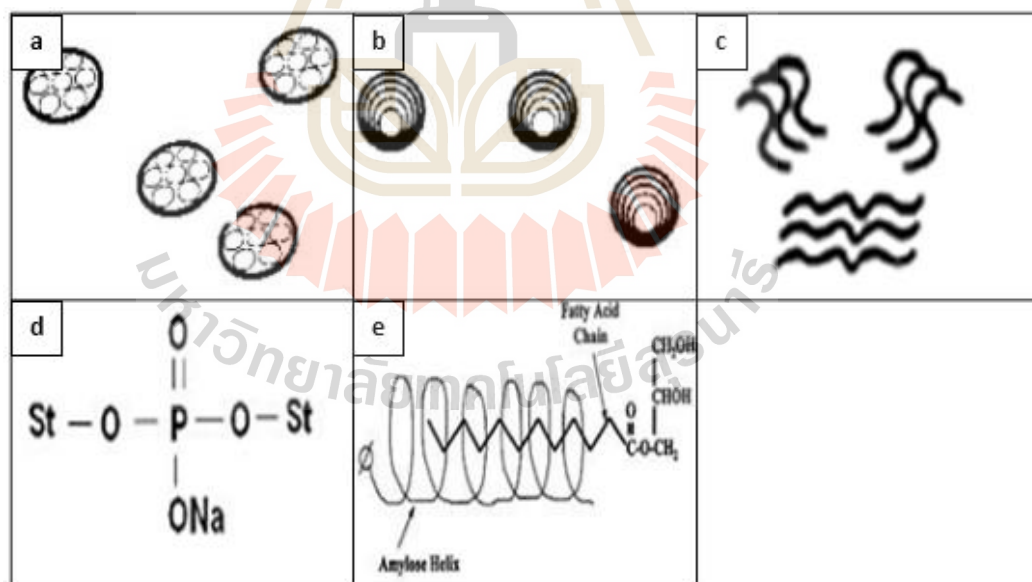
1) Resistant starch type 1 (RS1) เป็นสตาร์ชที่มีความต้านทานต่อการย่อย เนื่องจากลักษณะทางกายที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำลายเม็ดสตาร์ชได้ เช่น เมล็ดพืชที่ถูกขัดสีบางส่วน

2) Resistant starch type 2 (RS2) เป็นสตาร์ชที่ยังคงรูปร่าง หรือคงสภาพอยู่ในเม็ดสตาร์ชดิบ (native starch granule) ซึ่งมีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ เนื่องจากโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชมีการอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของเม็ดสตาร์ช ทำให้มีความต้านทานต่อการ

ย่อยด้วยเอนไซม์ตัวอย่างของสตาร์ชชนิดนี้ ได้แก่ สตาร์ชจากกล้วยดิบ (green banana) และ สตาร์ชมันฝรั่ง (potato starch)

3) Resistant starch type 3 (RS3) เป็น RS ชนิดที่มีมากที่สุด เกิดจากสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน และทำให้เย็น แล้วเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ หรือเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน เช่น ขนมปัง มันฝรั่งที่สุกและเย็นลง (cooked and cooled potato) เป็นต้น

4) Resistant starch type 4 (RS4) เป็น RS ที่เกิดจากกระบวนการดัดแปรสตาร์ชทางเคมี (chemical modified starch) ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสตาร์ช โดยทำให้มีพันธะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากพันธะ α -(1,4) และ α -(1,6) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีความแข็งแรงของพันธะมากขึ้น เช่น การทำเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) อีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) และการทำครอสลิงก์ (cross-linking) (Ratnayake and Jackson, 2008; Sanz, Salvador, Baixauli, and Fiszman, 2009) ซึ่งจะทำให้เกิดหมู่แทนที่หรือพันธะเพิ่มขึ้นภายในโครงสร้างของสตาร์ชทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยสตาร์ชได้ โดยขอบเขตในการดัดแปรขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ชที่ใช้ ชนิดของสตาร์ช ระดับการดัดแปร และวิธีที่ใช้ในการดัดแปร (Wepner, Berghofer, Miesenberger, Tiefenbacher, and Perry, 1999)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของสตาร์ชต้านทาน; (a) RS1; (b) RS2; (c) RS3; (d) RS4 และ (e) RS5

ที่มา: ดัดแปลงจาก Sajilata, Singhal, and Kulkarni (2006) และ Singh, Kaur, and McCarthy (2007)

5) Resistant starch type 5 (RS5) เป็น RS ที่อยู่ในรูปของ V-form (ภาพที่ 2.5e) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylase-lipid complex) (Li, Vasanthan, Hoover, and Rossnagel, 2004)

2.5 คุณสมบัติทางสรีระวิทยาของ RS (Sajilata et al., 2006)

1) RS เป็นสตาร์ชที่ไม่ถูกย่อยหรือต้านทานต่อการย่อยโดยเอนไซม์ของมนุษย์ และจัดว่าเป็นองค์ประกอบของเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ชนิดหนึ่ง ตามคำจำกัดความของ AACC (American Association of Cereal Chemists, 2000) และ NAS (National Academy of Sciences, 2002) สามารถใช้การวิเคราะห์แบบเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) โดยใช้วิธี AACC (2000) ได้ และมีคุณสมบัติทางสรีระวิทยาเหมือนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือ ทำให้ระดับการย่อยและการเผาผลาญกลูโคสได้ช้าลง ซึ่งส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งในลำไส้ใหญ่ และช่วยลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด

2) ช่วยลดระดับน้ำตาลในกระแสเลือด (Hypoglycemic effects) อาหารที่มี RS จะทำให้มีอัตราการย่อยต่ำ โดยทั่วไปอาหารประเภทแป้งจะเกิดการย่อยเกือบจะทันทีหลังการบริโภคอาหาร แต่อาหารที่มี RS จะเกิดการย่อยได้ช้า โดยเกิดขึ้นหลังจากรับประทานอาหารแล้ว 5 - 7 ชั่วโมง ดังนั้น RS จึงลดค่าไกลซีมิก (glycemic index) ได้

3) เป็นสารตั้งต้นของพรีไบโอติก (Prebiotic) เนื่องจาก RS ที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึมในลำไส้เล็ก จึงทำให้เหลือผ่านมาถึงลำไส้ใหญ่และจะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acid) ได้แก่ อะซิเตท บิวทีเรท และ โพรปิโนเอต ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารตั้งต้น (Substrate) ที่ให้พลังงานแก่แบคทีเรียพรีไบโอติก (Probiotic) เช่น Bifidobacterium ทำให้เจริญเติบโตได้ดี

4) ยังช่วยการสะสมไขมันและลดการสะสมคอเลสเตอรอล หลังการรับประทานอาหารที่มี RS พบว่า มีการเกิดออกซิเดชันของไขมันเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงการลดการสะสมไขมันในระยะยาวได้ และในการศึกษาในหนูทดลอง ที่ให้อาหารที่มี RS (ร้อยละ 25 ม้วนฝรั่งดิบ) พบว่าระดับคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดลดลง

2.6 สตาร์ชดัดแปร

2.6.1 ความหมายของสตาร์ชดัดแปร

สตาร์ชดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073 - 2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ชธรรมชาติ เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชสาลี มาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความ

ร้อนและ/ หรือเอนไซม์และ/ หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมอื่น ๆ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

2.6.2 การตัดแปรสตาร์ช

สตาร์ชธรรมชาติหรือสตาร์ชดิบโดยทั่วไปจะมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ จึงได้มีการทำการตัดแปรสตาร์ชธรรมชาติเพื่อให้มีคุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการตัดแปรจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสตาร์ชที่ต้องการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี (Light, 1990) การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) เพิ่มขึ้น ให้ลักษณะของเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการละลายหรือการผสมรวมกับน้ำและ/หรือตัวทำละลายอื่น ๆ ได้ดีขึ้น (Bemiller, 1997)

2.7 การตัดแปรแป้งสตาร์ชด้วยเอนไซม์

เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถพบได้ทั่วไปในระบบการย่อยอาหาร (digestive system) ของมนุษย์ และสัตว์ เช่น ในน้ำลาย และน้ำย่อยจากตับอ่อน และจัดเป็นเอนไซม์ในกลุ่มไฮโดรเลส (hydrolases) ที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคไซด์ภายในสายพอลิเมอร์ของสตาร์ช โดยจะทำหน้าที่ในการตัดพันธะแบบสุ่มที่ตำแหน่ง α - (1, 4)-ไกลโคซิดิกในอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจากภายใน (endo enzyme) ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชที่ถูกไฮโดรไลซ์มาขนาดโมเลกุลที่สั้นลงเป็น เดกซ์ตริน (dextrin) และน้ำตาลไคแซ็กคาไรด์ เช่น มอลโทส (maltose) และ โมโนแซ็กคาไรด์ เช่น กลูโคส (glucose) ทำให้ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมนำเอนไซม์ชนิดนี้มาใช้ในการไฮโดรไลซ์สตาร์ช เพื่อลดความหนืดของสารละลายสตาร์ชหลังการเกิดเจลในระหว่างการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส และหากนำสตาร์ชดิบมาย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลในเซชันของสตาร์ช จะทำให้เม็ดของสตาร์ชดิบถูกเอนไซม์ทำลายไปบางส่วน และเมื่อนำไปส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะเห็นว่ามิมูหรือมิมรอยแตกเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ชหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ (Chen and Zhang, 2012)

จากการทดลองของ Li et al. (2004) ได้ย่อย waxy, normal และ high-amylose hull-less barley (HB) starches ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเมื่อนำสตาร์ชที่ถูกย่อยไปตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ช พบว่าหลังถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส สตาร์ชมีรูพรุนที่ผิวของเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น โดย waxy HB starch มีรูพรุนที่ผิวของสตาร์ชมากที่สุด เช่นเดียวกับที่ Hoover and Zhou (2003) ได้รายงานไว้ว่าเมื่อย่อยสตาร์ชถั่วลันเตา (smooth pea starch) ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีรอยที่เกิดจากการถูกกัดกร่อนด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชเป็นจำนวน

มาก และมีสตาร์ชบางเมล็ดที่ถูกทำลายด้วยเอนไซม์จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม และบางเมล็ดเกิดการแตกที่บริเวณผิวของเมล็ดสตาร์ช และในการทดลองของ Puspasari et al. (2013) ที่ได้ย่อยสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังคึบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเมื่อนำไปส่องดูโครงสร้างของเมล็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่ามีรูเกิดขึ้นที่พื้นผิวของสตาร์ชข้าวโพด และเกิดการหลุดลอกที่ผิวของเมล็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

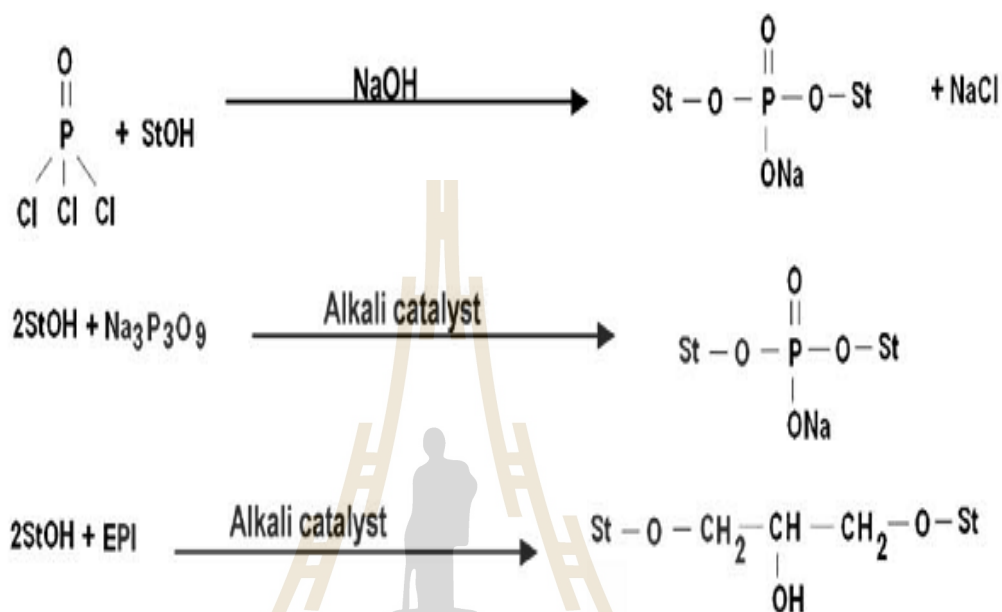
ปัจจัยที่มีผลต่อการถูกย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ ได้แก่ 1) ชนิดและสายพันธุ์ของสตาร์ช 2) ขนาด และรูปร่างของเมล็ดสตาร์ช ซึ่งเมล็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงได้มากกว่าและถูกย่อยได้ง่ายกว่าเมล็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ (Tester et al., 2004) และรูปร่างของเมล็ดสตาร์ชก็มีผลต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่นสตาร์ชที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมจะทำให้เอนไซม์สามารถย่อยบริเวณมุมของเมล็ดสตาร์ชได้ง่ายกว่าเมล็ดสตาร์ชที่มีลักษณะกลม เนื่องจากบริเวณมุมเป็นส่วนที่อ่อนแอที่สุดจึงเป็นบริเวณที่ถูกเอนไซม์เข้าไปย่อยได้ง่ายที่สุด

2.8 สตาร์ชเชื่อมข้าม (Cross-linked starch)

สตาร์ชเชื่อมข้ามได้จากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันหรืออีเทอร์ริฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multifunctional reagent) ซึ่งเรียกว่า cross-linking reagent โดยสารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชมากกว่า 1 หมู่ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสตาร์ชเป็นพันธะโควาเลนต์ที่จะช่วยเสริมความแข็งแรงให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเมล็ดสตาร์ชไว้ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้เมล็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงช่วยลดการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชได้ และยังเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และแรงเฉือน ได้ดีกว่าสตาร์ชธรรมชาติ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) แม้ว่าสตาร์ชเชื่อมข้ามจะได้รับความร้อนจนทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลสตาร์ชอ่อนตัวลงหรือถูกทำลายไป แต่เมล็ดสตาร์ชยังคงแข็งแรงอยู่ได้ด้วยพันธะที่เกิดจากการตัดแปรรวมเคมี สภาวะที่ใช้ในการทำคริสตัลไลซ์สตาร์ชมีหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่มาทำปฏิกิริยา ได้แก่ STMP STPP และฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ (POCl_3) เป็นต้น โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาในสารละลายสตาร์ชที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 50 องศาเซลเซียสที่ช่วงพีเอชเป็นกลางถึงด่างอ่อน (Wurzburg, 1986)

Hwang, Kim, and Baik (2009) ได้ศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของสตาร์ชข้าวอะมิโลเพคตินสูงที่มีการตัดแปรรวมด้วยการทำคริสตัลไลซ์โดยใช้ POCl_3 ที่ระดับความเข้มข้น 0.002 0.004 0.006 และ 0.008% ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของ POCl_3 เพิ่มขึ้นทำให้ระดับการเกิดคริสตัลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ RS สูงมากขึ้นจาก 1.17 เป็น 2.47% ซึ่งเมื่อระดับการ

เกิดครอสลิงก์เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการพองตัวของ (swelling) และความสามารถในการละลาย (soluble) ของสตาร์ชลดลง เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปได้จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีค่าลดลง



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชกับ POCl_3 STMP และ EPI
ที่มา: Singh et al. (2007)

Koo, Lee, and Lee (2010) ได้ศึกษาผลของการทำครอสลิงก์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชข้าวโพด โดยเตรียมตัวอย่างจากการใช้สารผสมระหว่าง STMP/STPP ในอัตราส่วน 99:1 (w/w) ที่ระดับ 5 - 12% พบว่าเมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารผสมสูงที่สุด คือ 12% นั้น สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการทำครอสลิงก์มีระดับครอสลิงก์สูงที่สุดคือ 99.1% และมีปริมาณ RS เท่ากับ 58.68% ซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดอีกด้วย จึงอาจสรุปได้ว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารเคมีในการทำครอสลิงก์ในสตาร์ชข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ระดับการเกิดครอสลิงก์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มสูงขึ้นด้วยนอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระดับครอสลิงก์ที่เพิ่มสูงขึ้นยังทำให้คุณสมบัติด้านการละลายของสตาร์ชข้าวโพดลดลงอีกด้วย

2.9 ผลของการตัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช

2.9.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐาน

การใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชหลังจากผ่านการตัดแปร จากการทดลองของ Kim and Lee (2002) พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการตัดแปรด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์และอิพิคลอโรไฮดรินยังคงมีผิวที่เรียบไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชหลังจากผ่านการเชื่อมข้าม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายอิพิคลอโรไฮดรินเพิ่มสูงขึ้น และจากการศึกษาของ Yeh and Yeh (1993) พบว่าการตัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือลักษณะปรากฏของสตาร์ชข้าวเจ้า จึงอาจกล่าวได้ว่าการตัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดสตาร์ช

2.9.2 ผลต่อความหนืด

Yeh and Yeh (1993) ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่องบราเบนเดอร์โดยสตาร์ชข้าวเจ้าจะให้ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 71.4 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดสูงสุด 600 BU (Brabender unit) ที่อุณหภูมิ 84.6 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นคือ 800 BU ที่อุณหภูมิ 87 องศาเซลเซียส ส่วน Liu, Ramsden, and Corke (1999) พบว่าหลังผ่านการเชื่อมข้าม สตาร์ชข้าวเจ้ามีความหนืดสูงสุดและอุณหภูมิในการเริ่มเกิดความหนืดลดลงต่ำลง แต่ในสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและสตาร์ชทั้งสองจะมีค่าเบรคดาวน์ต่ำลง ความหนืดขณะร้อน และความหนืดขณะเย็นเพิ่มสูงขึ้น และ Hirsch and Kokini (2002) พบว่าการเชื่อมข้ามสตาร์ชด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะให้คุณสมบัติทางด้านความหนืดสูงกว่าโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและอิพิคลอโรไฮดริน

2.9.3 ผลต่อการเกิดเจลลิตในเซชัน

การเกิดการเจลลิตในเซชันคือการทำลายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ผันกลับของคุณสมบัติของสตาร์ช เช่น การพองตัวของเม็ดสตาร์ช การหลอมเหลวของผลึก การสูญเสีย birefringence และการละลายของสตาร์ช (Singh et al., 2007)

Chatakanonda, Varavinit, and Chinachoti (2000) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดการเจลลิตในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยเครื่อง DSC พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลลิตในเซชัน (T_g) เท่ากับ 57.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุดขณะเกิดการเจลลิตในเซชัน (T_p) เท่ากับ 67.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลลิตในเซชัน (T_c) เท่ากับ 76.8 องศาเซลเซียส และพลังงานเอนทัลปีของการเกิดการเจลลิตในเซชัน (ΔH_{gel}) เท่ากับ 6.7 J/g และหลังจากผ่านการตัดแปรสตาร์ชด้วยการเชื่อมข้ามจะมีช่วงการเกิดเจลลิตในเซชัน ($T_c - T_g$) แคบขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรและสตาร์ชควบคุม (ไม่เติมโซเดียมไตร

เมตตาฟอสเฟต) สตาร์ชควบคุมจะมีอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันลดลงเล็กน้อย แต่สตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของการตัดแปรเพิ่มสูงขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้ยืนยันได้ว่าหมู่ฟอสเฟตจะเข้าไปในโมเลกุลของสตาร์ชส่งผลทำให้สตาร์ชเกิดการจับตัวกันแน่นมากขึ้นและมีค่า ΔH_{gel} ต่ำลงหลังผ่านการเชื่อมข้าม และยังพบฟิสิกที่เกิดขึ้นอีก 1 ฟิสิก ที่อุณหภูมิ 90 - 110 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นลักษณะของการรวมตัวกันเป็นสารประกอบของอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) ส่วน (Choi and Kerr, 2003) รายงานว่าการเชื่อมข้ามโดยใช้สารฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ที่ระดับต่ำ ๆ จะทำให้ช่วงการเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร ในขณะที่ถ้าใช้ระดับของการตัดแปรเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นและค่า ΔH_{gel} เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะขึ้นอยู่กับ 1) ความเข้มข้นและชนิดของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2) สภาพที่ใช้ในการตัดแปร 3) แหล่งของสตาร์ช (Kaur, Singh, and Sodhi, 2002)

2.9.4 ผลต่อโครงสร้างผลึก

Kim and Lee (2002) ได้ทำการศึกษาการตัดแปรการเชื่อมข้ามของสตาร์ชมันฝรั่ง และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffraction พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B คือเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.59 14.4 17.2 และ 22.1° แต่หลังจากผ่านการตัดแปรด้วยวิธีเชื่อมข้ามสตาร์ชจะเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 14.4 17.2 22 และ 24° แต่ยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เช่นเดียวกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงว่าการทำการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช

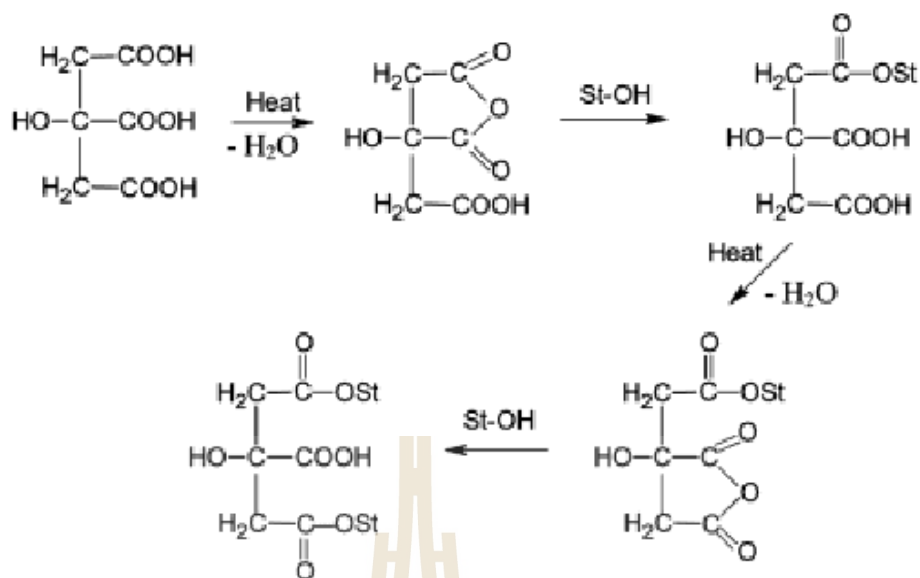
2.9.5 ผลต่อกำลังการพองตัวและค่าการละลาย

Kaur, Singh, and Singh (2004) ได้ศึกษาการเชื่อมข้ามของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งโดยการทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ พบว่าหลังผ่านการเชื่อมข้ามสตาร์ชจะมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวลดลงเป็นร้อยละ 20 - 25 ในขณะที่สตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 28 - 31 เช่นเดียวกับการตัดแปรโดยใช้สารอพิคโลโรไฮดรินค่าร้อยละกำลังการพองตัวลดลงเป็น 23 - 27 เช่นเดียวกับการทดลองในสตาร์ชข้าวเจ้าที่หลังจากผ่านการตัดแปรสตาร์ชจะมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเหลือเท่ากับ 9 (สตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 18) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่มีร้อยละกำลังการพองตัวลดลงเหลือเท่ากับ 14 (สตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 41) (Liu et al., 1999) ส่วน Yeh and Yeh (1993) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าในสารละลาย dimethyl sulphoxide (DMSO) พบว่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าที่

ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีค่าการละลายลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรเนื่องจากการเชื่อมข้ามส่งผลทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างสายสตาร์ชเพิ่มขึ้น

2.10 สตาร์ชซิเตรท (Citrated starch)

สตาร์ชซิเตรทเป็นสตาร์ชเชื่อมข้ามที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริก ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริกเกิดขึ้นในสถานะแห้งที่มีการให้ความร้อน เมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจะสูญเสียโมเลกุลของน้ำไปและเปลี่ยนอยู่ในรูปของซิตริกแอนไฮไดรต์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชโมเลกุลเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชและกรดซิตริกแสดงดังภาพที่ 2.7 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กรดซิตริกสูญเสียน้ำและอยู่ในรูปแอนไฮไดรต์มากขึ้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาหรือเกิดครอสลิงก์กับสตาร์ชโมเลกุลได้เป็นไดสตาร์ชซิเตรท (distarch citrate) (Chowdary, Enturi, and Sujatha, 2011; Xie and Liu, 2004; Xie, Liu, and Cui, 2006) และการผลิตสตาร์ชซิเตรทเพื่อให้ได้ปริมาณ RS ที่สูง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี ระดับความเข้มข้น สภาพแวดล้อมที่ใช้ และชนิดของสตาร์ช จากการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ได้รายงานว่าการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง (waxy corn) สตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสปกติ (normal corn) และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (high amylose starch) ที่ความเข้มข้นของกรดซิตริก 40% บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 - 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 - 9 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวโพดชนิดต่าง ๆ ให้ปริมาณ RS ที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชซิเตรทที่ได้จาก waxy corn มีปริมาณ RS สูงสุดคือ 87.5% ส่วนสตาร์ชซิเตรทจาก high amylose starch มีปริมาณ RS เท่ากับ 86.4% และปริมาณ RS ที่ได้จาก normal corn starch มีค่าต่ำที่สุด (78.8%) และเมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วย DSC พบว่าสตาร์ชซิเตรทจาก waxy corn starch ไม่แสดงพีคใน DSC thermogram และมีพีคเล็กน้อยในสตาร์ชซิเตรทจาก normal corn starch (0.4 J/g) และ Hylon VII starch (3.0 J/g) และสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพดทั้งหมดไม่แสดงพีคของความหนืด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ของสตาร์ชซิเตรทภายในโมเลกุลของสตาร์ชทำให้คุณสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชซิเตรทเปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชดิบ และต่อมาได้มีการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชซิเตรท พบว่าการบ่มสตาร์ชในกรดซิตริกทำให้ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างเปลี่ยนแปลง แต่ในกระบวนการให้ความร้อนไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อลักษณะของเม็ดสตาร์ช



ภาพที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดซิทริกกับสตาร์ชเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท (mono-esterified) และสตาร์ชเชื่อมข้าม (di-esterified)

ที่มา: Xie and Liu (2004)

Jyothi, Moorthy, and Rajasekharan (2007) ได้ทำการผลิตสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ และใช้กรดซิทริก 0.15 - 0.45 โมลต่อโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ที่อุณหภูมิ 120 - 160 องศาเซลเซียสเวลา 3 - 7 นาที พบว่า DS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่มีค่า DS สูงสุด 0.063 คือใช้กรดซิทริก 0.45 โมลอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเวลา 7 นาที เช่นเดียวกับการศึกษาของ Agboola, Akingbala, and Oguntimein (1991) ในการผลิตสตาร์ชซิเตรท จากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิทริกที่ 5 10 15 และ 20% พบว่ามีค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.002 เป็น 0.023 เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น

Shin et al. (2007) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวให้มีปริมาณ SDS และ RS สูงด้วยกรดซิทริก โดยผสมสตาร์ชกับสารละลายกรดซิทริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ปริมาตรต่าง ๆ (10 20 30 40 และ 50 ml) จากนั้นนำไป autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 4 35.5 67 98.5 และ 130 องศาเซลเซียสเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ 3 มิติ (response surface) เพื่อใช้คำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวตัดแปรด้วยกรดซิทริก คือที่ปริมาณกรดซิทริกเท่ากับ 2.62 มิลลิโมล ต่อ 20 กรัม

สตาร์ช ที่อุณหภูมิ 128.4 องศาเซลเซียส และเวลา 13.8 ชั่วโมง ซึ่งได้ค่า DS เท่ากับ 0.027 และ RS เท่ากับ 40% และเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย

2.11 รังสีซินโครตรอน

รังสีซินโครตรอน คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้โลหะของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงขับเคลื่อนในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ซึ่งจะแบ่งอิเล็กตรอนออกเป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า electron bunch จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) และถูกส่งไปยังเครื่องเร่งอนุภาคนวนวงกลม เพื่อเพิ่มพลังงานอิเล็กตรอนในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุ เพื่อบังคับอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลม และมีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือเกือบเท่าความเร็วแสง แล้วจึงถูกส่งต่อไปยังวงกักเก็บอิเล็กตรอน โดยวงอิเล็กตรอนจะทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) วงกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว เพื่อทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อ สุญญากาศ โดยบริเวณที่เป็นแม่เหล็กบังคับเลี้ยวสองขั้ว (Bending magnet) จะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน” โดยพลังงานที่ปลดปล่อยออกมารอบคลุมช่วงคลื่นตั้งแต่ อินฟราเรด แสงขาว อัลตราไวโอเลต และรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, ออนไลน์, 2017)

2.12 การฉายรังสี

กระบวนการฉายรังสี (Radiation processing) เป็นทางเลือกในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และ/ หรือทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการฉายรังสีเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่ปลอดภัยสำหรับใช้ในการเก็บรักษาอาหารและผลิตภัณฑ์หรือสินค้าทางการเกษตร เนื่องจากการฉายรังสีสามารถเก็บรักษาคุณค่าทางโภชนาการ (nutritional value) ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ (Al-Kaisey, Alwan, Mohammad, and Saeed, 2003; Bhat, Sridhar, and Tomita-Yokotani, 2007; Diehl, 2002) และการฉายรังสีไม่ทำให้เกิดความร้อนสูงมากกับผลิตภัณฑ์ มีการรายงานว่า การฉายรังสี (gamma และ electron beam) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลง (Ciesla, Zoltowski, and Mogilevsky, 1991; Grant and D'Appolonia, 1991; Sabularse, Liuzzo, Rao, and Grodner, 1991; Sokhey and Hanna, 1993) ซึ่งการฉายรังสีจะทำให้คุณสมบัติของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนืดลดลง และสามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น (Bao and Corke, 2002; Lee et al., 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่ารังสีทำให้ส่วนที่จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบหรือที่เป็นผลึก (crystalline phase) ในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในเมล็ดสตาร์ชลดลง (Ciesla, Zoltowski, and Mogilevski, 1992) และการฉายรังสีให้แก่สตาร์ชภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (oxygen) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามของสตาร์ชได้ (cross-linking) (Fiedorowicz, Tomasik, You, and Lim, 1999)

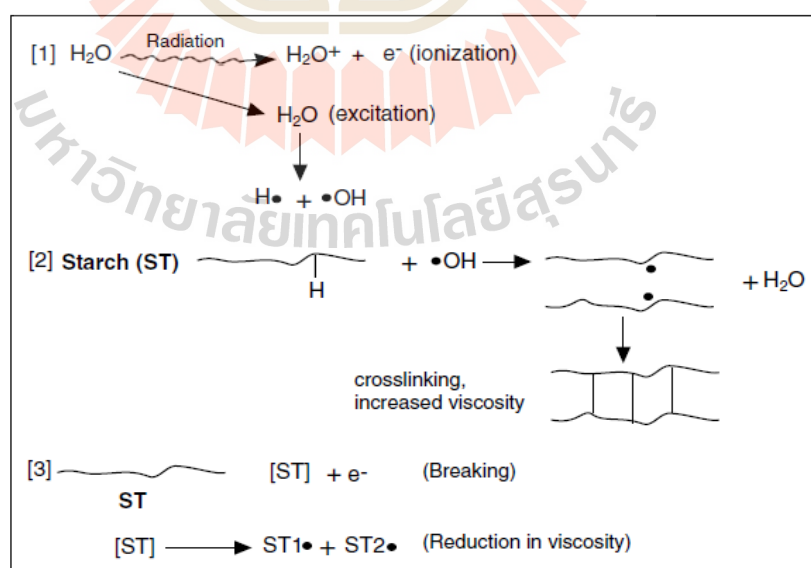
2.13 ผลของการฉายรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์

กลไกการเกิดการเชื่อมข้ามที่ได้รับการยอมรับสำหรับการฉายรังสีให้แก่พอลิเมอร์ คือการแตกของพันธะเคมีของพอลิเมอร์ ซึ่งจะเกิดการแตกพันธะเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H) บนสายโซ่พอลิเมอร์ เพื่อเกิดเป็นอะตอมไฮโดรเจนอิสระและเข้าไปจับกับอะตอมของไฮโดรเจนของโมเลกุลกลูโคสของสายโซ่ที่อยู่ใกล้เคียง จึงทำให้สายพอลิเมอร์มีอนุมูลอิสระ (free radical) และเมื่อมีอนุมูลอิสระบนสายพอลิเมอร์มากขึ้น อนุมูลอิสระที่อยู่ติดกันจะรวมกันทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่การเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched Polymer) และในที่สุดจะเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแหสามมิติ เมื่อแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์ถูกเชื่อมโยงเข้ากับสายโซ่อื่น นอกจากนี้การฉายรังสียังก่อให้เกิดการแตกสลายของพันธะเคมีหรือที่เรียกว่า “การตัด (Scission)” การตัดเกิดขึ้นเมื่อมีการแตกของพันธะเคมีระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) กระบวนการนี้ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ลดลง (พิริยาธร และ เกศินี, 2547 อ้างถึงใน กฤตพล ศรีวงษา, 2555, หน้า 14) การเกิดการตัดและกันเชื่อมข้ามของสายสตาร์ชโดยรังสีแสดงดังภาพที่ 2.8

2.14 การฉายรังสีสตาร์ช

จากการทดลองฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอนให้แก่สตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้ระดับปริมาณรังสีที่ 110 220 330 และ 440 kGy พบว่าการฉายรังสีทำให้เกิดการแตกหักของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ แต่ไม่ทำให้ลักษณะของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชลดลงหลังจากได้รับรังสี และยังทำให้สตาร์ชสามารถละลายในน้ำเย็นได้เพิ่มขึ้น (จาก 5 เป็น 70%) (Shishonok et al., 2007) เช่นเดียวกับการฉายรังสีให้แก่สตาร์ชข้าว (Bao, Ao, and Jane, 2005) สตาร์ชจาก amaranth (Kong, Kasapis, Bao, and Corke, 2009) สตาร์ชจากถั่วแดง (kidney bean) Gani, Bashir, Wani, and Masoodi (2012) ที่ทำให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชลดลง แต่ไม่มีผลต่อรูปแบบลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ช

จากการทดลองของ Mohd Adzahan, Mat Hashim, Muhammad, Abdul Rahman, Ghazali, and Hashim (2009) ที่ได้ทำการฉายรังสีต่าง ๆ ได้แก่ รังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 5 - 20 kGy ลำอเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน 5 - 30 kGy และ ไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 900วัตต์ ระยะเวลา 2 - 10 นาที ให้กับสตาร์ชข้าวสาลี สาคุ และมันสำปะหลัง พบว่าการฉายรังสีทำให้ปริมาณ amylose leaching ของสตาร์ชแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นจากสตาร์ชดิบที่ไม่ถูกฉายรังสี และผลการทดลองเปรียบเทียบการฉายรังสีทั้ง 3 ชนิดให้แก่ตัวอย่างสตาร์ชชนิดเดียวกัน พบว่าสตาร์ชข้าวสาลีมีค่า amylose leaching สูงที่สุดเมื่อถูกฉายด้วยรังสีแกมมาที่ 20 kGy ส่วนในสตาร์ชสาคุมีค่า amylose leaching สูงสุด เมื่อได้รับการฉายด้วยลำอเล็กตรอนที่ 15 kGy และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ฉายการฉายรังสีด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 10 นาที จะมี amylose leaching สูงสุด และอัตราส่วนระหว่าง อะมิโลสกับอะมิโลเพคติน (Amylose-amylopectin ratio) ของตัวอย่างสตาร์ชทุกชนิดที่ผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟ และลำอเล็กตรอนจะลดลง เมื่อได้รับพลังงานจะรังสีเพิ่มขึ้น แต่สำหรับการฉายด้วยรังสีแกมมา จะพบว่าตัวอย่างสตาร์ชมีค่า Amylose-amylopectin ratio ลดลงเมื่อได้รับรังสีในปริมาณที่สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อสตาร์ชได้รับรังสีในระดับ 20 kGy ค่า Amylose-amylopectin ratio จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ได้รับรังสีที่ระดับ 15 kGy นอกจากนี้การฉายรังสีทุกชนิดในการทดลองนี้ยังมีผลต่อความหนืดของสตาร์ชทุกชนิด โดยความหนืดของสตาร์ชที่ได้รับการฉายรังสีลดลงจากสตาร์ชดิบ และลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่สตาร์ชเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นในสตาร์ชข้าวสาลีที่ฉายด้วยรังสีไมโครเวฟที่มีความหนืดสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการฉายรังสีนานมากขึ้น



ภาพที่ 2.8 การเชื่อมข้ามและการแตกหักของสายสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสี
ที่มา: Bhat and Karim (2009)

Fiedorowicz et al. (1999) ได้ทำการศึกษาการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดโดยการฉายรังสียูวีในสถานะที่มีในโตรเจนและอากาศ โดยฉายรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 250 nm ระยะเวลาในการฉายรังสีคือ 5 8 10 15 และ 25 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ภายใต้สถานะที่มีในโตรเจน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการให้รังสีเพิ่มขึ้น ค่าเอนทัลปี (ΔH) ของสตาร์ชข้าวโพดลดลง และความหนืดของตัวอย่างลดลงจาก 97 เป็น 56 RVU เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยของ M_w และ R_g ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินก็ลดลงเช่นกัน และเมื่อศึกษาการฉายรังสีในสถานะที่มีการเติมอากาศ พบว่าเมื่อระยะเวลาการฉายรังสีเพิ่มขึ้นจาก 5 - 15 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่า ΔH ค่าความหนืด และค่าเฉลี่ยของ M_w และ R_g ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของขนาดโมเลกุล (molecular size distribution) แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีภายใต้สถานะที่มีอากาศในช่วง 5 ชั่วโมงแรก ทำให้เกิดการแตกแยกของโมเลกุลสตาร์ช และหลังจากนั้นเมื่อฉายรังสีต่อไป (5 - 15 ชั่วโมง) จะมีปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามเกิดขึ้น

Han and Lim (2012) ได้ศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติของสตาร์ช octenylsuccinylated (OS) จากข้าวเหนียว และ high-amylose rice พบว่าเมื่อระดับปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 0 - 50 kGy ระดับการแทนที่ (DS) ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเกิดขึ้นทั้งในสตาร์ชข้าวเหนียว และ high-amylose rice เนื่องจากการถูกตัดของสายสตาร์ชด้วยรังสี ซึ่งส่งผลให้ OS group ถูกกำจัดหรือตัดออกไปด้วยเช่นกัน (Yu and Wang, 2007) และการฉายรังสีที่ 10 หรือ 30 kGy ทำให้ค่า T_0 และ ΔH ของสตาร์ช OS จากทั้งจาก high-amylose และ waxy rice starches เพิ่มขึ้น แต่เมื่อฉายรังสีที่ระดับ 50 kGy ค่าเอนทัลปีของ OS waxy rice starch ลดลง แต่ไม่เกิดขึ้นกับ OS high-amylose rice starch นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการฉายรังสีไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกของตัวอย่างสตาร์ชทั้ง 2 ชนิด

จากงานการทดลองของ Yoon et al. (2010) ได้ศึกษาการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 5 - 20 kGy แก่สตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวที่ระดับความชื้นแตกต่างกัน (5 และ 12 %) พบว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีทั้งหมด มีปริมาณ RDS และ RS เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ SDS ลดลงจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการฉายรังสี แต่ในตัวอย่างสตาร์ชข้าว พบว่าการฉายรังสีไม่ทำให้ปริมาณ RDS ของตัวอย่างแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นที่ตัวอย่างที่มีความชื้น 12% และถูกฉายรังสีที่ 10 kGy และตัวอย่างที่มีความชื้น 5% และถูกฉายรังสีที่ 5 kGy มีปริมาณ RDS สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับอื่น เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความชื้นเดียวกัน แต่รังสีมีผลทำให้ปริมาณ SDS ของตัวอย่างทั้งหมดลดลง และทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ยกเว้นตัวอย่างที่มีความชื้น 12% ที่ผ่านการฉายรังสี 5 kGy มีปริมาณ SDS และ RS ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

การฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมที่ระดับ 10 - 30 kGy ในสตาร์ชสาคุ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีทุกระดับมีการพองตัวน้อยกว่าสตาร์ชดิบ โดยการพองตัวของสตาร์ชจะลดลงเมื่อตัวอย่างได้รับรังสีในปริมาณรังสีที่สูงขึ้น สำหรับการละลายของสตาร์ช พบว่ารังสีสามารถทำให้สตาร์ชละลายได้มากกว่าสตาร์ชดิบ และตัวอย่างจะละลายได้ดีขึ้นเมื่อได้รับรังสีในปริมาณที่มากขึ้น ตัวอย่างที่ถูกฉายรังสีที่ระดับ 20 kGy จะมีความสามารถในการละลายสูงที่สุด แต่เมื่อฉายรังสีจนถึงระดับ 30 kGy การละลายของตัวอย่างจะค่อย ๆ ลดลง (Pimpa et al., 2007)

2.15 รายการอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2535). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์แปรรูปสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร**. เอกสาร มอก. ที่ 1073-2535. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์, กรุงเทพมหานคร. 11 หน้า.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 292 หน้า.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 303 หน้า.
- พิริยธร สุวรรณมาลา และเกศินี เหมวิเชียร. **รังสีและอุตสาหกรรมพอลิเมอร์**. **นิวเคลียร์ปริทัศน์**. 17 (เม.ย.-มิ.ย. 47): 7-14. อ้างถึงใน กฤตพล ศรีวงษา. (2555). การศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมา และอิเล็กตรอนบีมที่มีต่อสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. (2017). **แสงซินโครตรอนสำหรับนักวิชาการ** [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.slri.or.th/th/what-is-synchrotron-light/for-research.html>
- Agboola, S., Akingbala, J., and Oguntimein, G. (1991). Production of low substituted cassava starch acetates and citrates. **Starch/Stärke**. 43(1): 13-15.
- Al-Kaisey, M. T., Alwan, A.-K. H., Mohammad, M. H., and Saeed, A. H. (2003). Effect of gamma irradiation on antinutritional factors in broad bean. **Radiation Physics and Chemistry**. 67(3): 493-496.
- Bao, J., Ao, Z., and Jane, J.-l. (2005). Characterization of physical properties of flour and starch obtained from gamma-irradiated white rice. **Starch/Stärke**. 57: 480-487
- Bao, J., and Corke, H. (2002). Pasting properties of γ -irradiated rice starches as affected by pH. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 50(2): 336-341.

- Bemiller, J. N. (1997). Starch modification: challenges and prospects. **Starch/Stärke**. 49 (4): 127-131.
- Bhat, R., and Karim, A. (2009). Impact of radiation processing on starch. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 8(2): 44-58.
- Bhat, R., Sridhar, K. R., and Tomita-Yokotani, K. (2007). Effect of ionizing radiation on antinutritional features of velvet bean seeds (*Mucuna pruriens*). **Food chemistry**. 103(3): 860-866.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **International Journal of Biological Macromolecules**. 23(2): 85-112.
- Chatakanonda, P., Varavinit, S., and Chinachoti, P. (2000). Relationship of gelatinization and recrystallization of cross-linked rice to glass transition temperature. **Cereal Chemistry**. 77(3): 315-319.
- Chen, G., and Zhang, B. (2012). Hydrolysis of granular corn starch with controlled pore size. **Journal of Cereal Science**. 56(2): 316-320.
- Choi, S., and Kerr, W. (2003). Water mobility and textural properties of native and hydroxypropylated wheat starch gels. **Carbohydrate Polymers**. 51(1): 1-8.
- Chowdary, K., Enturi, V., and Sujatha, S. (2011). Preparation and evaluation of starch citrate: A new modified starch as directly compressible vehicle in tablet formulations. **International Journal of Chemical Sciences**. 9(1): 177-187.
- Ciesla, K., Zoltowski, T., and Mogilevski, L. Y. (1992). SAXS investigations of structural changes after gamma ray irradiation of potato starch and starch suspensions. **Starch/Stärke**. 44(11): 419-422.
- Ciesla, K., Zoltowski, T., and Mogilevsky, L. Y. (1991). Detection of starch transformation under γ -irradiation by small-angle X-ray scattering. **Starch/Stärke**. 43(1): 11-12.
- Diehl, J. F. (2002). Food irradiation-past, present and future. **Radiation Physics and Chemistry**. 63(3): 211-215.
- Englyst, H. N., Kingman, S., and Cummings, J. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**. 46: 33-50.
- Fiedorowicz, M., Tomasik, P., You, S., and Lim, S.-T. (1999). Molecular distribution and pasting properties of UV-irradiated corn starches. **Starch-Starke**. 51(4): 126-131.

- Gani, A., Bashir, M., Wani, S., and Masoodi, F. (2012). Modification of bean starch by γ -irradiation: Effect on functional and morphological properties. **LWT-Food Science and Technology**. 49(1): 162-169.
- Grant, L. A., and D'Appolonia, B. L. (1991). Effect of low-level gamma radiation on water-soluble nonstarchy polysaccharides isolated from hard red spring wheat flour and bran. **Cereal Chemistry**. 68: 651-662.
- Han, J.-A., and Lim, S.-T. (2012). Effect of γ -irradiation on pasting and emulsification properties of octenyl succinylated rice starches. **Carbohydrate Polymers**. 90(4): 1480-1485.
- Hirsch, J. B., and Kokini, J. L. (2002). Understanding the mechanism of cross-linking agents (POCl₃, STMP, and EPI) through swelling behavior and pasting properties of cross-linked waxy maize starches. **Cereal Chemistry**. 79(1): 102-107.
- Hizukuri, S. (1985). Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. **Carbohydrate Research**. 141(2): 295-306.
- Hoover, R., and Zhou, Y. (2003). *In vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes-a review. **Carbohydrate Polymers**. 54(4): 401-417.
- Hwang, D. K., Kim, B. Y., and Baik, M. Y. (2009). Physicochemical properties of non-thermally cross-linked corn starch with phosphorus oxychloride using ultra high pressure (UHP). **Starch/Stärke**. 61(8): 438-447.
- Jacobs, H., and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46(8): 2895-2905.
- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N., and Rajasekharan, 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(10): 1964-1972.
- Kaur, L., Singh, N., and Singh, J. (2004). Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starches. **Carbohydrate Polymers**. 55(2): 211-223.
- Kaur, L., Singh, N., and Sodhi, N. S. (2002). Some properties of potatoes and their starches II. Morphological, thermal and rheological properties of starches. **Food chemistry**. 79(2): 183-192.

- Kim, M., and Lee, S.-J. (2002). Characteristics of crosslinked potato starch and starch-filled linear low-density polyethylene films. **Carbohydrate Polymers**. 50(4): 331-337.
- Kong, X., Kasapis, S., Bao, J., and Corke, H. (2009). Effect of gamma irradiation on the thermal and rheological properties of grain amaranth starch. **Radiation Physics and Chemistry**. 78(11): 954-960.
- 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(6): 619-625.
- Lee, Y.-S., et al. (2003). Effects of gamma irradiation on physicochemical and textural properties of starches. **Food Science and Biotechnology**. 12(5): 508-512.
- Li, J. H., Vasanthan, T., Hoover, R., and Rossnagel, B. G. (2004). Starch from hull-less barley: V. In-vitro susceptibility of waxy, normal, and high-amylose starches towards hydrolysis by alpha-amylases and amyloglucosidase. **Food chemistry**. 84(4): 621-632.
- Light, J. M. (1990). Modified food starches: why, what, where, and how. **Cereal Foods World**. 35(11): 1081-1092.
- Liu, H., Ramsden, L., and Corke, H. (1999). Physical properties and enzymatic digestibility of hydroxypropylated ae, wx, and normal maize starch. **Carbohydrate Polymers**. 40(3): 175-182.
- Mohd Adzahan, N., Mat Hashim, D. Muhammad, K., Abdul Rahman, R., Ghazali, Z. and Hashim, K. (2009). Pasting and leaching properties of irradiated starches from various botanical sources. **International Food Research Journal**. 16(3): 415-429.
- Nugent, A. P. (2005). Health properties of resistant starch. *Nutrition Bulletin*. 30(1): 27-54.
- Pérez, 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(8): 389-420.
- Pimpa, B., Muhammad, S. K.S., Hassan, M. A., Ghazali, Z., Hashim, K., and Kanjanasopa, D. (2007). Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties of sago starch. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. 29(3): 759-768.
- Puspasari, F., Radjasa, O. K., Noer, A. S., Nurachman, Z., Syah, Y. M., van der Maarel, M., Dijkhuizen, L., Janeček, S., and Natalia, D. (2013). Raw starch-degrading α -amylase from *Bacillus aquimaris* MKSC 6.2: isolation and expression of the gene, bioinformatics

- and biochemical characterization of the recombinant enzyme. **Journal of applied microbiology**. 114(1): 108-120.
- Ratnayake, W. S., and Jackson, D. S. (2008). Starch gelatinization. **Advances in Food and Nutrition Research**. 55: 221-268.
- Sabularse, V., Liuzzo, J., Rao, R., and Grodner, R. (1991). Cooking quality of brown rice as influenced by gamma irradiation, variety and storage. **Journal of Food Science**. 56(1): 96-98.
- Sajilata, M., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch—a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 5(1): 1-17.
- Sanz, T., Salvador, A., Baixauli, R., and Fiszman, S. (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.
- Sevenou, O., Hill, S., Farhat, I., and Mitchell, J. (2002). Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy. **International Journal of Biological Macromolecules**. 31(1): 79-85.
- Shin, S. I., Lee, C. J., Kim, D., Lee, H. A., Cheong, J. J., Chung, K. M., Bail, M. Y., Park, C. S., Kim, C. H., 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(1): 24-33.
- Shishonok, M., Shishonok, M. V., Litvyak, V. V., Murshko, E. A., Grinyuk, E. V., Sal'nikov, L. I., Roginets, L. P., and Krul, L. P. (2007). Structure and properties of electron-beam irradiated potato starch. **High Energy Chemistry**. 41(6): 425-429.
- Singh, J., Kaur, L., and McCarthy, O. (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): 1-22.
- Sokhey, A., and Hanna, M. (1993). Properties of irradiated starches. **Food Structure**. 12(4): 397-410.
- 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(4): 529-538.

- Tester, R., Karkalas, J., and Qi, X. (2004). Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. **World's Poultry Science Journal**. 60(2): 186-195.
- Wepner, B., Berghofer, E., Miesenberger, E., Tiefenbacher, K., and Perry, N. N. (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.
- Xie, X. S., and Liu, Q. (2004). Development and physicochemical characterization of new resistant citrate starch from different corn starches. **Starch/Stärke**. 56(8): 364-370.
- Xie, X. S., Liu, Q., and 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.
- Yeh, A-I., and Yeh, S-L. (1993). Some characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rice starch. **Cereal Chemistry**. 70: 596-596.
- Yoon, H. S., Yoo, J. Y., Kim, J. H., Lee, J.-W., Byun, M. W., Baik, B. K., and Lim, S. T. (2010). In vitro digestibility of gamma-irradiated corn starches. **Carbohydrate Polymers**. 81(4): 961-963.
- Yu, Y., and Wang, J. (2007). Effect of γ -ray irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of rice. **Food Research International**. 40(2): 297-303.
- Zobel, H. (1988). Molecules to granules: a comprehensive starch review. **Starch/Stärke**. 40(2): 44-50.

บทที่ 3

ผลของการย่อยสลายไขมันสำปะหลังดิบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสต่อ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชซีเตรท

3.1 บทคัดย่อ

สตาร์ชซีเตรท เป็นสตาร์ชที่ได้จากการตัดแปรทางเคมี ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซัลฟูริกในสถานะแห้งที่ความร้อนสูง จากการศึกษาการใช้สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นที่ 10 - 40% (w/v) บ่มกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 20% (w/v) ปริมาณ RS ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดเป็น 30 และ 40% (w/v) ทำให้ปริมาณ RS ลดลง

การศึกษาการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ โดยย่อยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง พบว่าภายหลังการย่อยมีเกิดรู/รอยแตกที่เกิดจากการกัดเซาะ โดยเอนไซม์เกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ช เมื่อระยะเวลาการย่อยเพิ่มมากขึ้นก็จะเห็นว่ามีรอยกัดเซาะที่พื้นผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อการตัดแปรพื้นผิวเป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมงไปผลิตสตาร์ชซีเตรท โดยนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 20% (w/v) ที่สถานะเดียวกับข้างต้น (6 ชั่วโมง) และศึกษาการลดระยะเวลาในการบ่มกับสารละลายกรดซัลฟูริกเป็น 3.0 และ 1.0 ชั่วโมง พบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มลดลง ทำให้ปริมาณ RS และ BC เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการบ่มในระยะเวลาสั้นทำให้สตาร์ชถูกไฮโดรไลซ์มากกว่าการบ่มที่ระยะเวลาสั้นกว่า สอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงก่อนนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก 1.0 ชั่วโมงทำให้สตาร์ชซีเตรทที่มีปริมาณ RS และ BC เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว คือ 69.4 %RS และ 11.8 %BC เป็น 75.4 %RS และ 12.4 %BC และการใช้วิธีการตัดแปรร่วมยังทำให้สตาร์ชซีเตรทสามารถพองตัวและละลายได้ดีกว่าสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชที่จากการตัดแปรจากสตาร์ชดิบ

3.2 บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญในการเลือกบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารเพื่อสุขภาพ (healthy foods) หรืออาหารฟังก์ชัน (functional foods) กำลังได้รับความ

นิยมจากผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น และหนึ่งในอาหารเพื่อสุขภาพที่น่าสนใจก็คือ resistant starch (RS) ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร คือไม่ถูกย่อยและดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก โดยจะสามารถผ่านไปถึงลำไส้ใหญ่ และเป็นอาหารหรือพรีไบโอติก (prebiotic) ของจุลินทรีย์โปรไบโอติก (probiotic microorganism) หมักได้เป็นกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย โดยเฉพาะต่อระบบทางเดินอาหาร (Englyst, Kingman, and Cummings, 1992; Wong, De Souza, Kendall, Emam, and Jenkins, 2006) เช่น อะซีเตท โพรพิโอเนต และบิวทิเรต ซึ่งกรดไขมันที่เกิดขึ้นจะช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้ดีขึ้น ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ก่อโรค เพิ่มปริมาณของของเหลวและปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่างภายในลำไส้ใหญ่ และช่วยเพิ่มความถี่ในการขับถ่าย ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก โรคผนังลำไส้อักเสบได้อีก และยังช่วยลดคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ และโรคเบาหวานได้ (De Deckere, Kloots, and Van Amelsvoort, 1993; Ferguson, Tasman-Jones, Englyst, and Harris, 2000; Mikulíková, Masár, and Kraic, 2008; Younes, Levrat, Demigné, and Rémésy, 1995) อีกทั้งยังสามารถช่วยยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติ (transformed cell) ในสิ่งมีชีวิตและช่วยเพิ่มการตายตามธรรมชาติของเซลล์ (apoptosis) ทำให้ลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ลงได้ (Hashimoto et al., 2006; Le Leu, Hu, and Young, 2002; Sajilata, Singhal, and Kulkarni, 2006) แต่ RS จะมีคุณสมบัติบางประการที่โดดเด่นกว่าใยอาหาร เช่น มีความเหมาะสมต่อกระบวนการแปรรูปมากกว่า และสามารถช่วยควบคุมลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ไม่ทำให้เนื้อสัมผัสมีลักษณะหยابกระด้างเช่นเดียวกับใยอาหาร และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสี และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ (Ranhotra, Gelroth, and Glaser, 1996) จึงสามารถนำ RS ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง RS สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท โดยใช้เกณฑ์ความสามารถในการถูกย่อย แต่ RS ประเภทที่ 4 (RS4) เป็น RS ที่มีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์มากที่สุดในการทดลองแบบ *in vitro* เมื่อเปรียบเทียบกับ RS ชนิดอื่น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะภายในโครงสร้างของสตาร์ชซึ่งช่วยขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ (Mun and Shin, 2006) จึงทำให้ RS4 ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งยังสามารถผลิตได้จากสตาร์ชและสารเคมีหลายชนิดดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำ RS ไปประยุกต์ใช้ในอาหารชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ขนมอบ และใช้เพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป

สตาร์ชชนิดที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตัดแปรสตาร์ชด้วยการทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับกรดซिटริก ซึ่งกรดซिटริกเป็นสารที่จะเกิดปฏิกิริยากับสตาร์ชได้ในสภาพและต้องอาศัยความร้อนร่วมด้วย ซึ่งเมื่อกรดซिटริกได้รับความร้อนจะสูญเสียโมเลกุลของน้ำไปและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซิทริกแอนไฮไดรด์ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช

โมเลกุลเกิดเป็นสตาร์ชซีเตรท และเมื่อให้ความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้นก็จะส่งผลให้กรดซิตริกสูญเสียน้ำและอยู่ในรูปแอนไฮไดรด์มากขึ้น ทำให้กรดซิตริกเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดครอสลิงก์กับสตาร์ชโมเลกุลได้เป็นไดสตาร์ชซีเตรท (distarch citrate) และกรดซิตริกยังได้รับการจัดว่าเป็น Generally Recognized as Safe (GRAS) จาก USFDA คือเป็นสารเคมีที่สามารถใช้ในอาหารได้อย่างไม่จำกัด และมีความปลอดภัยต่อร่างกายเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสของสตาร์ชซีเตรทมีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ของกรดในโครงสร้างของสตาร์ชเพิ่มขึ้น (Xie and Liu, 2004) ซึ่งก่อนหน้านี้นี้ได้มีการศึกษาการผลิตสตาร์ชซีเตรทในสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และสภาวะการผลิตที่แตกต่างกันดังนี้

Narkruga (1994) ที่ได้ศึกษาการผลิตสตาร์ชตัดแปร ซึ่งได้แก่ สตาร์ชซีเตรท สตาร์ชฟอสเฟต และสตาร์ชแคปไซออล โดยใช้เครื่องเอกทราเซอร์ และศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตัดแปรที่ได้ พบว่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตัดแปรทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นกับระดับการเกาะเกี่ยวระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกและความร้อนในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจะส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตัดแปรดีขึ้น คือทนต่อแรงเฉือน มีความคงทนต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย และจากการศึกษาของ Xie and Liu (2004) พบว่าการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินสูง (waxy corn) สตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสปกติ (normal corn) และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (high amylose starch) ที่ความเข้มข้นของกรดซิตริก 40% บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 - 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 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 การทดลองของ Jyothi, Moorthy, Sreekumar, and Rajasekharan (2007) ที่ได้ศึกษาการผลิตสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งได้ทำการผลิตสตาร์ชซีเตรทโดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ระดับ 0.15 - 0.45 mol ที่อุณหภูมิ 120 - 160 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 - 7 นาทีพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ DS และปริมาณ RS เพิ่มขึ้น ในปีเดียวกัน Shin et al. (2007) ก็ได้ทำการทดลอง ศึกษาหาสภาวะในการผลิตสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชข้าวโพดให้ได้สตาร์ชที่มีปริมาณ SDS และ RS สูง โดยการบ่มสตาร์ชข้าวโพดในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ปริมาตรต่าง ๆ (10 20 30 40 และ 50 ml) แล้วนำไป autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 4 35.5 67 98.5 และ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ 3 มิติ (response surface) เพื่อใช้คำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวโพดตัดแปรพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวโพดตัดแปรด้วยกรดซิตริก คือที่ระดับของกรดซิตริก

เท่ากับ 2.62 มิลลิโมลของกรดซัลฟิวริก ต่อ 20 กรัมสตาร์ชที่อุณหภูมิ 128.4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 13.8 ชั่วโมง มีค่า DS เท่ากับ 0.027 และ RS เท่ากับ 40% และเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในช่วงต้นพบว่ามีหลากหลายปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้ เช่น ความเข้มข้น สภาวะวิธีการที่ใช้ และชนิดของสตาร์ช และเนื่องจากข้อจำกัดของสตาร์ชธรรมชาติที่มีการพองตัวและดูดซับสารละลายได้ต่ำ จึงส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรดซัลฟิวริกต้องใช้ระยะเวลานาน เพื่อที่จะทำให้ได้สตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณ RS สูง จึงศึกษาวิจัยที่ได้มีการศึกษาในก่อนหน้า พบว่าการตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ช จะส่งผลให้คุณสมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไป เช่น การดูดซับน้ำ การนำความร้อน และการแพร่ของน้ำ เป็นต้น (Rahman, 2001) ซึ่งการตัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชสามารถทำได้โดยการใช้เอนไซม์ย่อยสตาร์ชบางส่วนในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติเนชันของสตาร์ช เพื่อทำให้สตาร์ชเกิดเป็นหลุม/รูที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ช หรือทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดเล็กลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งการศึกษาของ Aggarwal and Dollimore (1998) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการย่อยเม็ดสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชข้าวโพดหลังจากย่อยด้วยกลูโคอะไมเลสข้ามคืน และสำหรับสตาร์ชข้าวและสตาร์ชสาธาก็จะให้ผลคล้ายกับสตาร์ชข้าวโพด ซึ่งจำนวน ขนาด และความถี่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนเม็ดสตาร์ชก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ชนิดและความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิและพีเอชที่ใช้ในการย่อยสตาร์ช (Frans and Johannes, 1975) เช่นเดียวกับ (Chen, Huang, Tang, Chen, and Zhang, 2011) ที่ได้ย่อยสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และกลูโคอะไมเลส พบว่า เกิดการกักกร่อนและมีรอยแตกเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น 10.7 เท่าของสตาร์ชดิบ (native starch) และเมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าการย่อยจะเกิดมากที่สุดที่บริเวณออสันฐานและมีการเพิ่มขึ้นของผลึกในเม็ดสตาร์ช การตัดแปรพื้นผิวของสตาร์ชด้วยเอนไซม์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตสตาร์ชซิเตรทเพื่อช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนบ่มกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาผลของการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสก่อนนำไปบ่มกับสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรท รวมถึงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้

3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.3.1 วัสดุดิบ

สตาร์ชมันสำปะหลัง (บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด, จังหวัดนครราชสีมา) กรดซิตริกฟูเดเกรด (บริษัทราม่า โปรดักชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร) เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (α -amylase, heat-stable, A3306, E.C. 3.2.1.1, Sigma-Aldrich, USA) 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) และสารเคมีอื่น ๆ ที่เป็นกรดการวิเคราะห์

3.3.2 การตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

การลดขนาดอนุภาคของสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ โดยเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลัง (30% solid) ใน 0.1 M โซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ (pH 4.5) เติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (α -amylase, heat-stable, A3306) ความเข้มข้น 120 ยูนิตต่อมิลลิลิตร นำแล้วไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเขย่าตลอดเวลาที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วย 2.0 M HCl ให้ไป pH 1.5-1.6 แล้วนำมากรองและล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (DI) จน pH อยู่ในช่วง 6.5 และนำไปทำแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3.3.3 การเตรียมสตาร์ชชีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลัง

เตรียมสตาร์ชชีเตรทโดยตัดแปลงจากวิธีของ Klaushofer, Berghofer, and Steyrer (1978) เตรียมสารละลายกรดซิตริกให้มีความเข้มข้น 10 - 40% (w/v) และปรับ pH เป็น 3.5 ด้วย NaOH ความเข้มข้น 10 M และปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 50 มิลลิลิตร ผสมแล้วสารละลายกรดซิตริกกับสตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 50 กรัมในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปบ่มในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 - 6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา นำไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ความชื้นของสตาร์ชให้มีความชื้นอยู่ในช่วง 5 - 6% (w/w) จากนั้นบดตัวอย่างให้ละเอียด แล้วจึงนำไปทำปฏิกิริยาในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีอยู่ในช่วง pH 6.00 - 7.00 เพื่อกำจัดเอากรดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกจากสตาร์ช แล้วนำไปทำให้แห้งและบดตัวอย่าง แล้วเก็บตัวอย่างที่ได้ไว้ในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic method (DNS method) ตามวิธีของ Miller (1959) โดยละลายตัวอย่าง 100 mg ในสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 8 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที

จากนั้นดูดตัวอย่างปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แช่ในอ่างน้ำแข็งทันที เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Biochrom Liba S22, Biochrom Ltd, England) ที่ 540 นาโนเมตร สร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ใช้สารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 20 - 200 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เติม DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แช่ในอ่างน้ำแข็ง เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ 540 นาโนเมตร

3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณ Resistant starch (RS)

วิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC (2002) ที่มีการดัดแปลงเล็กน้อย โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ชหนัก 100 มิลลิกรัม ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมมาลีเอตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 M พีเอช 6.0 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยเอนไซม์แพนครีเอติกแอลฟา-อะไมเลส (pancreatic α -amylase) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) ความเข้มข้น 3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยเขย่าตลอดเวลา จากนั้นเติมเอทานอลความเข้มข้นปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาทีอีกครั้ง ค่อย ๆ เทส่วนใสทิ้งและรอให้ตะกอนสตาร์ชแห้ง จากนั้นเติมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 1.2 M pH 8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ความเข้มข้น 3300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกลูโคสที่ถูกปล่อยออกมาโดยสารละลาย PGO เอนไซม์ (Sigma, P7119) และคำนวณปริมาณ RS จากสูตร

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

เมื่อ F คือ ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

162/180 คือ แฟกเตอร์สำหรับเปลี่ยน free glucose เป็น anhydro-glucose

3.3.6 การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (bound citrate, BC)

ปริมาณของกรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช วิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ดัดแปลงมาจากวิธีการของ (Menzel et al., 2013) ดังนี้ ชั่งตัวอย่าง 0.4 - 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และสารละลาย KOH ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สำหรับการหา mono-ester bond ให้ใช้น้ำ DI แทนสารละลาย KOH แล้วคนให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer หลังจากนั้นนำไปต้มในน้ำอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 8.5 ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 N แล้วเติมสารละลายบอเรนัทไฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ murexid indicator 0.3 กรัม นำไปไตเตรทกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.05 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเหลือง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %กรดซิตริกที่เกาะเกี่ยว (%BC) และ %Mono-esterified citric acid ตามสูตรดังนี้

$$\%BC \text{ และ } \%Mono\text{- esterified citric acid} = \frac{9.61Y \times 10}{X(100 - Z)}$$

และ $\%Di\text{- esterified citric acid} = \%BC - \%Mono\text{- esterified citric acid}$

เมื่อ $X =$ น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม (น.น.เปียก)

$Y =$ ปริมาตรของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M ที่ใช้ในการไตเตรทจนถึงจุดที่สารละลายเปลี่ยนสี, มิลลิลิตร

$Z =$ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่าง

9.61 = calibration factor

3.3.7 กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility)

ดัดแปลงจากวิธีของ Daramola and Osanyinlusi (2006) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม ใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาดที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหาการละลายของตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างไปเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทส่วนใสใส่ใน Aluminum moisture can ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำ Aluminum moisture can ไปชั่งน้ำหนัก และหาความสามารถในการพองตัวได้โดยนำสตาร์ชส่วนที่

เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการพองตัวของตัวอย่างและความสามารถในการละลายดังนี้

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

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

3.3.8 การวิเคราะห์ความหนืด

วิเคราะห์ความหนืดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว RVA (Rapid Visco Analyzer) เตรียมตัวอย่างสตาร์ชสำหรับการวิเคราะห์จากสูตร

$$S = \frac{86 \times A}{(100 - \%M)}$$

$$W = 25 + (A - S)$$

เมื่อ	S	คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ต้องชั่ง (g)
	A	คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ความชื้น 14% (แทนค่าด้วย 2.5)
	W	คือ น้ำหนักน้ำที่ต้องชั่ง (g)
	%M	คือ ความชื้นในตัวอย่างที่วัดได้ (%)

นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด (RVA) ตามโปรแกรม STD 4 ดังนี้ โดยเริ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนผสมความเร็วรอบ 960 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และควบคุมให้อยู่ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ต่อเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

3.3.9 ลักษณะโครงสร้างผลึก

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วย Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line 1.2: WAXS โดยใส่ตัวอย่างสสารประมาณ 20 มิลลิกรัม ลงในวัสดุใส่ตัวอย่างซึ่งปิดด้วย PI เทปทั้งสองด้าน แล้วนำไปวิเคราะห์กำหนดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ 8 keV ในการวัดรังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวอนนุวัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับสัญญาณ (image plate detector) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร แปรผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ด้วยโปรแกรม OPUS (Bruker, Germany)

3.3.10 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสสาร

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (JSM-6010LV, JEOL Ltd., USA) โดยการนำตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาว 2 หน้า ที่ติดอยู่บนแท่ง aluminum stub จากนั้นนำแท่ง aluminum stub ที่ติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง แล้วนำไปวางในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 - 15 kV และใช้กำลังขยายที่ 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า และบันทึกภาพลงในคอมพิวเตอร์

3.3.11 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (DSC1, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 7 มิลลิกรัม ใส่ลงในถ้วยสแตนเลส ขนาด 60 ไมโครลิตร (Perkin Elmer DCS pan) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เติมน้ำกลั่น ลงไป 28 มิลลิกรัม ปิดฝาด้วยสแตนเลส นำไปอัดปิดฝาให้สนิทด้วยเครื่องปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 - 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำ ให้ Indium เป็นสารมาตรฐานในการสอบเทียบอุณหภูมิ วิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางความร้อนดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_o$) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) โดยใช้โปรแกรมประมวลผล STARsoftware (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.3.12 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 16.0 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

3.4 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.4.1 ผลของความเข้มข้นของซิริกในการผลิตสตาร์ชซิริก

จากการทดลองบ่มสตาร์ชมันสำปะหลังในสารละลายกรดซิริกเข้มข้น 10 - 40% (w/v) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.0 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.0 ชั่วโมง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซิริกที่ใช้แช่สตาร์ชเพิ่มมากขึ้น ทำให้สตาร์ชซิริกที่มีปริมาณ RS ค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซิริกไปถึง 20% จะได้สตาร์ชซิริกที่มีปริมาณ RS สูงที่สุด คือ 68.08% (ตารางที่ 3.1) แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซิริกเพิ่มมากขึ้นอีกเป็น 30 และ 40% กลับส่งผลให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิริกที่ได้จะมีปริมาณลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS ในสตาร์ชซิริก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซิริกที่ใช้ในการบ่มจาก 10 เป็น 20% ทำให้มีรีเอเจนต์ คือกรดซิริกที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ชมากขึ้น ส่งผลให้มีการปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ทำให้เกิดการเกิดการแทนที่และ/หรือเกิดการเชื่อมข้ามของโมเลกุลของซิริกแอนไฮไดรด์กับโมเลกุลสตาร์ชมากขึ้น ซึ่งการแทนที่หรือพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลในการขัดขวางการเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง α -(1, 4), และ α -(1, 6) ของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส ทำให้สตาร์ชซิริกมีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น (Xie and Liu, 2004) แต่การลดลงของปริมาณ RS เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซิริกจาก 20 ไปถึง 40% อาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีกรดซิริกปริมาณมากเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดระยะห่างระหว่างสายของสตาร์ชมากขึ้น และความเกะกะ (steric hindrance) ของโมเลกุลกรดซิริกภายในเม็ดสตาร์ชที่มากเกินไป ซึ่งอาจไปมีผลในการไปขัดขวางไม่ให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชโมเลกุลได้ (Mei, Zhou, Jin, Xu, and Chen, 2015) และ/หรืออาจเกิดจากการที่สตาร์ชโมเลกุลย่อยด้วยสารละลายกรด (acid hydrolysis) ที่ความเข้มข้นที่สูง ส่งผลให้ขนาดของสายสตาร์ชไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยากับกรดซิริก จึงทำให้สตาร์ชมีความสามารถในการต้านทานการย่อยโดยเอนไซม์ลดลง ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Jyothi, Moorthy, Sreekumar et al. (2007) ที่ทำการศึกษาการผลิตสตาร์ชซิริกจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อน ซึ่งพบว่าความสามารถในการย่อย (digestibility) ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสของสตาร์ชซิริกที่เตรียม

ได้จากการใช้สารละลายกรดซิตริกที่ 0.088 โมลต่อโมลของแอนไฮโดรกลูโคสยูนิต มีค่า digestibility น้อยกว่าสตาร์ชซีเตรทที่เตรียมได้จากการใช้สารละลายกรดซิตริกที่ 0.3 และ 0.512 โมลต่อโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสยูนิต และการทดลองของ Mei et al. (2015) ที่ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ระดับที่แตกต่างกัน (10 - 40%) ต่อปริมาณ RDS SDS และ RS ในสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เตรียมได้จากการบ่มสารละลายกรดซิตริกกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก็ให้ผลในลักษณะที่สอดคล้องกันคือการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริกในช่วง 10 - 30% มีผลทำให้ปริมาณ RDS จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีปริมาณ SDS และ RS เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจนถึง 40% ปริมาณ RS ของตัวอย่างจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณ RS ของสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากการใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Citric acid solution (% w/v)	RS content (%)
10	22.69 ± 1.30 a
20	68.08 ± 0.96 d
30	53.82 ± 1.50 c
40	48.67 ± 1.45 b

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.4.2 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ชหลังการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์

ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังตัดแปรพื้นผิวโดยเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส แสดงดังภาพที่ 3.1 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและที่ปลายด้านหนึ่งเป็นลักษณะถูกตัด ซึ่งเป็นบริเวณที่ถือว่าเป็นจุดที่มีความอ่อนแอที่ง่ายต่อการถูกทำลายหรือไวต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ เรียกบริเวณนี้ว่า truncated structure (Valetudie, Colonna, Bouchet, and Gallant, 1993; Yussof, Utra, and Alias, 2013) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวก็ยังคงมีรูปร่างเช่นเดิมไม่เปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชดิบ แต่พบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชในบางเม็ดที่มีรูหรือรอยแตกที่เกิดจากการกัดเซาะด้วยเอนไซม์ และเมื่อสตาร์ชถูกย่อยเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้น ขนาด จำนวน และความลึกของรูหรือรอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกเม็ดสตาร์ชทุกเม็ด แต่จะเกิดขึ้นเพียงบางเม็ดเท่านั้น (ดังภาพที่ 1b และ 1c) ซึ่ง Yussof et al. (2013) ก็ได้รายงานไว้เช่นเดียวกันว่ามีเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังเพียงบางเม็ดเท่านั้นที่มีรูที่เกิดจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์เกิดขึ้น ในขณะที่บางสตาร์ชบางเม็ดก็ยังคงมีลักษณะรูปร่างที่สมบูรณ์เหมือนเดิม

หลังจากถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ ซึ่งการไฮโดรไลซ์นี้จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ช โดยเอนไซม์จะเข้าไปทำลายในตำแหน่ง truncated structure และบริเวณที่อ่อนแอของเม็ดสตาร์ชได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น (Mu, Abegunde, Sun, Deng, and Zhang, 2013) และผลการทดลองของ Puspasari et al. (2011) ที่ได้ศึกษาการย่อยสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าว สตาร์ชสาเก สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่งด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ก็พบว่าเม็ดสตาร์ชมันปะหลัง สตาร์ชสาเก และสตาร์ชมันฝรั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการย่อย ในขณะที่สตาร์ชข้าวโพดเกิดรูที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ ส่วนสตาร์ชข้าวมีรูขนาดเล็ก ๆ เกิดขึ้นหลังผ่านการย่อยเช่นกัน นอกจากนี้ Rocha, Carneiro, and Franco (2010) ก็รายงานว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันเทศ (sweet potato) และสตาร์ชเปรูแครอท (Peruvian carrot) ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสแสดงให้เห็นการถูกทำลายในส่วนผิวด้านนอกของเม็ดสตาร์ช ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเกิดการย่อยกัดเซาะจากพื้นผิวภายนอกของเม็ดสตาร์ช (exocorrossion) และไม่ได้เกิดขึ้นกับสตาร์ชทุกเม็ด

3.4.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบหลังการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์

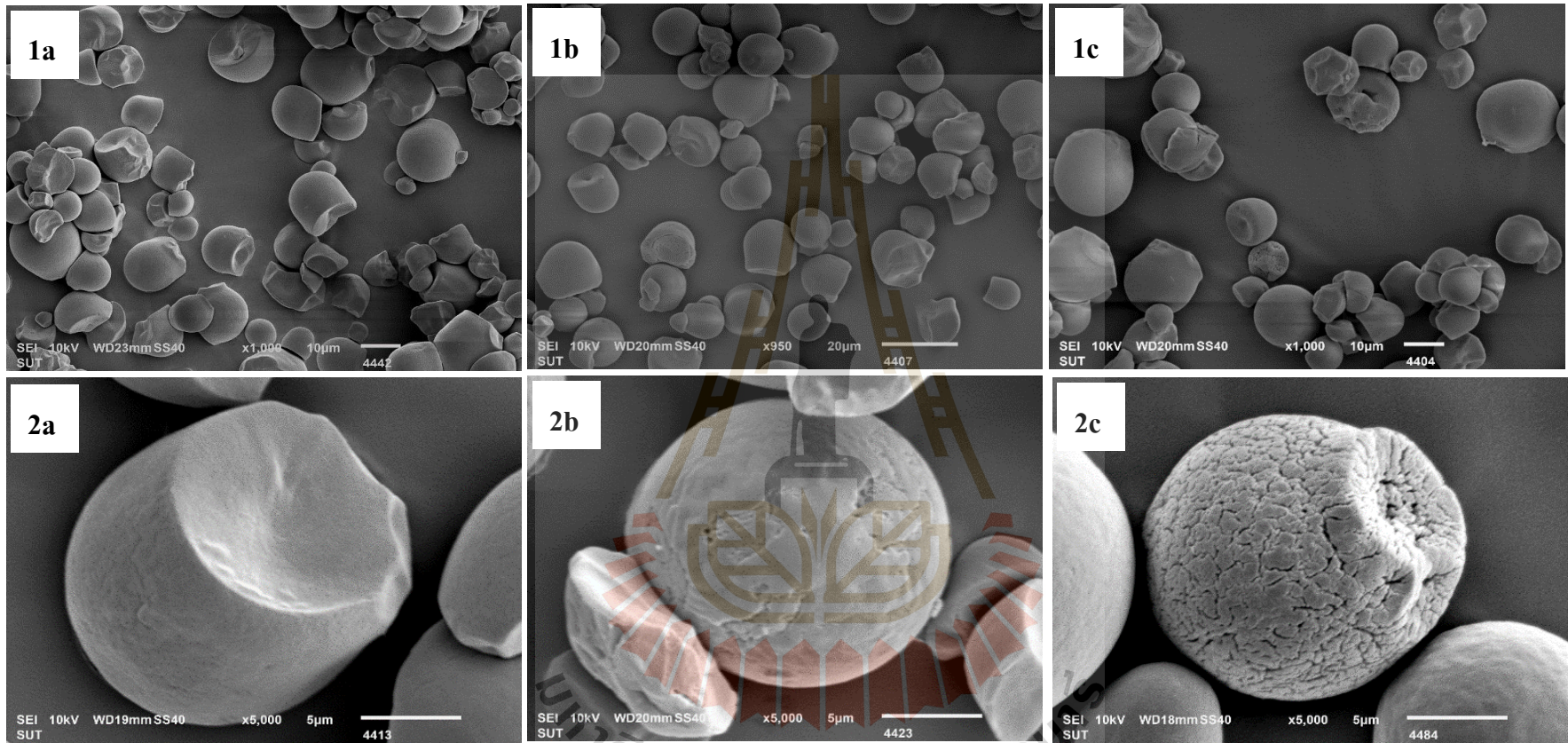
การศึกษาหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่ระยะเวลา 0.5 - 1.0 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าสตาร์ชดิบมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำที่สุด (3.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมสตาร์ช) และภายหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเป็น 4.15 และ 6.34 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมสตาร์ช ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการไฮโดรไลซ์พอลิเมอร์ของกลูโคสภายในโมเลกุลสตาร์ชโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเมื่อระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์นานขึ้นก็จะทำให้โมเลกุลของสตาร์ชถูกย่อยมากขึ้น ซึ่งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสจะไฮโดรไลซ์ที่ตำแหน่งพันธะ 1,4-glycosidase bond ในโมเลกุลของสตาร์ชให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เป็นผลส่งผลให้มีหุรีดิวซ์ที่เกิดจากการสตาร์ชที่ถูกย่อยโดยเอนไซม์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Rocha et al. (2010) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava) มันเทศ (sweet potato) peruvian carrot และมันฝรั่ง (potato) ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าหลังการย่อยด้วยเอนไซม์ สตาร์ชทุกชนิดมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อใช้เวลานานในการย่อยนานมากขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นด้วย และจากการทดลองของ Shariffa, Karim, Fazilah, and Zaidul (2009) ที่ย่อยเม็ดสตาร์ช และสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava) และมันเทศ (sweet potato) ด้วยเอนไซม์ STARGEN 001TH แสดงให้เห็นว่าค่า DE ของทุกตัวอย่างสูงขึ้น เมื่อย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์เป็นระยะเวลานานขึ้น

เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Uthumporn, Zaidul, and Karim (2010) ได้ศึกษาการย่อยเม็ดสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชถั่วเขียว และสตาร์ชสาธู ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ก็พบว่าเมื่อระยะเวลาในการย่อยนานมากขึ้น ค่า DE ก็จะสูงขึ้นด้วยปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว แสดงผลดังตารางที่ 3.1 พบว่าตัวอย่างสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวโดยย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีปริมาณ RS ต่ำกว่าสตาร์ชดิบ (6.34%) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ ปริมาณ RS ก็จะยิ่งลดลงจากสตาร์ชดิบ โดยสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง มีปริมาณ RS เท่ากับ 5.47 และ 4.68% ตามลำดับ เนื่องจากภายหลังการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชหรือรอยแตกเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ช (ดังรูปที่ 3.1) และมีโครงสร้างบางส่วนของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ (Uthumporn et al., 2010) จึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (native tapioca starch) ทำให้เอนไซม์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ RS เข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิก ส่งผลให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมีค่าลดลง

ตารางที่ 3.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

Surface modification time (h)	Reducing sugar ($\mu\text{g}/\text{mg}$ starch)	RS content (%)
Native	3.25 ± 0.33 a	6.34 ± 0.47 c
0.5	4.34 ± 0.58 b	5.23 ± 0.26 b
1.0	6.49 ± 0.63 c	4.45 ± 0.50 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 3.1 ลักษณะพื้นผิวของสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 (1) และ 5,000 (2) เท่า; สตาร์ชมันสำปะหลังดิบก่อน (a) และหลังผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ระยะเวลา 0.5 (b) และ 1.0 ชั่วโมง (c) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

3.4.4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชหลังผ่านการแช่ในสารละลายกรด

จากการศึกษาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของตัวอย่างหลังบ่มในสารละลายกรดซिटริกความเข้มข้น 20% แสดงผลดังตารางที่ 3.3 พบว่าตัวอย่างสตาร์ชที่ถูกตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุมที่ทุกระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม เนื่องจากกรดสามารถแทรกผ่านเข้าภายในเม็ดสตาร์ชผ่านทางรอยแตก/ ช่องที่ผิวของเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซ์พอลิเมอร์ภายในเม็ดสตาร์ชมากขึ้น และเมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่างสตาร์ชในสารละลายกรดซिटริกที่ระยะเวลาต่าง ๆ (1 3 และ 6 ชั่วโมง) พบว่าการแช่ในสารละลายกรดที่ระยะเวลานานขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นทั้งในตัวอย่างควบคุม และตัวอย่างที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว ยกเว้นตัวอย่างควบคุมที่บ่มในสารละลายกรด 1 และ 3 ชั่วโมง ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาการแช่ในแช่นานขึ้นกรดซिटริกสามารถไฮโดรไลซ์สายของสตาร์ชได้ ซึ่ง Menzel (2014) รายงานไว้ว่าถึงแม้กรดซिटริกที่จะเป็นกรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อน แต่ที่ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง (pH 3.5) ก็สามารถทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสสายอะไมโลสและสายอะไมโลเพกตินของสตาร์ชได้ และการทดลองของ Jayakody and Hoover (2002) ก็ได้แสดงให้เห็นว่าผลของการย่อยเม็ดสตาร์ชจากัญพีช (normal maize, waxy maize, amylo maize V และ VII, rice และ oat) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.2 N พบว่าสตาร์ชทุกชนิดมีระดับการไฮโดรไลซ์สูงขึ้นที่ระยะเวลาในการย่อยที่นานขึ้น

ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวหลังผ่านการแช่ในสารละลายกรดซिटริก

Surface modification time (h)	Conditioning time (h)	Reducing sugar ($\mu\text{g}/\text{mg}$ starch)
1.0		11.48 \pm 0.26 f
0.5	6.0	7.21 \pm 0.69 d
native (control)		4.29 \pm 0.20 ab
1.0		9.35 \pm 0.50 e
0.5	3.0	5.96 \pm 0.72 c
native (control)		3.35 \pm 0.22 a
1.0		7.93 \pm 1.20 d
0.5	1.0	4.79 \pm 0.30 b
native (control)		3.31 \pm 0.35 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.4.5 ผลของการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสตัดแปรพื้นผิวก่อนการผลิตสตาร์ชซีเตรท

จากการเตรียมสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบด้วยวิธีทางเคมีก่อนหน้านี้ ดังหัวข้อที่ 3.4.1 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซिटริกที่ทำให้ได้สตาร์ชซีเตรทที่มีปริมาณ RS สูงที่สุด (68.08%) คือ ความเข้มข้นที่ 20% (w/v) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และจากการศึกษาผลของการเตรียมสตาร์ชซีเตรทโดยใช้การตัดแปรพื้นผิวก่อนการตัดแปรทางเคมี โดยใช้สภาวะในการผลิตเช่นเดียวกับการใช้วิธีทางเคมี คือการนำสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์มาก่อนไปบ่มในสารละลายกรดซिटริกเข้มข้น 20% (w/v) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ 0.5 และ 1.0 ชั่วโมงมีปริมาณ RS เท่ากับ 48.27 และ 27.71% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว โดยอาจเป็นผลมาจากการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ทำให้เกิดร่องหรือรอยแตกที่ผิวของเม็ดสตาร์ช (ดังภาพที่ 3.1) และเมื่อนำไปแช่ในสารละลายกรดก็จะทำให้กรดเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้มากกว่าสตาร์ชดิบ จึงเกิดการย่อยสลายพอลิเมอร์ของสตาร์ช (acid hydrolysis) ให้ได้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์สายสั้น ๆ (short-chain oligosaccharide) ซึ่งอาจทำให้มีขนาดที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยากับกรดซिटริก จึงทำให้สตาร์ชซีเตรทที่ได้ต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้ลดลง แต่เมื่อลดระยะเวลาในการแช่บ่มสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวในสารละลายกรดลงเป็น 3 และ 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ RS ของสตาร์ชซีเตรทที่ได้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาการแช่สตาร์ชในสารละลายกรดซिटริกสั้นลง ทำให้เกิดการย่อยสลายพอลิเมอร์ของสตาร์ชจากกรดน้อยลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของตัวอย่างหลังการบ่มในสารละลายกรดซिटริก (ตารางที่ 3.3) จึงอาจทำให้ขนาดของพอลิเมอร์สตาร์ชที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยากับกรดซिटริกได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ BC (ตารางที่ 3.4) ที่บ่งบอกว่าการแช่สตาร์ชในสารละลายกรดซिटริกที่ระยะเวลาน้อยกว่าจะมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดซिटริกกับสตาร์ชได้มากกว่าการแช่ในสารละลายกรดเป็นเวลานาน เมื่อพิจารณาการบ่มในสารละลายกรดที่ระยะเวลาเดียวกันจะเห็นว่าสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว 0.5 ชั่วโมงจะมีปริมาณ RS มากกว่าที่ได้จากสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว 1.0 ชั่วโมง ในทุกระยะเวลาการบ่มในสารละลายกรด ซึ่งอาจเป็นผลของการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่มากกว่า เนื่องจากเมื่อสตาร์ชถูกตัดแปรพื้นผิวโดยการ ใช้เอนไซม์ย่อยเป็นเวลานานขึ้น ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกกัดเซาะที่พื้นผิวมากขึ้น (ดังภาพที่ 3.1) ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีพื้นที่ผิวที่จะให้สารละลายแทรกซึมเข้าไปภายในได้มากขึ้น สตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวที่ 1.0 ชั่วโมง จึงถูกไฮโดรไลซ์มากกว่าสตาร์ชตัดแปรพื้นผิว 0.5 ชั่วโมง ซึ่งก็ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยากับกรดซिटริกได้ด้วย โดยทำให้สตาร์ชตัดแปรพื้นผิว 1.0 ชั่วโมงเกิดปฏิกิริยากับกรดซिटริกได้น้อยสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวที่ 0.5 ชั่วโมง แต่ในตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นการบ่มสตาร์ชดิบ (ไม่ถูกตัดแปรพื้นผิว) กับสารละลายกรดซिटริกที่ระยะเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ RS ไม่แตกต่างกันอย่างมี

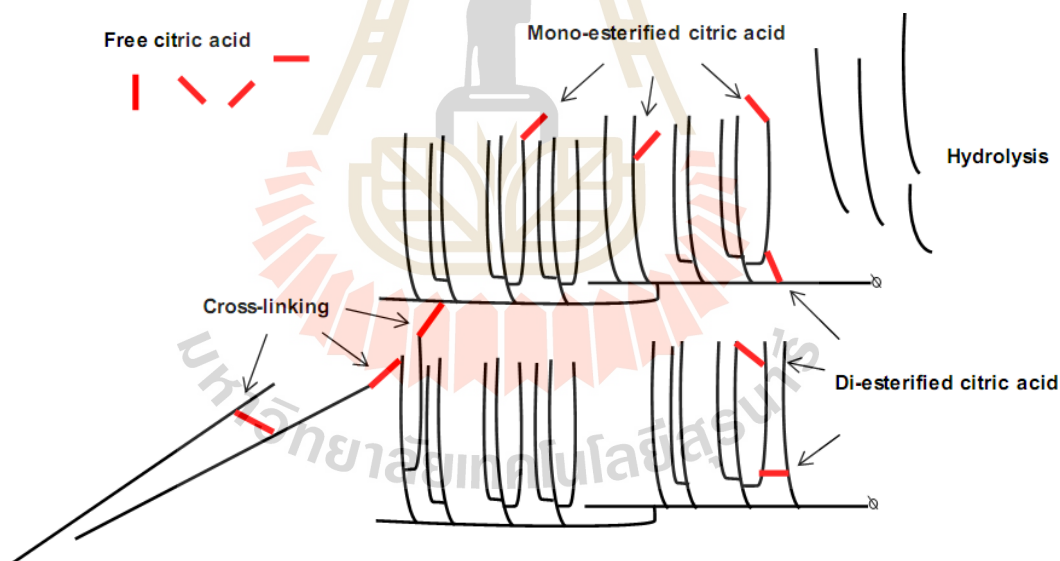
นัยสำคัญทางสถิติ เนื่องมาจากในกระบวนการทำแห้งภายหลังจากกระบวนการแช่บ่มในสารละลายกรดซิตริกที่ใช้อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่บ่มสตาร์ชในสารละลายกรดซิตริก คือที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง) และในระหว่างกระบวนการทำแห้งที่นานเช่นนี้ก็เปรียบเสมือนเป็นการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรดซิตริกเช่นเดียวกับกระบวนการก่อนหน้านี้อันส่งผลให้กรดซิตริกยังคงเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้ต่อไป จนกระทั่งสตาร์ชเกิดการพองตัวและดูดซับสารละลายกรดซิตริกเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้เต็มที่ เมื่อนำไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส จึงทำให้สตาร์ชที่ผ่านกระบวนการแช่ที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน (1 - 6 ชั่วโมง) มีปริมาณ RS ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการใช้วิธีการตัดแปรสตาร์ชโดยใช้วิธีร่วมระหว่างการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงก่อน แล้วนำไปตัดแปรด้วยวิธีทางเคมี คือการนำไปแช่ในสารละลายกรด 1.0 ชั่วโมง ทำให้ได้สตาร์ชชนิดที่มีปริมาณ RS (75.39%) สูงกว่าที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีทางเคมีเพียงอย่างเดียว (69.39%) ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมีความขรุขระมีรูหรือมีพื้นผิวที่เพิ่มมากกว่าสตาร์ชดิบ จึงทำให้กรดซิตริกสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในเม็ดของสตาร์ชได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณกรดซิตริกที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับสตาร์ชมากกว่าสตาร์ชชนิดที่ดิบได้จึงสามารถต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากกว่า

3.4.6 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริก (Bound citrate content; BC) กับโมเลกุลสตาร์ช

ปริมาณกรดซิตริกที่ถูกเกาะเกี่ยวกับ โมเลกุลสตาร์ชแสดงถึงปริมาณของกรดซิตริกที่จับอยู่กับโมเลกุลของสตาร์ชทั้งหมด โดยการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจนทำให้โมเลกุลของน้ำภายในกรดซิตริกหลุดออกไป เกิดเป็นซิตริกแอนไฮไดรด์ จากนั้นกรดซิตริกที่อยู่ในรูปซิตริกแอนไฮไดรด์จึงจะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Chowdary and Enturi, 2011; Menzel, 2014; Xie and Liu, 2004; Xie, Liu, and Cui, 2006) ทำให้เกิดพันธะ mono-esterified citric acid เมื่อหมู่คาร์บอกซิลของกรดซิตริกจำนวน 1 หมู่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสหรือหมู่คาร์บอกซิลของกรดซิตริกจำนวน 2 หมู่เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์กลูโคสที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดเป็นพันธะ di-esterified citric acid ซึ่งเกิดได้ทั้งภายในสตาร์ชสายเดียวกัน หรือเกิดระหว่างสายสตาร์ช 2 สาย หากเป็นกรดซิตริกเกิดปฏิกิริยากับกลูโคสที่อยู่บนสตาร์ชคนละสาย จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสายสตาร์ช (cross-linking) (Bleier and Klaushofer, 1983) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งการผลิตสตาร์ชชนิดที่ 1 กรดซิตริกสามารถเกิดปฏิกิริยากับสตาร์ชในแบบสุ่มได้ทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งการเกิดขึ้นของทั้งสองพันธะจะช่วยให้สตาร์ชชนิดที่ 1 สามารถต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้น

จากการศึกษาปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริก ปริมาณ mono และ di-esterified citric acid ของตัวอย่างสตาร์ชที่ผลิตได้ทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าตัวอย่างที่ปริมาณการเกาะ

เกี่ยวของกรดซิตริกสูงที่สุด (12.35 %BC) คือ สตาร์ชซีเทรทที่ได้จากการสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยเอนไซม์ 0.5 ชั่วโมง และการแช่ด้วยสารละลายกรด 1 ชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของปริมาณ RS คือ เป็นผลมาจากการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในกระบวนการตัดแปรพื้นผิว ทำให้เกิดรูหรือรอยแตกที่ผิวของเม็ดสตาร์ช กรดจึงเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ง่าย ส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้มากกว่า ทำให้มีปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกมากกว่า ส่วนสตาร์ชซีเทรทที่ได้จากการสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 1 ชั่วโมง และผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรด 6 ชั่วโมง มีปริมาณการเกาะเกี่ยวน้อยที่สุด (7.9 %BC) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชถูกไฮโดรไลซ์จากเอนไซม์ และโมเลกุลของสตาร์ชที่ถูกไฮโดรไลซ์ได้มากจากการถูกแช่ในสารละลายกรดเป็นเวลานาน ซึ่งดูได้จากผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ตารางที่ 3.3) และเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลของปริมาณ BC ก็พบว่ากรณีที่โมเลกุลของสตาร์ชถูกไฮโดรไลซ์มาก ๆ จะทำให้สตาร์ชเกิดปฏิกิริยากับกรดซิตริกได้น้อยขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากภายหลังการไฮโดรไลซ์ทำให้สายสตาร์ชมีขนาดที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับโมเลกุลของกรดซิตริก



ภาพที่ 3.2 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับ โมเลกุลสตาร์ช
ที่มา: Menzel (2014)

ตารางที่ 3.4 ปริมาณ RS และการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับ โมเลกุลสตาร์ชของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยเอนไซม์และแช่ในสารละลายกรดซิตริกในระยะเวลาต่าง ๆ

Surface modification time (h)	Conditioning time (h)	RS content (%)	BC content (%)	Mono-esterified citric acid (%)	Di-esterified citric acid (%)
1.0		27.71 ± 0.78 a	7.92 ± 0.52 a	2.82 ± 0.21 b	5.10
0.5	6.0	48.27 ± 1.10 b	10.05 ± 0.30 b	2.63 ± 0.19 b	7.42
native (control)		68.08 ± 0.96 c	11.90 ± 0.10 d	1.81 ± 0.25 a	10.09
1.0		62.58 ± 1.01 c	11.05 ± 0.10 d	2.76 ± 0.16 b	8.29
0.5	3.0	70.51 ± 1.24 e	12.01 ± 0.53 d	3.20 ± 0.35 c	8.81
native (control)		68.08 ± 1.27 e	11.84 ± 0.19 d	1.86 ± 0.21 a	9.98
1.0		65.50 ± 1.01 d	11.26 ± 0.05 c	3.32 ± 0.40 c	7.94
0.5	1.0	75.39 ± 1.67 f	12.35 ± 0.15 e	3.08 ± 0.41 c	9.27
native (control)		69.39 ± 1.78 ef	11.82 ± 0.15 d	1.78 ± 0.22 a	10.04

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.4.7 กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility)

กำลังการพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 2.21 กรัมต่อกรัมสตาร์ช (ตารางที่ 3.5) ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในแกรนูลของสตาร์ชดิบมีความหนาแน่นมากจากพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้น้อย ส่งผลให้สตาร์ชดิบมีการพองตัวต่ำ เมื่อพิจารณาการพองตัวของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชดิบที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยเอนไซม์ พบว่าสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์สามารถพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรพื้นผิว (สตาร์ชดิบ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ ส่งผลให้พื้นผิวของสตาร์ชบางส่วนที่ถูกทำลายไป หรือเม็ดสตาร์ชถูกกัดเซาะที่ผิวเกิดเป็นรู หรือรอยแตก หรือเกิดการกัดกร่อนที่ผิวของเม็ดสตาร์ช รวมถึงการแช่ในสารละลายกรดก็อาจทำให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกทำลายไป หรือเกิดการทำลายสายของสตาร์ชภายในเม็ดสตาร์ชเนื่องจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ซึ่งการถูกทำลายในกระบวนการต่าง ๆ ส่งผล

ให้ความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชลดลง ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกผ่านเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น และสตาร์ชที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ 1 ชั่วโมงก่อนนำไปแช่ในสารละลายกรด 6 ชั่วโมง ยังสามารถพองตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ BC ที่มีค่าน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสภาวะดังกล่าวเกิดการเชื่อมข้ามค้ำที่สุด จึงส่งผลให้ด้านการพองตัวได้น้อยกว่าตัวอย่างอื่น สอดคล้องกับการทดลองของ Koo, Lee, and Lee (2010) ที่ศึกษาสตาร์ชข้าวโพดที่เชื่อมข้ามด้วยสารผสมระหว่าง STMP/STPP ในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งพบว่าสตาร์ชเชื่อมข้ามที่มีระดับการเชื่อมข้ามที่มากขึ้น (degree of cross-linking) จะมีความสามารถในการพองตัวลดลง

จากการทดลองคุณสมบัติในการละลายของสตาร์ชซิเตรท พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบสามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้ไม่แตกต่างจากสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ทุกสภาวะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง ส่งผลให้น้ำไม่สามารถที่จะเข้าไปละลายสตาร์ชออกมาได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Agboola, Akingbala, and Oguntimein (1991) ที่รายงานว่า การละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้องของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปรได้จากอนุพันธ์ของซิเตรทไม่แตกต่างจากสตาร์ชดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่สตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมีความสามารถในการละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้มากกว่าสตาร์ชดิบ และสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชดิบ อาจเป็นผลมาจากความเสียหายของเม็ดสตาร์ชจากกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ที่ทำให้เกิดรูหรือการแตกที่ผิวของเม็ดสตาร์ช จึงส่งผลให้สตาร์ชละลายกรดซิเตรทเกิดการไฮโดรไลซ์โครงสร้างบางส่วนของสตาร์ช หรือรัดกร่อนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชบางส่วน (Menzel, 2014) ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายจึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้จากบริเวณพื้นผิวรอบนอกที่ถูกกัดเซาะออกไปได้ง่ายขึ้น โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนจึงสามารถละลายออกมาได้ โดยผลการทดลองของ Jyothi, Moorthy, and Rajasekharan (2007) รายงานว่าค่าการละลายไม่มีความสัมพันธ์กับระดับการแทนที่ของอนุพันธ์ของซิเตรทในสตาร์ชมันสำปะหลัง

3.4.8 คุณสมบัติด้านความหนืด

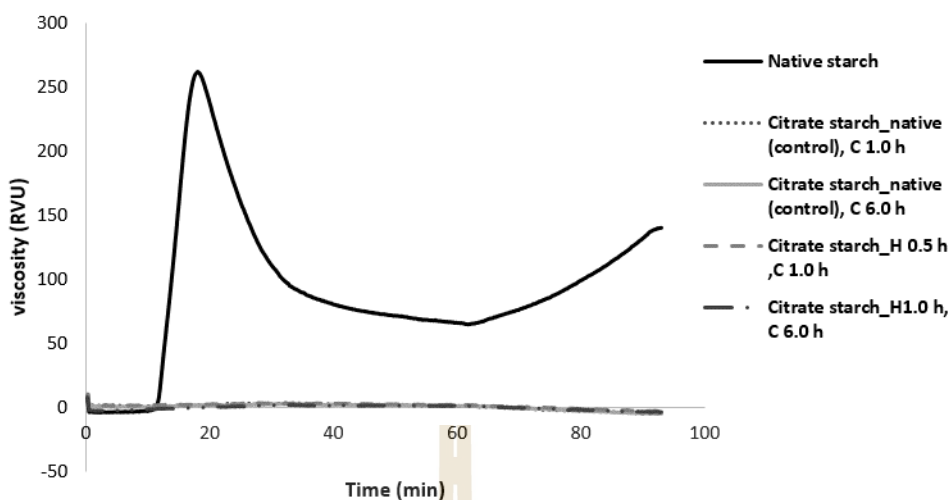
จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้จากทุกสภาวะไม่มีความหนืด (ภาพที่ 3.3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชซิเตรทไม่เกิดเจลาตินในเซชันขึ้นระหว่างการทดสอบด้วยเครื่อง RVA โดยสามารถอธิบายได้ว่าการเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชกับกรดซิเตรท ส่งผลทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Xie and Liu, 2004) ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเคลื่อนที่ได้น้อยลงและลดการจับกัน (interactions) ระหว่างสตาร์ชโมเลกุลและน้ำ ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยากจึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชด้านการพองตัว และไม่เกิด

เจลาตินในเซชัน (Jyothi, Moorthy, and Rajasekharan, 2007; Majzoobi, Radi, Farahnaky, Jamalain, and Tongdang, 2009; Yussof et al., 2013) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังการพองตัวของตัวอย่าง (ดังตารางที่ 3.5) ที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทสามารถพองตัวได้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากผลกับการทดลองของ Xie and Liu (2004) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชซีเตรทที่ผลิตจาก normal corn starch กับ control (ตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีกรดซิตริก) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสตาร์ชซีเตรททุกตัวมี peak viscosity ที่บนราบและมีค่าความหนืดต่ำกว่า control และผลการศึกษาของ Shin et al. (2007) ที่ตัดแปรรูปสตาร์ชข้าวด้วยกรดซิตริก ก็พบว่าสตาร์ชตัดแปรรูปไม่แสดงพิกของความหนืดเช่นกัน

ตารางที่ 3.5 ความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรท

Surface modification time (h)	Conditioning time (h)	Swelling power (g/g)	Solubility (%)
native	-	2.21 ± 0.16 a	1.57 ± 0.28 a
1.0		4.27 ± 0.18 d	4.16 ± 0.23 b
0.5	6.0	3.73 ± 0.13 c	3.64 ± 0.12 b
native (control)		3.31 ± 0.96 b	2.26 ± 0.81 a
1.0		3.95 ± 0.15 c	3.41 ± 0.08 b
0.5	3.0	3.64 ± 0.21 c	3.50 ± 0.09 b
native (control)		3.17 ± 1.27 b	2.18 ± 0.90 a
1.0		3.95 ± 0.40 c	3.54 ± 0.25 b
0.5	1.0	3.63 ± 0.39 c	3.36 ± 0.28 b
native (control)		3.24 ± 1.78 b	2.28 ± 0.76 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 3.3 โพรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านกระบวนการสถานะต่าง ๆ; N คือ สตาร์ชที่ไม่ดัดแปรพื้นผิว, H คือ สตาร์ชดัดแปรพื้นผิวที่เวลาต่าง ๆ และ C คือ ระยะเวลาบ่มในสารละลายกรด

3.4.9 โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบของสตาร์ชซิเตรท

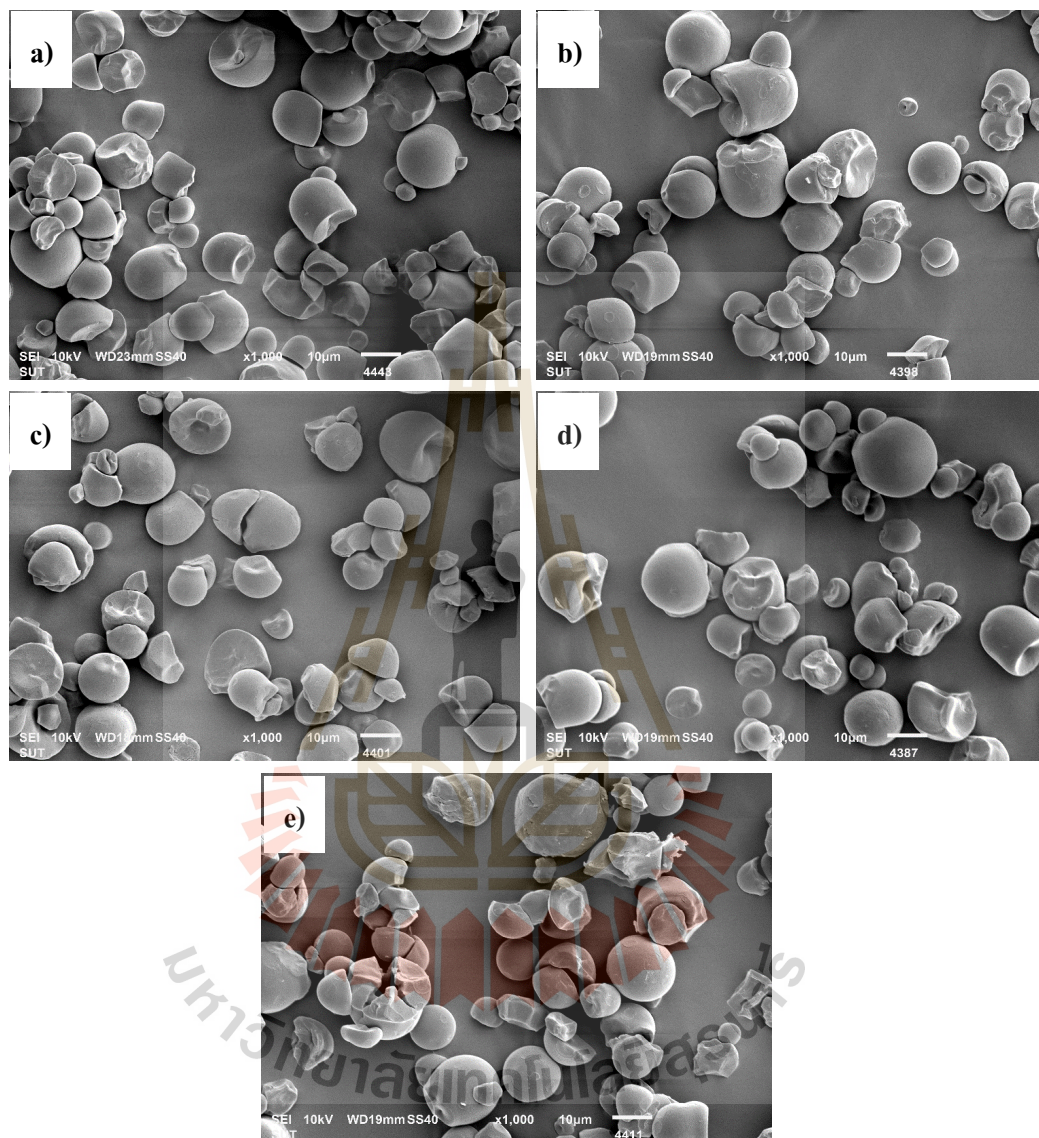
จากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชซิเตรทได้จากกระบวนการผลิตที่สถานะต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3.4 และ 3.5 พบว่าลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างซิเตรทไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเม็ดสตาร์ชดิบ แต่จะพบว่ามีกรยุบตัวของเม็ดสตาร์ชเข้าไปภายในที่เกิดขึ้นกับสตาร์ชบางเม็ดเท่านั้น ซึ่งจะพบได้ในบริเวณที่เป็นส่วนตัดของเม็ดสตาร์ช (turcatures) (ภาพที่ 3.4 (c) และ (e)) โดยอาจเกิดจากในขั้นตอนที่สตาร์ชดูดซับสารละลายกรดเข้าไปในขั้นตอนการแช่บ่มจนเกิดการพองตัว (swelling) และยุบตัวลงเมื่อทำแห้ง เนื่องจากกรดเข้าไปทำลายบริเวณศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช (hilum) ซึ่งเป็นจุดที่ง่ายต่อการทำลายด้วยเอนไซม์และกรด ทำให้เกิดเป็นรูหรือโพรงได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ๆ ของเม็ดสตาร์ช (Chabot, Allen, and Hood, 1978; Fuwa, Sugimoto, Tanaka, and Glover, 1978) จึงทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชลดลง และส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการยุบตัวลง (Shin et al., 2007; Xie et al., 2006) ในการทดลองของ Xie et al. (2006) ก็ได้รายงานผลจากศึกษาลักษณะทางกายภาพของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพด (normal corn starch) สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn starch) และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (high amylose corn starch) พบว่าลักษณะเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไปหลังจากบ่มด้วยกรดซิเตรก และเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซิเตรทบางเม็ดจะมีลักษณะรูปร่างที่นุ่มลงไปคล้ายกับโดนัท (Doughnut shaped) จะพบได้ในเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับการทดลองของ Kim et al. (2008) ได้ศึกษาการผลิตสตาร์ชกลูตาเรทจากสตาร์ชลูกเดือย และรายงานว่

สตาร์ชกุกูตารทยังคงมีรูปร่างคล้ายกับตัวอย่างควบคุมแต่มีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่ถูกทำลายโดยสารที่เคมีที่ใช้ เช่นเดียวกับ Koo et al. (2010) ที่ได้ผลิตสตาร์ชเชื่อมข้ามจากสตาร์ชข้าวโพดด้วยส่วนผสมระหว่าง STTP/STMP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และพบว่าเม็ดสตาร์ชเชื่อมข้ามมีรูปร่างและลักษณะเปลี่ยนไปโดยมีผิวที่ขรุขระและยุบตัวเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสตาร์ช ดิบ และผลการศึกษากการผลิตสตาร์ชซิเตรทจาก Tacca starch (Adebiyi, Omojola, Orishadipe, Afolayan, and Olalekan, 2011) และ Icacina starch (Omojola, Orishadipe, Afolayan, and Adebiyi, 2012) เพื่อใช้เป็น ส่วนประกอบของยา พบว่าสตาร์ชดังกล่าวมีรูปร่างลักษณะคล้ายสตาร์ชดิบแต่มีบางเม็ดที่ถูกทำลาย บางส่วนเช่นกัน Ma, Chang, Yu, and Stumborg (2009) ได้ทำการศึกษาลักษณะเม็ดสตาร์ชของ สตาร์ชถั่ว (pea starch) และสตาร์ชข้าว (rice starch) ที่ผ่านการผลิตเป็นสตาร์ชซิเตรท และได้ รายงานไว้ว่าเม็ดสตาร์ชของทั้งสตาร์ชถั่วและข้าวไม่ถูกทำลายในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

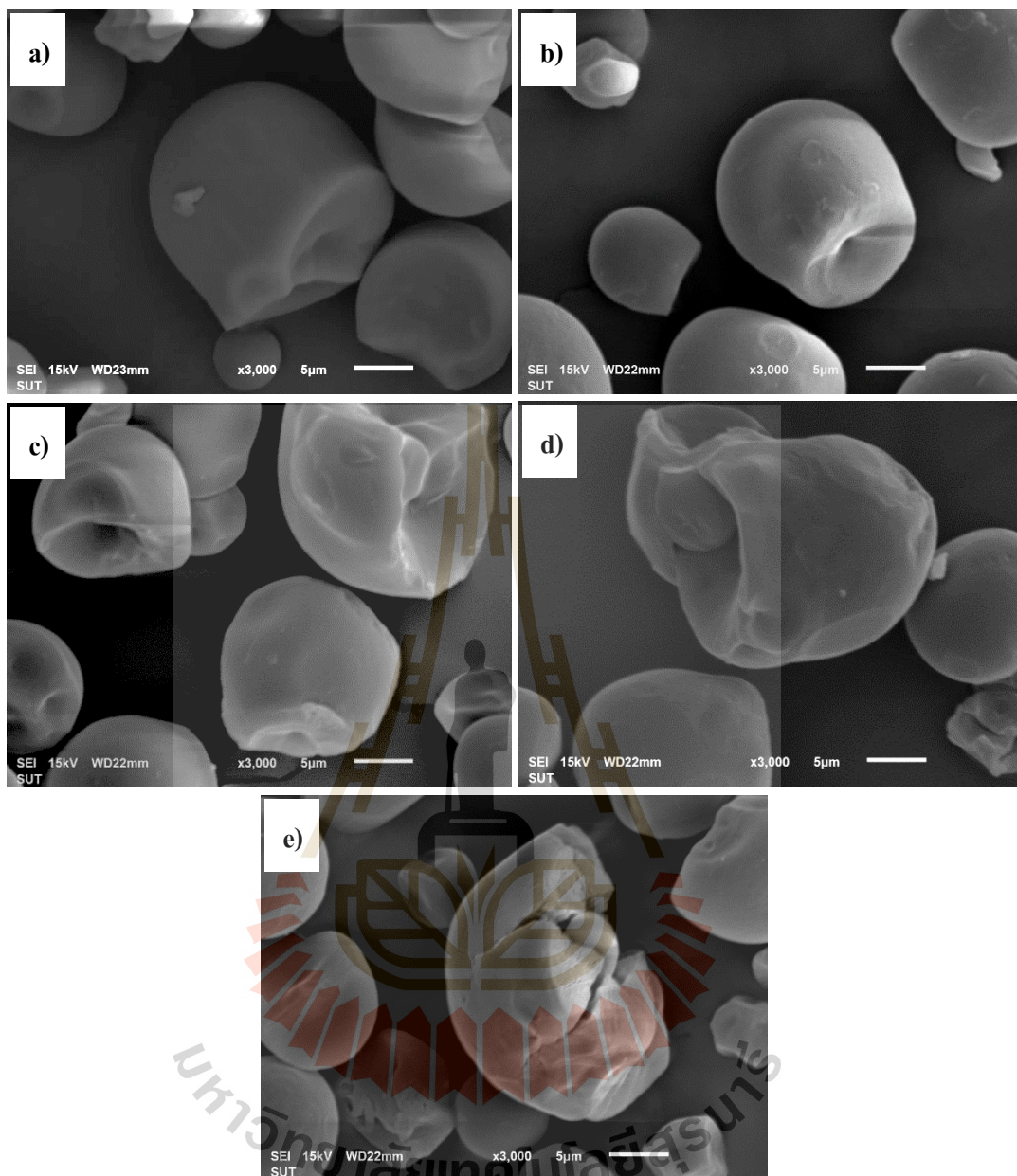
3.4.10 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรท

จากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของตัวอย่างด้วยเทคนิค WAXS พบว่าตัวอย่างทั้งหมดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ซึ่ง X-diffraction pattern ยังคงแสดง ตำแหน่งของพีกคู่ (double peak) ที่ 2θ ที่ 17° และ 18° และพีกเดี่ยว (single peak) ที่ 15° 20° และ 23° (ดังภาพที่ 3.5) ซึ่งเป็นลักษณะผลึกของโครงสร้างแบบ A และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลึก (relative crystallinity) ของตัวอย่างทั้งหมดพบว่าสตาร์ชดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ ที่เวลาต่าง ๆ มีปริมาณผลึกไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากเอนไซม์เข้าไปย่อยสตาร์ชทั้งในส่วน ออสันฐานและส่วนผลึกในสัดส่วนปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสตาร์ชซิเตรทที่ได้ทั้งหมดมีปริมาณ ผลึกต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ซึ่งเป็นผลจากกรดซิตริกที่เข้าไปทำลายโครงสร้างภายใน สตาร์ชซึ่งเกิดได้ทั้งในส่วนออสันฐานและส่วนของผลึก อีกทั้งยังมีผลจากความร้อนในการทำ ปฏิกิริยาที่อาจไปทำลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ช และผลจากการเกิดการแทนที่และ/ หรือพันธะ เชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริกที่ส่งผลให้ความเป็นผลึกภายในเม็ดสตาร์ชลดลง (Kim et al., 2008; Xie et al., 2006) ซึ่งการทดลองของ Reddy and Yang (2010) ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ สตาร์ชเชื่อมข้ามด้วยกรดซิตริกมีปริมาณผลึกลดลงจากตัวอย่างควบคุม (17%) เหลือ 14% อย่างไรก็ตามความเป็นผลึกของสตาร์ชซิเตรททั้งหมดก็จะพบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชที่ ย่อยด้วยเอนไซม์ 1.0 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในสารละลายกรด 6.0 ชั่วโมงมีค่า relative crystallinity สูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่กรดสามารถเข้าไปในเม็ดสตาร์ชจากรูหรือรอยแตกที่ผิวของเม็ด สตาร์ชที่เกิดจากการย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากกว่าตัวอย่างอื่น และไปย่อยส่วนที่เป็นออสันฐาน มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก จึงส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น (Gunaratne and Corke, 2007; Kwon, Chung, Shin, and Moon, 2005) หรือไปทำลายส่วนผลึกที่มีความเป็นระเบียบไม่มากนัก (Singh,

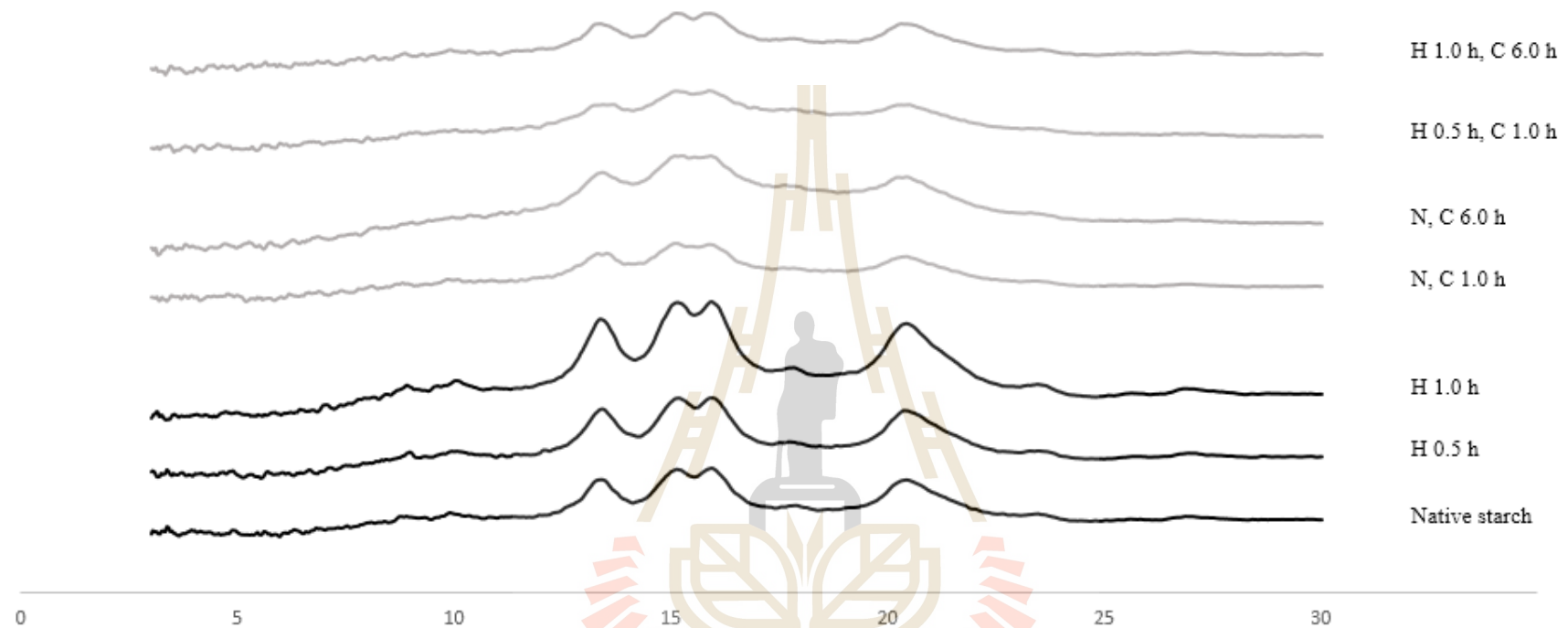
Singh, Ezekiel, and Kaur, 2011) และเมื่อนำมาคำนวณในเชิงสัดส่วน (Relative crystallinity) จึงทำให้ได้ค่า relative crystallinity ที่สูงกว่าตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทตัวอย่างอื่น



ภาพที่ 3.4 ลักษณะแกรนูลของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากสถานะต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า; (a) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; (b) สตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชดิบที่แช่ในสารละลายกรดซิตริก 1.0 ชั่วโมง; (c) สตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชดิบที่แช่ในสารละลายกรดซิตริก 6.0 ชั่วโมง; (d) สตาร์ชตัดแปรพื้นผิว 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริก 1.0 ชั่วโมง และ (e) สตาร์ชดิบตัดแปรพื้นผิว 1.0 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริก 6.0 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.5 ลักษณะแกรนูลของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากสถานะต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 3,000 เท่า; (a) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ; (b) สตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชดิบที่แช่ในสารละลายกรดซิตริก 1.0 ชั่วโมง; (c) สตาร์ชซีเตรทจากสตาร์ชดิบที่แช่ในสารละลายกรดซิตริก 6.0 ชั่วโมง; (d) สตาร์ชตัดแปรพื้นผิว 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริก 1.0 ชั่วโมง และ (e) สตาร์ชดิบตัดแปรพื้นผิว 1.0 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริก 6.0 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรท; เมื่อ — คือ สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ — คือ สตาร์ชซีเตรท N คือ สตาร์ชที่ไม่ตัดแปรพันผิว; H คือ สตาร์ชตัดแปรพันผิวที่เวลาต่าง ๆ และ C คือ ระยะเวลาบ่มในสารละลายกรด

ตารางที่ 3.6 ปริมาณผลึก (Relative crystallinity) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสภาวะต่าง ๆ

Sample	Surface modification time (h)	Conditioning time (h)	Relative crystallinity (%)
Native starch	Native		29.1 ± 1.28 e
	0.5	-	30.1 ± 0.29 e
	1.0		28.6 ± 1.17 e
Citrate starch	0.5		15.2 ± 0.76 b
	native (control)	1	19.4 ± 0.42 c
	1.0		21.4 ± 1.46 d
	native (control)	6	13.4 ± 0.61 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.4.11 คุณสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชที่ทำการตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังทั้งที่ไม่ผ่าน และผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ มีค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการเจลาติไนเซชัน (ΔH) ไม่แตกต่างกัน ซึ่ง ΔH เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานความร้อนที่ใช้ในสลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ช เพื่อการทำลาย double helice ทำให้สตาร์ชสามารถคือน้ำเข้าไปจนสามารถพองตัวและเจลาติไนซ์ได้ (Cooke and Gidley, 1992) จากการทดลองนี้แสดงว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชดิบ และสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวด้วยเอนไซม์ยังคงมีความสมบูรณ์ไม่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณผลึกในตารางที่ 3.6

สำหรับสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสภาวะต่าง ๆ พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน (T_0) อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_p) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_c) และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) ลดลง ซึ่งการที่ T_0 , T_p และ ΔH ลดลง เนื่องจากการถูกทำลายจากเอนไซม์ในกระบวนการตัดแปรพื้นผิว หรือจากกรดในกระบวนการแช่ หรือความร้อนจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไปทำให้สตาร์ชสูญเสียความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสตาร์ช (Lee, Shin, Kim, Choi, and Moon, 2011; Liu et al., 2014) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ลดลง ดังตารางที่ 3.6 ซึ่ง Chatakanonda, Varavinit, and Chinachoti (2000) ก็รายงานค่า ΔH ของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรให้เกิดการเชื่อมข้ามมีค่าลดต่ำลง และจากผลการทดลองของ Xie and Liu (2004) ก็พบว่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการ

เจลาตินในเซชันของสตาร์ชซีเทรทที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพดและ Hylon VII มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน โดยสตาร์ชซีเทรทจากสตาร์ชข้าวโพดลดลงจาก 6.7 J/g เป็น 0.4 J/g และสตาร์ชซีเทรทจาก Hylon VII ลดลงจาก 15.6 J/g เป็น 3.0 J/g ตามลำดับ นอกจากนี้งานวิจัยของ Mei et al. (2015) ยังรายงานว่าเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.096 ค่า ΔH ของตัวอย่างลดลงจาก 10.53 J/g (สตาร์ชดิบ) เหลือเพียง 0.86 J/g แต่จากการทดลองนี้จะเห็นว่าสตาร์ชซีเทรทที่ได้จากสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวด้วย เอนไซม์ 1.0 ชั่วโมง และแช่กรดซิตริก 6.0 ชั่วโมงมีค่า ΔH เท่ากับ 5.68 J/g ซึ่งมีค่าสูงกว่าสตาร์ชซีเทรทตัวอย่างอื่น ๆ (1.10 - 1.26 J/g) ซึ่งอาจเกิดจากการสายของสตาร์ชที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมา เกิดเป็นโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (double helix) ทำให้เกิดการสร้างสายสตาร์ชที่เป็นเกลียวคู่ระหว่าง อะมิโลส-อะมิโลส และอะมิโลส-อะมิโลเพคตินที่ถูกไฮโดรไลซ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำละลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ช (Jayakody and Hoover, 2002) ซึ่งก็สอดคล้องกับปริมาณผลึกมากกว่าสตาร์ชซีเทรทตัวอย่างอื่น (ดังตารางที่ 3.6) อาจเพราะการเกิดถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งกรดจะเข้าจึงทำให้มาจากการสายของสตาร์ชที่ถูกไฮโดรไลซ์มาเกิดปฏิกิริยากรดซิตริกได้น้อยกว่าสตาร์ชซีเทรทที่ได้จากสภาวะอื่น ๆ (ดังตารางที่ 3.4) ทำให้เหลือโครงสร้างที่เป็น double helix มากกว่า จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำละลายส่วนของผลึกที่เหลืออยู่ เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการเจลาตินในเซชัน

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสภาวะต่าง ๆ

Sample	Surface modification time (h)	Conditioning time (h)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	Enthalpy (J/ g)
Native starch	native	-	65.40 ± 0.10 c	70.51 ± 0.24 c	82.28 ± 0.22 e	13.24 ± 0.71 c
	0.5	-	66.87 ± 0.29 d	70.78 ± 0.24 c	81.86 ± 0.25 de	13.62 ± 1.32 c
	1.0	-	67.47 ± 0.06 d	71.16 ± 0.10 c	81.79 ± 0.37 d	13.94 ± 0.52 c
Citrate starch	0.5	1	58.23 ± 0.19 a	66.06 ± 0.12 a	76.19 ± 0.46 a	1.23 ± 0.07 a
	native (control)		59.52 ± 0.42 b	67.76 ± 0.35 b	78.81 ± 0.51 c	1.26 ± 0.15 a
	1.0	6	59.71 ± 1.09 b	66.55 ± 0.76 a	76.53 ± 0.89 a	5.68 ± 1.26 b
	native (control)		59.46 ± 0.85 b	67.49 ± 0.32 b	77.91 ± 0.34 b	1.10 ± 0.07 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)



3.5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชซีเตรทที่ระดับ 10 - 40% (w/v) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด 20% (w/v) เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดในการใช้บ่มสตาร์ชที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.0 ชั่วโมง และ โดยการตัดแปรพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชด้วยเอนไซม์ก่อนการตัดแปรทางเคมี พบว่าการบ่มสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวกับสารละลายกรดความเข้มข้น 20% (w/v) ทำให้ปริมาณ RS ที่ได้มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชซีเตรทที่ได้โดยวิธีทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อลดระยะเวลาการบ่มในการทดลองเหลือ 3.0 และ 1.0 ชั่วโมง จะทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การผลิตสตาร์ชซีเตรทโดยใช้วิธีตัดแปรร่วมกันยังทำให้ตัวอย่างที่ได้สามารถละลายและพองตัวได้มากกว่าตัวอย่างที่ตัดแปรด้วยวิธีทางเคมีเพียงอย่างเดียว และยังทำให้คุณสมบัติทางความร้อน และปริมาณผลึกเปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากการตัดแปรด้วยวิธีทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ไม่ทำให้โปรไฟล์ความหนืด และโครงสร้างผลึกแตกต่างจากสตาร์ชซีเตรทที่ได้จากการตัดแปรทางเคมีเพียงอย่างเดียว

3.6 รายการอ้างอิง

- Adebisi, A. B., Omojola, M. O., Orishadipe, A., Afolayan, M., and Olalekan, D. (2011). Tacca starch citrate-a potential pharmaceutical excipient. **Archives of Applied Science Research**. 3(6): 114-121.
- Agboola, S., Akingbala, J., and Oguntimein, G. (1991). Production of low substituted cassava starch acetates and citrates. **Starch/Stärke**. 43(1): 13-15.
- Aggarwal, P., and Dollimore, D. (1998). A thermal analysis investigation of partially hydrolyzed starch. **Thermochimica Acta**. 319(1): 17-25.
- Bleier, J., and Klaushofer, H. (1983). Versuche zur aufklärung der struktur von citratstärken. 2. mitteilung. Strukturmodelle einzelner citronensäureester der amylose und des amylopektins. **Starch/Stärke**. 35(1): 12-15.
- Chabot, J. F., Allen, J. E., and Hood, L. F. (1978). Freeze-etch ultra structure of waxy maize and acid hydrolyzed waxy maize starch granules. **Journal of Food Science**. 43(3): 727-730.
- Chatakanonda, P., Varavinit, S., and Chinachoti, P. (2000). Relationship of gelatinization and recrystallization of cross-linked rice to glass transition temperature. **Cereal Chemistry**. 77(3): 315-319.

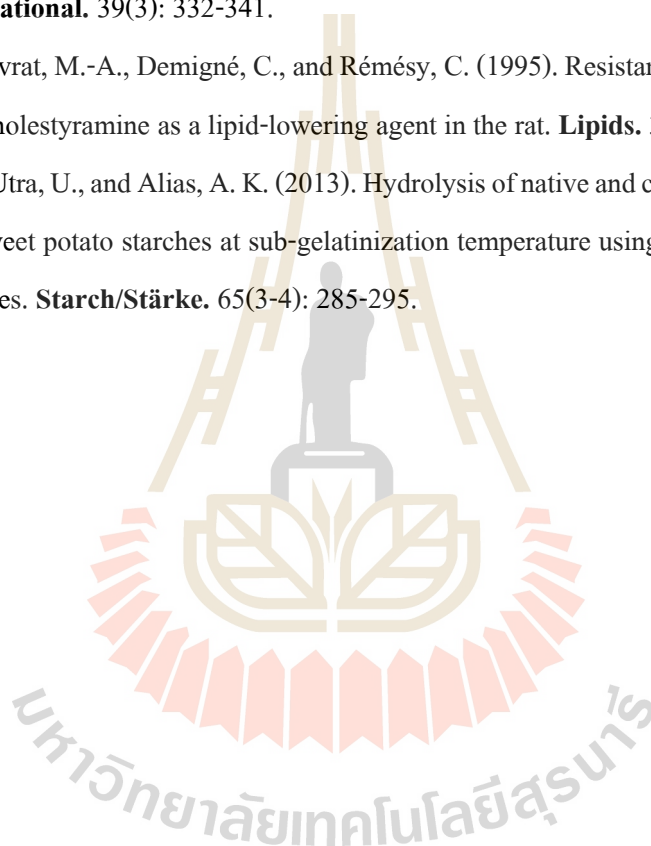
- Chen, Y., Huang, S., Tang, Z., Chen, X., and Zhang, Z. (2011). Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of α -amylase and glucoamylase. **Carbohydrate Polymers**. 85(1): 272-275.
- Chowdary, K. P. R., and Enturi, V. (2011). Enhancement of dissolution rate and formulation development of efavirenz tablets employing starch citrate-a new modified starch. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**. 1(5): 119-123.
- Cooke, D., and Gidley, M. J. (1992). Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate Research**. 227: 103-112.
- Daramola, B., and Osanyinlusi, S. (2006). Investigation on modification of cassava starch using active components of ginger roots (*Zingiber officinale* Roscoe). **African Journal of Biotechnology**. 5(10): 917-920.
- De Deckere, E., Kloots, W. J., and Van Amelsvoort, J. (1993). Resistant starch decreases serum total cholesterol and triacylglycerol concentrations in rats. **The Journal of Nutrition**. 123(12): 2142-2151.
- Englyst, H. N., Kingman, S., and Cummings, J. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**. 46: 33-50.
- Ferguson, L. R., Tasman-Jones, C., Englyst, H., and Harris, P. J. (2000). Comparative effects of three resistant starch preparations on transit time and short-chain fatty acid production in rats. **Nutrition and Cancer**. 36(2): 230-237.
- Frans, B., and Johannes, B. D. (1975). Preparation of redispersible hydrophobic starch derivatives. US Patent No. 3,891,624.
- Fuwa, H., Sugimoto, Y., Tanaka, M., and Glover, D. (1978). Susceptibility of various starch granules to amylases as seen by scanning electron microscope. **Starch/Stärke**. 30(6): 186-191.
- Gunaratne, A., and Corke, H. (2007). Influence of prior acid treatment on acetylation of wheat, potato and maize starches. **Food Chemistry**. 105(3): 917-925.
- Hashimoto, N., Ito, Y., Han, K. H., Shimada, K., Sekikawa, M., Topping, D. L., Bird, A. R., Noda, T., Chiji, H., and Fukushima, M. (2006). Potato pulps lowered the serum cholesterol and triglyceride levels in rats. **Journal of Nutritional Science and Vitaminology**. 52(6): 445-450.

- Jayakody, L., and Hoover, R. (2002). The effect of lintnerization on cereal starch granules. **Food Research International**. 35(7): 665-680.
- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N., and Rajasekharan, 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(10): 1964-1972.
- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N., Sreekumar, J. N., and Rajasekharan, K. N. (2007). Studies on the properties of citrate derivatives of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starch synthesized by microwave technique. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 87(5): 871-879.
- Kim, M. J., Choi, S. J., Shin, S. I., Sohn, M. R., Lee, C. J., Kim, Y., Cho, W., and Moon, T. W. (2008). Resistant glutarate starch from adlay: Preparation and properties. **Carbohydrate Polymers**. 74(4): 787-796.
- Klaushofer, H., Berghofer, E., and Steyrer, W. (1978). Stärkecitrate-Produktion und anwendungs-technische Eigenschaften. **Starch/Stärke**. 30(2): 47-51.
- 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(6): 619-625.
- Kwon, S-K., Chung, K. M., Shin, S. I., and Moon, T. W. (2005). Contents of indigestible fraction, water solubility, and color of pyrodextrins made from waxy sorghum starch. **Cereal Chemistry**. 82(1): 101-104.
- Le Leu, R. K., Hu, Y., and Young, G. P. (2002). Effects of resistant starch and nonstarch polysaccharides on colonic luminal environment and genotoxin-induced apoptosis in the rat. **Carcinogenesis**. 23(5): 713-719.
- Lee, C. J., Shin, S. I., Kim, Y., Choi, H. J., and Moon, T. W. (2011). Structural characteristics and glucose response in mice of potato starch modified by hydrothermal treatments. **Carbohydrate Polymers**. 83(4): 1879-1886.
- Liu, H., Liang, R., Antoniou, J., Liu, F., Shoemaker, C. F., Li, Y., and Zhong, F. (2014). The effect of high moisture heat-acid treatment on the structure and digestion property of normal maize starch. **Food Chemistry**. 159: 222-229.
- Ma, X., Chang, P. R., Yu, J., and Stumborg, M. (2009). Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites. **Carbohydrate Polymers**. 75(1): 1-8.

- Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., and Tongdang, T. (2009). Physico-chemical properties of phosphoryl chloride cross-linked wheat starch. **Iranian Polymer Journal**. 18: 491-499.
- Mei, J-Q., Zhou, D-N., Jin, Z-Y., Xu, X-M., and Chen, H-Q. (2015). Effects of citric acid esterification on digestibility, structural and physicochemical properties of cassava starch. **Food Chemistry**. 187: 378-384.
- Menzel, C. (2014). **Starch structures and their usefulness in the production of packaging materials**. Ph.D. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.
- Menzel, C., Olsson, E., Plivelicc, T. S., Anderssona, R., Johanssonb, C., Kuktaited, R., Järnströmb, L., Koch, K. (2013). Molecular structure of citric acid cross-linked starch films. **Carbohydrate Polymers**. 96(1): 270-276.
- Mikulíková, D., Masár, Š., and Kraic, J. (2008). Biodiversity of legume health-promoting sarch. **Starch/Stärke**. 60(8): 426-432.
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**. 31(3): 426-428.
- Mu, T. H., Abegunde, O. K., Sun, H. N., Deng, F. M., and Zhang, M. (2013). Physicochemical characterization of enzymatically hydrolyzed heat treated granular starches. **Starch/Stärke**. 65(11-12): 893-901.
- Mun, S.-H., and Shin, M. (2006). Mild hydrolysis of resistant starch from maize. **Food Chemistry**. 96(1): 115-121.
- Narkrugsa, W. (1993). Study on the feasibility of starch citrate production by microwave technique. In **Proceedings of the 31st Kasetsart University Annual Conference: Home Economics, Science, Engineering, Agro-Industry, Economics and Business Administration, Education, Humanities, Natural Resources and Environmental Economics** (pp. 27-284). Bangkok, (Thailand): Kasetsart University.
- 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 Biology Journal of North America**. 3(1): 11-16.

- Puspasari, F., Nurachman¹, Z., Noer, A. S., Radjasa, K. O., van der Maarel, M. J. E. C., and Natalia, D. (2011). Characteristics of raw starch degrading α -amylase from *Bacillus aquimaris* MKSC 6.2 associated with soft coral *Sinularia* sp. **Starch/Stärke**. 63(8): 461-467.
- Rahman, M. S. (2001). Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. **Drying Technology**. 19(1): 1-13.
- Ranhotra, G., Gelroth, J., and Glaser, B. (1996). Effect of resistant starch on blood and liver lipids in hamsters. **Cereal Chemistry**. 73(2): 176-178.
- Reddy, N., and Yang, Y. (2010). Citric acid cross-linking of starch films. **Food Chemistry**. 118(3): 702-711.
- Rocha, T. d. S., Carneiro, A. P. d. A., and Franco, C. M. L. (2010). Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. **Food Science and Technology (Campinas)**. 30(2): 544-551.
- Sajilata, M., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch—a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 5(1): 1-17.
- Shariffa, Y., Karim, A., Fazilah, A., and Zaidul, I. (2009). Enzymatic hydrolysis of granular native and mildly heat-treated tapioca and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature. **Food Hydrocolloids**. 23(2): 434-440.
- Shin, S. I., Lee, C. J., Kim, D., Lee, H. A., Cheong, J. J., Chung, K. M., Bail, M. Y., Park, C. S., Kim, C. H., 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(1): 24-33.
- Singh, S., Singh, N., Ezekiel, R., and Kaur, A. (2011). Effects of gamma-irradiation on the morphological, structural, thermal and rheological properties of potato starches. **Carbohydrate Polymers**. 83(4): 1521-1528.
- Uthumporn, U., Zaidul, I. S., and Karim, A. (2010). Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Food and Bioproducts Processing**. 88(1): 47-54.
- Valetudie, J. C., Colonna, P., Bouchet, B., and Gallant, D. J. (1993). Hydrolysis of tropical tuber starches by bacterial and pancreatic α -amylases. **Starch/Stärke**. 45(8): 270-276.

- Wong, J. M., De Souza, R., Kendall, C. W., Emam, A., and Jenkins, D. J. (2006). Colonic health: fermentation and short chain fatty acids. **Journal of Clinical Gastroenterology**. 40(3): 235-243.
- Xie, X. S., and Liu, Q. (2004). Development and physicochemical characterization of new resistant citrate starch from different corn starches. **Starch/Stärke**. 56(8): 364-370.
- Xie, X. S., Liu, Q., and 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.
- Younes, H., Levrat, M.-A., Demigné, C., and Rémésy, C. (1995). Resistant starch is more effective than cholestyramine as a lipid-lowering agent in the rat. **Lipids**. 30(9): 847-853.
- Yusof, 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(3-4): 285-295.



บทที่ 4

ผลของการฉายรังสีซินโครตรอนต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช มันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรท

4.1 บทคัดย่อ

การศึกษาการฉายรังสีซินโครตรอนของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรท โดยฉายที่ระดับพลังงาน 0 - 5,000 mJ/cm³ ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทมีปริมาณ RS เริ่มต้น 6.35 และ 68.1% ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างถูกฉายรังสีซินโครตรอน ปริมาณ RS ของทั้งสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ถูกฉายรังสีที่ 5,000 mJ/cm³ มีปริมาณ RS ไม่แตกต่างกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ถูกฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อสตาร์ชมันสำปะหลังดิบถูกฉายรังสีที่ 100 และ 500 mJ/cm³ ปริมาณ RS ลดลงเป็น 2.80 และ 2.78% ตามลำดับ แต่เมื่อฉายรังสีที่ 1,000 และ 5,000 mJ/cm³ ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นเป็น 4.42 และ 5.87% ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารังสีซินโครตรอนสามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายสตาร์ชในสตาร์ชดิบได้ ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่ากำลังการพองตัวที่ลดลง ในขณะที่ตัวอย่างอื่น ๆ มีค่าการพองตัวเพิ่มขึ้นหลังผ่านการฉายรังสี และการฉายรังสียังทำให้ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบละลายในน้ำได้ดีขึ้น และทำให้ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบลดลง แต่สตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ยังไม่แสดงโปรไฟล์ของความหนืดเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี นอกจากนี้รังสีซินโครตรอนยังไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อรูปร่างของเม็ดสตาร์ช และลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง แต่ส่งผลให้ปริมาณของผลึกของตัวอย่างลดลง

4.2 บทนำ

การฉายรังสีอาหารถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการถนอมรักษาอาหารให้มีอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยฉายพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังอาหารในปริมาณของรังสีไอออไนซ์ และระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการในการฉายรังสีและต้องปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยยังคงคุณค่าทางโภชนาการ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหารไว้ได้ การฉายรังสีให้กับอาหารโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่ปนเปื้อนมากับอาหาร ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อม

เสียน้ำของอาหาร ช่วยชะลอการสุกของผลไม้ ทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง และช่วยปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในอาหารบางชนิด นอกจากนี้การฉายรังสียังมีข้อดีคือสามารถฉายรังสีไปยังอาหาร โดยตรงหรืออาหารที่อยู่ในภาชนะบรรจุก็ได้ ทำให้ไม่เกิดการปนเปื้อนภายหลังการฆ่าเชื้อ และจัดว่าเป็นกระบวนการที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับอาหารที่ได้รับการฉายรังสี แต่อย่างไรก็ตามการฉายรังสีอาจทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของอาหารได้ในหลายลักษณะ เช่น ทำให้โมเลกุลที่มีขนาดยาวของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืชแตกตัวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ส่งผลให้ผักและผลไม้บางชนิดอ่อนนุ่มหรือสูญเสียคุณภาพของเนื้อสัมผัสหลังผ่านการฉายรังสี (Kader, 1986) ทำให้ไขมันเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไขมันและเกิดการเหม็นหืน (rancidity) ขึ้นได้ และการใช้รังสีในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติที่เรียกว่า burnt feathers เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังทำให้โปรตีนบางส่วนเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติและทำลายวิตามินบางชนิด (Feng et al., 2016) อย่างไรก็ตามการฉายรังสีก็ไม่สามารถกระทำได้กับอาหารทุกประเภท เช่นเดียวกับการถนอมรักษาอาหารด้วยวิธีอื่น ๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นกับอาหารที่ผ่านการฉายรังสีไว้ 2 ประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยตรงคือ พลังงานจากรังสีที่ฉายให้แก่อาหารจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมี โดยอาจทำให้โมเลกุลนั้นอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และการเปลี่ยนแปลงทางอ้อม ซึ่งเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำเนื่องมาจากรังสี (radiolytic products) ไปทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารอื่น ๆ ภายในอาหาร (Rosenthal, 1992)

De Kerf, Mondelaers, Lahorte, Vervaet, and Remon (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติในการแตกตัว (disintegration properties) ของสตาร์ชข้าวโพด มันฝรั่ง และข้าวโพดที่ผ่านการบวนการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่ผ่านการฉายรังสีเอ็กซ์ (X-ray) และอิเล็กตรอนบีมที่ระดับพลังงานต่าง ๆ (10 50 และ 100 kGy) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mw, weight-average molecular weight) ของทุกตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าต่ำกว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และเมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้กับตัวอย่างมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของตัวอย่างลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นนี้ทั้งกับตัวอย่างที่ผ่านการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์และอิเล็กตรอนบีม นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสียังสามารถช่วยเพิ่มการละลายของตัวอย่างสตาร์ช เช่นเดียวกับการทดลองของ Henry, Costa, and Aymes-Chodur (2010) ที่ฉายรังสีแกมมาสตาร์ชคัดแปรทางเคมี (Cationic และ Anionic starch) และสตาร์ชมันฝรั่ง แล้วพบว่าการฉายรังสี ทำใหตัวอย่างสตาร์ชทั้งหมดสามารถละลายได้ดีขึ้น

Rombo, Taylor, and Minnaar (2001) ได้ทำการฉายรังสีแกมมาให้แก่ฟลาวัวร์ข้าวโพด และ ถั่วแดง (kidney bean) โดยปริมาณรังสีที่ใช้ในการทดลอง คือ 0 2.5 5 7.5 และ 10 kGy โดยได้ ศึกษาความหนืดของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อตัวอย่างได้รับการฉาย รังสี ความหนืดมีค่าลดลง และการลดลงของความหนืดมีมากขึ้น เมื่อปริมาณรังสีแกมมาที่ฉาย ให้กับตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้รังสียังมีผลต่อการย่อย (starch digestibility) โดยที่ฟลาวัวร์ ข้าวโพดที่ได้รับรังสีแกมมาที่ 2.5 kGy มีค่า starch digestibility สูงกว่าฟลาวัวร์ข้าวโพดดิบ (0 kGy) แต่เมื่อฟลาวัวร์ข้าวโพดดิบได้รับการฉายรังสีแกมมาในปริมาณสูงขึ้นไประดับ 5 - 10 kGy ค่า starch digestibility ลดลงและมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ได้รับรังสีแกมมา และสำหรับฟลาวัวร์ ถั่วแดงก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ตัวอย่างที่ได้รับรังสีแกมมา 2.5 kGy มีค่า starch digestibility เพิ่มขึ้น จากฟลาวัวร์ถั่วแดงดิบ (0 kGy) และลดลงต่ำเมื่อระดับปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มระหว่าง 5 - 10 kGy แต่ ยังคงมีค่าสูงกว่าฟลาวัวร์ถั่วแดงดิบ (0 kGy) และเมื่อนำข้าวโพด และถั่วแดงที่ผ่านการทำให้สุกไป ฉายรังสีแกมมา พบว่าที่ระดับปริมาณรังสีที่ 2.5 kGy ค่า starch digestibility เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ ไม่ได้รับรังสีแกมมา และจะลดลงเมื่อตัวอย่างได้รับรังสีแกมมาในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งลดลงต่ำกว่า ตัวอย่างควบคุม (0 kGy) จากการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของฟลาวัวร์ข้าวโพดและถั่ว (bean flour) ที่ได้รับการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 0 5 10 20 และ 40 kGy นั้นพบว่ารังสีแกมมาสามารถ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างได้ โดยการเพิ่มปริมาณรังสีแกมมาที่ฉายใน ฟลาวัวร์ถั่ว ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาติไนเซชัน (onset temperature, T_o) และอุณหภูมิสูงสุดของ การเกิดเจลลาติไนเซชัน (peak temperature, T_p) สูงขึ้น แต่ช่วงอุณหภูมิเจลลาติไนเซชัน (gelatinisation temperature, $T_p - T_o$) ลดลง และเมื่อระดับปริมาณรังสีแกมมาที่ฉายให้ตัวอย่างสูงขึ้น พลังงานเอน ทาลปีของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (endothermic gelatinisation enthalpy, ΔH) ก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน สำหรับฟลาวัวร์ข้าวโพด พบว่าเมื่อตัวอย่างได้รับการรังสีแกมมา จะทำให้ค่า T_o ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ รับรังสีแกมมา แต่ค่า T_p และ $T_p - T_o$ มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสีแกมมา และค่า ΔH ของ ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับ 5 และ 20 kGy ก็มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสีแกมมา (Rombo, Taylor, and Minnaar, 2004) นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 0 2 4 6 8 และ 10 kGy ต่อคุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากเมล็ด amaranth ที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน 2 สาย พันธุ์ คือ Hy 030 (*Amaranthus hypochondriacus* L.) และ Tibet Yellow (*Amaranthus paniculatus* L.) พบว่าสตาร์ชที่ได้จากทั้ง 2 สายพันธุ์ มีค่า T_o , T_p and T_c ไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉาย รังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการฉายรังสีไม่มีผลต่อ ΔH ของตัวอย่างสตาร์ชจาก grain amaranth ทั้ง 2 สายพันธุ์ (Kong, Kasapis, Bao, and Corke, 2009)

Pietranera and Narvaiz (2001) รายงานว่ารังสีแกมมาทำให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวโพด และมันสำปะหลังลดลง และยังทำให้ความหนืดของพุดดิ้งที่ใช้สตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมัน

ลำปะหลังเป็นส่วนประกอบลดลงเช่นกัน สำหรับการฉายรังสีแกมมาให้กับ agar - agar และ kappa carrageenan พบว่าการฉายรังสีทำให้ตัวอย่างทั้งคู่มิมีความหนืดลดลงจากตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสี อีกทั้งยังทำให้ค่า gel strength ของตัวอย่างลดลงอีกด้วย ส่วนการทดลองของ Falade, Ighravwe, and Ikoyo (2011) พบว่าการฉายรังสีแกมมาให้กับหัวของ sweet potato (*Ipomea batatas* (L) Lam) และ yam (*Dioscorea rotundata*, *Dioscorea alata*) แล้ววัดความหนืดของฟลาว์ที่ได้จากตัวอย่างที่ฉายและไม่ฉายรังสี เมื่อปริมาณรังสีที่ฉายเพิ่มขึ้นจาก 0 0.15 1.0 3.0 และ 5.0 kGy พบว่าความหนืดของตัวอย่าง sweet potato ลดลงดังนี้ 57.54 53.17 33.88 28.08 และ 23.75 RVU ตามลำดับ แต่สำหรับการฉายรังสีให้กับ *Dioscorea alata* yam flour สายพันธุ์ต่าง ๆ พบว่าการฉายรังสีทำให้ความหนืดของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปดังนี้ สายพันธุ์ TDr 02/ 00012 มีค่าความหนืดเท่ากับ 78.58 73.84 11.38 45.75 และ 60.79 RVU เมื่อฉายรังสีที่ระดับ 0 0.15 1.0 3.0 และ 5.0 kGy, TDr 03/ 00196 มีค่าความหนืดเท่ากับ 99.38 114.79 78.13 117.92 และ 140.84 RVU และ TDr 97/ 00632 มีค่าความหนืดเท่ากับ 11.5 23.8 98.33 12.06 และ 69.58 RVU และความหนืดของ *Dioscorea alata* yam flour สายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ได้รับการฉายรังสีที่ระดับ 0 0.15 1.0 3.0 และ 5.0 kGy ส่งผลให้ความหนืดมีค่าเปลี่ยนไปดังนี้ สายพันธุ์ TDa 98/ 01176 มีค่าความหนืดเท่ากับ 45.79 60.29 57.63 42.13 และ 86.96 RVU ตามลำดับ สายพันธุ์ TDa 00/ 00194 มีค่าความหนืดเท่ากับ 189.67 99.37 65.13 100.25 และ 86.29 RVU และสายพันธุ์ TDa 01/ 00390 มีค่าความหนืดเท่ากับ 95.29 76.88 164.38 63.75 และ 76.75 RVU ตามลำดับ

การศึกษาโครงสร้างโมเลกุลและคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพด (corn starch) เมื่อฉายรังสีแกมมาให้แก่สตาร์ชข้าวโพด (corn starch) ที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ 2 10 และ 50 kGy พบว่าค่าการพองตัว (swelling factor) ของสตาร์ชลดลงเมื่อได้รับรังสีในระดับที่สูงขึ้น และมีการสูญเสียของอะมิโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีทำให้เกิดแตกหักของโมเลกุลอะมิโลสกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง (low molecular weight) นอกจากนี้จากการศึกษาความเป็นผลึกโดยใช้ X-ray diffractometer พบว่าแป้งข้าวเจ้าธรรมชาติและที่ผ่านการฉายรังสีมีรูปแบบการจะเรียงตัวของผลึกเป็นชนิด A (A-type diffraction pattern) แต่แป้งข้าวโพดที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าความเป็นผลึกลดลงเมื่อได้รับรังสีในระดับที่สูงขึ้น การฉายรังสียังทำให้ความหนืดและอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้งลดลง และรังสียังมีผลต่อประมาณ RDS SDS และ RS อีกด้วย โดยเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ฉายจะทำให้แป้งมีปริมาณ RDS และ RS เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ SDS ลดลง (Chung and Liu, 2009)

ผลจากการฉายรังสีจากไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าการฉายรังสีไมโครเวฟทำให้รูปแบบผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งเปลี่ยนแปลงจากชนิด B เป็นลักษณะผลึกชนิด A แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลึกใน

สตาร์ชมันสำปะหลัง (Lewandowicz, Fornal, and Walkowski, 1997) และต่อมาในปี 2000 ได้มีการทดลองฉายรังสีไมโครเวฟให้กับสตาร์ชจากข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นผลของการฉายรังสีไมโครเวฟต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างว่า การฉายรังสีไมโครเวฟทำให้ความหนืดของตัวอย่างสตาร์ชทุกชนิดในการทดลองลดลง และยังทำให้ T_0 และ T_p ของตัวอย่างสูงขึ้น ส่วนค่า ΔH ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟ แต่ไม่มีผลต่อลักษณะผลึกของตัวอย่าง และการฉายรังสีไมโครเวฟยังส่งผลให้ปริมาณผลึกของสตาร์ชข้าวสาลี และข้าวโพดลดลง แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลึกของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และลักษณะของผลึกของสตาร์ชทุกชนิดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟ (Lewandowicz, Jankowski, and Fornal, 2000)

Henry et al. (2010) ได้ศึกษาผลของอิเล็กตรอนบีมที่มีต่อสตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชตัดแปรทางเคมี (แคตไอออนิก และแอนไอออนิกสตาร์ช) พบว่าการละลายเพิ่มของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีที่ให้แกตัวอย่างสูงขึ้น (25 75 และ 150 kGy) เนื่องจากรังสีทำให้เกิดการแตกหักของสายสตาร์ช ซึ่งส่งผลทำให้แป้งมีขี้เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สตาร์ชละลายน้ำได้ดีขึ้น จากการศึกษาของ Hu, Huang, Yin, Zi, and Wen (2011) พบว่าสตาร์ชสาลีที่ได้รับการฉายรังสีด้วยอิเล็กตรอนบีมจะมีค่าความหนืด T_p และ $T_c - T_0$ ลดลงเมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้แกตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 4.4 kGy น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างก็มีค่าลดลงหลังจากได้รับการฉายรังสีเช่นกัน นอกจากนี้ Pimpa et al. (2007) ก็ได้ศึกษาคุณสมบัติของสตาร์ชสาหลูหลังผ่านการฉายรังสีด้วยอิเล็กตรอนบีมในระดับ 10 ถึง 30 kGy พบว่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชสาหลูลดลงเมื่อระดับของการฉายรังสีสูงขึ้น ความแข็งแรงของเจลมีค่าสูงขึ้นเมื่อสตาร์ชได้รับรังสีที่ระดับ 10 และ 15 kGy และการฉายรังสียังทำให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสีในระดับที่สูงขึ้น ในขณะที่การพองตัว และน้ำหนักโมเลกุลมีค่าลดลงหลังจากได้รับการฉายรังสี

จากงานวิจัยที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น จะเห็นว่าคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของสตาร์ชจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับการฉายรังสี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ชนิดของรังสี ปริมาณรังสี และชนิดของสตาร์ช ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชชีเตรทที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานที่แตกต่างกัน

4.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.3.1 การเตรียมสตาร์ชชีเตรท

เตรียมสตาร์ชชีเตรทโดยตัดแปลงจากวิธีของ Klaushofer, Berghofer, and Steyrer (1978) เตรียมสารละลายกรดซิตริกให้มีความเข้มข้น 20% (w/v) ปรับ pH เป็น 3.5 ด้วย NaOH ความเข้มข้น

10 M และปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 50 มิลลิลิตร ผสมสารละลายกรดซัลฟิวริก 50 มิลลิลิตร กับ สตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 50 กรัมในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ความชื้นของสตาร์ชให้มีความชื้นอยู่ในช่วง 5 - 6% (w/w) จากนั้นบดตัวอย่างให้ละเอียด แล้วจึงนำไปทำปฏิกิริยาในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำ DI จนกระทั่งมีอยู่ในช่วง pH 6.00 - 7.00 เพื่อกำจัดเอากรดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกจากสตาร์ช แล้วนำไปทำให้แห้งและบดตัวอย่าง แล้วเก็บตัวอย่างที่ได้ไว้ในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

4.3.2 การฉายรังสีซินโครตรอน

การศึกษาการฉายรังสีซินโครตรอนให้แก่ตัวอย่าง ณ สถาบันวิจัยรังสีซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line 6a: Deep X-ray Lithography (DXL) โดยนำสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชซีเตรทไปอัดเป็นเม็ดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางเรียงบนแผ่นกระจกขนาด 10×10 เซนติเมตร แล้วปิดทับด้วย PI (polyimide) เทป แล้วนำไปฉายรังสีซินโครตรอนที่มีย่านพลังงานรังสีเอกซ์ครอบคลุมในช่วง 2 - 8 keV โดยกำหนดให้ตัวอย่างได้พลังงานในระดับที่ต้องการ คือ 100 - 5,000 mJ/cm² (ซึ่งคำนวณได้เป็น 0.1 - 5.0 Gy) ใช้ระยะเวลาในการฉายรังสี 2 - 100 นาที ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดขณะนั้น จากนั้นนำเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสีแล้วไปบดละเอียด แล้วนำไปใช้วิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic method (DNS method) ตามวิธีของ Miller (1959) โดยละลายตัวอย่าง 100 mg ใน 1 M KOH และเติมน้ำ 9 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างปริมาตร 500 ไมโครลิตรใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตรเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค (KMS1, IKA Works, Inc., USA) นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แขนในอ่างน้ำแข็งทันที เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค จากนั้น นำไปวัดค่าดูดกลืนรังสีด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (biochrom Liba S22, Biochrom Ltd, England) ที่ 540 นาโนเมตร สร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ใช้สารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 20 - 200 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เติม DNS ปริมาตร 500 ไมโครลิตรเขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มให้เดือด 15 นาที แขนในอ่างน้ำแข็ง เติมน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร จากนั้น นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร

4.3.4 กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (solubility)

คัดแปลงจาก Daramola and Osanyinlusi (2006) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม ใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาดที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 - 120 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการละลายของตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างไปเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทส่วนใสใส่ใน Aluminum moisture can ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำ Aluminum moisture can ไปชั่งน้ำหนัก และหาความสามารถในการพองตัวได้โดยนำสตาร์ชส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหา กำลังการพองตัวของตัวอย่างและความสามารถในการละลายดังนี้

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

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

4.3.5 การวิเคราะห์ความหนืด

วิเคราะห์ความหนืดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว RVA (Rapid Visco Analyzer) เตรียมตัวอย่างสตาร์ชสำหรับการวิเคราะห์จากสูตร

$$S = \frac{86 \times A}{(100 - \%M)}$$

$$W = 25 + (A - S)$$

เมื่อ	S	คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ต้องชั่ง (g)
	A	คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ความชื้น 14% (สำหรับสตาร์ชมันปะหลังแทนค่าเป็น 2.5)
	W	คือ น้ำหนักน้ำที่ต้องชั่ง (g)
	%M	คือ ความชื้นในตัวอย่างที่วัดได้ (%)

นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด (RVA) ตามโปรแกรม STD 4 ดังนี้ โดยเริ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนผสมความเร็วรอบ 960 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และควบคุมให้อยู่ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ต่อเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

4.3.6 ลักษณะโครงสร้างผลึก

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วย Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) ณ สถาบันวิจัยรังสีซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line 1.2: WAXS โดยใส่ตัวอย่างสสารประมาณ 20 มิลลิกรัม ลงในวัสดุใส่ตัวอย่างซึ่งปิดด้วย PI เทปทั้งสองด้าน แล้วนำไปวิเคราะห์กำหนดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ 8 keV ในการวัดรังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวอนส่ววัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับสัญญาณ (image plate detector) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร แปรผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ด้วยโปรแกรม OPUS 7.5 (Bruker, Germany)

4.3.7 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดสสาร

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (JSM-6010LV, JEOL Ltd., USA) โดยการนำตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาว 2 หน้า ที่ติดอยู่บนแท่ง aluminum stub จากนั้นนำแท่ง aluminum stub ที่ติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง แล้วนำไปวางในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 - 15 kV และใช้กำลังขยายที่ 1,000 และ 5,000 เท่า และบันทึกภาพลงในคอมพิวเตอร์

4.3.8 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (DSC1, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 7 มิลลิกรัมใส่ลงในถ้วยสแตนเลส ขนาด 60 ไมโครลิตร (Perkin Elmer DCS pan) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เติมน้ำกลั่น ลงไป 28 มิลลิกรัม ปิดฝาถ้วยสแตนเลส นำไปอัดปิดฝาให้สนิทด้วยเครื่องปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 - 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิง ใช้ Indium เป็นสารมาตรฐานในการสอบเทียบอุณหภูมิ วิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางความร้อนดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o)

อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) อุณหภูมิต่ำสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_p$) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) โดยใช้โปรแกรมประมวลผล STARsoftware (Mettler-Toledo, Switzerland)

4.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณ resistance starch

วิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC (2002) ที่มีการดัดแปลงเล็กน้อย โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ชหนัก 100 มิลลิกรัม ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมมาลีเอตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 M พีเอช 6.0 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยเอนไซม์แพนครีเอติกแอลฟา-อะไมเลส (pancreatic α -amylase) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) ความเข้มข้น 3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยเขย่าตลอดเวลา จากนั้นเติมเอทานอลความเข้มข้นปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500×g เป็นเวลา 10 นาทีอีกครั้ง ค่อย ๆ เทส่วนใสทิ้งและรอให้ตะกอนสตาร์ชแห้ง จากนั้นเติมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 1.2 M พีเอช.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ความเข้มข้น 3300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกลูโคสที่ถูกปล่อยออกมาโดยสารละลาย PGO เอนไซม์ (Sigma, P7119) และคำนวณปริมาณ RS จากสูตร

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

เมื่อ F คือ ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

162/180 คือ แฟกเตอร์สำหรับเปลี่ยน free glucose เป็น anhydro-glucose

4.3.10 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 16.0 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ t-test

4.4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.4.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจาก 4.40 - 43.7 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม และตัวอย่างสตาร์ชซีเตรท มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจาก 23.8 - 49.7 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม และเมื่อตัวอย่างสตาร์ชได้รับรังสีในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 4.1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารังสีซินโครตรอนสามารถทำลายพันธะไกลโคซิดิกภายในสายสตาร์ชให้กลายเป็นเด็คซ์โทรสได้ และเมื่อฉายรังสีในระดับพลังงานที่สูงมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้พันธะไกลโคซิดิกถูกทำลายมากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งก็มีการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายสตาร์ชโดยรังสี เช่นการทดลองของ Bao, Ao, and Jane (2005) ได้ทำการวิเคราะห์ห้มวลโมเลกุล (Molecular weight) ของสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา พบว่ามวลโมเลกุลของสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าลดลง และมีงานวิจัยในอีกมากมายที่ได้รายงานไว้ว่าการฉายรังสีให้แก่สตาร์ชส่งผลให้ปริมาณอะมิโลส (apparent amylose content) ลดลง (Chung and Liu, 2010; Gani, Bashir, Wani, and Masoodi, 2012; Gani, Gazanfar, Jan, Wani, and Masoodi, 2013; Sofi, Wani, Masoodi, Saba, and Muzaffar, 2013; Wani, Jabeen, Geelani, Masoodi, Saba, and Muzaffar, 2014) และการลดลงของปริมาณอะมิโลสจะมีมากขึ้นเมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่สตาร์ชสูงมากขึ้น (Chung and Liu, 2009; Lee, Ee, Chung, and Othman, 2013; Singh, Singh, Ezekiel, and Kaur, 2011) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่สตาร์ชเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ของสตาร์ชก็จัดถูกตัดโดยรังสีมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับต่าง ๆ

Dose (mJ/cm ³)	Reducing sugar (µg/mg starch)	
	Native starch	Citrate starch
0	4.40 ± 0.30 a	23.8 ± 0.62 a
100	4.33 ± 0.19 a	27.1 ± 0.61 b
500	11.1 ± 0.72 b	30.2 ± 0.47 c
1,000	18.9 ± 0.88 c	35.6 ± 1.18 d
5,000	43.7 ± 0.47 d	49.8 ± 0.58 e

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

4.4.2 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย

จากการทดสอบกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (50 และ 65 องศาเซลเซียส) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสี ซินโครตรอนที่ระดับพลังงานที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.2) พบว่าเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบได้รับการฉายรังสีที่ระดับพลังงาน 100 mJ/cm³ ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีซินโครตรอน แสดงให้เห็นถึงว่ารังสีซินโครตรอนสามารถทำลายพันธะไกลโคซิดิกระหว่างพอลิเมอร์ของโมเลกุลกลูโคสได้ จึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระอยู่ได้มากขึ้น และเมื่อฉายรังสีให้แก่ที่ระดับพลังงาน 500 - 5,000 mJ/cm³ พบว่าค่ากำลังการพองตัวลดลงจะค่อย ๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นตัวอย่างที่ถูกฉายรังสี 500 mJ/cm³ ที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งการที่ตัวอย่างสามารถพองตัวได้น้อยลง อาจเป็นผลมาจากมีพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสายของสตาร์ชเกิดขึ้น เมื่อสตาร์ชมันสำปะหลังดิบถูกฉายรังสีที่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกผ่านเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้ยากขึ้น ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าพลังงานจากรังสีที่ฉายให้แก่ตัวอย่างจะถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงหลัก ๆ ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ที่ผ่านการฉายรังสีคือ การเกิดการเชื่อมข้าม (Crosslinking) และการแตกสลาย (Degradation) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองอย่างจะสามารถเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน โดยมีปฏิกิริยาอันใดอันหนึ่งที่เกิดขึ้นมากกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักสองประการคือ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์และปริมาณรังสีที่ฉาย ซึ่งการเชื่อมขวางและการแตกสลายที่เกิดขึ้น จะส่งผลให้คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป (สิรินทรา อภิตติกร, เกศินี เหมวิเชียร, พิริยาธร สุวรรณมาตา และวรารัตน์ กังสัมฤทธิ์, 2555) กลไกของการเชื่อมข้ามด้วยรังสีเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.8 คือ การแตกพันธะเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H) บนสายโซ่พอลิเมอร์ เพื่อเกิดเป็นอะตอมของไฮโดรเจนตามด้วยการเข้าจับของอะตอมไฮโดรเจนที่สองจากสายโซ่ใกล้เคียง เพื่อเกิดเป็นโมเลกุลไฮโดรเจน ดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (Free Radical) ที่อยู่ติดกันจะรวมกันเพื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 [2] และการฉายรังสีในระดับปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นจะนำไปสู่การเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched Polymer) และในที่สุดจะเกิดเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแหสามมิติ เมื่อแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์ถูกเชื่อมโยงเข้ากับสายโซ่อื่น ทั้งนี้นอกจากการฉายรังสีจะทำให้เกิดการเชื่อมข้ามแล้วรังสียังสามารถก่อให้เกิดการแตกสลายของพันธะเคมีได้อีกด้วย (พิริยาธร และเกศินี, 2547 อ้างถึงใน กฤตพล ศรีวงษา, 2555 หน้า 14) การเกิดการแยกกันและกันเชื่อมข้ามของสายสตาร์ชโดยรังสี

ดังแสดงในภาพที่ 2.8 [3] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chung and Liu (2009) ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการฉายด้วยรังสีแกมมาที่ระดับปริมาณพลังงานตั้งแต่ 0 - 50 kGy ซึ่งพบว่าค่าการพองตัวของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 0 - 2 kGy มีค่าการพองตัวไม่แตกต่างกัน แต่ค่าการพองตัวของสตาร์ชข้าวโพดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อสตาร์ชข้าวโพดถูกฉายรังสีที่ระดับพลังงาน 10 - 50 kGy และผลการทดลองของ Ashwar et al. (2014) ก็ให้ผลในลักษณะคล้ายกันคือ การฉายรังสีแกมมาที่ 0 (control) 5 10 และ 20 kGy แก่สตาร์ชข้าวที่สกัดได้จากข้าวทั้งสองสายพันธุ์ คือ K-322 และ K-448 พบว่าเมื่อตัวอย่างได้รับการฉายรังสีในระดับปริมาณรังสีที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าการพองตัวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวทั้งสองสายพันธุ์มีค่าลดลง เช่นเดียวกับการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมก็ทำให้การพองตัวของสตาร์ชสาकुลดลงเช่นเดียวกัน และการพองตัวจะยังมีค่าลดลง เมื่อตัวอย่างได้รับการฉายรังสีในระดับพลังงานที่สูงขึ้น (10 - 30 kGy) (Pimpa et al., 2007)

ผลการทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบถูกฉายรังสีในระดับพลังงานที่สูงมากขึ้นก็จะส่งผลให้สตาร์ชมันสำปะหลังดิบสามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตีในเซชันได้มากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วสตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตีในเซชัน เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างแน่นหนา ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถดูดซึมและพองตัวได้น้อยในน้ำเย็น แต่การที่สตาร์ชดิบที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น อาจเป็นผลมาจากรังสีซินโครตรอนมีความสามารถในการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกภายในโมเลกุลของสตาร์ชได้ ส่งผลให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระได้มากขึ้น จึงเป็นผลให้สตาร์ชมันสำปะหลังดิบละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตีในเซชันได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) Sofi et al. (2013) ได้ศึกษาการฉายรังสีแกมมาแก่สตาร์ชจากถั่วปากอ้า (broad bean) ที่ระดับปริมาณรังสี ตั้งแต่ 0 - 15 kGy พบว่าเมื่อตัวอย่างถูกฉายรังสีในระดับปริมาณรังสีที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าการพองตัวของตัวอย่างสตาร์ชจะลดลง แต่ค่าการละลายของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบความสามารถในการพองตัวและการละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าทั้งค่าความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าที่ทำการทดสอบที่ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลน้ำก็จะสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระภายในโมเลกุลของสตาร์ชได้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของสตาร์ชก็จะละลายออกมาได้

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการพองตัวและการละลายในน้ำของสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับพลังงาน 0 - 5,000 mJ/cm³ แสดงผลดังตารางที่ 4.3 พบว่า การฉายรังสีซินโครตรอนทำให้สตาร์ชซีเตรทสามารถพองตัวได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ 5,000 mJ/cm³ ที่สามารถพองตัวได้มากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการไฮโดรไลซ์พันธะภายในเม็ดสตาร์ชโดยรังสีซินโครตรอนที่ทำให้พันธะไกลโคซิดิก และพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดจากโมเลกุลกรดซिटริกอาจถูกทำลายไป ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระที่สามารถจับกับโมเลกุลน้ำมากขึ้น ตัวอย่างจึงสามารถพองตัวเพิ่มขึ้นจากสตาร์ชซีเตรทที่ไม่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน สำหรับการละลายของสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ พบว่าการฉายรังสีทำให้ตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น โดยเฉพาะกับตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงาน 5,000 mJ/cm³ เนื่องจากระดับพลังงานสูงขึ้นทำให้เกิดไฮโดรไลซ์แล้วเกิดกลูโคสอิสระหรือโมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดจากการแตกหักของพอลิเมอร์มากขึ้น จึงส่งผลให้ตัวอย่างสตาร์ชสามารถละลายออกมาได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Chung et al., 2010) ได้ฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 10 20 40 และ 100 kGy ให้แก่สตาร์ชดิบและสตาร์ชตัดแปร (RS 4) ที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว และรายงานผลไว้ว่าการละลายของทั้งตัวอย่างสตาร์ชดิบและสตาร์ชตัดแปรจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่านการฉายด้วยรังสี และการละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวอย่างได้รับการฉายรังสีในระดับที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดการแตกหักของโมเลกุลของสตาร์ชมากขึ้นเมื่อปริมาณรังสีที่ฉายให้แกตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น การทดลองของ Henry et al. (2010) ได้รายงานไว้ว่า หลังการฉายรังสีอิเล็กตรอนบีมที่ระดับ 25 kGy ให้แก่สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชตัดแปรทางเคมี พบว่าตัวอย่างทั้งหมดสามารถละลายได้เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี (0 kGy) อย่างมาก และการละลายยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อตัวอย่างได้รับการฉายรังสีในระดับที่สูงขึ้น (75 และ 100 kGy) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีมีผลในการช่วยเพิ่มการละลายให้แก่สตาร์ช เนื่องจากความมีขั้วของสตาร์ชเพิ่มขึ้นจากการที่สายสตาร์ชถูกตัดด้วยรังสี และผลการทดลองของ Han and Lim (2012) ก็รายงานว่า Octenylsuccinylated starch สามารถละลายได้มากขึ้นหลังจากได้รับการฉายรังสีแกมมาที่ระดับต่าง ๆ (10 30 และ 50 kGy) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมา เมื่อทดสอบกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายในน้ำของตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทโดยใช้อุณหภูมิสูงขึ้น (65 - 120 องศาเซลเซียส) พบว่าอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส สตาร์ชซีเตรททั้งที่ไม่ผ่านการฉายและผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ทุกระดับสามารถพองตัว และละลายได้มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลายมากขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงสามารถเข้าไปจับกับหมู่หมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระได้ ส่งผลให้ตัวอย่างสามารถพองตัวและละลายได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับต่าง ๆ

Dose (mJ/cm ³)	Swelling power		Solubility	
	(g/g)	(%)	(g/g)	(%)
	at 50 °C		at 65 °C	
0	2.21 ± 0.16 b, A	1.57 ± 0.28 a, A	10.11 ± 0.14 d, B	3.01 ± 0.50 a, B
100	2.72 ± 0.14 c, A	3.18 ± 0.51 b, A	10.99 ± 0.49 e, B	12.42 ± 0.92 b, B
500	2.50 ± 0.07 c, A	5.84 ± 0.24 c, A	6.42 ± 0.08 c, B	11.01 ± 0.69 b, B
1,000	2.31 ± 0.06 b, A	8.53 ± 0.19 d, A	4.39 ± 0.20 b, B	14.79 ± 0.54 c, B
5,000	1.66 ± 0.07 a, A	34.00 ± 0.67 e, A	2.56 ± 0.17 a, B	45.2 ± 0.68 d, B

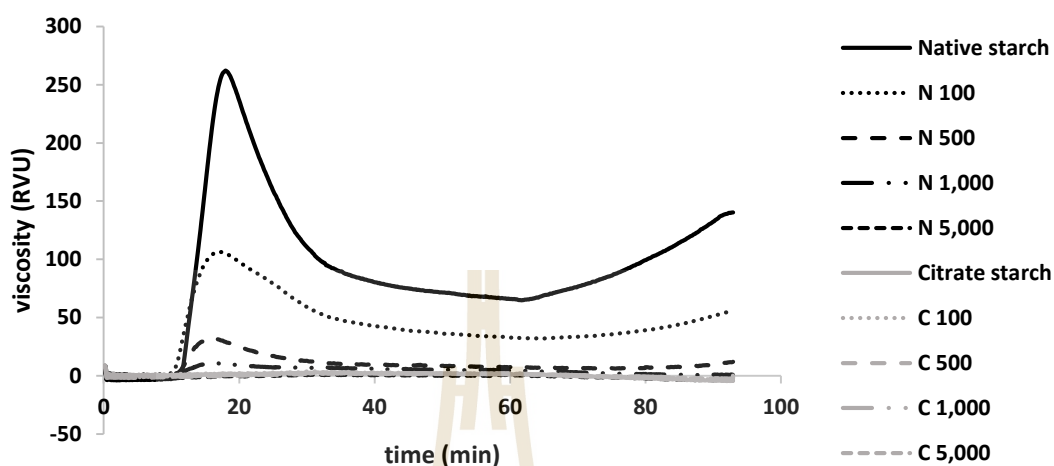
ตัวอักษรพิมพ์เล็ก แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของระดับพลังงานของรังสีซินโครตรอน

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของอุณหภูมิที่ทดสอบ

4.4.3 ความหนืด

ผลการตรวจสอบความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายด้วยรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานตั้งแต่ 0 - 5,000 mJ/cm³ แสดงดังภาพที่ 4.1 จะพบว่าการฉายรังสีให้แก่สตาร์ชมันสำปะหลังในระดับปริมาณพลังงานที่มากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างลดลง เนื่องจากตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยรังสีซินโครตรอน และเมื่อปริมาณพลังงานของรังสีที่ฉายให้แก่สตาร์ชมันสำปะหลังดิบเพิ่มขึ้น ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบก็ถูกไฮโดรไลซ์เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองคุณสมบัติด้านความหนืดนี้มีความสอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานของรังสีซินโครตรอน (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารังสีซินโครตรอนมีความสามารถในการทำลายพันธะไกลโคซิดิกของสตาร์ช จากรายงานการทดลองฉายรังสีให้แก่สตาร์ชชนิดต่าง ๆ พบว่าสตาร์ชที่ได้รับรังสีจะมีความหนืดลดลง เช่น Chung and Liu (2009) ได้ฉายรังสีแกมมาให้แก่สตาร์ชข้าวโพดที่ระดับพลังงาน 0 2 10 และ 50 kGy และพบว่าความหนืดของสตาร์ชลดลง เมื่อสตาร์ชได้รับการฉายรังสีในระดับที่มากขึ้น Mohd Adzahan et al. (2009) ได้ศึกษาความหนืดของสตาร์ชจากข้าวสาลี สาอุ และมันสำปะหลังที่ได้รับการฉายรังสีจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ อิเล็กตรอนบีม (5 - 30 kGy) และแกมมา (5 - 20 kGy) พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมีความหนืดลดลงจากสตาร์ชดิบ และเมื่อเพิ่มระดับพลังงานของรังสีที่ฉายให้แก่ตัวอย่างสูงขึ้นก็จะยิ่งทำให้ความหนืดของตัวอย่างลดลง การ

ลดลงของความหนืดของสตาร์ชที่ได้รับการฉายรังสี เนื่องมาจากการทำลายพันธะไกลโคซิดิกภายในโมเลกุลของสตาร์ชโดยรังสี (Urbain, 1986)



ภาพที่ 4.1 โพรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ปริมาณพลังงานในระดับต่าง ๆ; N คือ สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ C คือ สตาร์ชซีเตรท

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ พบว่าตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ทุกระดับพลังงานไม่แสดงโพรไฟล์ของความหนืดเช่นเดียวกับสตาร์ชซีเตรทที่ไม่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับคุณสมบัติในด้านการพองตัวของสตาร์ชซีเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน (ตารางที่ 4.3) ก็จะเห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทมีการพองตัวที่ต่ำมาก ถึงแม้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิสูง (120 องศาเซลเซียส) ก็จะไม่พบว่าการพองตัวของตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่ารังสีซินโครตรอนจะสามารถไฮโดรไลซ์ตัวอย่างได้ ซึ่งคู่ได้จากปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) แต่เนื่องจากสตาร์ชซีเตรทมีพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชกับกรดซัลฟิวริกที่แข็งแรงที่ไปช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช ซึ่งการไฮโดรไลซ์จากรังสีซินโครตรอนในระดับที่ใช้ในการทดลองอาจไม่สามารถทำลายความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชนี้ได้ จึงทำให้ตัวอย่างไม่เกิดการพองตัวและไม่เกิดการเจลาทิไนซ์จากการทดสอบนี้ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างสตาร์ชซีเตรทภายหลังจากการถูกฉายรังสีซินโครตรอนได้

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของของสารซีซีเทรทที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับต่าง ๆ

Dose (mJ/cm ³)	Swelling power	Solubility	Swelling power	Solubility	Swelling power	Solubility	Swelling power	Solubility
	(g/g)	(%)	(g/g)	(%)	(g/g)	(%)	(g/g)	(%)
	at 50 °C		at 65 °C		at 100 °C		at 120 °C	
0	3.31 ± 0.96 a, A	2.26 ± 0.81 a, B	3.46 ± 0.25 a, A	2.59 ± 0.13 a, A	4.03 ± 0.43 a, B	5.01 ± 0.31 a, C	4.61 ± 0.19 a, C	6.10 ± 0.32 a, D
100	3.98 ± 0.07 b, A	2.80 ± 0.28 b, A	3.90 ± 0.01 b, A	3.55 ± 0.29 b, B	4.15 ± 0.09 ab, B	4.64 ± 0.26 a, C	5.16 ± 0.29 b, C	6.11 ± 0.37 ab, D
500	4.06 ± 0.16b, A	3.71 ± 0.21 c, A	4.00 ± 0.10bc, A	4.95 ± 0.06 c, B	4.25 ± 0.08 ab, B	5.22 ± 0.26 a, B	5.03 ± 0.14 b, C	6.41 ± 0.32 ab, C
1,000	4.09 ± 0.03 b, A	4.37 ± 0.19 d, A	4.07 ± 0.14 c, A	4.80 ± 0.53 c, B	4.31 ± 0.03 b, B	6.24 ± 0.15b, C	5.16 ± 0.24 b, C	6.92 ± 0.37 b, D
5,000	4.74 ± 0.19 c, B	8.79 ± 0.30e, A	4.48 ± 0.42d, A	9.90 ± 0.40 d, B	5.07 ± 0.09 c, B	11.35 ± 0.72 c, C	5.92 ± 0.63 c, C	13.43 ± 0.55 c, D

ตัวอักษรพิมพ์เล็ก แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของระดับพลังงานของรังสีซินโครตรอน

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของอุณหภูมิที่ทดสอบ



4.4.4 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก

ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน แสดงดังภาพที่ 4.3 พบว่ารังสีซินโครตรอนไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างผลึกของทั้งแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลัง โดยตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนในทุกระดับปริมาณพลังงาน (100 - 5,000 mJ/cm²) ยังคงมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่มีพีกเด่นชัดที่มุม (2 θ) ที่เป็นลักษณะพีกคู่ (doublet peak) ที่ 2 θ ที่ 17° และ 18° และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ 2 θ ที่ 15° และ 23° เช่นเดียวกับตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอื่น ๆ ที่พบว่า การฉายรังสีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง ได้แก่ การทดลองฉายรังสีแกมมาให้แก่แป้งมันสำปะหลัง (Chung and Liu, 2009; Lee et al., 2006), แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (Han and Lim, 2012), แป้งมันสำปะหลังสายพันธุ์ K-322 และ K-448 (Ashwar et al., 2014), แป้งมันสำปะหลัง และถั่ว (Chung and Liu, 2010) และ lotus stem starch (Gani et al., 2013) เนื่องจากพลังงานจากรังสีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สายโมเลกุลแป้งมากกว่าการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้ง (Bachman, Gambus, and Nowotna, 1997) แต่รังสีทำให้ปริมาณผลึกของตัวอย่างลดลง โดยปริมาณผลึกของตัวอย่างทั้งแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนมีปริมาณผลึกน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และปริมาณผลึกจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อตัวอย่างถูกฉายรังสีในระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งการลดลงของปริมาณผลึกเป็นผลมาจากการไฮโดรไลซ์แป้งโดยรังสีซินโครตรอน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในส่วนผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) (Chung and Liu, 2009; Gani et al., 2012) ทำให้โครงสร้างที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบภายในเม็ดแป้งถูกทำลายลงไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองฉายรังสีแกมมาแก่แป้งมันสำปะหลังขาว และแดงที่ระดับพลังงาน 0 5 10 และ 20 kGy (Gani et al., 2014) หรือแป้งมันสำปะหลังสายพันธุ์ PR 121 และ PR 116 ที่ระดับพลังงาน 0 2 5 และ 10 kGy (Gul, Singh, and Sonkawade, 2016) ต่างก็รายงานว่าเมื่อผ่านการฉายรังสีในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกของตัวอย่างลดลง

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึก (Relative crystallinity) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับต่าง ๆ

Dose(mJ/cm ³)	Relative crystallinity (%)	
	Native starch	Citrate starch
0	28.5 ± 0.40 c	13.4 ± 0.61 c
100	26.7 ± 0.22 b	8.88 ± 0.37 b
500	25.8 ± 0.56 ab	8.56 ± 0.53 ab
1,000	25.6 ± 0.79 ab	8.49 ± 0.84 ab
5,000	24.8 ± 0.96 a	7.62 ± 0.65 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

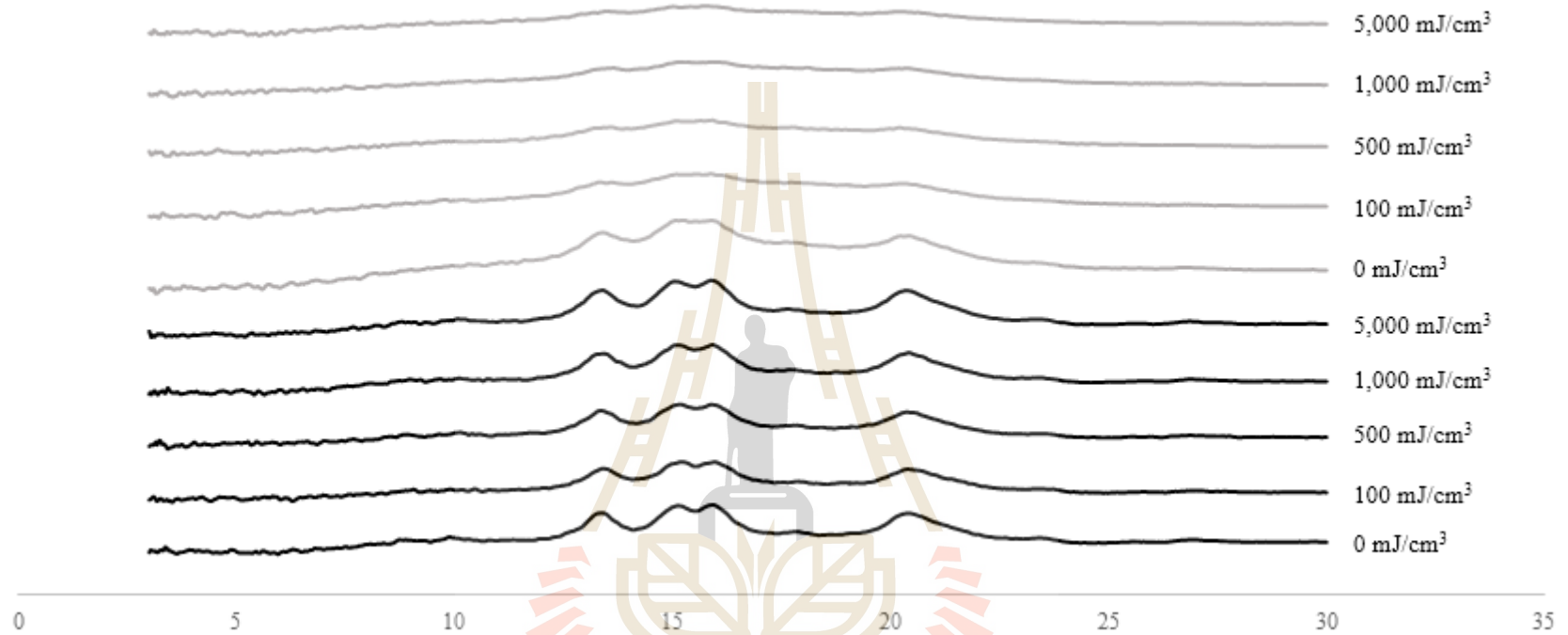
4.4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเม็ดสตาร์ช

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่ารูปร่างของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีปลายตัด และการฉายรังสีซินโครตรอนให้แก่สตาร์ชไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชทั้งในตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซิเตรท โดยที่เม็ดสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนยังคงมีรูปร่างเป็นเช่นเดิม (ภาพที่ 4.3 และ 4.4) แต่พบว่ามีการยุบตัวเกิดขึ้นในสตาร์ชบางเม็ด ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ว่ารังสีซินโครตรอนที่ฉายให้แก่ตัวอย่างไปทำลายโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช โดยไปตัดพันธะไกลโคซิดิกภายในโมเลกุลสตาร์ช ส่งผลให้โมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่ขนาดเล็กลง (Ghali, Ibrahim, Gabr, and Aziz, 1979; Hayashi and Kawashima, 1982; Raffi, Agnel, Thiery, Frejaville, and Saint-Lebe, 1981) ทำให้โครงสร้างที่แข็งแรงภายในเม็ดสตาร์ชที่เกิดจากโมเลกุลของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายลงไป จึงส่งผลให้สตาร์ชเกิดการยุบตัวลง และเมื่อฉายรังสีซินโครตรอนในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ก็จะพบว่าเม็ดสตาร์ชมีการยุบตัวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นในภาพ 1b 1c 2b และ 2c แสดงว่าการเพิ่มระดับพลังงานที่ฉายให้แก่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่เม็ดสตาร์ชจากการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกที่สตาร์ชโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการยุบตัวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณผลึกที่ลดลง การทดลองของ Wu, Shu, Wang, and Xia (2002) พบว่าตัวอย่างฟลาวัวร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงสายพันธุ์ Jin97-47 เกิดการสูญเสียรูปร่างของเม็ดสตาร์ชหลังผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 1 kGy ซึ่งเกิดจากการที่รังสีสามารถทำให้เกิดการแตกหักของสตาร์ชโมเลกุลขนาด

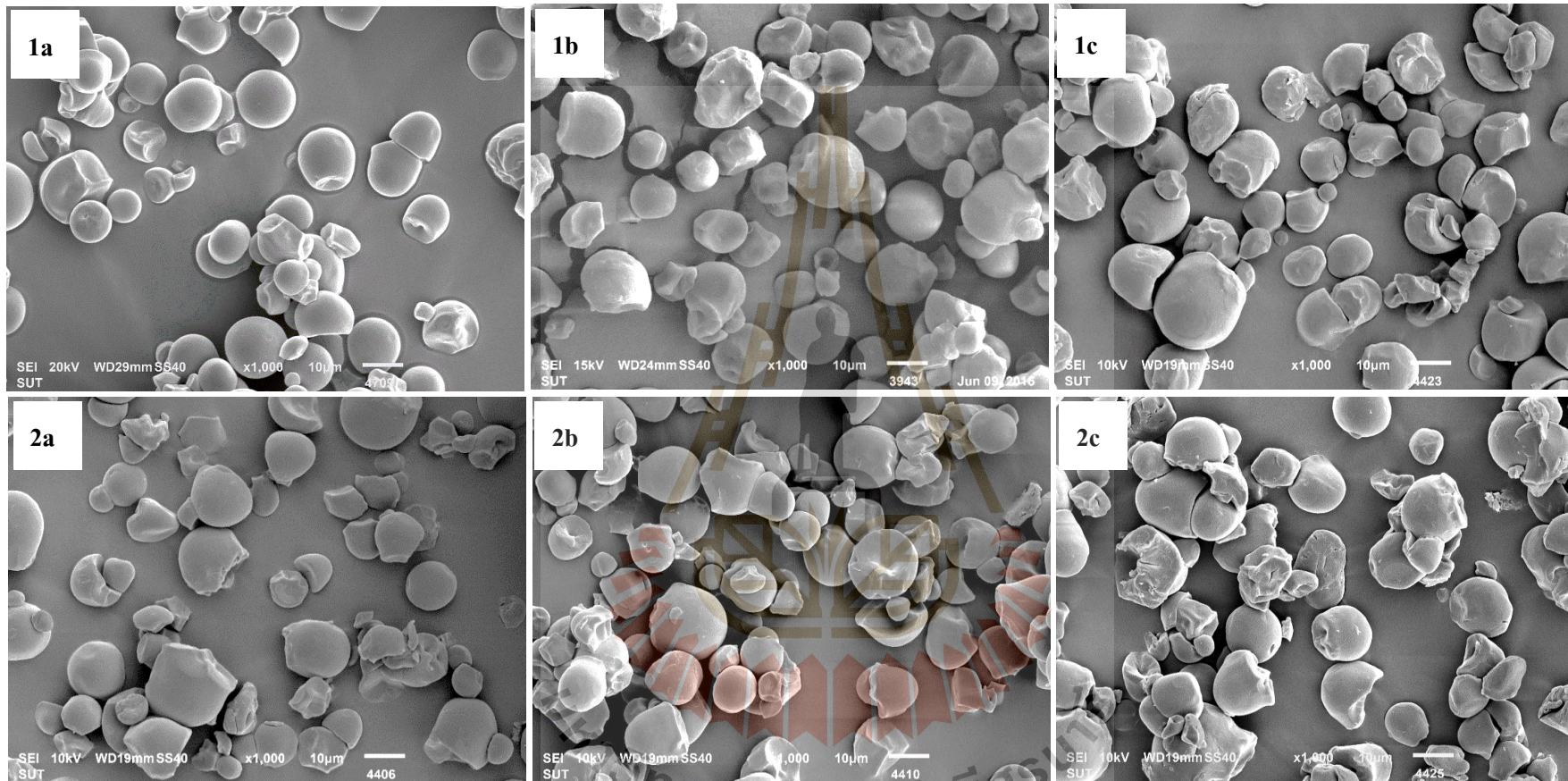
ใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง และยังมีการรายงานอีกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ฉายให้แก่ตัวอย่าง จะทำให้มีปริมาณของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีบางส่วนของเม็ดสตาร์ชที่แตกหรือหลุดออกโดยการถูกไฮโดรไลซ์จากรังสี (Sabularse, Liuzzo, Rao, and Grodner, 1991; Yu and Wang, 2007)

4.4.6 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

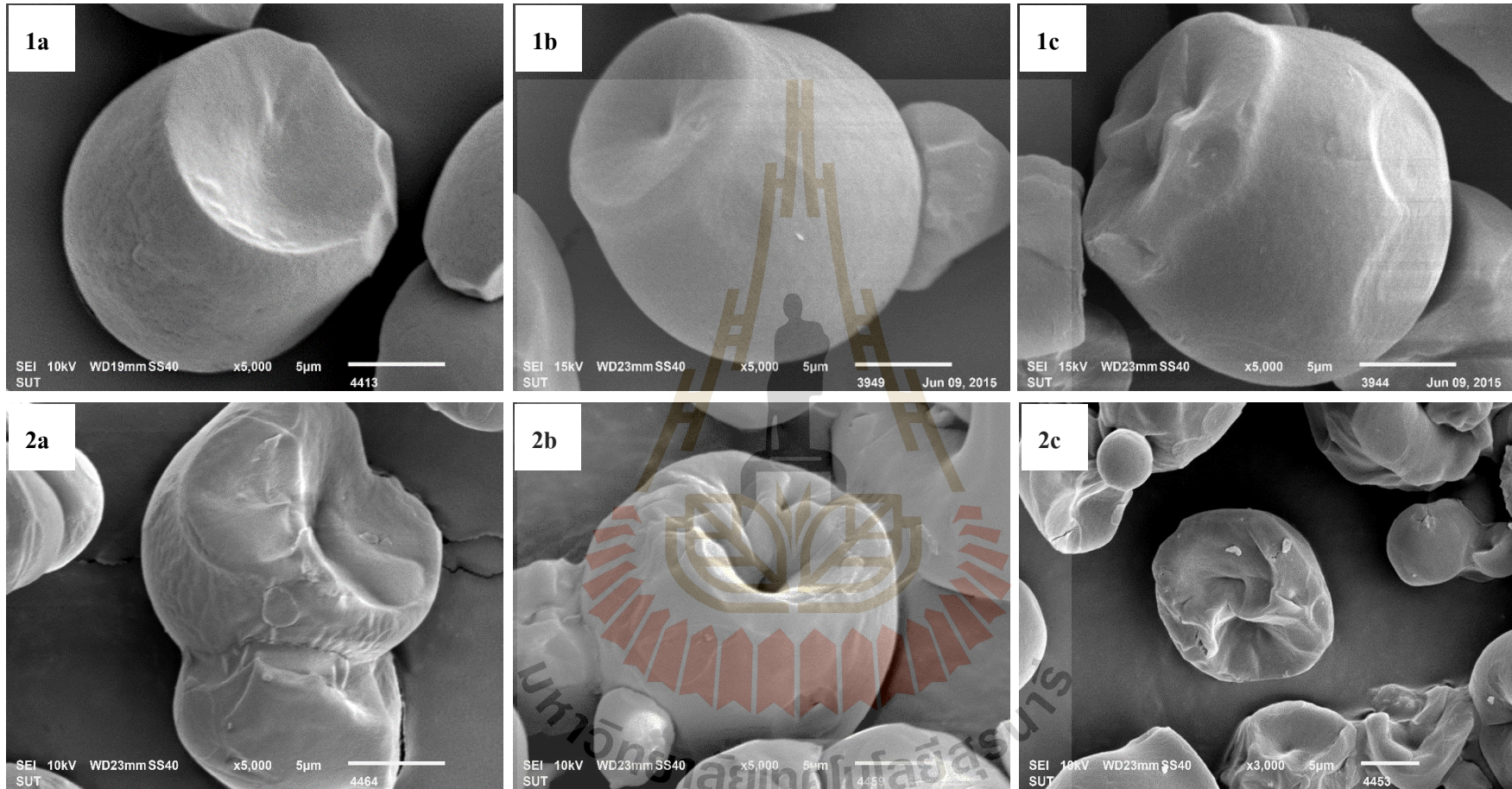
จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC ซึ่งให้ผล T_0 , T_p , T_c และ ΔH ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสี มีค่า T_0 , T_p และ ΔH ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสี ยกเว้นค่า T_p ของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ถูกฉายรังสีที่ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ การลดลงของค่า T_0 และ T_p อาจจากการฉายรังสีทำให้สตาร์ชเม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกทำลายไปจากการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิก จึงทำให้เม็ดสตาร์ชมีความอ่อนแอลงจากสตาร์ชดิบ ส่งผลให้สตาร์ชสามารถเกิดการเจลาทิไนซ์ได้ง่ายกว่าสตาร์ชดิบ แต่สาเหตุที่ทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ถูกฉายรังสีที่ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ มีค่า T_p และ T_c สูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอน อาจเป็นผลมาจากพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีที่ช่วยเสริมความแข็งแรงเม็ดสตาร์ช ทำให้จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้สตาร์ชเจลาทิไนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กำลังการพองตัวของตัวอย่างในตารางที่ 4.2 ที่แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดการเชื่อมข้ามเกิดขึ้น จากค่ากำลังการพองตัวที่ลดลง และการลดลงของค่า ΔH เมื่อถูกฉายรังสีในระดับพลังงานที่สูงขึ้น เนื่องจากการฉายรังสีซินโครตรอนทำให้อะมิโลส และอะมิโลเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ และยังทำให้พันธะที่ยึดจับกันของ โครงสร้างเกลียวคู่แตกออก (Liu, Ma, Xue, and Shi, 2012) จึงใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างเกลียวคู่ของตัวอย่างเพื่อทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณผลึกของตัวอย่างที่ลดลงหลังการถูกฉายรังสีซินโครตรอน (ตารางที่ 4.4) ซึ่งในการทดลองการฉายรังสีแกมมาที่ระดับปริมาณพลังงานที่สูงขึ้น ก็ทำให้ ΔH ของฟลาวัวร์ และสตาร์ชข้าว (Bao et al., 2005) สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวดิบ และสตาร์ชเชื่อมข้ามจากข้าวโพดข้าวเหนียว (Chung et al., 2010) ลดลงเช่นเดียวกัน และสำหรับตัวอย่างสตาร์ชซีเตรท พบว่าการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับ 100 mJ/cm^3 ค่า T_0 และ T_p สูงกว่า และ T_c และ ΔH ต่ำกว่าสตาร์ชซีเตรทที่ไม่ผ่านการฉายรังสี แต่ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ ไม่พบฟลักของการเปลี่ยนเฟสของตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากรังสีซินโครตรอนเข้าไปไฮโดรไลซ์สตาร์ช จึงทำให้โครงสร้างเกลียวคู่ในส่วนผลึกของสตาร์ชซีเตรทถูกทำลายไป



ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ไขมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ซซิเตรทที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับ 0 - 5,000 mJ/cm³;
 — คือ สตาร์ไขมันสำปะหลังดิบ และ — คือ สตาร์ซซิเตรท



ภาพที่ 4.3 ลักษณะเม็ดสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า; 1) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ 2) สตาร์ชซีเตรท เมื่อ a) b) และ c) ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับพลังงาน 0 100 และ 5,000 mJ/cm³



ภาพที่ 4.4 ลักษณะเม็ดสตาร์ชที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า; 1) สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และ 2) สตาร์ชซีเตรท เมื่อ a) b) และ c) ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับพลังงาน 0 100 และ 5,000 mJ/cm³

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของสตาร์ชสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านการฉายด้วยรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ

Dose (mJ/cm ³)	Native starch				Citrate starch			
	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
0	65.40 ± 0.10 c	70.51 ± 0.24 b	81.99 ± 0.22 ab	13.24 ± 0.71 b	59.46 ± 0.85 a	67.49 ± 0.32 a	77.91 ± 0.34 b	1.10 ± 0.07 b
100	63.00 ± 0.46 a	69.74 ± 0.42 a	81.37 ± 0.63 a	11.97 ± 0.93 b	61.32 ± 0.71 b	68.02 ± 0.34 b	75.61 ± 0.94 a	0.37 ± 0.12 a
5,000	63.65 ± 0.13 b	71.77 ± 0.19 c	82.62 ± 0.61 b	6.98 ± 0.52 a	nd	nd	nd	nd

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรทที่ผ่านการฉายด้วยรังสีซินโครตรอนที่ระดับปริมาณพลังงานต่าง ๆ

Dose (mJ/cm ³)	RS content (%)	
	Native starch	Citrate starch
0	6.34 ± 0.47 c	68.08 ± 0.96 d
100	2.80 ± 0.56 a	61.52 ± 1.18 c
500	2.93 ± 0.55 a	56.48 ± 3.80 b
1,000	4.42 ± 0.76 b	54.80 ± 1.52 b
5,000	5.87 ± 1.03 c	41.10 ± 1.68 a

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

4.4.7 ปริมาณ resistant starch

จากการวิเคราะห์ปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับพลังงานต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนส่วนใหญ่มีปริมาณ RS ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี แต่ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ระดับพลังงานต่ำ ๆ ($100 - 500 \text{ mJ/cm}^3$) มีปริมาณ RS ต่ำกว่าตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีที่พลังงานสูง และเมื่อระดับพลังงานที่ฉายให้แก่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีปริมาณ RS มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการฉายรังสีที่ระดับพลังงานต่ำ ๆ ทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์พอลิเมอร์สายยาวของสตาร์ชให้เล็กลง (Urbain, 1986) ส่งผลให้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสสามารถย่อยสตาร์ชโมเลกุลที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้วได้ง่ายขึ้น และการที่สตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีปริมาณ RS มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณพลังงานของรังสีซินโครตรอนขึ้นจน $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ อาจเป็นผลจากอนุโมลติสระจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซ์โดยรังสีซินโครตรอนมาจับกันใหม่เกิดเป็นพันธะเชื่อมข้าม (ดังภาพที่ 2.8 [3]) ซึ่งจะขัดขวางการเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง α - (1 - 4), และ α - (1 - 6) ของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส ทำให้สตาร์ชมีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการพองตัวของตัวอย่างที่ลดลง เมื่อฉายรังสีสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ระดับพลังงาน $1,000 - 5,000 \text{ mJ/cm}^3$ เมื่อเทียบกับตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีซินโครตรอนที่ระดับพลังงานต่ำกว่า แต่ถึงแม้ว่าปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีที่ $1,000$ และ $5,000 \text{ mJ/cm}^3$ จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ฉายรังสีในระดับพลังงานที่ต่ำกว่า แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างสตาร์ชดิบที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรังสีซินโครตรอนสามารถก่อให้เกิดทั้งการไฮโดรไลซิสและการเชื่อมข้าม แต่จากการทดลองนี้ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบอาจมีการเชื่อมข้ามเกิดขึ้นน้อยกว่าการไฮโดรไลซิส จึงทำให้ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีมีปริมาณ RS ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rombo et al. (2001) ที่ได้ทดสอบอัตราการย่อยของสตาร์ชที่ฉายรังสีแกมมาที่ระดับ $0 - 10 \text{ kGy}$ พบว่าฟลาวัวร์ข้าวโพดที่ฉายฉายรังสีแกมมา 2.5 kGy มีอัตราการย่อยได้ (starch digestibility) สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (0 kGy) และเมื่อฟลาวัวร์ข้าวโพดดิบได้รับการฉายรังสีเพิ่มขึ้น อัตราการย่อยได้จะมีค่าลดลงจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมา และในฟลาวัวร์ถั่วแดงดิบที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ทุกระดับพลังงานมีอัตราการย่อยได้ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี โดยตัวอย่างที่ถูกฉายรังสีแกมมาที่ 2.5 kGy มีค่าอัตราการย่อยได้สูงสุด และเมื่อตัวอย่างถูกฉายรังสีแกมมาในระดับปริมาณพลังงานรังสีที่เพิ่มขึ้น ($5 - 10 \text{ kGy}$) ค่าอัตราการย่อยได้ก็จะค่อย ๆ ลดลง และการทดลองของ Lee et al. (2013) ที่ได้ฉายรังสีแกมมา ($5 - 10 - 25$ และ 50 kGy) ให้แก่ตัวอย่างสตาร์ชข้าวโพด (normal corn starch) สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy

corn starch) Hylon V และ Hylon VII ได้รายงานผลของปริมาณ RS ของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไว้ว่าตัวอย่างที่ได้รับรังสีแกมมาเกือบทุกตัวอย่างมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี ($p > 0.05$) และพบว่าเมื่อตัวอย่างสารทั้งหมดถูกฉายรังสีที่ระดับ 5 kGy จะทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีไปที่ระดับ 10 kGy ปริมาณ RS ของตัวอย่างจะลดลง และปริมาณ RS จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากตัวอย่างได้รับการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ไปที่ระดับ 25 และ 50 kGy ส่วนการทดลองของ Chung and Liu (2009) ได้ทดลองฉายรังสีแกมมาแก่สตาร์ชข้าวโพดเช่นกัน โดยระดับปริมาณรังสีที่ใช้ได้แก่ 0 2 10 และ 50 kGy ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณ RS ของตัวอย่างที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมามีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสี ยกเว้นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ 2 kGy มีปริมาณ RS ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS ของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณรังสีที่สูงขึ้น แต่สำหรับตัวอย่างสารซีเตรท พบว่าการฉายรังสีซินโครตรอนมีผลทำให้ปริมาณ RS ของตัวอย่างลดลง โดยเฉพาะเมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณพลังงานของรังสีซินโครตรอน ก็จะมีผลทำให้ปริมาณ RS ของตัวอย่างลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากแตกสลายของพันธะจากการถูกไฮโดรไลซ์โดยรังสีซินโครตรอน จึงส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าถึง และย่อยสตาร์ชได้ดีขึ้น และเมื่อถูกฉายรังสีที่ระดับพลังงานมากขึ้น ก็จะมีเกิดการไฮโดรไลซ์มากขึ้น สอดคล้องการฉายรังสีแกมมาให้กับ RS 4 ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (5 และ 10% STMP/STPP) พบว่า ตัวอย่าง RS 4 เมื่อได้รับรังสีแกมมาในที่ระดับเพิ่มขึ้นจาก 20 - 100 kGy ปริมาณ RS ของตัวอย่างจะค่อย ๆ ลดลง (Chung et al., 2010)

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการฉายรังสีซินโครตรอนแก่สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชซีเตรท โดยทดสอบที่ระดับพลังงาน 100 - 5,000 mJ/cm³ พบว่าการฉายรังสีซินโครตรอนทำให้เกิดการแตกสลายของพันธะไกลโคซิดิกภายในโมเลกุลของสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และทำให้ตัวอย่างสามารถการพองตัวและละลายได้ดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อตัวอย่างถูกฉายรังสีในระดับ 5,000 mJ/cm³ และยังส่งผลให้ปริมาณ RS ปริมาณผลึก และความหนืดต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี แต่ไม่มีผลต่อความหนืดของตัวอย่างสารซีเตรท ที่ยังคงไม่แสดงโปรไฟล์ของความหนืดเช่นเดิม นอกจากนี้ยังพบว่ารังสีซินโครตรอนในระดับพลังงานสูงกว่า 500 mJ/cm³ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายของสตาร์ชในสตาร์ชมันสำปะหลังดิบได้ ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีที่ 1,000 และ 5,000 mJ/cm³ มีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการฉายรังสีที่ 500 mJ/cm³ และค่ากำลังการพองตัวที่ลดลงที่แสดงว่ามีการเกิดพันธะเชื่อมขวางเกิดขึ้นในตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการ

ฉายรังสีที่ระดับพลังงานสูง นอกจากนั้นการฉายรังสียังทำให้ปริมาณผลึกของตัวอย่างทั้งหมดลดลง จากตัวอย่างที่ไม่ถูกฉายรังสี แต่ไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

4.6 รายการอ้างอิง

- พิริยาธร สุวรรณมาลา และเกศินี เหมวิเชียร. รังสีและอุตสาหกรรมพอลิเมอร์. นวัตกรรมปริทัศน์. 17 (เม.ย.-มิ.ย. 47): 7-14. อ้างถึงใน กฤตพล ศรีวงษา. (2555). การศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมา และอิเล็กตรอนบีมที่มีต่อสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ศิรินทรา อภิตติกร เกศินี เหมวิเชียร พิริยาธร สุวรรณมาลา และวรารัตน์ กังสัมฤทธิ์. (2555). ผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PP, PLA และ PBAT [ออนไลน์]. ใ้ จาก <http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/MPM097.pdf>
- Ashwar, B. A., Shah, A., Gani, A., Rather, S. A., Wani, S. M., Wani, I. A., Masoodi, F. A., and Gani, A. (2014). Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties of alkali-extracted rice starch. **Radiation Physics and Chemistry**. 99: 37-44.
- Bachman, S., Gambus, H., and Nowotna, A. (1997). Effect of gamma-radiation on some physico-chemical properties of triticale starch. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**. 6(3): 31-36.
- Bao, J., Ao, Z., and Jane, J.-I. (2005). Characterization of physical properties of flour and starch obtained from gamma-irradiated white rice. **Starch/Stärke**. 57: 480-487.
- Binh, D., Hong, P. T. T., Duy, N. N., Duoc, N. T., and Dieu, N. N. (2012). A study on size effect of carboxymethyl starch nanogel crosslinked by electron beam radiation. **Radiation Physics and Chemistry**. 81(7): 906-912.
- Chung, H. J., Lee, S. Y., Kim, J. H., Lee, J. W., Byun, M. W., Lim, S. T. (2010). Pasting characteristics and in vitro digestibility of γ -irradiated RS 4 waxy maize starches. **Journal of Cereal Science**. 52(1): 53-58.
- Chung, H.-J., and Liu, Q. (2010). Molecular structure and physicochemical properties of potato and bean starches as affected by gamma-irradiation. **International Journal of Biological Macromolecules**. 47(2): 214-222.
- Chung, H.-J., and Liu, Q. (2009). Effect of gamma irradiation on molecular structure and physicochemical properties of corn starch. **Journal of Food Science**. 74(5): C353-C361.

- Daramola, B., and Osanyinlusi, S. (2006). Investigation on modification of cassava starch using active components of ginger roots (*Zingiber officinale* Roscoe). **African Journal of Biotechnology**. 5(10): 917-920.
- De Kerf, M., Mondelaers, W., Lahorte, P., Vervaet, C., and Remon, J. P. (2001). Characterisation and disintegration properties of irradiated starch. **International Journal of Pharmaceutics**. 221(1): 69-76.
- Falade, K. O., Ighravwe, E., and Ikoyo, S. S. (2011). Physico-chemical characteristics of non-irradiated and γ -irradiated yams cultivars (*Dioscorea rotundata*, *Dioscorea alata*) and sweet potato (*Ipomoea batatas* (L) Lam). **International Journal of Food Science & Technology**. 46(6): 1186-1193.
- Feng, X., Lee, E.J., Num, K., Jo, C., Ko, K., and Ahn, D. U. (2016). Mechanisms of volatile production from amino acid esters by irradiation. **Food Research International**. 81: 100-107.
- Gani, A., Bashir, M., Wani, S., and Masoodi, F. (2012). Modification of bean starch by γ -irradiation: Effect on functional and morphological properties. **LWT-Food Science and Technology**. 49(1): 162-169.
- Gani, A., Gazanfar, T., Jan, R., Wani, S. M., and Masoodi, F. A. (2013). Effect of gamma irradiation on the physicochemical and morphological properties of starch extracted from lotus stem harvested from Dal lake of Jammu and Kashmir, India. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 12(2): 109-115.
- Gani, A., Nazia, S., Rather, S. A., Wani, S. M., Shah, A., Bashir, M., Masoodi, F. A., and Gani, A. (2014). Effect of γ -irradiation on granule structure and physicochemical properties of starch extracted from two types of potatoes grown in Jammu & Kashmir, India. **LWT - Food Science and Technology**. 58(1): 239-246.
- Ghali, Y., Ibrahim, N., Gabr, S., and Aziz, H. (1979). Modification of corn starch and fine flour by acid and gamma irradiation. Part 1. Chemical investigation of the modified products. **Starch/Stärke**. 31(10): 325-328.
- Gul, K., Singh, A., and Sonkawade, R. (2016). Physicochemical, thermal and pasting characteristics of gamma irradiated rice starches. **International Journal of Biological Macromolecules**. 85: 460-466.

- Han, J.-A., and Lim, S.-T. (2012). Effect of γ -irradiation on pasting and emulsification properties of octenyl succinylated rice starches. **Carbohydrate Polymers**. 90(4): 1480-1485.
- Hayashi, T., and Kawashima, K. (1982). Accumulation of Sucrose in Gamma-Irradiated Sweet Potato Roots. **Journal of Food Science**. 47(6): 2011-2014.
- Henry, F., Costa, L., and Aymes-Chodur, C. (2010). Influence of ionizing radiation on physical properties of native and chemically modified starches. **Radiation Physics and Chemistry**. 79(1): 75-82.
- Hu, B., Huang, M., Yin, S., Zi, M., and Wen, Q. (2011). Effects of electron-beam irradiation on physicochemical properties of starches separated from stored wheat. **Starch/Stärke**. 63(3): 121-127.
- Kader, A. A. (1986). Potential applications of ionizing radiation in postharvest handling of fresh fruits and vegetables. **Food Technol**. 40(6): 117-121.
- Klaushofer, H., Berghofer, E., and Steyrer, W. (1978). Stärkescitrate-produktion und anwendungstechnische eigenschaften. **Starch/Stärke**. 30(2): 47-51.
- Kong, X., Kasapis, S., Bao, J., and Corke, H. (2009). Effect of gamma irradiation on the thermal and rheological properties of grain amaranth starch. **Radiation Physics and Chemistry**. 78(11): 954-960.
- Lee, J.-S., Ee, M.-L., Chung, K.-H., and Othman, Z. (2013). Formation of resistant corn starches induced by gamma-irradiation. **Carbohydrate Polymers**. 97(2): 614-617.
- Lee, Y.-J., Kim, S. Y., Lim, S.-T., Han, S.-M., Kim, H.-M., and Kang, I.-J. (2006). Physicochemical properties of gamma-irradiated corn starch. **Preventive Nutrition and Food Science**. 11(2): 146-154.
- Lewandowicz, G., Fornal, J., and Walkowski, A. (1997). Effect of microwave radiation on physicochemical properties and structure of potato and tapioca starches. **Carbohydrate Polymers**. 34(4): 213-220.
- Lewandowicz, G., Jankowski, T., and Fornal, J. (2000). Effect of microwave radiation on physicochemical properties and structure of cereal starches. **Carbohydrate Polymers**. 42(2): 193-199.
- Liu, T., Ma, Y., Xue, S., and Shi, J. (2012). Modifications of structure and physicochemical properties of maize starch by γ -irradiation treatments. **LWT-Food Science and Technology**. 46(1): 156-163.

- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**. 31(3): 426-428.
- Mohd Adzahan, N., Mat Hashim, D. Muhammad, K., Abdul Rahman, R., Ghazali, Z. and Hashim, K. (2009). Pasting and leaching properties of irradiated starches from various botanical sources. **International Food Research Journal**. 16(3): 415-429.
- Pietranera, M. A., and Narvaiz, P. (2001). Examination of some protective conditions on technological properties of irradiated food grade polysaccharides. **Radiation Physics and Chemistry**. 60(3): 195-201.
- Pimpa, B., Muhammad, S. K.S., Hassan, M. A., Ghazali, Z., Hashim, K., and Kanjanasopa, D. (2007). Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties of sago starch. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. 29(3): 759-768.
- Raffi, J. J., Agnel, J. P. L., Thiery, C. J., Frejaville, C. M., and Saint-Lebe, L. R. (1981). Study of gamma-irradiated starches derived from different foodstuffs: a way for extrapolating wholesomeness data. **Journal of agricultural and Food Chemistry**. 29(6): 1227-1232.
- Rombo, G. O., Taylor, J., and Minnaar, A. (2001). Effect of irradiation, with and without cooking of maize and kidney bean flours, on porridge viscosity and in vitro starch digestibility. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 81(5): 497-502.
- Rombo, G. O., Taylor, J., and Minnaar, A. (2004). Irradiation of maize and bean flours: effects on starch physicochemical properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 84(4): 350-356.
- Rosenthal, I. (1992). **Electromagnetic radiations in Food Science**. Berlin: Springer Verlag.
- Sabularse, V., Liuzzo, J., Rao, R., and Grodner, R. (1991). Cooking quality of brown rice as influenced by gamma irradiation, variety and storage. **Journal of Food Science**. 56(1): 96-98.
- Singh, S., Singh, N., Ezekiel, R., and Kaur, A. (2011). Effects of gamma-irradiation on the morphological, structural, thermal and rheological properties of potato starches. **Carbohydrate Polymers**. 83(4): 1521-1528.
- Sofi, B. A., Wani, I. A., Masoodi, F. A., Saba, I., and Muzaffar, S. (2013). Effect of gamma irradiation on physicochemical properties of broad bean (*Vicia faba* L.) starch. **LWT-Food Science and Technology**. 54(1): 63-72.
- Urbain, W. M. (1986). **Food Irradiation**. New York: Academic Press.

- Wani, I. A., Jabeen, M., Geelani, H., Masoodi, F. A., Saba, I., and Muzaffar, S. (2014). Effect of gamma irradiation on physicochemical properties of Indian Horse Chestnut (*Aesculus indica* Colebr.) starch. **Food Hydrocolloids**. 35: 253-263.
- Wu, D., Shu, Q., Wang, Z., and Xia, Y. (2002). Effect of gamma irradiation on starch viscosity and physicochemical properties of different rice. **Radiation Physics and Chemistry**. 65(1): 79-86.
- Yu, Y., and Wang, J. (2007). Effect of γ -ray irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of rice. **Food Research International**. 40(2): 297-303.



บทที่ 5

บทสรุป

จากการศึกษาสภาวะในการผลิตสตาร์ชซีเตรทที่ความเข้มข้น 10 - 40% (w/v) พบว่าการบ่มสตาร์ชดิบในสารละลายกรดเข้มข้น 20% (w/v) ทำให้สตาร์ชซีเตรทมีปริมาณ RS สูงที่สุด และเมื่อนำสตาร์ชตัดแปรพื้นผิวมาผลิตสตาร์ชซีเตรทโดยบ่มในสารละลายกรดซिटริกที่ความเข้มข้นของกรด 20% พบว่าระยะเวลาในการตัดแปรพื้นผิว และระยะเวลาการบ่มสตาร์ชกับสารละลายกรด มีผลต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชซีเตรทที่ได้ โดยสภาวะการเตรียมที่ทำให้ได้สตาร์ชซีเตรทที่มีปริมาณ RS สูงที่สุด คือการตัดแปรพื้นผิวสตาร์ช 0.5 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มในสารละลายกรดซिटริก 1.0 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณ RS สูงถึง 75.39% แต่หากใช้ระยะเวลาตัดแปรพื้นผิวและระยะเวลาแช่บ่มสตาร์ชในสารละลายกรดนานขึ้น ส่งผลให้สตาร์ชซีเตรทที่ได้มีปริมาณ RS ลดลง

การฉายรังสีซินโครตรอนให้แก่สตาร์ชมันสำปะหลังดิบในระดับพลังงานต่ำคือ 100 - 500 mJ/cm³ จะก่อให้เกิดการแตกหักของสตาร์ชโมเลกุลได้ แต่หากระดับพลังงานที่ฉายให้ตัวอย่างสูงขึ้นไปจนถึง 5,000 mJ/cm³ จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชจากอนุโมลอิสระที่เกิดขึ้นได้ ในขณะที่การฉายรังสีซินโครตรอนให้กับสตาร์ชซีเตรท มีการแตกหักของโมเลกุลมากกว่า แต่ผลของการฉายรังสีสามารถช่วยให้ตัวอย่างทั้งสตาร์ชดิบ และสตาร์ชซีเตรทละลายได้ดีขึ้น และยังทำให้ความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบลดลง แต่โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชซีเตรทภายหลังการฉายรังสีไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ประวัติผู้เขียน

นางสาวผ่องพรรณ นนทมาศ เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ที่อำเภอเมือง นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนสวนหม่อน และสำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และตอนปลายจากโรงเรียนบุญเหลือวิทยานุสรณ์ จากนั้นเข้า รับการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2554 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานทางวิชาการ

Nontamas, P. and Tongta, S. (2015). Resistant starch and properties of the native and cross-linked starch exposed to electron beam irradiation. In **Proceeding of The 8th International Conference on Starch Technology** (pp 147-151). Pathum Thani, THAILAND: National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี