รหัสโครงการ SUT3-305-55-36-11

รายงานการวิจัย

การผลิตสตาร์ชซิเตรททนย่อยต่อเอนไซม์
(Production of Enzymes-Resistant Citrate starch)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT3-305-55-36-11

รายงานการวิจัย

การผลิตสตาร์ชซิเตรททนย่อยต่อเอนไซม์
(Production of Enzymes-Resistant Citrate starch)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา
ผู้ร่วมวิจัย
ดร.ธนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2555 - 2556
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2555-2556 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ 3 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยสุรนารี สำหรับอาคารสถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัยเหล่านี้ คือ นางสาวสุรวีร์ จำปาเทศ และนางสาวผ่องพรรณี นนทมาศ จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษาสภาวะการผลิตสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการดัดแปรทางเคมี โดยแช่สตาร์ชในสารละลายกรดซิตริก 20% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 1 - 6 ชั่วโมง ก่อนนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดัดแปรด้วยเอนไซม์ร่วมกับวิธีทางเคมี ซึ่งเตรียมโดยการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 - 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผลิตเป็นสตาร์ชซิเตรทด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับวิธีการดัดแปรทางเคมี พบว่า ระยะเวลาในการแช่ในสารละลายกรดซิตริกไม่มีผลทำให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทแตกต่างกัน ซึ่งมีปริมาณ RS ในช่วง 68.1 – 69.4 % แต่เมื่อใช้วิธีการดัดแปรร่วมกับเอนไซม์ พบว่าสภาวะการผลิตที่ทำให้ได้สตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณ RS สูงสุด เท่ากับ 74.2 % คือ ย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง และจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์และระยะเวลาในการแช่ในสารละลายกรดซิตริก ส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้มีปริมาณ RS ลดลง (27.71%) จากผลการทดลองนี้แสดงให้ว่าระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์และระยะเวลาในการแช่กรดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชที่ได้ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ RS และปริมาณกรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (bound citric acid) ของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้ลดลง นอกจากนี้พบว่าปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่เกิดในช่วง 28 – 74 % ไม่มีผลต่อความหนืด การพองตัวและการละลายของสตาร์ชซิเตรท และสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้ไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเพสท์

การทดสอบการให้ความร้อนระบบต่าง ๆ ของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชข้าว พบว่าการให้ความร้อนกับสตาร์ชข้าวซิเตรทที่มี RS 72.26% ด้วยลูกกลิ้งและการนึ่งมีผลทำให้ปริมาณ RS ของตัวอย่างที่มีความชื้น 70% ลดลงต่ำที่สุดคือ 0.59%และ 1.91% ตามลำดับ รองลงมาคือการให้ความร้อนด้วยเตาอบที่มีการสูญเสียปริมาณ RS 44.30% ส่วนการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอเป็นเวลา 30 นาทีมีผลทำให้สูญเสียปริมาณ RS มากที่สุดคือ 66.97% นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนไม่แสดงสมบัติการเกิดเพสท์ เช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม โดยลักษณะรูปร่างเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวซิเตรทหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง ด้วยลูกกลิ้ง และด้วยเตาอบ มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ไม่เหลือลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้การให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ มีผลทำให้ตัวอย่างเกิดผลึกแบบ Vh-type

Abstract

The resistant citrate starch (RS) production using chemical modification were studied. Tapioca starch was mixed with 20 % (w/v) citric acid solution and conditionted at 50 ^{o}C for 1 - 6 h prior to heating at 150 ^{o}C for 3 h. The enzymatic and chemical modification was investigated. Tapioca starch was hydrolyzed with α-amylase at 55 ^{o}C for 0.5 – 1 h, and followed by chemical modification. The results showed that the resistant starch (RS) content was not affected by conditioning time with the range of 68.1-69.4% RS. The combined method with enzyme showed that the optimal condition for producing the highest RS content of 74.1% was hydrolyzing with enzyme for 0.5 h, then conditioning citric acid solution for 1 h. An increased in enzyme hydrolysis time and conditoioning time resulted in a lower RS content (27.1%). The results indicated that the longer hydrolysis and conditioning times affected the increased reducing sugar content while the RS content and bound citrate content were decreased. In addition, a decrease in RS content showed no effect on pasting properties, swelling power and solubility. Thus, the citrate starch obtained did not exhibit pasting behavior.

The effect of various heat treatments were carried out by drum dry, steaming, baking and autoclaving process. The drum dry process with 70% moisture content of the sample showed the lowest loss of RS content (0.59% loss and 72.26% RS) while the steaming processes was1.91% loss in. Furthermore, the baking process showed 44.30% RS loss and the highest loss of 66.97% was found in the autoclaving process. Moreover, the citrate rice starch obtained from all of the heating processes showed no pasting viscosity. The granular shape of the rice citrate starch undergone the steaming, drum drying, and baking processes still unchanged, while it disappeared after autoclaving. These thermal processes also induced a Vh-crystalline type structure.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)	4
2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง	4
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช	4
2.1.1.1 อะไมโลส	5
2.1.1.2 อะมิโลเพกติน	5
2.2 ประเภทของสตาร์ช	7
2.2.1 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS)	8
2.2.2 คุณประโยชน์ทางสรีระวิทยาของ RS	9
2.3 สตาร์ชดัดแปร	11
2.3.1 ความหมายของสตาร์ชดัดแปร	11
2.3.2 การดัดแปรสตาร์ช	11
2.3.2.1 การดัดแปรทางเคมี	11
2.3.2.2 การดัดแปรทางกายภาพ	12
2.3.2.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ	12
2.4 สตาร์ชดัดแปรทางเคมี	12
2.4.1 ครอสลิงสตาร์ช	12
2.4.2 สตาร์ชอะซิเตท	14
2.4.3 สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล	14
2.4.4 สตาร์ชซิเตรต	15
2.5 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช	16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 ผลต่อลักษณะสัณฐาน...16
2.5.2 ผลต่อความหนืด..17
2.5.3 ผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน.. 18
2.5.4 ผลต่อโครงสร้างผลึก...19
2.5.5 ผลต่อกำลังการพองตัวและค่าการละลาย..19
2.6 การดัดแปรด้วยเอนไซม์..20
2.7 กระบวนการให้ความร้อน.. 20
2.7.1 การให้ความร้อนด้วยการนึ่ง..21
2.7.2 การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดัน..23
2.7.3 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง..24
2.7.4 การให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อน...24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.. 26
3.1 วัตถุดิบ………………………………………………………………… 26
3.2 วิธีการดำเนินงาน ………………………………..…………………….... 26
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง……………………………………………... 26
3.2.1.1 การเตรียมซิเตรทสตาร์ชจากสตาร์ชมันสำปะหลัง…... 26
3.2.1.2 การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์………. 26
3.2.1.3 การเตรียมซิเตรทสตาร์ชสำหรับทดสอบการทนความร้อน………………………………………………………….. 27
3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณ resistance starch……………………… 27
3.2.3 การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Bound citric acid)…..…………………………………………………….. 28
3.2.4 การวิเคราะห์ความหนืด……………………………………… 28
3.2.5 ความสามารถในการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)………………………………………………………... 29
3.2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์………………………. 29
3.2.7 โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชแกรนูล……………………… 30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.8 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)……………….. 30
3.2.9 X-ray Diffraction (XRD)……………….…………………… 30
3.2.10 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการนึ่ง (Steaming)………. 31
3.2.11 การทดสอบการทนความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ (Autoclaving)………………………..………………………….. 31
3.2.12 การทดสอบการทนความร้อนด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying) ……………………………...………………….... 31
3.2.12 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการอบ (Baking)………… 32
3.2.13 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ………. 32
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล……………………………………………….….. 33
4.1 ผลของความเข้มข้นของซิตริกในการผลิตสตาร์ชซิเตรท………………. 33
4.2 ผลของการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสร่วมกับกรดซิตริกในการสตาร์ชซิเตรท……………………………………………………….. 34
4.3 ผลของการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริก (Bound citrate) กับโมเลกุลสตาร์ช... 37
4.4 ความสามารถในการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)………………………………………………………………… 38
4.5 คุณสมบัติด้านความหนืด………………………………………………... 41
4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์…………………………………………………… 42
4.7 โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชแกรนูล…………………………………... 44
4.8 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)………………………… 47
4.9 การทดสอบการทนความร้อน…………………………………………….. 48
4.10 ผลของการทดสอบการทนความร้อนต่อปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปร……………………………………………………. 50
4.11 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวดัดแปร……………………………………… 57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.12 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านหนืดของสตาร์ช ข้าวดัดแปร.......... 59
4.13 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านความร้อนของ สตาร์ชข้าวดัดแปร.......... 60
4.14 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ สตาร์ชข้าวดัดแปร.......... 60
บทที่ 5 บทสรุป.......... 64
บรรณานุกรม.......... 65
ประวัติผู้วิจัย.......... 74

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อย..	10
3.1	ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกต่อปริมาณ RS...................	33
3.2	ผลของระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและแช่ในสารละลายกรดซิตริก...	35
3.3	ความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรท..	39
3.4	ผลของการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และการแช่ในสารละลายกรดซิตริกต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนกระบวนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน..	43
3.5	อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ....................	47
3.6	ค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ.....	52
3.7	อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ..	53
3.8	ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (Dextrose equivalent: DE) ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ..	54
3.9	ผลการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ (Cooking processes) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวดัดแปร...	55
3.10	อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านและไม่ผ่านความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ..	61

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน…………………………….	5
2.2	ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของสตาร์ชแกรนูล…………………………………………………………………	6
2.3	โครงสร้างทางผลึกชนิด A และ B รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรยของสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างทางผลึกแบบ A, B และ Vh…	7
2.4	ลักษณะโครงสร้างของ RS…………………………………………...	9
2.5	ปฏิกิริยาการเกิดครอสลิงกิงค์ระหว่างสตาร์ชกับ $POCl_3$, STMP และ EPI……………………………………………………………….....	13
2.6	การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับไวนิล อะซิเตทและอะซิติกแอนไฮไดรด์………………………………………………..	14
2.7	ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอริฟิเคชัน ระหว่างสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์…..	15
2.8	การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดซิตริกกับสตาร์ชเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท (mono-esterified) และสตาร์ชเชื่อมข้าม (di-esterified)….	16
3.1	ผลของความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรท……...	42
3.2	ลักษณะแกรนูลสตาร์ชของสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการผลิตที่สภาวะต่างๆ……………………………………………...	46
3.3	ผลการทดสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน RVA, แล้ว autoclave 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และต้มประมาณ 3 ชั่วโมง……………………..	49
3.4	ผลการทดสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน autoclave 121องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง……………………………………………………………...	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.5 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะการบ่ม 50องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ... 50
3.6 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ... 51
3.7 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่างๆ.................. 58
3.8 โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ............. 59
3.9 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ไม่ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)... 62
3.10 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction).. 63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในใบ และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับสตาร์ชจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพดและข้าวสาลีเป็นแหล่งให้สตาร์ชที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย, แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลังเป็นต้น ซึ่งสามารถสกัดเอาสตาร์ชออกมาได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง และต้นทุนต่ำ จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) แต่เนื่องจากว่าการใช้สตาร์ชดิบ (raw starch หรือ native starch) ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ มีข้อจำกัด เนื่องจากคุณสมบัติของสตาร์ชดิบ ได้แก่ ไม่สามารถทนต่อสภาวะการใช้ที่มี pH เป็นกรด อุณหภูมิสูง เครื่องมือที่มีแรงเฉือนสูง เมื่อเกิดเจลาติไนซ์แล้วอาจเกิดรีโทรเกรด ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบ หรือเกิดเจลแข็ง รวมถึงเมื่อเก็บนานขึ้นโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดซีนเนอร์เรซิสมีผลทำให้น้ำถูกบีบออกจากก้อนเจล เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาสตาร์ชดิบมาดัดแปรโดยวิธีทางเคมี ทางกายภาพ และการใช้เอนไซม์ โดยทำให้สตาร์ชทำให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนไป มี functional properties ตามที่ต้องการ เช่น ทำให้ความหนืดลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน นอกจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ดีขึ้นนี้แล้วยังต้องคำนึงถึงคุณประโยชน์ที่ร่างกายจะได้รับ เนื่องจากสตาร์ชเป็นแหล่งพลังงานหลักของมนุษย์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสุขภาพโดยเฉพาะในเรื่องของระดับน้ำตาลในเลือดที่มีผลกระทบต่อผู้ที่ป่วยเป็นโรคเบาหวาน โรคอ้วน และไขมันอุดตันในเส้นเลือด เป็นต้น จึงได้มีการดัดแปรสตาร์ชที่สามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในร่างกายที่เรียกว่า Resistant Starch ที่ไม่ถูกย่อยในลำไส้เล็กแต่จะถูกหมักในลำไส้ใหญ่ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งลำไส้ ลดระดับน้ำตาลในเลือด เป็นอาหารของโพรไบโอติก ลดคอเลสเตอรอล ยับยั้งการจับตัวของไขมัน และเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุ เป็นต้น (Sajilata, Singhal and Kulkani, 2006 อ้างถึงใน Chung, Shin, and Lim, 2008) โดยสตาร์ชทนย่อยนี้แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ RS type 1, RS type 2, RS type 3, และ RS type 4

เมื่อเปรียบเทียบ resistant starch (RS) ทั้ง 4 ชนิดพบว่า resistant starch type 4 หรือ chemically modified starch มีความทนทานต่อเอนไซม์มากที่สุดในการทดลองแบบ in vitro test (Moon and Shin, 2006) เนื่องจากว่าการดัดแปรสตาร์ชทางเคมีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะภายในโครงสร้างของแป้งที่ตำแหน่ง α – (1, 2), α – (1, 3), และ α – (1, 6) ซึ่งช่วยขัดขวางไม่ให้เอนไซม์เข้าไปย่อยพันธะ α – (1, 4), และ α – (1, 6) จึงทำให้สตาร์ชทนต่อการย่อย

ด้วยเอนไซม์ โดยมีการทดสอบการย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชฟอสเฟต สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชอะซิเตท และ สตาร์ชซิเตรท แล้วพบว่าถูกย่อยได้ลดลง และพบว่าอัตราการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Han and Bemiller (2007) ในการทำสตาร์ชเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัคซินิก แอนไฮไดรด์ เพื่อดูผลของการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าสตาร์ชดัดแปรมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 7.9% เป็น 25% ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ Chung et al. (2008) ที่ศึกษาผลของการดัดแปร normal corn starch โดยการทำออกซิเดชัน (oxidation) อะซิทิเลชัน(acetylation) ไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropylation) และครอสลิงกิง (cross-linking) ต่อการย่อยด้วย pancreatic α-amylase โดยได้ใช้สารเคมีต่างๆ และเหลือตกค้างไม่เกินที่ Codex กำหนด พบว่าการทำออกซิเดชัน (oxidation) อะซิทิเลชัน (acetylation) ไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (hydroxypropylation) และครอสลิงกิง (cross-linking) ที่มีค่า DS เท่ากับ 0.475, 0.482, 2.086, และ 0.137% มีปริมาณ RS เท่ากับ 35.1, 23.4, 34.2, และ 13.9% ตามลำดับ Klaushofer, Berghofer, and Steyrer (1978) ได้ศึกษาถึงการผลิตสตาร์ชซิเตรทและการใช้ประโยชน์ โดยใช้กรดซิตริกในการดัดแปรสตาร์ชจากธัญพืชและจากส่วนราก พบว่าเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ที่ได้ทำการดัดแปร corn starch ด้วยกรดซิตริก ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่าเมื่อค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.09 เป็น 0.12 ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 37.8 เป็น 78.8% ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Shin et al. (2007) ในการผลิต rice starch ด้วยกรดซิตริกที่ปริมาตร อุณหภูมิ และระยะเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า DS สูงขึ้นจะทำให้มีปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ Schrijver et al. (1999) ได้ทำการทดสอบความปลอดภัยของสตาร์ชซิเตรท แบบ in vitro โดยให้หนูรับประทานสตาร์ชซิเตรท พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพยาธิวิทยากับหนูเมื่อเปรียบเทียบผลกับ wheat starch และ corn starch

อย่างไรก็ตามจากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสตาร์ชดัดแปรทางเคมีข้างต้นโดยทั่วไปมี resistant starch ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณสารเคมีที่ใช้ได้และปริมาณสารตกค้าง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิธีการในการผลิตสตาร์ชทนย่อยให้มีปริมาณ resistant starch ที่สูงขึ้น โดยใช้สารเคมีที่ปลอดภัยที่สามารถให้ได้อย่างไม่จำกัดปริมาณ เช่น กรดซิตริก ซึ่งเป็นสารปรุงแต่งอาหาร มีราคาไม่แพง และสามารถจัดหาได้ง่าย เช่นเดียวกับสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวที่ประเทศไทยผลิตได้เป็นจำนวนมาก และจัดหาได้ง่าย ดังนั้นหากสามารถนำสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสตาร์ชซิเตรท เพื่อให้ได้สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ที่มีปริมาณ RS ที่สูงขึ้น และสามารถดูดหรือละลายน้ำได้ เพื่อทำให้สามารถนำไปใช้ได้หลากหลายตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังเป็นการช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้แก่สตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าว ให้มีมูลค่าสูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ศึกษา

กระบวนการผลิต RS ด้วยวิธีการทางเคมี จากแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่แป้งข้าว แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น มาระยะหนึ่งแล้ว เพื่อให้มีการพัฒนาและสามารถนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้ดีขึ้น เนื่องจากตลาดในปัจจุบันทั้งในประเทศ และต่างประเทศ มีความต้องการไฟเบอร์มากขึ้น ทางผู้วิจัยจึงต้องการต่อยอดการวิจัยเกี่ยวกับการผลิต RS ด้วยวิธีการทางเคมี เพื่อนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการผลิต RS ในเชิงพาณิชย์ โดยมีเป้าหมายที่จะนำไปใช้เป็น functional food ingredients ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการสร้างนวัตกรรมใหม่ของผลิตภัณฑ์จากแป้ง เพื่อใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเพื่อสุขภาพในอาหารต่างๆได้มากขึ้น ซึ่งนวัตกรรมนี้จะช่วยเพิ่มมูลค่าของแป้งให้สูงขึ้น และทำให้ประเทศไทยไม่ต้องนำเข้าไฟเบอร์ในจำพวก RS และอาจสามารถส่งออกต่างประเทศได้ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาหาปริมาณของกรดซิตริกที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชซิเตรทให้มีปริมาณการทนย่อยต่อเอนไซม์มากที่สุด

2.2 เพื่อศึกษาผลของการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ก่อนทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันต่อประมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้

2.3 เพื่อศึกษาศึกษาผลของกระบวนการให้ความร้อนแบบต่างๆ ต่อคุณสมบัติของสตาร์ชซิเตรท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

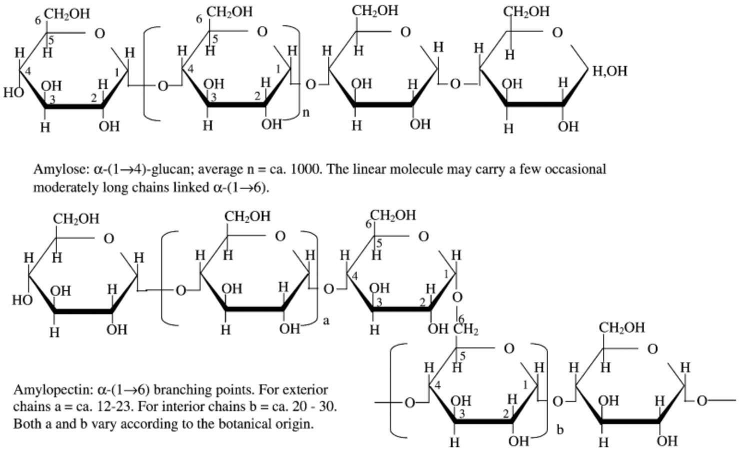
บทที่ 2
วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

2.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง

สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีขาว และลักษณะเด่นของสตาร์ชมันสำปะหลังคือมีความบริสุทธิ์สูง อุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่นิยมนำสตาร์ชมันสำปะหลังไปใช้ในอาหารสำเร็จรูป เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยการยึดเกาะ การแข็งตัว ทำให้เกิดความเข้มข้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้สตาร์ชมันสำปะหลังยังสามารถนำมาแปรสภาพเป็นสารให้ความหวาน เช่น กลูโคสไซรัปฟรุกโตรสไซรัป สารให้ความหวานที่มีพลังงานต่ำเช่น น้ำตาลแอลกอฮอล์ต่างๆ และสารปรุงแต่งรส เช่น ผงชูรส เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกู ปิยะจอมขวัญ, 2546) แต่อย่างไรก็ตามสตาร์ชมันสำปะหลังจัดว่าเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีสมบัติบางอย่างไม่คงตัว เช่น เมื่อได้รับความร้อนจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง แต่ความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงเฉือนและความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีข้อจำกัดในการนำสตาร์ชมันสำปะหลังจากธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ได้โดยการนำสตาร์ชธรรมชาติไปผ่านกรรมวิธีการดัดแปรต่างๆ เพื่อปรับปรุงสตาร์ชธรรมชาติให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น มีความหนืดสูงกว้างขึ้น หรือมีความหนืดต่ำลง เกิดเจลและให้ความหนืดได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำลง คงทนต่อสภาวะต่างๆในการแปรรูปและเก็บรักษา ซึ่งการดัดแปรสตาร์ชจะทำให้สตาร์ชธรรมชาติซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากและราคาถูก มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น และมีมูลค่าของสตาร์ชก็สูงขึ้นด้วย (Light, 1990)

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้น พบอยู่ในส่วนของคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว และสตาร์ชยังถึงเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานสูงของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และจัดเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิ่ง (reducing end group) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะมิโลเพคติน (amylopectin) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

ที่มา : Tester, Karkalas, and Qi, (2004)

2.1.1.1 อะไมโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ประกอบด้วยกลูโคส ประมาณ 1,000-6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4-glycosidic linkage และอาจพบกิ่งก้านในโมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Bulèon et al.,1998; Hizukuri, 1985) อะมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และมีค่าระดับขั้นของพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกันด้วยํากพ ตำแหน่งของอะมิโลสภายในสตาร์ชแกรนูลขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช โดยอะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โครงสร้างของอะมิโลสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย ซึ่งถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500-160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler and Daniel, 1984)

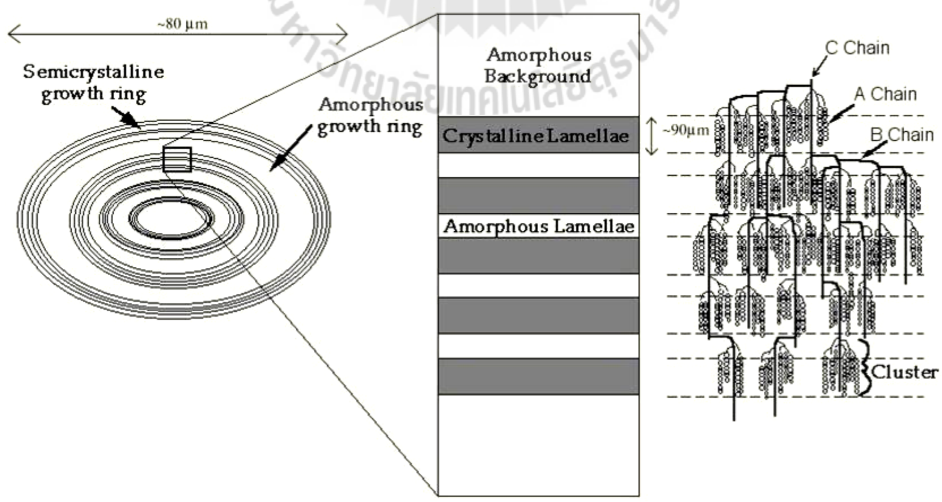
2.1.1.2 อะมิโลเพกติน

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสที่มีขนาดใหญ่กว่าอะมิโลสหลายเท่ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7- 10^9 (Buleon, Colonna, Planchot, and Ball, 1998) ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 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 แสดงดังรูปที่ 2.2 ในอะมิโลเพกตินแต่ละ

โมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น สำหรับอะมิโลเพกตินของสตาร์ชข้าว สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90% จะประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

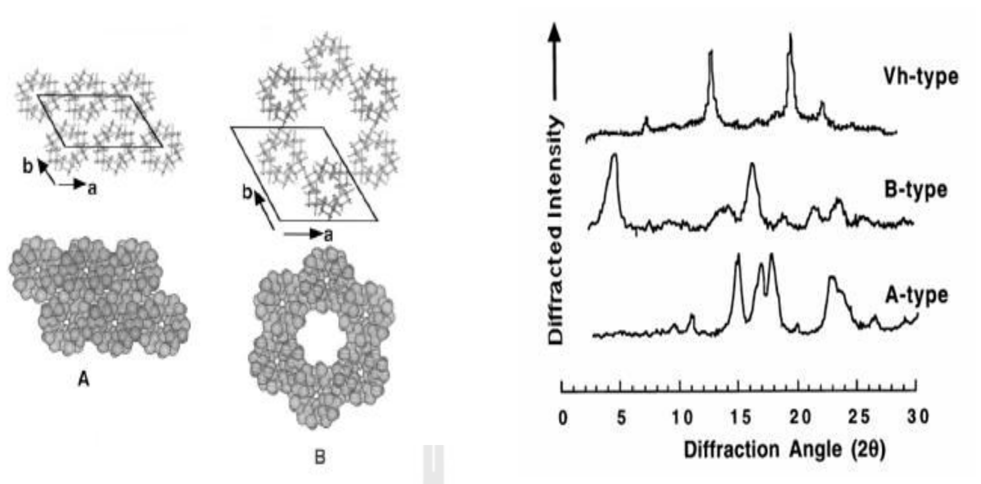
สตาร์ชในธรรมชาติทั่วไปจะอยู่ในรูปของสตาร์ชแกรนูลขนาดเล็กพบในพืชเม็ด พืชหัว และพืชราก ซึ่งมีขนาด รูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชนั้น ๆ (Perez and Bertoft, 2010; Srichuwong, Sunarti, Mishima, Isono, and Hisamatsu, 2005) สตาร์ชแกรนูลมีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) คือโครงสร้างส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) โดยส่วนอสัณฐานของสตาร์ชแกรนูลจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (Jacobs and Delcour, 1998) ขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ต่อกันของคลัสเตอร์อะมิโลเพกติน (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า amorphous lamellae และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวม้วนคู่ (double helices) อย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณส่วนนี้ว่า crystalline lamellae แสดงดังรูปที่ 2.2

สตาร์ชแกรนูลมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (สตาร์ชจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของสตาร์ชแกรนูล

ที่มา : Jacobs and Delcour (1998)



(a) (b)

รูปที่ 2.3 (a) ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B, (b) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซเรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A, Bและ V_h

ที่มา : Buleon et al. (1998)

ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V (Sevenou, Hill, Farhat, and Mitchell, 2002; Zobel, 1998)

สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกันซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคคู่ (doublet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 17-18^{o}และพีคเดี่ยว (singlet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 23^{o}แต่ไม่มีพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6^{o}ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17^{o} แต่ไม่มีพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 18^{o}และมี doublet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 22 และ 24^{o} ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากพืชหัว ส่วนสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือมี singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17.9^{o}ตัวอย่างเช่น สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว รากลำต้น และสตาร์ชจากผลไม้บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะผลึกแบบ V ที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะมิโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex)จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 13 และ 20^{o}(รูปที่ 2.4) (Buleon et al.,1998)

2.2 ประเภทของสตาร์ช

กระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตหรอสตาร์ช เริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก โดยกระบวนการย่อยลำดับแรก คือฟันจะทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหารย่อยขนาดของชิ้นอาหารให้เล็กลง

และคลุกเคล้าชิ้นอาหารที่ถูกบดให้ขนาดเล็กลงกับในน้ำลายซึ่งมีเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α-amylase) ที่สามารถย่อยสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงเป็นเด็กซ์ตริน (dextrin) แต่การย่อยในปากจะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ จึงทำให้เกิดการย่อยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหาร ซึ่งมีเอนไซม์อะไมเลสอยู่ แต่เอนไซม์จะไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากในกระเพาะอาหารมีสภาวะที่เป็นกรดสูง ดังนั้นในกระเพาะอาหารจึงไม่เกิดกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ แต่จะเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส คือการแตกตัวของคาร์โบไฮเดรตทำให้สคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ชมีขนาดโมเลกุลเล็กลง จากนั้นกระบวนการย่อยสตาร์ชที่แท้จริงจะเกิดที่ลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่างที่เหมาะสมกับสภาวะการย่อย ทำให้ลำไส้เล็กสามารถย่อยสตาร์ชจนสุดท้ายได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่สามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ดังนั้นในเชิงโภชนาการสตาร์ช (nutritional starch) โดยทั่วไปแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย (Englyst and Hudson, 1992) ได้แก่ สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) สตาร์ชที่สามารถถกย่อยได้อย่างช้า ๆ (Slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS)

2.2.1 สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS)

สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (enzymes–resistant starch หรือ resistant starch) ตามคำนิยามของ EURESTA (European Resistant Starch Research Group) ได้ให้คำจำกัดความของ resistant starch ว่าเป็นสตาร์ชหรือผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่มีความสามารถทนทานต่อสภาวะการย่อยในลำไส้เล็กของมนุษย์ และเมื่อสตาร์ชชนิดนี้ถูกส่งต่อมายังลำไส้ใหญ่จะสามารถเป็นสารตั้งต้นให้แก่จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ได้ และทำให้เกิดกระบวนการหมัก ขึ้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการหมักนั้นคือ ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, และกรดไขมัน สายสั้น (short chain fatty acid; SCFA) (Nugent, 2005)

1) Resistant starch type 1 (RS1) เป็นสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการย่อย เนื่องจาก ลักษณะทางกายรูปที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำลายเม็ดสตาร์ชได้ เช่น เมล็ดพืชที่ถูกขัดสีบางส่วน

2) Resistant starch type 2 (RS2) เป็นสตาร์ชที่ยังคงรูปร่าง หรือคงสภาพอยู่ใน เม็ดสตาร์ชดิบ(native starch granule) ซึ่งมีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ เนื่องจากโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชมี การอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของเม็ดสตาร์ช ทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ตัวอย่างของสตาร์ชชนิดนี้คือสตาร์ชจากกล้วยดิบ (green banana) และสตาร์ชมันฝรั่ง (potato starch)

3) Resistant starch type 3 (RS3) เป็น resistant starch ชนิดที่มีมากที่สุด ซึ่งเป็น สตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเจลาทิไนเซชัน และมีการทำให้เย็นและเกิดการ จัดเรียงตัวกันใหม่ หรือเกิด

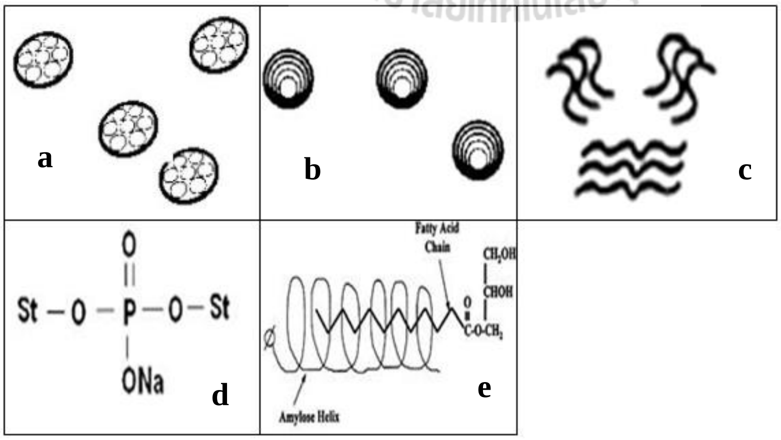
กระบวนการรีโทรเกรเดชัน เช่น ขนมปัง มันฝรั่งที่สุกและเย็นลง (cooked and cooled potato) เป็นต้น

4) Resistant starch type 4 (RS4) เป็น resistant starch ที่เกิดจากกระบวนการดัดแปรสตาร์ชทางเคมี (chemical modified starch) ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสตาร์ชโดยมีพันธะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากพันธะ α-(1-4) และ α-(1-6) ซึ่งทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีความแข็งแรงของพันธะมากขึ้น เช่น การทำเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) อีเทอริพิเคชัน (etherification) และการทำครอสลิงค์ (cross-linking) (Ratnayake and Jackson, 2008; Sanzet al., 2009) ซึ่งจะทำให้เกิดหมู่แทนที่หรือพันธะเพิ่มขึ้นภายในโครงสร้างของสตาร์ชทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยได้ โดยขอบเขตในการดัดแปรขึ้นอยู่กับ แหล่งของสตาร์ชที่ใช้ ชนิดของสตาร์ช ระดับการดัดแปร และวิธีที่ใช้ในการดัดแปร (Perry, Wepner, Berghofer, Miesenberger, and Tiefenbacher, 1999)

5) Resistant starch type 5 (RS5) เป็น resistant starch ที่อยู่ในรูปของ V-form (รูปที่ 2.4e) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylase-lipid complex) (Li, Gao, and Ward, 2011)

2.2.2 คุณประโยชน์ทางสรีระวิทยาของ RS

1) RS เป็นสตาร์ชที่ทนทานต่อการย่อยโดยเอนไซม์ของมนุษย์ 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



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของ (a) RS_1, (b) RS_2, (c) RS_3 (d) RS_4และ RS_5

ที่มา : ดัดแปลงจาก Sajilata et al.(2006) and Singh, Kaur, and McCarthy (2007)

และมีคุณประโยชน์ทางสรีระวิทยาเหมือนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือ ทำดิบ) พบว่าระดับคลอเลสเตอรอลและไตกลีเซอไรด์ในเลือดลดลง ให้ระดับการย่อยและการเผาผลาญกลูโคสได้ช้าลง ซึ่งส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งในลำไส้ใหญ่ลดคอเลสเทอรอลและไตรกลีเซอร์ไรด์ในเลือด

ตารางที่ 1.1 ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อย

ประเภทสตาร์ช	แหลงของสตาร์ช	การย่อยในลำไส้เล็ก
สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS)	อาหารที่มีส่วนประกอบของสตาร์ชเมื่อผ่านการหุงต้มใหม่ ๆ	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วไปเป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที
สตาร์ชที่สามารถถกย่อยได้อย่างช้า ๆ (Slowly digestible starch, SDS)	สตาร์ชจากธัญพืชดิบ ผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุก	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างช้า ๆ ไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เวลาตั้งแต่ 20 ถึง 110 นาที
สตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS)	เมล็ดธัญพืชที่ถูกบด หรือสตาร์ชที่เกิดการคืนตัว	ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

ที่มา : Englyst t al. (1992)

2) อัตราการย่อยอาหารต่ำ (Hypoglycaemic effects) อาหารที่มี RS จะทำให้มีอัตราการย่อยต่ำ โดยทั่วไปอาหารประเภทแป้งจะเกิดการย่อย เกือบจะทันทีหลังการบริโภคอาหารแต่อาหารที่มี RS จะเกิดการย่อยได้ช้า โดยเกิดขึ้นหลังจากรับประทานอาหารแล้ว 5-7 ชั่วโมง ดังนั้น RS จึงลดค่าไกลซีมิค (glyceamic index) ได้

3) เป็นสารตั้งต้นของพรีไบโอติก (Prebiotic) เนื่องจาก RS ที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึมในลำไส้เล็กทำให้เหลือผ่านมาถึงลำไส้ใหญ่และจะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acid) ได้แก่ อะซิเตท บิวทีเรท และโพรปิโนเอต ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารตั้งต้น (Substrate) ที่ให้พลังงานแก่แบคทีเรียโพรไบโอติก (Probiotic) เช่น Bifidobacterium ทำให้เจริญเติบโตได้ดี

4) ยังยั้งการสะสมไขมันและลดการสะสมคอเลสเทอรอล หลังการรับประทานอาหารที่มี RS พบว่า มีการเกิดออกซิเดชั่นของไขมันเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงการลดการสะสมไขมันในระยะยาวได้ และในการศึกษาในหนูทดลอง ที่ให้อาหารที่มี RS (ร้อยละ 25 มันฝรั่งดิบ๗ พบว่าระดับคลอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดลดลง

2.3 สตาร์ชดัดแปร

2.3.1 ความหมายของสตาร์ชดัดแปร

สตาร์ชดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหารตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ชธรรมชาติ เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/ทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมอื่นๆ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

2.3.2 การดัดแปรสตาร์ช

สตาร์ชธรรมชาติหรือสตาร์ชดิบโดยทั่วไปจะมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่นๆ จึงได้มีการทำการดัดแปรสตาร์ชธรรมชาติเพื่อให้มีคุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการดัดแปรจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสตาร์ชที่ต้องการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี (Light, 1990) การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) เพิ่มขึ้น ให้ลักษณะของเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีความสามารถในละลายหรือการผสมรวมกับน้ำและ/หรือตัวทำละลายอื่นๆได้ดีขึ้น (BeMiller and Lafayette, 1997) สามารถแบ่งกลุ่มสตาร์ชดัดแปรได้ดังนี้

2.3.2.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical modification)

a) การกิดอนุพันธ์ (derivatization)

(1) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของสตาร์ช (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น สตาร์ชอะซิเทต หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น สตาร์ชไฮดรอกซีเอทิล

(2) การทีที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากว่า 1 หมู่ เช่น สตาร์ชครอสลิงค์ (cross-linking starch)

b) การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชด้วยกรด (acid thinning) เช่น สตาร์ชย่อยด้วยกรด

c) เดกซ์ทริไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะโดใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น เดกซ์ทริน (dextrin)

d) ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น สตาร์ชออกซิไดซ์ (oxidized starch)

e) การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์หรือกรด เพื่อย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทริน (maltodextrin)

2.3.2.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

a) เจลาทิไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนสตาร์ชจนผ่านขั้นตอนของเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชแล้วทำแห้งทันที เช่น สตาร์ชพรีเจลาทิไนซ์

b) สตาร์ชละลายน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาทิไนเซชัน

c) การลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยทางกล เป็นการทำให้เม็ดสตาร์ชแตกโดยทางกล จะทำให้ได้เม็ดสตาร์ชขนาดเล็กกว่าปกติ

d) annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดสตาร์ชอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช

e) การใช้ความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนในอุณหภูมิสูงกว่าจุดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชในขณะที่สตาร์ชอยู่อยู่ในสภาวะที่มีความชื้นต่ำ

2.3.2.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

a) Waxy starch คือสตาร์ชที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

b) High-amylose starch คือสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง

2.4 สตาร์ชดัดแปรทางเคมี

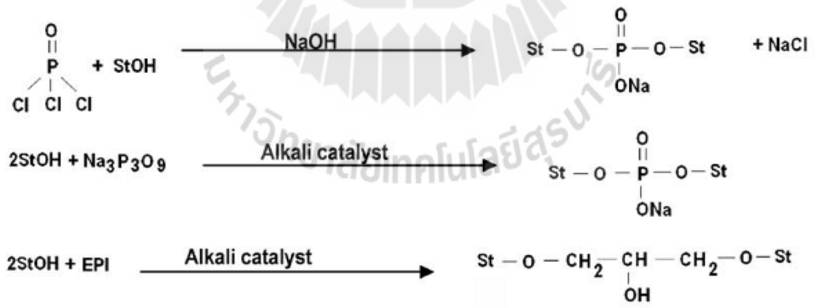
2.4.1 ครอสลิงสตาร์ช (Cross-linked starch)

ครอสลิงค์สตาร์ชเป็นสตาร์ชที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multifunctional reagent) เรียกสารเคมีนั้นว่า cross-linking reagent เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันหรืออีเทอร์ริฟิเคชัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชดังแสดงในรูปที่ 2.6 พันธะโควาเลนต์จะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ชโดยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสรูปที่มีแรงเฉือน (กล้าณรงค์ ศีรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ส่งผลให้เมื่อให้ความร้อนแก่ครอสลิงค์สตาร์ช ถึงแม้ว่าพันธะไฮโดรเจนจะอ่อนตัวลง หรือ ถูกทำลาย แต่เม็ดสตาร์ชยังคงแข็งแรงอยู่ได้ด้วยพันธะที่เกิดจากการดัดแปรทางเคมี สภาวะที่ใช้ในการทำ ครอสลิงค์สตาร์ชมีหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่มาทำปฏิกิริยา ได้แก่ STMP STPP และ ฟอสฟอรัส ออกซีคลอไรด์ ($POCl_3$) เป็น

ต้น โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาในสารละลายสตาร์ช ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 50 องศาเซลเซียสที่ช่วงพีเอชเป็นกลางถึงด่างอ่อน (Wurzbug,1986)

Hwang et al. (2009) ได้ศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของสตาร์ชข้าวอะมิโลเพคตินสูงที่มีการดัดแปรด้วยการทำครอสลิงค์โดยใช้ $POCl_3$ ที่ระดับความเข้มข้น 0.002, 0.004, 0.006 และ 0.008 % ตามลำดับ พบว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของ $POCl_3$ เพิ่มขึ้นทำให้ระดับการเกิดครอสลิงกิงค์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณ RS สูงมากขึ้นคือจาก 1.17 เป็น 2.47% ซึ่งเมื่อระดับการเกิดครอสลิงกิงค์เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการพองตัวของ (Swelling) และความสามารถในการละลาย (Soluble) ของสตาร์ชลดลง เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปได้จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีค่าลดลง

ต่อมา Khondkar, Tester, and Karkalas (2009) ทำการศึกษาสภาวะในการผลิตครอสลิงค์สตาร์ชระหว่างสาร STMP กับเจลาติไนซ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (gelatinized waxy maize starch) และโล- เมทอกซี เพคติน (low-methoxy pectin mixture) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (สตาร์ช:เพคติน = 3:2, 2:3) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียสและระยะเวลา 2-24 ชั่วโมง เพื่อดูผลของการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส โดยสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าการเกิดครอสลิงค์ระหว่างสตาร์ชและเพคตินที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลทำให้ตัวอย่างดังกล่าวถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้น้อยกว่าสตาร์ชดิบ โดยครอสลิงค์ที่มีอัตราส่วน



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิดครอสลิงกิงค์ระหว่างสตาร์ชกับ $POCl_3$, STMP และ EPI
ที่มา : Singh et al. (2007)

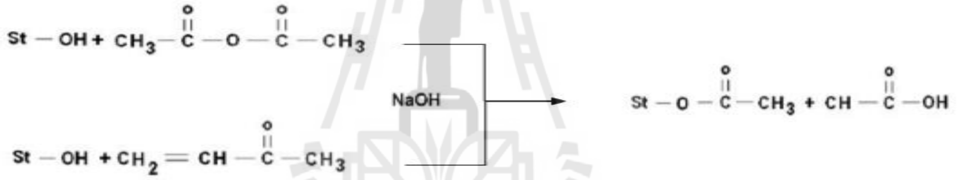
ของเพคตินมากกว่าจะถูกย่อยได้น้อยกว่า ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสตาร์ชกับเพคติน (heterologus cross-linked) ขึ้น จึงทำให้ขัดขวางการย่อยของเอนไซม์

Koo, Lee, and Lee (2010) ได้ศึกษาผลของการทำครอสลิงค์ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชข้าวโพดโดยเตรียมจากการใช้สารผสมระหว่าง STMP/STPP ในอัตราส่วน 99 : 1 (w/w) ที่ระดับ 5-12% พบว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารผสมสูงที่สุด คือ 12 % นั้น สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการทำครอสลิงค์มีระดับครอสลิงกิงค์สูงที่สุดคือ 99.1 % ตลอดจนมี

ปริมาณ RS คือ 58.68 % ซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดอีกด้วย จึงอาจสรุปได้ว่า เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของสารเคมีในการทำครอสลิงค์ในสตาร์ชข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ระดับการเกิดครอสลิงกิงค์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มสูงขึ้นด้วยนอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระดับครอสลิงกิงค์ที่เพิ่มสูงขึ้นยังทำให้คุณสมบัติด้านการละลายของสตาร์ชข้าวโพดลดลงอีกด้วย

2.4.2 สตาร์ชอะซิเตท (Starch acetate)

สตาร์ชอะซิเตทเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (estherification) ของสตาร์ชโพลิเมอร์ ที่หมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสเปลี่ยนเป็นหมู่อะซิติลด้วยสารเคมี ได้แก่ กรดอะซิติก และอะซิติกแอนไฮไดรด์ในสภาวะด่างโดยระดับการแทนที่จะขึ้นอยู่กับสภาวะและชนิดของสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยา (รูปที่ 2.6) (Wurzbug, 1986) Shogren and Biswas (2006) ได้ศึกษาการเตรียมสตาร์ชอะซิเตทที่สามารถละลายน้ำได้ จากสตาร์ชข้าวโพดโดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียสและเวลา 4-7 นาที พบว่ามีค่า DS เท่ากับ 0.4-0.9 และมีความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องได้มากกว่า 90% ในปีเดียวกัน Shon and Yoo (2006)



ได้ศึกษาผลของการทำอะซิทิเลชันต่อคุณสมบัติการไหลของสตาร์ชข้าว โดยใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์

รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างสตาร์ชกับไวนิล อะซิเตท และอะซิติกแอนไฮไดรด์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Singh et al. (2007)

ที่ระดับ 2, 4, 6, 8, และ 10% ในการดัดแปรสตาร์ชข้าว พบว่าเมื่อระดับของอะซิติกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่า DS สูงขึ้น เป็นผลทำให้ค่าการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชทำให้ความเป็นระเบียบของเม็ดสตาร์ชลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ง่ายขึ้นจึงทำให้มีค่าการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น

2.4.3 สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl starch)

สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลถูกผลิตขึ้นมาครั้งแรกเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide) ในสภาพสารละลายสตาร์ช โดยเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (รูปที่ 2.7) โดยมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปประมาณ 5-7% เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(catalyst) ซึ่งทำให้สตาร์ชที่ได้มีความทนต่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเย็น (cold-storage) มีความใส และมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

Jyothi, Moorthy, and Rajasetharam (2007) และคณะได้ศึกษาวิธีการเตรียมและคุณสมบัติของสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลจากมันสำปะหลัง โดยได้ทำการดัดแปลงสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยโพรพิลีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 50, 100, 150 และ 200 กรัมต่อกิโลกรัมสตาร์ชพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์มากขึ้นมีผลทำให้ DS เพิ่มขึ้นจาก 0.259 เป็น1.405 ซึ่งส่งผลให้สตาร์ชถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (digestibility)ลดลงจาก 840 เป็น 424 กรัมต่อกิโลกรัม ส่วนค่าการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโมเลกุลของสตาร์ชจึงทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความเป็นระเบียบลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้ามาได้ง่ายขึ้น จึงทำให้มีค่าการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้น

Ebihara, Nakai, and Kishida (2006) ได้ศึกษาการเตรียมไฮดรอกซีโพรพิล-ไดสตาร์ชฟอสเฟตที่ผลิตจากสตาร์ชมันฝรั่งที่ความเข้มข้นของโพรพิลีนออกไซด์เพื่อให้ได้ระดับการแทนที่ 2

ระดับ ได้แก่ high DS และ low DS และที่ degree ofcross-linking (DC) 3 ระดับ คือ low DC,

รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอริฟิเคชัน ระหว่างสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์
ที่มา : ดัดแปลงจาก Tharanathan (2005) and Singh et al. (2007)

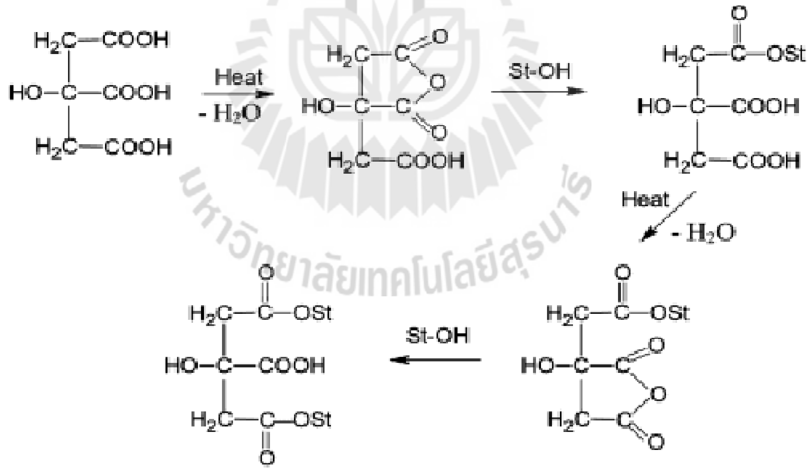
และhigh DC พบว่าเมื่อระดับครอสลิงกิงค์และระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นคือ จาก 0.05 เป็น 0.23 ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจาก 21.9 เป็น 63.1% และมีค่า swelling power เพิ่มขึ้นจาก 14.3 เป็น 17.1 แต่เมื่อระดับครอสลิงกิงค์เพิ่มขึ้น swelling power มีค่าลดลง

2.4.4 สตาร์ชซิเตรต (Citrate starch)

สตาร์ชซิเตรทสามารถผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริกโดย USFDA ได้จัดกรดซิตริกว่าเป็น Generally Recognized as Safe (GRAS) คือเป็นสารที่สามารถใช้ได้อย่างไม่จำกัด และมีความปลอดภัยต่อร่างกายเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชซิเตรทมีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ของกรดในโครงสร้างของสตาร์ชเพิ่มขึ้น (Xie and Liu, 2004) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริกเกิดขึ้นในสภาวะแห้งที่มีการให้ความร้อน เมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจะสูญเสียโมเลกุลของน้ำไปและเปลี่ยนอยู่ในรูปของซิตริกแอนไฮไดรด์ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช

โมเลกุลเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชและกรดซิตริกแสดงดังรูปที่ 2.8 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กรดซิตริกสูญเสียน้ำและอยู่ในรูปแอนไฮไดรด์มากขึ้น ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาหรือเกิดครอสลิงค์กับสตาร์ชโมเลกุลได้เป็นไดสตาร์ชซิเตรท (distarch citrate) (Xie and Liu, 2004; Xie, Lui, and Cui, 2006; and Chowdary and Enturi, 2011)

ในการผลิต resistant starch เพื่อให้ได้ระดับการแทนที่และปริมาณ RS ที่สูงขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี ระดับความเข้มข้น สภาวะ วิธีการที่ใช้ และชนิดของสตาร์ช จากการศึกษาของ Xie and Liu (2004) ได้รายงานว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินสูง (waxy corn), สตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสปกติ (normal corn), และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (high amylose starch) ที่ความเข้มข้นของกรดซิตริก 40% บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียสเวลา 3-9 ชั่วโมง พบว่า waxy corn มีค่า DS และปริมาณ RS สูงสุดคือ 0.16 และ 87.5% ตามลำดับ ส่วน high amylose starch และ normal corn starch มีค่าเท่า 0.14 กับ 86.4% และ 0.12 กับ 78.8% ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่า DS และปริมาณ RS เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดหมู่แทนที่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชทำให้ขัดขวางการเข้ามาย่อยของเอนไซม์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดซิตริกกับสตาร์ชเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท (mono-esterified) และสตาร์ชเชื่อมข้าม (di-esterified)

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Xie and Liu (2004) และ Menzel (2014)

Jyothi, Moorthy, Shreckumar, and Rajasetharam (2007) ได้ทำการผลิตสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟที่กรดซิตริก 0.15-0.45 โมลต่อโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสที่อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียสเวลา 3-7 นาที พบว่า DS มีค่า

เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอุณหภูมิ รวมถึงความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่มีค่า DS สูงสุด 0.063 คือใช้กรดซิตริก 0.45 โมลอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเวลา 7 นาทีเช่นเดียวกับการศึกษาของ Agboola, Akingbala, and Oguntmein (1991) ในการผลิตตาร์ชซิเตรทที่มีค่า DS ต่ำจากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ 5, 10, 15 และ 20% พบว่ามีค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.002 เป็น 0.023

Shin et al. (2007) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวให้มีปริมาณ SDS และ RS สูงด้วยกรดซิตริก โดยให้ตาร์ชกระจายตัวในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ปริมาตรต่างๆ (10, 20, 30, 40 และ 50 ml) จากนั้นนำไป autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 4, 35.5, 67, 98.5 และ130 องศาเซลเซียสเวลา 0, 6, 12, 18 และ24 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ 3 มิติ (response surface) เพื่อใช้คำณวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวดัดแปรพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสตาร์ชข้าวดัดแปรด้วยกรดซิตริกคือที่ระดับของกรดซิตริกเท่ากับ 2.62 มิลลิโมล ของกรดซิตริก ต่อ 20 กรัมสตาร์ชที่อุณหภูมิ 128.4 องศาเซลเซียส เวลา 13.8 ชั่วโมง มีค่า DS เท่ากับ 0.027 และ RS เท่ากับ 40% ตามลำดับ และเมื่อระดับ DS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ RS สูงขึ้นด้วย ต่อมา Kim et al. (2008) ได้ศึกษาสภาวะในการผลิตกลูตาเรทสตาร์ชเพื่อให้มีปริมาณ RS ที่สูง โดยใช้ความเข้มข้นของกรดกลูตาริกในช่วง 0.1-0.5 กรัมต่อกรัมสตาร์ช บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70-130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-9 ชั่วโมง พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีระดับการแทนที่และปริมาณ RS ที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยสภาวะที่มีปริมาณ RS สูงสุดคือที่ 0.45 กรัมกรดต่อกรัมสตาร์ช อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสเวลา 7.5 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณ RS เท่ากับ 66%

2.5 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ช

2.5.1 ผลต่อลักษณะสัณฐาน

การใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชหลังจากผ่านการดัดแปร จากการทดลองของ Kim and Lee (2002) พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์และอิพิคลอโรไฮดรินยังคงมีผิวที่เรียบไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชหลังผ่านการเชื่อมข้าม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายอิพิคลอโรไฮดรินเพิ่มสูงขึ้น และจากการศึกษาของ Yeh and Yeh (1993) พบว่าการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือลักษณะปรากฏของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยสตาร์ชยังคงมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างร่างแหอยู่ แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ^{o}Cเป็นระยะเวลา 30 นาที จะส่งผลทำให้สตาร์ชมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างตาข่ายเพิ่ม

มากขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดสตาร์ช

2.5.2 ผลต่อความหนืด

Yeh and Yeh (1993) ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่องบราเบนเดอร์โดยสตาร์ชจะให้ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 71.4 ^{o}Cค่าความหนืดสูงสุด 600 BU (Brabender unit) ที่อุณหภูมิ 84.6 ^{o}C หลังจากผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้ามสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นคือ 800 BU ที่อุณหภูมิ 87 ^{o}C

Liu, Ramsden, and Corke (1999) พบว่าหลังผ่านการเชื่อมข้ามสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีความหนืดสูงสุดอุณหภูมิในการเริ่มเกิดความหนืดลดต่ำลงแต่ในสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและสตาร์ชทั้งสองจะมีค่าเบรกดาวน์ลดต่ำลงความหนืดขณะร้อนความหนืดขณะเย็นเพิ่มสูงขึ้น

Hirsch and Kokini (2002) ได้ทำการศึกษาสารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมข้ามพบว่าฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะให้คุณสมบัติทางด้านความหนืดสูงกว่าสารเคมีชนิดอื่น (โซเดียมไตรเมตตาฟอสเฟตและอิพิคลอโรไฮดริน)

2.5.3 ผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน

Singh et al. (2007) กล่าวว่าการเกิดการเจลาติไนเซชันคือการทำลายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ผันกลับของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชเช่นการพองตัวของเม็ดสตาร์ชการหลอมเหลวของผลึกการสูญเสีย birefringence และการละลายของสตาร์ช

Chatakanonda, Varavinit, and Chinachoti (2000) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยเครื่อง DSC พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_o) เท่ากับ 57.4 ^{o}Cอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุดขณะเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_p) เท่ากับ 67.3 ^{o}C อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_c) เท่ากับ 76.8 ^{o}C และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการเจลาติไนเซชัน (ΔH_{gel}) เท่ากับ 6.7 J/g และหลังจากผ่านการดัดแปรสตาร์ชด้วยการเชื่อมข้ามจะมีช่วงการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_c- T_o) แคบขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรและสตาร์ชควบคุม (ไม่เติมโซเดียมไตรเมตตาฟอสเฟต) สตาร์ชควบคุมจะมีอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันลดลงเล็กน้อยแต่สตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของการดัดแปรเพิ่มสูงขึ้นจากผลดังกล่าวทำให้ยืนยันได้ว่าหมู่ฟอสเฟตจะเข้าไปในโมเลกุลของสตาร์ชส่งผลทำให้สตาร์ชเกิดการจับตัวกันแน่นมากขึ้นและมีค่า ΔH_{gel} ลดต่ำลงหลังผ่านการเชื่อมข้ามและยังพบพีคที่เกิดขึ้นอีก 1 พีคที่อุณหภูมิ 90-110^{o}Cซึ่งเป็นลักษณะของการรวมตัวกันของอะไมโลสและไขมัน (amylose-lipid complex)

Choi และ Kerr (2003) รายงานว่าการเชื่อมข้ามโดยใช้สารฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ที่ระดับต่ำๆจะทำให้ช่วงการเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรในขณะที่ถ้าใช้ระดับของการดัดแปรเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นและค่า ΔH_{gel} เพิ่มสูงขึ้นคล้ายกับการทดลองของYeh and Yeh (1993) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะขึ้นอยู่กับ 1) ความเข้มข้นและชนิดของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2) สภาวะที่ใช้ในการดัดแปร 3) แหล่งของเม็ดสตาร์ช (Kaur et al., 2002)

2.5.4 ผลต่อโครงสร้างผลึก

Kim et al. (2002) ได้ทำการศึกษาการดัดแปรการเชื่อมข้ามของสตาร์ชมันฝรั่งและนำสตาร์ชไปทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffraction พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B คือเกิดพีคที่ตำแหน่ง 5.59, 14.4, 17.2 และ 22.1° 2θแต่หลังจากผ่านการดัดแปรด้วยด้วยวิธีการเชื่อมข้ามสตาร์ชจะเกิดพีคที่ตำแหน่ง 14.4, 17.2, 22 และ 24° 2θแต่ยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เช่นเดียวกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงว่าการทำการเชื่อมข้ามไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช

2.5.5 ผลต่อกำลังการพองตัวและค่าการละลาย

Kaur, Singh and Sodhi (2004) ได้ศึกษาการเชื่อมข้ามของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งโดยการทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์พบว่าหลังผ่านการเชื่อมข้ามสตาร์ชจะมีค่าร้อยละกำลังจากพองตัวลดลงเป็นร้อยละ 20-25 ในขณะที่สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 28-31เช่นเดียวกับการดัดแปรโดยใช้สารอิพิคลอโรไฮดรินค่าร้อยละกำลังการพองตัวลดลงเป็น 23-27 เช่นเดียวกับการทดลองในสตาร์ชข้าวเจ้าที่หลังจากผ่านการดัดแปรสตาร์ชจะมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเหลือเท่ากับ 9 (สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 18) และสตาร์ชข้าวเหนียวที่มีร้อยละกำลังการพองตัวลดลงเหลือเท่ากับ 14 (สตาร์ชที่ไม่ผ่านการ ดัดแปรมีค่าร้อยละกำลังการพองตัวเท่ากับ 41) (Liu et al., 1999) การที่กำลังการพองตัวของสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามมีค่าลดลงเนื่องมาจาก 1) ชนิดของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2) สภาวะที่ใช้ในการดัดแปร 3) ชนิดของเม็ดสตาร์ช (Singh et al., 2007) ซึ่ง Leach และคณะ (1959) เสริมว่าความแข็งแรงของร่างแห (micellar network) ภายในเม็ดสตาร์ชเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดสตาร์ชส่วน Yeh and Yeh (1993) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าในสารละลาย dimethyl sulphoxide (DMSO) พบว่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีค่าการละลายลดลงเมื่อเปรียบเทียบ

กับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรเนื่องจากการเชื่อมข้ามจะส่งผลทำให้พันธะระหว่างสายสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้นและเกิดการรวมตัวกันภายในเม็ดสตาร์ช

2.6 การดัดแปรด้วยเอนไซม์

การดัดแปรสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ เป็นกระบวนการที่ทำเพื่อให้สตาร์ชเกิดเป็นหลุม/รูพรุนที่เม็ดสตาร์ชหรือทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดเล็กลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชด้วยการใช้เอนไซม์ไฮโดรไลซ์บางส่วนของสตาร์ชที่สภาวะที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยคือ แอลฟา-อะไมเลส ตัดที่พันธะ α-1,4 บนสายสตาร์ช และกลูโคอะไมเลสตัดพันธะα-1,4 และ α-1,6 บนสายสตาร์ชการนำเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และกลูโคอะมิเลส มาช่วยในการดัดแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชให้เป็นรูพรุนนั้นมีการศึกษาโดยวิธีที่แตกต่างกันไปมากมาย ซึ่งรูพรุนจะเกิดขึ้นในระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์ และรูที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวแบบสุ่มที่ผิวของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจสอบโดยใช้เทคนิคของกล้อง SEM ส่วนปริมาตร ขนาด และรูปร่างของรูพรุนนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ และการซึมผ่านของสารเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน (Apinan et al., 2007; Castro and Aguilera, 2007)

Aggarwal and Dollimore (1998) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส เมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง SEM พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชข้าวโพดหลังจากย่อยด้วยกลูโคอะไมเลสข้ามคืน และสำหรับสตาร์ชข้าวและสตาร์ชสาลีก็จะให้ผลคล้ายกับสตาร์ชข้าวโพด จำนวน ขนาด และความลึกของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนเม็ดแปรขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิดได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ชนิดและความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิและพีเอชของสารละลายสตาร์ช (Boonstra and Berkhout, 1975)

Youshuang, Shirong, Zhongfeng, Xiaowei and Zengfang (2011) เตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังโดยย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไลส และกลูโคอะไมเลส พบว่า เกิดการกักกร่อนและมีรอยแตกเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น 10.7 เท่าของสตาร์ชดิบ (native starch) และเมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าการย่อยจะเกิดมากที่สุดที่บริเวณอสันฐานและมีการเพิ่มขึ้นของผลึกในเม็ดสตาร์ช การใช้เอนไซม์ร่วมกันจะช่วยในการย่อยสตาร์ชได้โดยใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก เพื่อเป็นการลดพลังงานในการให้ความร้อน (Uthumporn, Zaidul, and Karim, 2010)

2.7 กระบวนการให้ความร้อน (Thermal processing)

เนื่องจาก RS มีคุณสมบัติเป็นเส้นใยอาหารอีกชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในอาหาร ในปัจจุบันจึงได้มีการนำ RS มาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่อาหารที่มีความชื้นต่ำจำพวกผลิตภัณฑ์ขนมอบต่าง ๆ ได้แก่ ขนมปัง คุกกี้ และวัฟเฟิล เป็นต้น รวมถึงอาหารที่มีความชื้นปานกลาง เช่น พาสตา เป็นต้น

ซึ่งกระบวนการในการแปรรูปหรือผลิตอาหารต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติตามต้องการ ดังนั้นการใช้ความร้อนเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่งในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้เพื่อให้อาหารมีคุณภาพการบริโภคตามต้องการ โดยทั่วไปเราจะบริโภคอาหารที่ผ่านความร้อนแล้ว การใช้ความร้อนกับอาหารมีหลายวิธีแต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายจำเพาะเจาะจง ดังนั้นระดับความมากน้อยของความร้อนจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ กระบวนการที่ไม่รุนแรง (mild processes) เช่น การลวก การพาสเจอไรซ์ ทำให้คุณภาพการบริโภคเปลี่ยนไปไม่มากนัก สามารถใช้ร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น การแช่เยือกแข็งและการบรรจุ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น ส่วนวัตถุประสงค์หลักของการใช้ความร้อนที่ค่อนข้างรุนแรง เช่น การอบ (baking) การย่าง (roasting) และการทอด (frying) คือ เน้นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเรื่องคุณภาพการบริโภคมากกว่าการถนอมรักษา โดยทั่วไปการอบ การย่าง และการนึ่งเป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส (วิไล รังสาดทอง, 2543)

2.7.1 การให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (Steam cooking)

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

Tovar and Melito (1996) รายงานว่าสตาร์ชที่สกัดจากถั่วดำ ถั่วแดง และถั่วลิมาที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 90 นาที พบว่ามีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากถั่วที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนจาก 2.2 เป็น 18.9%, จาก 1.7 เป็น 21.2% และจาก 2.0 เป็น 30.7% ตามลำดับ โดย RS ที่เกิดขึ้นจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสายอะมิโลสที่หลุดออกมาในระหว่างการให้ความร้อนภายโครงสร้างของสตาร์ชถั่ว Wepner et al. (1990) ได้ศึกษาเติมสตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณ RS เริ่มต้น 34.1% เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตพาสต้า (7.5 และ 15% สตาร์ชซิเตรท) พบว่าการเติมซิเตรทสตาร์ช 15% ทำให้ปริมาณ RS ในพาสต้าดิบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5% แต่พาสต้ามีปริมาณ RS

ลดลงเหลือ 1.88% หลังจากผ่านการถูกปรุงสุก โดยมีปริมาณการสูญเสีย (cooking loss) อยู่ในช่วง 3.8-8.2% ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ RS ในระหว่างกระบวนการผลิต ต่อมา Shin et al. (2007) ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยไอน้ำต่อปริมาณ SDS และ RS ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดซิตริก พบว่าสตาร์ชข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดซิตริกมีปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจาก 14.1 เป็น 23.0% แต่มีปริมาณ RS ลดลงจาก 40.0 เป็น 30.3% เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ในปี 2007 Sozer และคณะได้ศึกษาผลของการเติม RS_3ลงในสปาเกตตี้เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร ต่อเวลาที่เหมาะสมในการปรุงสุกสปาเกตตี้ โดยพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการปรุงสุกคือ 13 นาที และเมื่อระยะเวลาในการปรุงสุกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการสูญเสีย (cooking loss) เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับสปาเกตตี้ที่ไม่ได้เติม RS ต่อมา Roopa and Premavlli (2008) ได้ศึกษาผลของกระบวนการปรุงสุกได้แก่ การต้มในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ เป็นเวลา 10 นาที, การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที และการอบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ต่อปริมาณ RS ของข้าวป้างสามง่าม (finger millet) รายงานว่าสตาร์ชข้าวป้างสามง่ามมีปริมาณ RS ลดลงหลังจากผ่านกระบวนการการให้ความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้ การต้มทำให้ RS ลดลง 0.7%, หม้อนึ่งความดัน ทำให้ RS ลดลง 0.6% และการอบทำให้ RS ลดลง 0.5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบที่มีปริมาณ RS 1.0% ซึ่งกระบวนการปรุงสุกจะเพิ่มอัตราการย่อยของสตาร์ชโดยการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยโครงสร้างของสตาร์ชได้ง่ายขึ้น (Roder et al., 2009)

Ratnayake and Jackson (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อนและการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชของ RS 3 ชนิด ได้แก่ RS_2 (Novelose 240^{TM}), RS_3 (Novelose 330^{TM}), และ RS_4 (Fibersym 70^{TM}) โดยการให้ความร้อนแก่ RS ในสรูปที่มีน้ำมากเกินพอ ที่อุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดสตาร์ชของ RS_2และ RS_4 ไม่ถูกทำลายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างผ่านการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียสเมื่อตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (light microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(SEM) โดย 40-50% ของเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการพองตัวที่ผันกลับได้ ทั้งนี้ RS_2ที่ถูกให้ความร้อนถึง 85 องศาเซลเซียสหลังผ่านการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_p) และค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) เท่ากับ 103 องศาเซลเซียส และ 10.7 J/g ตามลำดับ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างผลึกเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ ส่วน RS_3 มีความทนทานต่อสภาวะการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และมีการพองตัวบางส่วนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 85 องศาเซลเซียสนอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นผลึกของ RS_3 ลดลง และตัวอย่างที่ถูกให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 35 และ 75 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานเอนทาลปีลดลงจาก 17.75 J/g

เป็น 14.20 J/g เมื่อถูกให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 80 และ 85 องศาเซลเซียสสำหรับ RS_4 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชหลังจากการให้ความร้อนถึง 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส เม็ดสตาร์ชเริ่มพองตัว และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส เม็ดสตาร์ชเกิดการสูญเสียรูปร่างธรรมชาติไป RS_4 มีความเป็นผลึกลดลงเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 35-85องศาเซลเซียสเมื่อตรวจสอบด้วย DSC และ XRD แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่ทำให้ส่วนอสัณฐานเพิ่มขึ้น

2.7.2 การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดัน (Autoclaving)

Autoclave หรือหม้อนึ่งความดัน เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับนึ่งฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำร้อนและแรงดันสูงทำให้ของที่ผ่านการนึ่งแล้วอยู่ในสภาพปราศจากเชื้อจึงมักใช้เครื่องนี้ในการนึ่งฆ่าเชื้อของเสียทางชีวภาพเพื่อกำจัดและป้องกันการปนเปื้อนและนอกจากจะใช้ป้องกันการปนเปื้อนแล้ว หม้อนึ่งความดัน ยังสามารถใช้ฆ่าเชื้อตัวอย่างก่อนจะนำมาใช้ในการทดลองได้อีกด้วยหลักการทำงานของหม้อหนึ่งความดัน เป็นกระบวนการทางกายรูปที่ทำให้ปราศจากเชื้อโดยการทำงานร่วมกันของไอน้ำ ความดัน และเวลา ซึ่งจะใช้ไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยการใช้ความร้อนต้มน้ำให้กลายเป็นไอในหม้อที่ปิดสนิทจนทำให้ความดันในหม้อเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของไอน้ำก็จะเพิ่มขึ้นจากปกติด้วย โดยทั่วไปจะต้มให้น้ำเดือดจนกระทั่งความดันของไอน้ำภายในหม้ออยู่ที่ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมีอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จึงเริ่มจับเวลาระหว่างนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิและความดันให้คงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาทีซึ่งในกระบวนการปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำจะใช้อุณหภูมิระหว่าง 121-134 องศาเซลเซียส โดยไอน้ำที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดจะต้องสัมผัสกับอุปกรณ์ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ (holding time) ที่ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอย่างน้อย 15 นาที ที่อุณหภูมิ 126 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 10 นาที และที่อุณหภูมิ 134 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 นาที (Papadimitriou and Barton, 2009; Yussof, Utra and Alias, 2013)

จากการศึกษาของ Shin et al. (2007) เกี่ยวกับผลของการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันต่อปริมาณ SDS และ RS ของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรกรดซิตริก พบว่าเมื่อให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันสตาร์ชข้าวดัดแปรด้วยกรดซิตริกมีปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจาก 14.1 เป็น 28.3% แต่มีปริมาณ RS ลดลงจาก 40.0 เป็น 17.1% เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

2.7.3 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)

drum dryer เป็นหนึ่งในอุปกรณ์หลักทางการค้าที่ใช้ในการผลิตอาหารที่เป็นแหล่งของสตาร์ชต่าง ๆ ได้แก่ ธัญพืช พืชหัว และเมล็ดถั่ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ drum dryer กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะข้นหนืดตามธรรมชาติหลังจากการทำเข้มข้น เช่น มันฝรั่งบด นม อาหารเด็ก และเนื้อผลไม้บด เป็นต้น drum dryer จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของสตาร์ชดิบ เนื่องจากความร้อนจากผิวหน้าของลูกกลิ้งที่ได้จากไอน้ำจะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์ขึ้น และ

ขณะที่ลูกกลิ้งหมุนไปจะมีการระเหยน้ำพร้อมไปด้วย สตาร์ชที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆฉาบอยู่บนผิวหน้าของลูกกลิ้งและถูกขูดออกไปด้วยใบมีด แล้วจึงนำแผ่นสตาร์ชที่ได้ไปบดเป็นผงร่อนผ่านตะแกรงตามขนาดที่ต้องการ (พรศักดิ์ มนัสศิริเพ็ญ, 2543) Vatanasuchart, Niyomwit and Narasri, (2012) ได้ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อปริมาณ RS ของสตาร์ช และเฟลค (flake) ที่สกัดจากกล้วยดิบ (green banana) และกล้วยห่าม (green to yellow banana) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กล้วยน้ำหว้า กล้วยหอม กล้วยไข่ และกล้วยเล็บมือนาง พบว่าสตาร์ช (starch) ที่สกัดจากกล้วยน้ำหว้าห่ามและแป้ง (flour) ที่ได้จากกล้วยน้ำหว้าดิบมีปริมาณ RS สูงสุด เท่ากับ 77.3 และ 58.1% ตามลำดับ ในขณะที่ flake ของกล้วยทุกชนิดที่ผ่านการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (flake, drum-dryied) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณ RS ต่ำสุด คือใกล้เคียงกับ 1.0% เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนแบบลูกกลิ้งส่งผลให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันและแห้งอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการแตกตัวหรือทำลายโครงสร้างของ RS ขึ้น เช่นเดียวกับ Parchure and Kulkarni (1997) ที่ได้ศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปได้แก่ การต้ม (boiling), การปรุงด้วยความดัน (pressure cooking), การคั่ว (roasting), การเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking), การทอด (frying), และการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวและสตาร์ชจากแวกซี่อะมารานท์ (waxy amaranth starch) ได้รายงานว่าการให้ความร้อนโดยการ boiling และ pressure cooking ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของ RS_3 ขึ้นระหว่างการให้ความร้อน ในขณะที่การ drum drying, roasting, frying, และ extrusion ส่งผลให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชลดลงจากประมาณ 10% เหลือประมาณ 1.6%

2.7.4 การให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อน (Baking)

ในการอบอาหารนั้นอาหารจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีจากผนังเครื่องอบ การพาความร้อนจากอากาศที่หมุนเวียนและการนำความร้อนผ่านถาดที่มีอาหารวางอยู่ ความร้อนส่วนใหญ่จะถ่ายเทไปยังอาหารโดยการนำความร้อน ส่วนการถ่ายเทความร้อนของอากาศ และไอน้ำในเครื่องอบเกิดขึ้นโดยการพาความร้อน และเปลี่ยนเป็นการนำความร้อนที่ผิวหน้าของอาหารและผนังเครื่องอบ ฟิล์มบางๆ ของอากาศเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนสู่อาหารและการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากอาหาร ความเร็วของอากาศและคุณสมบัติผิวหน้าของอาหารจะเป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มนี้ กระแสการพาความร้อนส่งเสริมเกิดการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอในเตาอบ การนำความร้อนผ่านจานอบซึ่งสัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน (oven hearth)ในเตาอบจะเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิที่ด้านล่างของอาหารและทำให้เกิดการอบที่แตกต่างกัน อาหารมีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนมีค่าต่ำและมีผลมากต่อเวลาในการอบ ขนาดของชิ้นอาหารเป็นตัวกำหนดระยะทางที่ความร้อนต้องเคลื่อนที่จากผิวอาหารเข้าสู่ใจกลางเพื่อให้เกิดการอบอย่างเพียงพอ ความชื้นที่ผิวหน้าจะระเหยและถูกกำจัดไปโดยความร้อนเมื่อ

อาหารวางอยู่ในเตาอบ อากาศในเตาอบซึ่งมีความชื้นต่ำจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ และทำให้ความชื้นเคลื่อนที่จากใจกลางอาหารออกมายังที่ผิวอาหาร คุณสมบัติของอาหารและอัตราการให้ความร้อนจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความชื้นที่เสียไป เมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในจะทำให้แนวของการระเหยเคลื่อนที่เข้าไปในอาหาร ทำให้ผิวอาหารแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิของลมร้อน (110-240 องศาเซลเซียส) จึงเกิดเปลือกแข็งด้านนอกขึ้น (วิไล รังสาดทอง, 2543)

Wepner, Berghofer, Miesenberger, Tiefenbacher and NK Ng, (1999) ได้ศึกษาการใช้สตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตร์ชข้าวสาลี,สตาร์ชมันฝรั่ง, สตาร์ชถั่ว และสตาร์ชข้าวโพด เพื่อเป็นส่วนผสมในขนมปังปิ้ง (10% สตาร์ชซิเตรท) และเวเฟอร์ (7.5 และ 15%สตาร์ชซิเตรท) เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร พบว่าขนมปังปิ้งที่เติมซิเตรทสตาร์ชจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลีมีปริมาณ RS สูงสุดคือ 4.45 และ 4.54% ตามลำดับ ส่วนเวเฟอร์ผลิตได้มีปริมาณ RS เท่ากับ 2.4% ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เติมสตาร์ชซิเตรทลงไป อย่างไรก็ตามการเติมซิเตรทสตาร์ชไม่ได้มีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นในระหว่างการอบ เนื่องจากกรดซิตริกที่จับกับสตาร์ชอย่างสมบูรณ์จึงไม่สามารถทำให้สตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็น RS ขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

สตาร์ชมันสำปะหลัง (บริษัทสงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด, จังหวัดนครราชสีมา), กรดซิตริกฟู้ดเกรด (บริษัทรามา โปรดักชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร), เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α-amylase from *Bacillus lichenifomis*, A3306, E.C. 3.2.1.1, Sigma-Aldrich, USA), เอนไซม์แพนครีเอติกแอลฟา-อะไมเลส (α-amylase from porcine pancreas, A3176, E.C. 3.2.1.1, Sigma-Aldrich, USA), เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase from *Aspergillus niger*, A7095, E.C. 3.2.1.3, Sigma-Aldrich, USA), ชุดทดสอบ PGO เอนไซม์ (PGO enzyme kit P7119, Sigma-Aldrich, USA)และสารเคมีอื่นๆ ที่เป็นเกรดการวิเคราะห์

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.1.1 การเตรียมซิเตรทสตาร์ชจากสตาร์ชมันสำปะหลัง

เตรียมซิเตรทสตาร์ชโดยดัดแปลงจากวิธีของ Klaushofer et al. (1978) เตรียมสารละลายกรดซิตริกให้มีความเข้มข้น 10 – 40 % (w/v) ปรับ pH เป็น 3.5 ด้วย NaOH ความเข้มข้น 10 M และปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 50 มิลลิลิตร ผสมสารละลายกรกซิตริก 50 มิลลิลิตร กับสตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 50 กรัมในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปบ่มในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง จากนั้นบดตัวอย่างให้ละเอียด และวัดความชื้นของสตาร์ชให้มีความชื้นอยู่ในช่วง 5 - 10 % (w/w) แล้วนำไปทำปฏิกิริยาในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นรอจนตัวอย่างมีอุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำ DI ปริมาตร 2 ลิตร เพื่อกำจัดเอากรดที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกจากสตาร์ช แล้วนำไปทำให้แห้งและบดตัวอย่าง แล้วเก็บตัวอย่างที่ได้ไว้ในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.1.2 การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

การลดขนาดอนุภาคของสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ โดยเตรียมสตาร์ชมันปะหลัง(30 % solid) ใน 0.1 M sodium acetate buffer (pH 4.5) เติมเอนไซม์ termamyl ความเข้มข้น 120 ยูนิตต่อมิลลิลิตร นำแล้วไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเขย่าตลอดเวลาที่ 180 รอบ/นาที เป็นเวลา 0.5 และ 1 นาที หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วย 2.0 M HCl

ให้ไป pH 1.5–1.6 แล้วนำมากรองและล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนจน pH อยู่ในช่วง 6.5 และนำไปทำแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3.2.1.3 การเตรียมซิเตรทสตาร์ชสำหรับทดสอบการทนความร้อน

เตรียมตามวิธีของ Klaushofer et al. (1978) โดยการนำสตาร์ชข้าว มาผสมให้เข้ากันกับสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 40%(ต่อ 100 กรัมสตาร์ช) ที่ปรับ พีเอช 3.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ในอัตราส่วนสตาร์ชข้าวต่อสารละลายกรดซิตริกเป็น 1:1 จากนั้นทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (28±1องศาเซลเซียส) หรือที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ความชื้น 5 (±1) % นำมาบด แล้วทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-7 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ลิตรเพื่อกำจัดกรดที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออก นำไปทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นบดและร่อนผ่านตระแกรงขนาด (mesh no. 100) < 0.15 มิลลิเมตร

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณ resistance starch ตามวิธีการของ AOAC (2002)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชหนัก 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 (amyloglucosidase) ความเข้มข้น 3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยเขย่าตลอดเวลา จากนั้นเติมเอทานอลเข้มข้นปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งส่วนใสแล้วเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500xg เป็นเวลา 10 นาทีอีกครั้ง ค่อยๆเทส่วนใสทิ้งและรอให้ตะกอนสตาร์ชแห้ง จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 1.2 M พีเอช.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส ความเข้มข้น 3300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกลูโคสที่ถูกปล่อยออกมาโดยสารละลาย PGO เอนไซม์ (Sigma, P7119) และคำนวณปริมาณ RS จากสูตร

RS (กรัมต่อ100 กรัมสตาร์ช) = F/W x 162/180 x 100

เมื่อ F คือ ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

162/180 คือ แฟคเตอร์สำหรับเปลี่ยน free glucose เป็น anhydro-glucose

3.4 การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Bound citric acid)

ปริมาณของกรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช วิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Narkrugsa (1993) ดังนี้ชั่งตัวอย่างที่ได้ 0.4-0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และสารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer หลังจากนั้นนำไปต้มในน้ำอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 8.5 ด้วยสารละลายกระอะซีติกเข้มข้น 5 N แล้วเติมสารละลาย borate buffer ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ murexid indicator 0.3 กรัม นำไปไตเตรทกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.05 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเหลือง นำค่าที่ได้ไปคำนาณหา %BC ตามสูตรดังนี้

$$\%BC\ (db) = \frac{9.61Y \times 10}{X(100 - Z)}$$

โดยที่ X = น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม (นน.เปียก)

Y = ปริมาตรของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.05 M ที่ใช้ในการไตเตรทจนถึงจุดที่สารละลายเปลี่ยนสี, มิลลิลิตร

Z = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่าง

9.61 = calibration factor

3.5 การวิเคราะห์ความหนืด

วิเคราะห์ความหนืดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว RVA (Rapid Visco Analyzer) เตรียมตัวอย่างสตาร์ชสำหรับการวิเคราะห์จากสูตร

S = (86 x 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 องศา

เซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และควบคุมให้อยู่ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ต่อเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

3.6 ความสามารถในการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)

ดัดแปลงจาก Daramola and Osanyinlusi (2006) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1 กรัม ใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาดที่ทราบน้ำหนักที่แน่นนอน เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำ ตัวอย่างไปเหวี่ยงแยกส่วนใสออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทส่วนใสใส่ใน Aluminum moisture can ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นนอน แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก และนำสตาร์ชส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งน้ำหนักที่เหลือหลังอบเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาส่วนที่สามารถละลายได้ และชั่งน้ำหนักส่วนตะกอนสตาร์ชในหลอดเหวี่ยง เพื่อนำมาคำนวณหาความสามรถในการดูดซับน้ำของตัวอย่างจากสูตร

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

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

3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

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

3.8 โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชแกรนูล

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

3.9 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (DSC1, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 7 มิลลิกรัมใส่ลงในถ้วยสแตนเลสขนาด 60 ไมโครลิตร (PerkinElmer DCS pan) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เติมน้ำกลั่นลงไปเพื่อให้มีความชื้นประมาณ 28 มิลลิกรัม ปิดฝาถ้วยสแตนเลส แล้วนำไปอัดปิดฝาให้สนิทด้วยเครื่องอัดปิด นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียสที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำการวิเคราะห์และใช้ Indium เป็นสารมาตรฐานในการสอบเทียบอุณหูมิ โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ทำการวิเคราะห์มีดังนี้ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o), อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส(peak temperature, T_p), อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c), ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_o$) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) โดยใช้โปรแกรมประมวลผล STAResoftware (Mettler-Toledo, Switzerland)

3.10 X-ray Diffraction (XRD)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วย Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line2.2: SAXS โดยมใส่ตัวอย่างสตาร์ชปริมาณ 20 มิลลิกรัม ลงในวัสดุใส่ตัวอย่างซึ่งปิดด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมทั้งสองด้าน แล้วนำไปวิเคราะห์กำหนดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ 8 keV ในการวัดรังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวนอนสู่วัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับสัญญาณ (image plate detector) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร แปรผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ด้วยโปรแกรม SAXSIT 3.52

3.11 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการนึ่ง (Steaming)

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

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

3.12 การทดสอบการทนความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ (Autoclaving)

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

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

3.13 การทดสอบการทนความร้อนด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying)

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

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

3.14 การทดสอบการทนความร้อนด้วยการอบ (Baking)

เตรียมตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทให้ได้ความชื้น 50% นวดให้ตัวอย่างมีลักษณะคล้ายโดที่สามารถขึ้นรูปได้ ตัดด้วยพิมพ์รูปวงกลมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm ความหนา 0.5 cm จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยการอบในเตาอบ (DC22, Sveba Dahlen, Sweden) ที่อุณหภูมิ 180องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ RS ที่เหลือตามวิธีข้อ 3.3, วิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดตามวิธีข้อ 3.5, ตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อนตามวิธีข้อ 3.7, ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสตาร์ชแกรนูลตามวิธีข้อ 3.9, ตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกตามวิธีข้อ 3.10 และคำนวณปริมาณการสูญเสีย (%loss)

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

3.15 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS16.0 (SPSS Inc., Illinois, USA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลของความเข้มข้นของซิตริกในการผลิตสตาร์ชซิเตรท

จากการทดลองใช้สารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 10 – 40 % (w/v) ในกระบวนการแช่สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการเตรียมโดยใช้สารละลายกรดซิติริกที่ 20% มีปริมาณ RS สูงที่สุด เท่ากับ 69.68 % (ตารางที่ 3.1) โดยปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริก แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มขึ้นสูงกว่า 20 % ค่าปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จะมีปริมาณ RS ลดลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ Jyothi et al. (2007) ที่ทำการศึกษาการผลิตสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความสามารถในการย่อยได้ (digestibility) ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสของสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมได้จากการใช้สารละลายกรดซิตริกที่ 0.088 โมลต่อโมลของแอนไฮโดรกลูโคสยูนิต มีค่า digestibility น้อยกว่าสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมได้จากการใช้สารละลายกรดซิตริกที่ 0.3 และ 0.512 โมลต่อโมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสยูนิต และให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองของ Mei, Zhou, Jin, Xu and Chen (2015) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ระดับที่แตกต่างกัน (10 – 40 %) ต่อปริมาณ RDS, SDS และ RS ในสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลัง ที่เตรียมได้จากการบ่มสารละลายกรดซิตริกกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 130 ^{o}C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งได้รายงานผลไว้ว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณ RDS จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณ SDS และ RS เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริเพิ่มขึ้นในช่วง 10 – 30 % การเพิ่มขึ้นของ ปริมาณ RS ในสตาร์ชซิเตรทเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกที่ใช้ในการบ่มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ชถูกแทนที่ด้วยซิตริกแอนไฮไดรด์ ส่งผล

ตารางที่ 3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกต่อปริมาณ RS

ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริก (% w/v)	ปริมาณ RS (%)
10	22.69 ± 1.30 a
20	69.68 ± 1.33 d
30	53.82 ± 1.50 c
40	48.67 ± 1.45 b

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

ให้สามารถทำปฏิกิริยาหรือเกิดครอสลิงค์กับสตาร์ชโมเลกุลได้ ซึ่งพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชโดยซิตริกแอนไฮไดรด์จะขัดขวางการเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง α– (1 – 4), และ α– (1 – 6) ของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส ทำให้สตาร์ชซิเตรทมีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น (Xie and Liu, 2004) และการลดลงของปริมาณ RS เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มมากเกินไปเกิดจากผลของความเกะกะ (steric hindrance) ของโมเลกุลซิตริกที่มากเกินไป ซึ่งอาจไปขัดขวางการเกิดการครอสลิงค์ระหว่างสตาร์ชโมเลกุลกับกรดซิตริก (Mei et al.,2015) ซึ่งส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทที่เตรียมได้จากกรดซิตริกที่ความเข้นข้นเพิ่มขึ้นในช่วง 30 - 40 % มีปริมาณ RS ลดลง หรือการลดลงของปริมาณ RS เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกเพิ่มมากขึ้นอาจเกิดจากสารละลายกรดที่ความเข้มข้นมากไปทำลายเม็ดสตาร์ชบางส่วน (acid hydrolysis) ส่งผลให้ได้โมเลกุลของอะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินที่เล็กลง จึงทำให้เอนไซม์สามารถย่อยได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้มาความสามารถในการทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้ลดลง

4.2 ผลของการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสร่วมกับกรดซิตริกในการผลิตสตาร์ชซิเตรท

ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งผลของการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (55 °C) เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำประหลังมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native tapioca strach) เท่ากับ 6.34 % และปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง เท่ากับ 5.47 % และ 4.68 % ตามลำดับ เนื่องจากหลังสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูเกิดขึ้นจำนวนเล็กน้อย และโครงสร้างบางส่วนของแกรนูลถูกทำลายไปหลังจากการย่อด้วยเอนไซม์ (Uthumporn et al.,2010) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จะมีพื้นที่ผิว (specific surface area) เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ยังไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (native tapioca starch) จึงทำให้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง α– (1 – 4), และ α– (1 – 6) ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสได้ง่ายขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native strach) ส่งผลให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสลดลง

จากผลการทดลองโดยการนำสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native strach) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไปแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 20 % ที่อุณหภูมิ 50 °C ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 1,

3 และ 6 ชั่วโมง และนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นระยะเวลา 3ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างสตาร์ชซิเตรททั้งหมดมีปริมาณ RS สูงกว่าตัวอย่างควบคุม แสดงว่าให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดซิตริกกับสตาร์ชส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามของสตาร์ชด้วยกรดซิตริกขึ้น (Xie and Liu, 2004) ซึ่งพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการเข้าไปย่อยพันธะกลูโคซิดิกที่ตำแหน่ง α– (1 – 4), และ α– (1 – 6) ของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส ทำให้สตาร์ชซิเตรทมีความต้านทานต่อการย่อยของเอนไซม์ได้มากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการแช่สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native tapioca strach) ในสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 20 % (w/v) พบว่าไม่มีผลทำให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ซึ่งอาจอธิบายได้

ตารางที่ 3.2 ผลของระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและแช่ในสารละลายกรดซิตริก

ระยะเวลาที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (ชั่วโมง)	ระยะเวลาที่แช่สารละลายกรดซิตริก (ชั่วโมง)	ปริมาณ RS (%)	ปริมาณ BC (%)
Native *	-	6.34 ± 0.47 a	-
0.5 *	-	5.23 ± 0.26 a	-
1.0 *	-	4.45 ± 0.50 a	-
Native	1.0	69.39 ± 1.78 c	11.82 ± 0.15 d
	3.0	68.08 ± 1.27 e	11.84 ± 0.19 d
	6.0	68.08 ± 0.96 e	11.89 ± 0.10 d
0.5	1.0	74.17 ± 1.22 g	12.35 ± 0.15 e
	3.0	71.26 ± 0.69 f	12.01 ± 0.53 d
	6.0	48.27 ± 1.10 c	10.05 ± 0.30 b
1.0	1.0	62.58 ± 1.10 d	11.26 ± 0.05 c
	3.0	68.50 ± 0.84 e	11.95 ± 0.10 d
	6.0	27.71 ± 0.78 b	7.92 ± 0.52 a

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

Native คือสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์

* ไม่ได้วิเคราะห์หาปริมาณ BC เนื่องจากตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการแช่ในสารละลายกรดซิตริก

ว่าสภาวะการแช่สตาร์ชในสารละลายกรดซิตริกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มาก จึงทำให้กรดซิตริกสามารถแทรกเข้าไปภายในเม็ดถสตาร์ชได้ง่ายและรวดเร็ว และเมื่อนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จึงทำให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการแช่สารละลายกรดที่ระยะเวลา 1, 3 และ 6 ชั่วโมงไม่แตกต่างกัน

สำหรับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก พบว่า เมื่อระยะเวลาในการแช่ในสารละลายกรดซิตริกนานขึ้น จะทำให้ปริมาณ RS ลดลง โดยสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เวลา 0.5 ชั่วโมง และนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก 1 ชั่วโมง มีปริมาณ RS สูงที่สุด (74.14 %) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เวลา 1 ชั่วโมง และนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก 6 ชั่วโมง มีปริมาณ RS ต่ำที่สุด (27.55 %) ซึ่งการที่ปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เวลา 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริก 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการเตรียมโดยกระบวนการเดียวกันแต่ใช้สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส เนื่องจากเอนไซม์จะไปย่อยแกรนูลสตาร์ชมันสำปะหลังที่ทำให้แกรนูลหลังถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีความขรุขระและมีรูที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (Mu, Abegunde, Sun, Deng, and Zhang, 2013) ส่งผลให้กรดซิตริกเข้าไปในแกรนูลสตาร์ชมันสำปะหลังได้มากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งทำให้กรดซิตริกเกิดการเชื่อมข้ามกับสตาร์ชมากกว่าส่งผลให้ซิเตรทสตาร์ชที่ได้สามารถต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ได้เพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาของ Chen and Zhang (2012) ซึ่งได้ทำการศึกษาทดลองย่อยแกรนูลของสตาร์ชข้าวโพดด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียว เป็นเวลา 1 – 8 ชั่วโมง โดยตรวจสอบการถูกทำลายของแกรนูลสตาร์ชข้าวโพดด้วย SEM พบว่าแกรนูลสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากแกรนูลของสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และยังพบว่ามีรู (pinhole) ที่ผิวของแกรนูลสตาร์ชข้าวโพดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแกรนูลของสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และเมื่อระยะเวลาในการย่อยสตาร์ชแกรนูลเพิ่มมากขึ้น ทำให้รูที่พื้นผิวของแกรนูลสตาร์ชมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายผลที่ทำให้ซิเตรทสตาร์ชที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เวลา 1 ชั่วโมง และนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก 6 ชั่วโมง มีปริมาณ RS ต่ำได้ว่าเมื่อย่อยแกรนูลสตาร์ชด้วยเอนไซม์นานมากขึ้น อาจทำให้เกิดรูที่แกรนูลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าแกรนูลสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระยะเวลาสั้นกว่า และโครงสร้างบางส่วนของแกรนูลถูกทำลายไปหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ (Uthumporn et al., 2010) จึงทำให้กรดซิตริกเข้าไปในแกรนูลสตาร์ชได้ง่ายและมากขึ้น และการที่สตาร์ชแช่อยู่ในสารละลายกรดซิตริกเป็นระยะเวลานาน (6 ชั่วโมง) อาจเกิดการไฮโดรไล

ซิสสายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยกรดได้ (Menzel, 2014) ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในตารางที่ 3.4 ที่พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการแช่สตาร์ชนานขึ้น ทำให้เกิดอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสายที่สั้นลง และเมื่อทำปฏิกิริยาให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามกับกรดซิตริกก็อาจจะเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีสายที่สั้นจะทำให้เกิดการเชื่อมข้ามได้น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ BC ที่น้อยกว่าตัวอย่างซิเตรทสตาร์ชอื่นๆ (ตารางที่ 3.2) อีกทั้งการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างกรดซิตริกกับอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีสายที่สั้นก็จะทำให้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสสามารถย่อยได้มากกว่าการเกิดการเชื่อมข้ามของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสายที่มีสายที่ยาวกว่าจึงทำให้มีปริมาณ RS ต่ำกว่าซิเตรทสตาร์ชจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ผ่านกระบวนการเช่นเดียวกัน เนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ทำให้กรดซิตริกผ่านเข้าไปในแกรนูลได้ยากกว่าและในปริมาณที่น้อยกว่าจึงเกิดผลในด้านการไฮโดรไลซิสสายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยกรดน้อยกว่า เมื่อเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินกับกรดซิตริกแล้วจึงทำให้ปริมาณ RS สูงกว่า

4.3 ผลของการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริก (Bound citrate) กับโมเลกุลสตาร์ช

จากการศึกษาปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกของตัวอย่างสตาร์ชที่ผลิตได้ทั้งหมด (ตารางที่ 3.2) พบว่าตัวอย่างที่ปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกสูงที่สุด คือสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 0.5 ชั่วโมง และผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรซิตริกที่ความเข้มข้น 20 % เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนตัวอย่างที่ปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริก ต่ำที่สุด คือสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 1 ชั่วโมง และผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรซิตริกที่ความเข้มข้น 20 % เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งการเกิดการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับสายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในแกรนูลสตาร์ชจะเกิดขึ้นในช่วงของการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง โดยจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส (Dastidar and Netravali, 2012) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้จากการที่กรดซิตริกได้รับความร้อนทำให้โมเลกุลน้ำของกรดซิตริกจะหลุดออกไปได้เป็นซิตริกแอนไฮไดรด์ จากนั้นซิตริกแอนไฮไดรด์จึงจะปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันหรือการเชื่อมข้ามกับสายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในแกรนูลสตาร์ชเกิดเป็นสตาร์ชซิเตรท ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการที่สตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรซิตริก 1 ชั่วโมง มีปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกสูงที่สุด สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของปริมาณ RS คือ เป็นผลจากการที่เอนไซม์ย่อยแกรนูลสตาร์ชทำให้เกิดรูที่ผิวแกรนูลจึงทำให้กรดเข้าไปในแกรนูลสตาร์ชได้ง่ายและมากกว่าแกรนูลของสตาร์ชที่ไม่เกิดรูจากการย่อยด้วยเอนไซม์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันหรือปฏิกิริยาการเชื่อมข้ามระหว่างกรดซิ

ตริกกับสตาร์ชได้มากกว่า ทำให้มีปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ก่อนกระบวนการผลิตสตาร์ชซิเตรท ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ 1 ชั่วโมง และแช่ด้วยสารละลายกรซิตริก เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณการเกาะเกี่ยวน้อยที่สุด อาจเกิดจาการที่สตาร์ชถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในระยะเวลาที่นานกว่า ซึ่งอาจทำให้แกรนูลสตาร์ชเกิดรูที่ผิวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือแกรนูลสตาร์ชถูกทำลายไปมากกว่าสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระยะเวลาสั้นกว่า (Uthumporn et al., 2010) เมื่อแกรนูลสตาร์ชเกิดรูขนาดใหญ่มากขึ้น อาจส่งผลให้โครงสร้างของแกรนูลสตาร์ชไม่แข็งแรงหรือเมื่อแกรนูลถูกทำลายก็จะส่งผลให้ไม่สามารถดูดซับกรดซิตริกไว้ภายในแกรนูลได้จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับสตาร์ชได้น้อย ปริมาณการเกาะเกี่ยวกับกรดซิตริกจึงน้อยลงด้วย จากการทดลองนี้พบว่าปริมาณการเกาะเกี่ยวกรดซิตริกจะแปรผันตามปริมาณ RS เนื่องจากการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่และพันธะเชื่อมข้ามระหว่างกรดซิตริกกับสตาร์ช ซึ่งพันธะเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ทำให้สตาร์ชซิเตรทมีคุณสมบัติในการเป็นสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกมากก็จะมาปริมาณ RS สูง จึงอาจสรุปได้ว่าสตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกมากแสดงว่าเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างกรดซิตริกกับสายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินได้มากเช่นกัน

4.4 ความสามารถในการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)

จากผลการทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลายของสตาร์ชซิเตรท พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากทุกสภาวะมีค่าความสามารถในการพองตัวต่ำกว่ากว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ ซึ่งอาจเกิดจาดสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีโครงสร้างแกรนูลที่แข็งแรง เนื่องจากแกรนูลของสตาร์ชดิบไม่ได้ถูกทำลายด้วยเอนไซม์หรือกรดจึงทำให้น้ำเข้าไปในแกรนูลของสตาร์ชดิบได้ยากกว่าแกรนูลของสตาร์ชิเตรทที่ไม่ถูกกย่อยด้วยเอนไซม์แต่ผ่านการแช่ในสารละลายกรดซิตริก ซึ่งกรดซิตริกที่มี pH ต่ำ (3.5) สามารถไฮโดรไลซ์สตาร์ชทำให้เกิดการแต่หักของสตาร์ชได้ (Menzel., 2014) ซึ่งอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของแกรนูลสตาร์ช และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูย่อยด้วยเอนไซม์จะเกิดรูที่ผิวของแกรนูล และโครงสร้างแกรนูลถูกทำลายไปบางแกรนูลหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ (Uthumporn et al., 2010) จึงทำให้น้ำเข้าไปภายในแกรนูลสตาร์ชของสตาร์ชซิเตรททั้งที่ผลิตได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยและผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสได้ง่ายกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สตาร์ชซิเตรททั้งหมดจึงมีค่าความสามารถในการพองตัวสูงกว่าของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

สตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native starch) ที่ทุกสภาวะการแช่ในสารละลายกรดซิตริก 1 – 6 ชั่วโมง มีค่าความสามารถในการ

ตารางที่ 3.3 ความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรท

ระยะเวลาที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (ชั่วโมง)	ระยะเวลาที่แช่สารละลายกรดซิตริก (ชั่วโมง)	Swelling power (g/g)	Solubility (%) *
Native	-	2.21 ± 0.16 a	1.57 ± 0.28
Native	1.0	3.24 ± 1.78 b	2.88 ± 0.76
	3.0	3.17 ± 1.27 b	2.46 ± 0.90
	6.0	3.31 ± 0.96 b	2.26 ± 0.81
0.5	1.0	3.89 ± 0.39 c	2.55 ± 0.28
	3.0	3.92 ± 0.21 c	2.81 ± 0.09
	6.0	3.73 ± 0.13 c	2.19 ± 0.12
1.0	1.0	3.95 ± 0.40 c	2.30 ± 0.25
	3.0	3.95 ± 0.15 c	2.74 ± 0.08
	6.0	3.41 ± 0.26 b	2.03 ± 0.05

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

Native คือสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์

* WSI ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

พองตัวไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่กรด พบว่า สตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีความสามารถในการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native tapioca starch) เนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีรูเกิดขึ้นที่ผิวของแกรนูลสตาร์ชและเมื่อนำไปแช่ในสารละลายกรดซิตริกก็จะเกิดการไฮโดรไลซ์แกรนูลสตาร์ชอีก จึงส่งผลให้แกรนูลของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ร่วมกับการแช่ในสารละลายกรดซิตริกมีความแข็งแรงของแกรนูลสตาร์ชน้อยกว่าแกรนูลของสตาร์ชที่ผ่านการแช่กรดโดยไม่ได้ผ่านการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มาก่อน จึงทำให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสสามารถดูดซับน้ำเข้าไปในแกรนูลได้ดีกว่า จึงมีความสามารถในการพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และการที่สตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

1 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริกเป็นเวลา 6 ชั่วโมงมีค่าความสามารถในการพองตัวน้อยกว่าสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการผลิตในสภาวะอื่นๆ อาจเกิดจากการที่สตาร์ชถูกย่อยด้วยเอนไซม์และแช่ในสารละลายกรดซิตริกนานมากที่สุด ทำให้บางแกรนูลสตาร์ชถูกทำลายไปจนไม่สามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในแกลนูลสตาร์ชได้

จากการศึกษาของ Jyothi et al. (2007) ได้ศึกษาความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดซิตรกร่วมกับการใช้เทคนิคไมโครเวฟ รายงานไว้ว่าความสามารถในการพองตัวไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าระดับการแทนที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีการรายงานไว้ว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่เกิดปฏิกิริยากับอนุพันธ์ของกรดซิตริกที่มีระดับการแทนที่ต่ำได้ จะมีการพองตัวได้ต่ำเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ (Agboola et al., 1991) ซึ่งได้มีการอธิบายว่าแกรนูลสตาร์ชที่มีการแทนที่ด้วยซิเตรทภายในแกรนูล จะทำให้แกรนูลสตาร์ชต้านการพองตัว เนื่องจากแกรนูลดูดซับน้ำเข้าไปได้น้อย

ผลการศึกษาความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชซิเตรทจากสตาร์ชมันสำปะหลัง ของ Mei et al. (2105) รายงานว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่าการพองมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบสูงขึ้นโดยตัวอย่างซิเตรทสตาร์ชทั้งหมดมีค่าการพองตัวต่ำกว่าของสตาร์ชดิบ และตัวอย่างสตาร์ชที่มีระดับการแทนที่ที่แตกต่างกันก็มีการพองตัวได้แตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างที่มีระดับการแทนที่สูงจะมีค่าความสามารถในการพองตัวต่ำ นอกจากนี้ Koo et al. (2011) ที่ศึกษาการผลิตสตาร์ชครอสลิงค์จากสตาร์ชข้าวโพดด้วยสารผสมระหว่าง STMP/STPP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ รายงานว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชครอสลิงค์มีค่าลดลงจาก 33.51 เป็น 13.17 ตามระดับการเกิดพันธะเชื่อมข้าม (degree of cross-linking) ที่เพิ่มขึ้นจาก 51.3 เป็น 99.1% เช่นเดียวกับ Ebihara et al. (2006) ที่รายงานว่าสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล ไดสตาร์ช ฟอสเฟต (Hydroxypropyl-Distarch Phosphate) จากสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงตามระดับการเกิดพันธะเชื่อมข้ามที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการเกิดการแทนที่หรือเกิดการเชื่อมข้ามภายในโมเลกุลทำให้แกรนูลสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากพันธะเคมีที่เกิดขึ้นภายในแกรนูลสตาร์ช ซึ่งจะมีผลในการไปขัดขวางการจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับโมเลกุลของน้ำ จึงส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทจับกับน้ำได้น้อยลง ทำให้สตาร์ชซิเตรทพองตัวในน้ำได้ลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ RVA (รูปที่ 3.1) ที่แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้ไม่แสดงค่าความหนืดเนื่องจากมีพันธะเชื่อมข้ามเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับกรดซิตริก ตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีความสามารถในการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native tapioca starch) เนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จะเกิดรู และโครงสร้างบางส่วนของแกรนูลถูกทำลายไปหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์

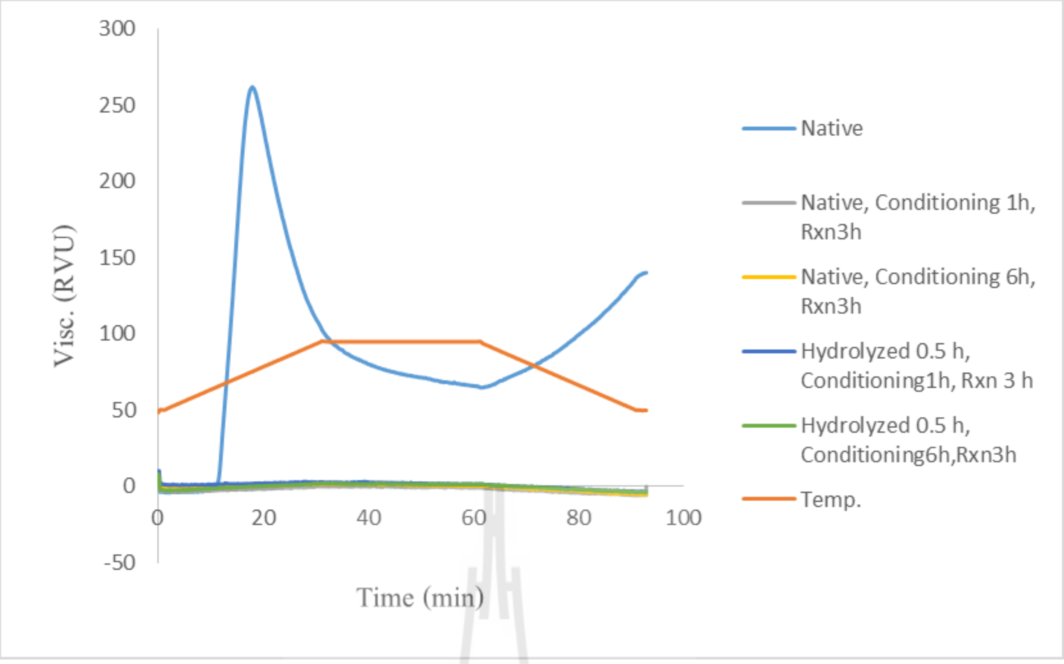
(Uthumporn et al., 2010) จึงทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปภายในแกรนูลสตาร์ชได้ง่ายมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ จึงส่งให้ให้สตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจากสตาร์ชที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ก่อนมีความสามารถในการพองตัวได้มากกว่า

จากการทดลองด้านคุณสมบัติในการละลายของสตาร์ชซิเตรท พบว่าสตาร์ชซิเตรททุกตัวอย่างมีค่าความสามารถในการละลายมากกว่าสตาร์ชดิบ ซึ่งสตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแกรนูลของสตาร์ชดิบมีความหนาแน่นมากกว่าจึงทำให้มีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรกอซิลของโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้น้อย ส่งผลให้สตาร์ชดิบมีการพองตัวและละลายในน้ำได้ต่ำ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) สำหรับในสตาร์ชซิเตรทที่มีค่าการละลายสูงกว่า อาจเนื่องมาจากการเกิดความเสียหายของแกรนูลสตาร์ชในระหว่างกระบวนการผลิตสตาร์ชซิเตรทตั้งแต่กระบวนการย่อยแกรนูลสตาร์ชด้วยเอนไซม์ ซึ่งอาจทำให้เกิดรูที่ผิวของแกรนูล ในขั้นตอนการแช่ในสารละลายกรดซึ่งกรดอาจเกิดการไฮโดรไลซ์โครงสร้างบางส่วนของสตาร์ช หรือกรัดกร่อนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชบางส่วน(Menzel, 2014) จึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างบริเวณพื้นผิวรอบนอกได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชสามารถดูดน้ำและพองตัวได้มากขึ้น และในขณะเดียวกันก็ทำให้โมเลกุลบางส่วนของสตาร์ชละลายออกมาด้วย และผลของกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชซิเตรทมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้สูง (Hydrophilic) ที่ช่วยส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซิเตรทสูงขึ้นได้เช่นกัน (Yook, Pek, and Park, 1993)

จากผลการทดลองของ Jyothi et al. (2007) พบว่าค่าการละลายไม่มีความสัมพันธ์กับระดับการแทนที่ของอนุพันธ์ของซิเตรทในสตาร์ชมันสำปะหลัง Agboola et al. (1991) รายงานว่าการละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้องของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ดัดแปรได้จากอนุพันธ์ของซิตริกไม่แตกต่างจากสตาร์ชดิบอย่างมี่นัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองของ Mei et al. (2015) พบว่าการละลายของสตาร์ชดิบและซิเตรทสตาร์ชสามารถละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายสูงขึ้นเช่นเดียวกับผลของการพองตัว แต่ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียสค่าการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชซิเตรทไม่แตกต่างจากสตาร์ชดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.5 คุณสมบัติด้านความหนืด

ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสแล้วที่ 0.5 และ 1 ชั่วโมงไปแช่ในสารละลายกกรดซิตริกที่มีความเข้มข้น 20 % เป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้จากทุกสภาวะ มีค่าความหนืดต่ำกว่า



รูปที่ 3.1 ผลของความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซิเตรท

สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (native starch) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชซิเตรทมีการพองตัวต่ำที่อุณหภูมิสูง จึงไม่เกิดเจลาติไนเซชันขึ้นระหว่างการทดสอบด้วย RVA โดยสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อสตาร์ชทำปฏิกิริยากับกรดซิตริก ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยกรดซิตรกภายในโครงสร้างของแกรนูลสตาร์ช จึงส่งให้สายอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจับยึดกันได้แข็งแรงมากขึ้นและเกิดพันธะเชื่อมข้ามขึ้นภายในโครงสร้างจำนวนมาก และส่งผลทำให้แกรนูลสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Xie and Liu, 2004) ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเคลื่อนที่ได้น้อยลงและลดการจับกัน (interactions) ระหว่างสตาร์ชโมเลกุลและน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยากจึงส่งผลให้สตาร์ชต้านการพองตัว และ ไม่เกิดเจลาติไนเซชัน (Jyothi et al., 2006; Majzoobi, Radi, Farahnaky, Jamalian, and Tongdang, 2009; Yussof et al., 2013) เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Xie and Liu (2004) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตจาก normal corn starch กับ control (ตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีกรดซิตริก) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสตาร์ชซิเตรททุกตัวมี peak viscosity ที่แบนราบและมีค่าความหนืดต่ำกว่า control และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shin et al. (2007) ที่ดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยกรดซิตริก ผลของความหนืดพบว่าสตาร์ชดัดแปรไม่แสดงความหนืด การลดลงของความหนืดเกิดจากสตาร์ชซิเตรทไม่เกิดการพองตัว และเจลาติไนเซชันระหว่างการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการการพองตัวดังตารางที่ 3.3 ที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชซิเตรทมีระดับการพองตัวต่ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถอธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของสตาร์ชซิเตรทได้ว่า การเกิดการเชื่อมข้ามของกรดซิติรกในโมเลกุลของสตาร์ชนั้นมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชมีความคงตัวต่อความร้อนและแรงเฉือนได้เพิ่มขึ้น จึงมีการแตกสลายของเม็ดสตาร์ชลดลง และส่งให้สตาร์ชซิเตรทไม่แสดงความหนืด Orozco-Martinez

and Betancur-Ancona (2004) รายงานว่าการที่ความหนืดของ pyrodextrinized starch ลดลง อาจจะเกิดจากการที่สายของแป้งถูกย่อยสลายและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายแป้ง การเติมกรดซิตริกที่มี pH 3.5 ใน corn starch ทำให้ความหนืดลดลง เพราะกรดจะไปย่อยสลายทำให้เม็ดแป้งแตกออก (Hirashima, Takahashi, and Nishinari, 2004) นอกจากนี้ความหนืดของ citrate corn starch ก็มีค่าลดลง เนื่องจากการแทนด้วยกรดในแป้งทำให้แป้งไม่เกิดการพองตัว (Xie and Liu, 2004)

4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

จากการศึกษาหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4 ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงการไฮโดรไลซ์สตาร์ชโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและกรดซิตริก ซึ่งผลการทดลองพบว่าทั้งตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสร่วมกับการแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 20 % มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 3.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมสตาร์ช และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมงมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 4.15 และ 6.34 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมสตาร์ช ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้

ตารางที่ 3.4 ผลของการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และการแช่ในสารละลายกรดซิตริกต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนกระบวนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ระยะเวลาที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (ชั่วโมง)	ระยะเวลาที่แช่สารละลายกรดซิตริก (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์
Native	-	3.25 ± 0.33 a
0.5	-	4.15 ± 0.58 b
1.0	-	6.34 ± 0.63 de
0.5	1.0	5.27 ± 0.94 c
	3.0	5.96 ± 1.05 cd
	6.0	6.96 ± 0.77 e
1.0	1.0	7.93 ± 1.20 f
	3.0	9.35 ± 0.50 g
	6.0	11.12 ± 0.50 h

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

Native คือสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์

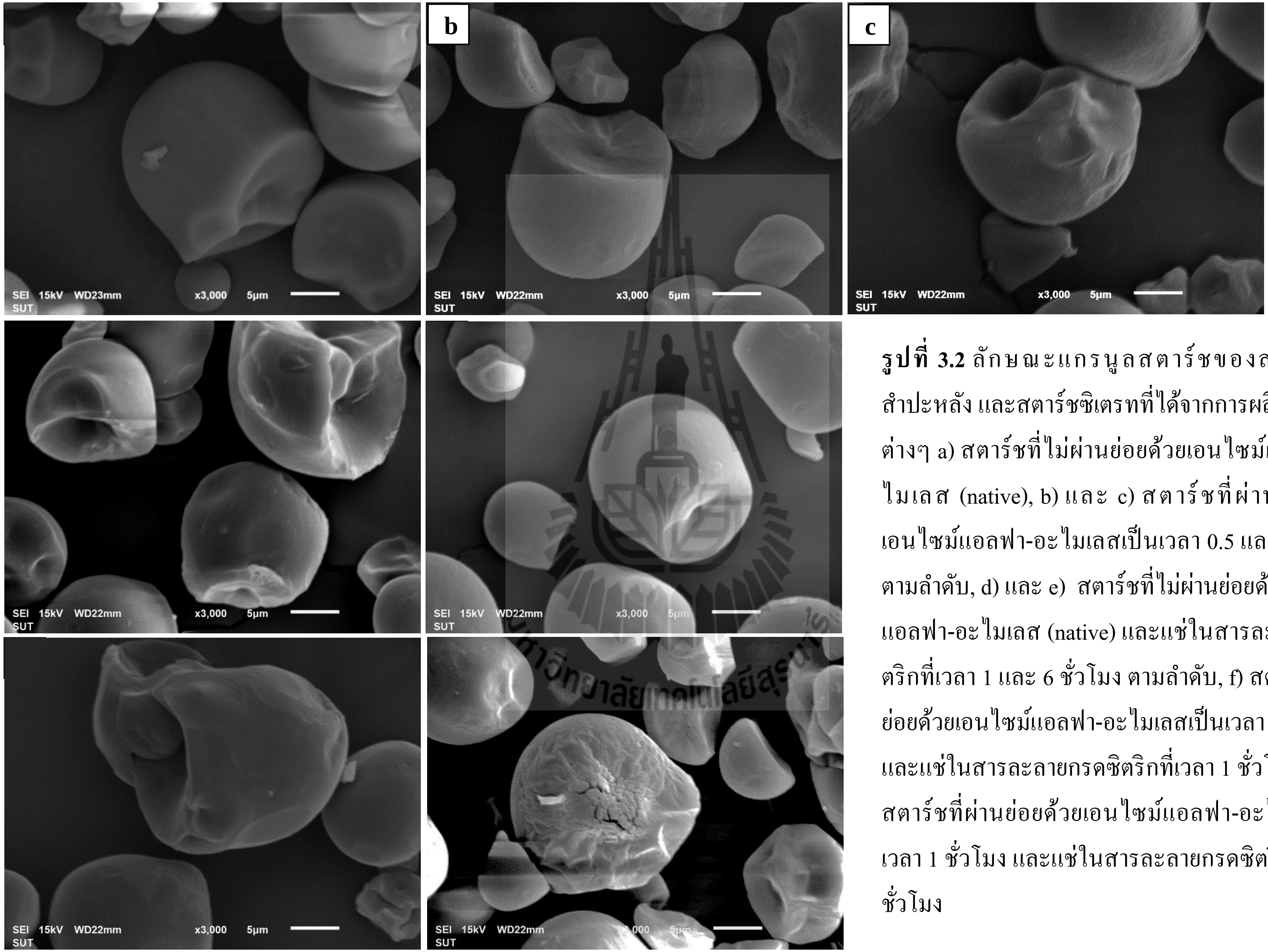
ว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และเมื่อระยะเวลาในการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น จะส่งให้ให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสตาร์ชนานขึ้นก็จะทำให้เอนไซม์เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสสามารถย่อยสตาร์ชได้มากขึ้น เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสจะไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4-glycosidase bond ในโมเลกุลของสตาร์ช (starch) ให้มีขนาดของโมเลกุลเล็กลง ซึ่งเมื่อสตาร์ชถูย่อยด้วยเอนไซม์ก็จะทำให้มีหมู่รีดิวซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sadeghi, Shahidi, Mortazavi, and Mahalati, (2008) ที่ได้ศึกษาการย่อยสตาร์ชข้าวโพดด้วยเอนไซม์ α-amylase termamyl 2-x ที่ความเข้มข้นของเอนไซม์ 3 ระดับ คือ 0.2, 0.25 และ 0.3 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัมของสตาร์ช ที่อุณหภูมิ 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่า DE ในช่วงระยะเวลา 5 นาทีที่ทำการทดลองหาปริมาณ DE พบว่าเมื่อระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น ที่ทุกระดับความเข้มข้นของเอนไซม์และทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Rocha, Carneiro, and Franco (2010) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภายของแกรนูลสตาร์ชจากมันสำปะหลัง (cassava), มันเทศ (sweet potato), peruvian carro และมันฝรั่ง (potato) ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงพบว่าสตาร์ชทุกชนิดมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการย่อยนานมากขึ้น จากการทดลองย่อยแกรนูลสตาร์ช และสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava) และมันเทศ (sweet potato) ด้วยเอนไซม์ STARGEN 001TH ของ Shariffa, Karim, Fazilah, and Zaidul (2009) แสดงให้เห็นว่าค่า DE ของทุกตัวอย่างสูงขึ้น เมื่อย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์เป็นระยะเวลานานขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Uthumporn et al. (2010) ได้ศึกษาการย่อยแกรนูลสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชถั่วเขียว และสตาร์ชสาคู ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและเอนไซม์กลูโคอะไมเลส คือเมื่อระยะเวลาในการย่อยนานมากขึ้น ค่า DE ก็จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการแช่สตาร์ชมันสำปะหลังในสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 20 % พบว่าเมื่อระยะเวลาในการแช่ในสารละลายกรดนานมากขึ้นก็จะทำให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลของระยะเวลาในการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เมื่อแช่ในสารละลายกรดนานมากขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากการไฮโดรไลซ์สตาร์ชด้วยกรดซึ่งถึงแม้ว่ากรดซิตริกจะเป็นกรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อน แต่ที่สภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำ (pH 3.5) ก็สามารถเกิดการไฮโดรไลซ์สายอะไมโลสและสายอะไมโลเพคตินของสตาร์ชได้ (Menzel, 2014) จากการทดลองของ Jayakody and Hoover (2002) ที่แสดงให้เห็นว่าผลของการย่อยแกรนูลของสตาร์ชจาธัญพืช (normal maize, waxy maize, amylomaize V & VII, rice และ oat) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.2 นอร์มัล พบว่าสตาร์ชทุกชนิดมีระดับการไฮโดรไลซ์สูงขึ้นที่ระยะเวลาในการย่อยที่นานขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Nagazawa and

Wang (2003) ที่ได้ย่อยสตาร์ชดิบและสตาร์ชที่ผ่านการ annealing ด้วยกรดซัลฟูริก พบว่าระดับการย่อยสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

4.7 โครงสร้างจุลภาคของสตาร์ชแกรนูล

ลักษณะรูปร่างของสตาร์ชแกรนูลของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสแสดงดังรูปที่ 3.2 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและที่ปลายด้านหนึ่งเป็นลักษณะถูกตัด ซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า turcatures และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ยังคงมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงไปจากสตาร์ชดิบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Puspasari et al., (2011) โดยย่อยสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าว สตาร์ชสาคู สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่งด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส พบว่าแกรนูลของสตาร์ชมันปะหลัง สตาร์ชสาคู และสตาร์ชมันฝรั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการย่อย ในขณะที่สตาร์ชข้าวโพดเกิดรูที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหลังจากการย่อยด้วยเอนไซม์ และสตาร์ชข้าวมีรูขนาดเล็กเกิดขึ้นหลังผ่านการย่อย ผลการทดลองของ Rocha et al. (2010) รายงานว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันเทศ (sweet potato) และสตาร์ชเปรูแครอท (Peruvian carrot) ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสแสดงให้เห็นการถูกทำลายในส่วนผิวด้านนอกของแกรนูลสตาร์ช ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเกิดการย่อยกัดเซาะจากพื้นผิวภายนอกแกรนูลสตาร์ช (exocorrossion) แต่ไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกแกรนูลสตาร์ช

สำหรับสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากทุกสภาวะในการผลิตทั้งที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และแช่ในสารละลายกรดซิตริกเป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง พบว่าแกรนูลสตาร์ชไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่พบว่ามีการยุบของแกรนูลเข้าไปในบางแกรนูลซึ่งจะเกิดที่บริเวณที่เป็นส่วนตัดของแกรนูล (turcatures) และมีแกรนูลสตาร์ชบางส่วนถูกทำลาย เการทดลองของ Ma, Chang, Yu, and Stumborg (2009) รายงานว่าสตาร์ชถั่ว (Pea starch) และสตาร์ชข้าวที่ดัดแปรด้วยกรดซิตริกสตาร์ชแกรนูลยังคงมีรูปร่างเช่นเดิม ซึ่งขั้นตอนการเกิดเอสเทอริฟิเคชั่นไม่ได้ส่งผลต่อแกรนูลสตาร์ช Kim et al. (2008) ได้ศึกษาการผลิตสตาร์ช กลูตาเรทจากลูกเดือยและรายงานว่าสตาร์ชกลูตาเรทยังคงมีรูปร่างคล้ายกับตัวอย่างควบคุมแต่มีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่ถูกทำลาย Koo et al. (2010) ได้ผลิตสตาร์ชครอสลิงค์จากสตาร์ชข้าวโพดด้วยส่วนผสมระหว่าง STTP/STMP ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าครอสลิงค์เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างและลักษณะเปลี่ยนไปโดยมีผิวที่ขรุขระและยุบตัวเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ ส่วน Adebiyi, Omojola, Orishadipe, Afolayan, and Olalekan (2011) ศึกษาการผลิตสตาร์ชซิเตรทจาก Tacca starch และ Omojola, Orishadipe, , Afolayan, and Adebiyi (2012) ที่ผลิตสตาร์ชซิเตรทจาก Icacina starch เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของยารายงานว่าสตาร์ชดังกล่าวมีรูปร่างลักษณะคล้ายสตาร์ชดิบแต่มีบางแกรนูลที่ถูกทำลายบางส่วน ทั้งนี้การเปลี่ยนลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวซิเตรทดังกล่าวสามารถอธิบายได้



รูปที่ 3.2 ลักษณะแกรนูลสตาร์ชของสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากการผลิตที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชที่ไม่ผ่านย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native), b) และ c) สตาร์ชที่ผ่านย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ, d) และ e) สตาร์ชที่ไม่ผ่านย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (native) และแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่เวลา 1 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ, f) สตาร์ชที่ผ่านย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่เวลา 1 ชั่วโมง และ g) สตาร์ชที่ผ่านย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่เวลา 6 ชั่วโมง

ว่าในระหว่างการบ่มตัวอย่างในสารละลายกรด ทำให้กรดสามารถแทรกเข้าไปทำลายโครงสร้างส่วนอสัณฐานและโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดสตาร์ชจึงทำให้เกิดการยุบตัว (Xie et al., 2006; Shin et al., 2009) หรือย่อยพื้นผิวรอบนอกของเม็ดสตาร์ชทำให้มีชิ้นส่วนหลุดออกมา

4.8 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

ระยะเวลาที่ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (ชั่วโมง)	ระยะเวลาที่แช่สารละลายกรดซิตริก (ชั่วโมง)	Onset temperature (°C)	Peak temperature (°C)	Conclusion temperature (°C)	Enthalpy (J/ g)
Native	-	65.37 ± 0.10 c	70.49 ± 0.20 c	81.99 ± 0.60 d	12.57 ± 1.46 c
	1.0	59.52 ± 0.42 b	67.76 ± 0.35 b	78.81 ± 0.51 c	1.26 ± 0.15 a
	6.0	59.46 ± 0.85 b	67.49 ± 0.32 b	77.91 ± 0.34 b	1.10 ± 0.07 a
0.5	1.0	58.23 ± 0.19 a	66.06 ± 0.12 a	76.19 ± 0.46 a	1.23 ± 0.07 a
1.0	6.0	59.71 ± 1.09 b	66.55 ± 0.76 a	76.53 ± 0.89 a	5.68 ± 1.26 b

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

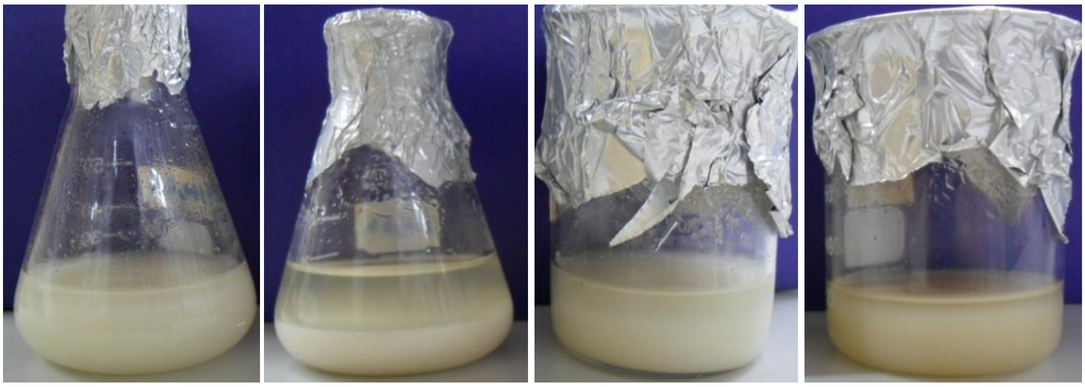
Native คือสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์

จากการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC แสดงดังตารางที่ 3.5 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์จะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_o) เท่ากับ 65.37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุดขณะเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_p) เท่ากับ 70.49 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_c) เท่ากับ 81.99 องศาเซลเซียส และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการเจลาติไนเซชัน (ΔH) เท่ากับ 12.57 J/g สำหรับสตาร์ชซิเตรทที่เตรียมได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_o) อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุดขณะเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_c) และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการเจลาติไนเซชัน (ΔH) ต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ยังไม่ผ่านกระบวนการผลิตเป็นสตาร์ชซิเตรท เนื่องจากการเชื่อมข้ามทำให้สตาร์ชมีความสามารถในการต้านการพองตัวและการเจลาติไนซ์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผล RVA ที่พบว่าสตาร์ชซิเตรททั้งหมดไม่แสดงความหนืดที่อุณหภูมิสูง ผลการทดลองของ Xie and Liu (2004) พบว่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการ

เจลาติไนเซชันของสตาร์ชซิเตรทที่ได้จากสตาร์ชข้าวโพดและ Hylon VII มีค่าลดลงจากสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการดัดแปรโดยลดลงจาก 6.7 J/g เป็น 0.4 J/g และ จาก 15.6 J/g เป็น 3.0 J/g ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดเอสเทอริฟิเคชันของกรดซิตริกทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน (T_o) และพลังงานเอนทาลปีของการเกิดการเจลาติไนเซชัน (ΔH) ลดลง เนื่องจากการเกิดการแทนที่หรือเชื่อมข้ามระหว่างสตาร์ชกับกรดซิตริกส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการพองตัวและการเจลาติไนซ์ (Liu et al., 2014) ซึ่งสารที่เคมที่ใช้ในการเชื่อมข้าม (cross-linking reagent) จะเข้าไปเชื่อมภายในโมเลกุลของสตาร์ชส่งผลทำให้สตาร์ชเกิดการจับตัวกันแน่นมากขึ้นและมีค่า ΔH ลดต่ำลงหลังผ่านการเชื่อมข้าม (Chatakanonda et al., 2000)

4.9 การทดสอบการทนความร้อน

หลังจากนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง มาทดสอบการทนความร้อนโดย 1) นำไปผ่านเครื่อง RVA จากนั้นนำไปให้ความร้อนต่อด้วย autoclave ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และนำมาให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ100 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง2) นำไปทดสอบการทนความร้อนด้วย autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เพียงอย่างเดียว พบว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรทุกสภาวะดังกล่าวไม่สามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้หรือเกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยที่ตัวอย่างไม่เกิดลักษณะข้นหนืดขึ้น (starch paste) กล่าวคือตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรยังคงมีลักษณะแค่พองตัวและมีการแยกชั้นระหว่างน้ำกับสตาร์ช ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีการพองตัวของเม็ดสตาร์ชมากกว่าสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM (รูปที่ 3.5 และ 3.6) ที่แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชข้าวดัดแปรดังกล่าวมีลักษณะรูปร่างและพื้นผิวไม่เรียบรวมทั้งถูกกัดกร่อนจนมีชิ้นส่วนเล็กๆ หลุดออกมามากกว่า เช่นเดียวกับผลของ DE (ตารางที่ 3.8) ที่ตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรจากสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมงและนอกจากนี้ผลของ DSC (ตารางที่ 3.7) ของตัวอย่างดังกล่าวยังมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสภาวะบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง อีกด้วยแสดงให้เห็นว่าสภาวะการบ่มที่ใช้เวลานานขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนถูกทำลายจึงส่งผลให้เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอจึงทำให้เกิดการพองตัวได้ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำและสูง พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง สามารถทนความร้อนได้มากกว่าที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมงโดยตัวอย่างที่



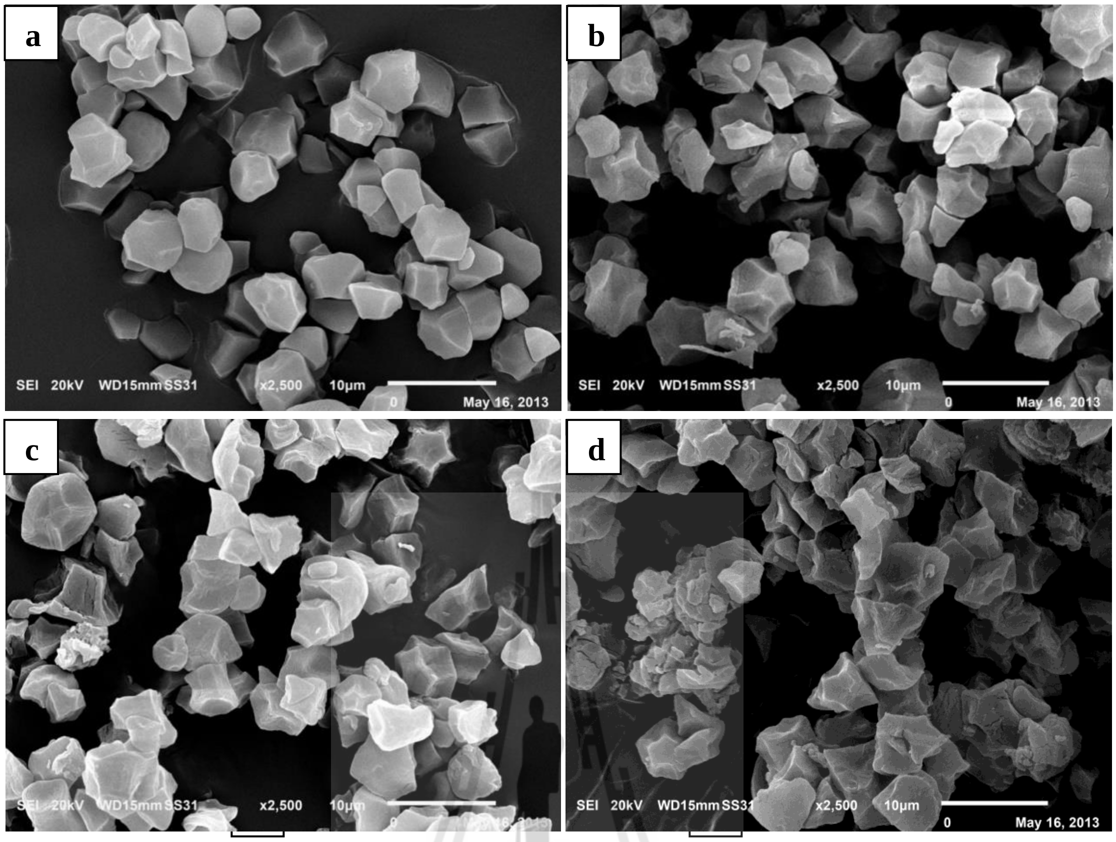
50˚C 6h 140˚C 3 h 50˚C 6h 150˚C 7 h 28˚C 16h 140˚C 3 h 28˚C 16h 150˚C 7 h

รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน RVA, แล้ว autoclave 110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และต้มประมาณ 3 ชั่วโมง

50˚C 6h 140˚C 3 h 50˚C 6h 150˚C 7 h 28˚C 16h 140˚C 3 h 28˚C 16h 150˚C 7 h

รูปที่ 3.4 ผลการทดสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างที่ระยะเวลาในการบ่ม 6 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง หลังผ่าน autoclave 121องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง

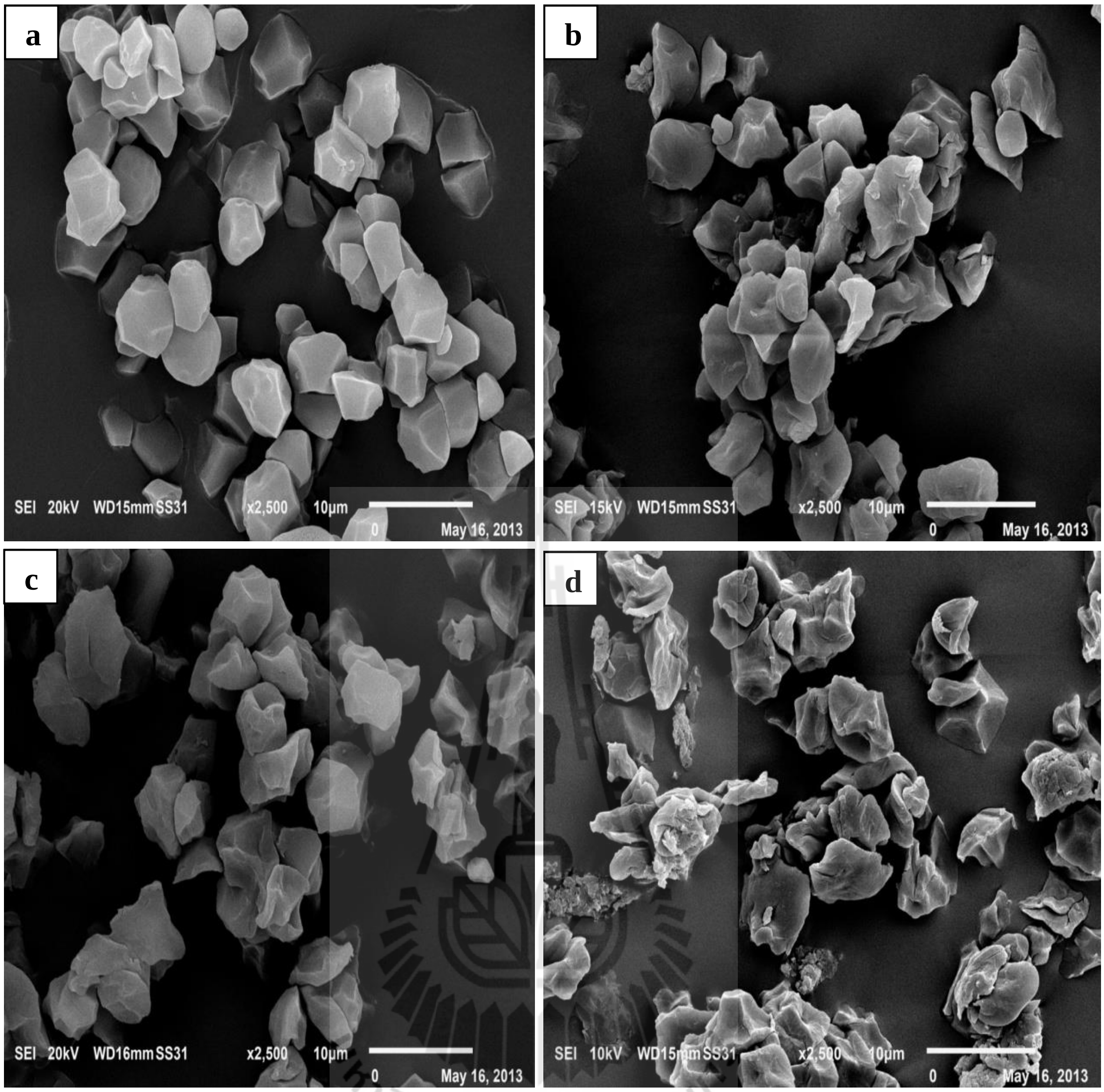
อุณหภูมิ150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง ยังคงเห็นการแยกชั้นระหว่างสตาร์ชกับน้ำได้อย่างชัดเจน ในขณะที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมงที่สตาร์ชมีการพองตัวได้มากกว่าโดยอยู่ในรูปของสารแขวนลอยของสตาร์ชกับน้ำที่เกือบจะไม่เห็นการแยกตัวระหว่างสตาร์ชกับน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ RVA ที่แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาที่เพิ่มขึ้น (140-150 องศาเซลเซียส และ 3-7 ชั่วโมง) ส่งผลให้ตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรมีค่าความหนืดต่ำลดลง (ตารางที่ 3.6) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งเสริมให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามภายในโครงสร้างของสตาร์ชข้าวดัดแปรมากขึ้น จึงส่งผลให้สตาร์ชต้านการพองตัวและไม่เกิดเจลาติไนเซชันจึงสามารถทนต่อสภาวะการให้ความร้อนที่สูงและรุนแรงได้มากขึ้น



รูปที่ 3.5 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะการบ่ม 50 องศาเซลเซียสเวลา 6 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวดิบ, b) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง, c) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง และ d) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง

4.10 ผลของการทดสอบการทนความร้อนต่อปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปร

หลังจากนำสตาร์ชข้าวดัดแปรที่เตรียมจากสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ไปผ่านการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ การนึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 30 นาที การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาทีการผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และการอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาทีพบว่ากระบวนการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ มีผลทำให้ตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรทนต่อความร้อนแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3.9 โดยจะเห็นได้ว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปร



รูปที่ 3.6 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะการบ่ม 28 องศาเซลเซียสเวลา 16 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวดิบ, b) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง, c) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 3 ชั่วโมง และ d) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเวลา 7 ชั่วโมง

สามารถทนต่อการให้ความร้อนด้วยการนึ่งมากที่สุด ในขณะที่สามารถทนต่อการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอต่ำสุด เมื่อพิจารณาถึงผลของกระบวนการให้ความร้อนที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณ RS พบว่าการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ (70%mc, 121 องศาเซลเซียส, 10 นาที)

ตารางที่ 3.6 ค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวดิบและสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

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

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

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

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

ตารางที่ 3.8 ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (Dextrose equivalent: DE) ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ

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

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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($P \leq 0.05$) ของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

มีผลทำให้สูญเสียปริมาณ RS เท่ากับ 52.11% ซึ่งมากกว่าการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (70%mc, 100 องศาเซลเซียส, 10 นาที) ที่มีปริมาณการสูญเสีย เท่ากับ 1.91% และการให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้ง (70%mc, 120 องศาเซลเซียส, 1 นาที) มีปริมาณการสูญเสียน้อยที่สุด คือ 0.59% สำหรับการให้ความร้อนด้วยการนึ่ง (40%mc, 100 องศาเซลเซียส, 10 นาที) พบว่ามีปริมาณการสูญเสียน้อยกว่าการให้ความร้อนด้วยการอบ (50%mc, 180 องศาเซลเซียส, 10 นาที) ที่มีปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 39.04% ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอเป็นการให้ความร้อนชื้นที่อุณหภูมิและความดันสูงแก่ตัวอย่าง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างสูงถึง 121 องศาเซลเซียส เป็น

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ (Cooking processes) ต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชข้าวดัดแปร

Samples	**Cooking temperature (˚C)**	**sample temperature (˚C)**	**Cooking time (min)**	**RS (%)**	**Loss (%)**
Steamed 40%mc	100	87	10	$72.37^{a}\pm0.38$	0
Steamed 40%mc	100	94	30	$70.68^{b}\pm0.69$	2.19
Steamed 70%mc	100	90	10	$70.88^{b}\pm0.88$	1.91
Steamed 70%mc	100	96	30	$66.44^{c}\pm1.28$	8.06
Autoclaved 70%mc	121	121	10	$34.48^{f}\pm0.57$	52.11
Autoclaved 70%mc	121	121	15	$23.78^{g}\pm1.36$	66.97
Drum dried 70%mc	120	118	1	$71.83^{a}\pm1.04$	0.59
Drum dried 70%mc	140	138	1	$67.68^{c}\pm1.19$	6.34
Baked 50%mc	180	86.8	5	$42.91^{d}\pm1.16$	39.57
Baked 50%mc	180	98.8	10	$43.28^{d}\pm1.46$	39.04
Baked 50%mc	180	99.4	15	$43.28^{d}\pm1.46$	39.04
RS (uncooked)	-	-	-	$72.26^{a}\pm0.34$	-

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq0.05$)

เวลานานถึง 10 นาทีอีกทั้งตัวอย่างมีการปรับให้ความชื้นสูงถึง 70%m จึงทำให้ตัวอย่างเกิดการพองตัวได้มากขึ้นทำให้สูญเสียลักษณะโครงสร้างดั้งเดิม เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณ RS จึงส่งผลให้เอนไซม์สามารถแทรกเข้าไปย่อยพันธะภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายกว่าและมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่อุณหภูมิของตัวอย่างเพียง 90 องศาเซลเซียสและแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิของตัวอย่าง 118 องศาเซลเซียสซึ่งใช้เวลาเพียง 60 วินาที ที่ตัวอย่างสัมผัสกับผิวลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้สตาร์ชข้าวดัดแปรที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงและต้านการพองตัวจึงทนต่อความร้อนจากกระบวนการดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับ Roopa et al. (2008) ที่รายงานว่าสตาร์ชข้าวป้างสามง่าม (finger millet) มีปริมาณ RS ลดลงหลังจากที่ผ่านกระบวนการการให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอด้วยการต้มด้วยหม้อนึ่งความดัน และด้วยการอบ ซึ่งกระบวนการให้ความร้อนจะเพิ่มอัตราการย่อยของสตาร์ชโดยการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยโครงสร้างของสตาร์ชได้ง่ายขึ้น (Roder et al., 2009) นอกจากนี้ Shin et al. (2007) ที่ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและหม้อนึ่งความดันไอแก่สตาร์ชข้าวดัดแปรด้วยกรดซิตริก รายงานว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรดังกล่าวมีปริมาณ RS ลดลง โดยการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอทำให้ปริมาณ RS ลดลงมากกว่าการให้ความร้อนด้วยการนึ่งโดยมีปริมาณ RS เหลืออยู่เท่ากับ 17.1 และ 30.3% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนที่มีปริมาณ RS เท่ากับ 40.0% โดย Vatanasuchart et al. (2012) อธิบายว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลายและเกิดเจลาติไนเซชันขึ้นซึ่งส่งผลทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างหรือแตกตัวของ RS ในตัวอย่าง

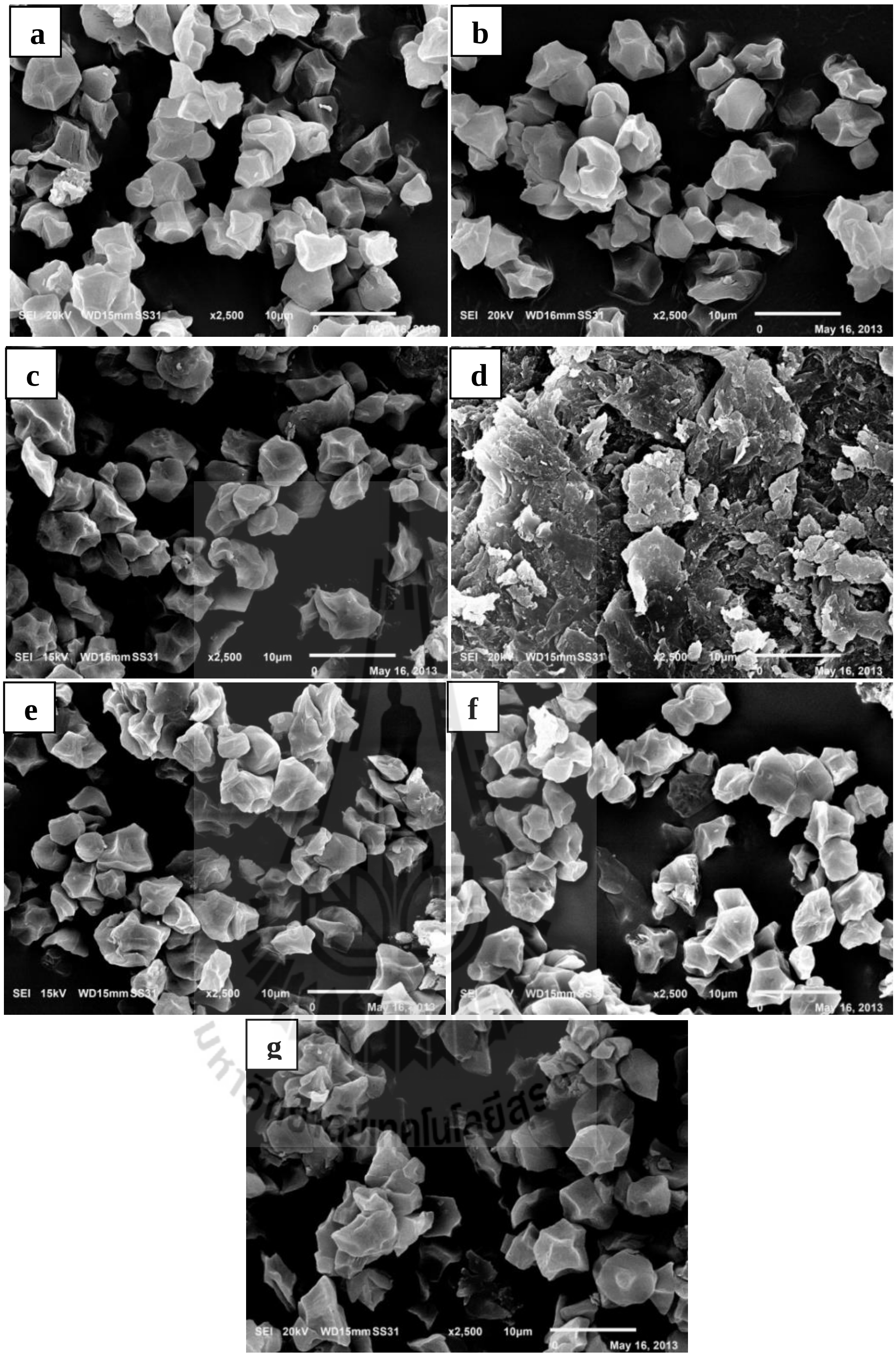
เมื่อพิจารณาผลของความชื้น จากตัวอย่างที่มีความชื้น 40 และ 70%mc ผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ 100 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที (ตารางที่ 3.9) จะพบว่าตัวอย่างที่มีความชื้นสูงกว่ามีการสูญเสียปริมาณ RS มากกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำคือมีปริมาณการสูญเสียเท่ากับ 8.06% สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้น 70%mc (อุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ 96 องศาเซลเซียส) และเท่ากับ 2.19% สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้น 40%mc (อุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่ความชื้นสูงและมีการให้ความร้อนในเวลานาน ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากขึ้น จึงทำให้เอนไซม์จากการวิเคราะห์สามารถแทรกเข้าไปทำลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ชได้ง่ายกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำกว่า สำหรับผลของระยะเวลาในการให้ความร้อน จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนทั้งแบบการนึ่ง แบบหม้อนึ่งความดันไอ และด้วยเตาอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สูญเสียปริมาณ RS เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่ได้รับความร้อนเป็นเวลานานกว่าส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงกว่า (ตารางที่ 3.9) จึงทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากและถูกทำลายได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Alsaffar (2010) ที่ศึกษาผลของการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 และ 32 นาที และผลของความชื้นในช่วง 20-70%mc ต่อการย่อยของสตาร์ชในเม็ดข้าวสาลีได้รายงานว่าสภาวะการให้ความร้อนที่ความชื้นสูงและเวลานาน ส่งผลให้สตาร์ชถูกย่อยได้

มากกว่าสภาวะการให้ความร้อนที่ความชื้นต่ำและเวลาสั้น เพราะเมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากขึ้น เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนแบบลูกกลิ้งที่เพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 140 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาเท่ากัน จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียปริมาณ RS มากกว่าคือ 6.34% ในขณะที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียเพียง 0.59% เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้มากจึงถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้สตาร์ชข้าวดัดแปรจะมีการสูญเสียปริมาณ RS หลังจากผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แต่ปริมาณ RS ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่เหลืออยู่ยังคงมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลการศึกษาอื่นๆ ข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรสามารถทนต่อกระบวนการการให้ความร้อนต่างๆ ได้ โดยเฉพาะการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและลูกกลิ้งที่ยังคงเหลือ RS ในปริมาณสูงมาก

4.11 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

เมื่อนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการทดสอบการทนความร้อนที่สภาวะต่างๆ มาตรวจสอบลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช พบว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนแต่ละสภาวะยังคงมีความเป็นแกรนูลเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 3.7) ยกเว้นที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ไม่มีความเป็นแกรนูลหลงเหลืออยู่ (รูปที่ 3.7d) เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอเป็นสภาวะที่รุนแรงสุดจึงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากจนทำให้เม็ดสตาร์ชแตกตัวในที่สุด โดย Aparicio-Saguilan et al., (2005) ได้รายงานว่าการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอแก่สตาร์ชกล้วยส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวหรือทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณ RS ที่มีปริมาณการสูญเสียมากสุด สำหรับสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาอบยังคงมีลักษณะของเม็ดสตาร์ชไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนแต่มีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่เกิดการยุบตัวเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 3.7g) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าการให้ความร้อนด้วยเตาอบซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูงแก่ตัวอย่าง จึงทำให้ความชื้นในตัวอย่างระเหยออกมาจากโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ชซึ่งอาจเป็นผลที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการยุบตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้นภายในโดยที่ไม่ได้ทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวจนเกิดเจลาติไนเซชันขึ้น สตาร์ชจึงยังคงมีลักษณะเป็นแกรนูลอยู่ โดยสภาวะการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ความชื้น 40%mc ที่ยังคงมีลักษณะแกรนูลที่ไม่แตกต่าง

จากสตาร์ชข้าวดัดแปร ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 3.7a) โดยเมื่อสภาวะในการให้ความร้อนที่รุนแรงขึ้นยิ่งส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสูญเสียลักษณะรูปร่างไปจากเดิมและพื้นผิวบางส่วนหลุดเป็นชิ้นเล็กๆ และเม็ดสตาร์ชบางส่วนมีลักษณะคล้ายรูปโดนัท (doughnut shape) โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่ความชื้น 70%mc (รูปที่ 3.7c) ที่แกรนูลมีลักษณะเป็น doughnut shape มากที่สุด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับ Kim et al., (2008) ที่ผลิตสตาร์ชกลูตาเรทจากลูกเดือย



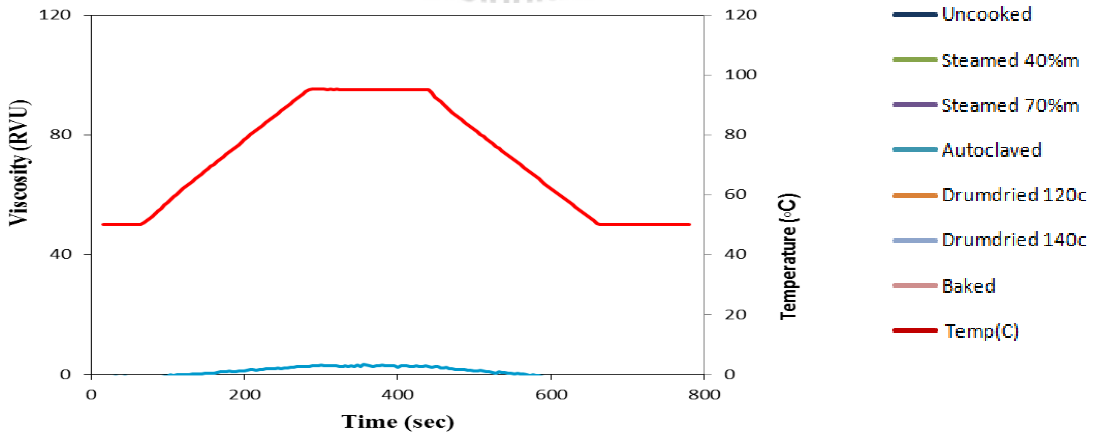
รูปที่ 3.7 ลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่างๆ a) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน, b) สตาร์ชข้าวดัดแปร (40%mc), c) สตาร์ชข้าวดัดแปร (70%mc) ที่ให้ความร้อนด้วยการนึ่ง, d) สตาร์ชข้าวดัดแปร (70%m) ให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอ,e) สตาร์ชข้าวดัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่120°C,f) สตาร์ชข้าวดัดแปรให้ความร้อนด้วยลูกกลิ้งที่140°C, g) สตาร์ชข้าวดัดแปร (50%mc) ให้ความร้อนด้วยเตาอบ

รายงานว่าหลังจากให้ความร้อนแก่สตาร์ชกลูตาเรทที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็น doughnut shape และอธิบายว่าที่สภาวะที่รุนแรงดังกล่าวส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและเกิดการยุบตัวของโครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบ

4.12 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านหนืดของสตาร์ชข้าวดัดแปร

จากผลการศึกษาคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แสดงโปรไฟล์ความหนืดไม่ต่างจากสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน แสดงว่ากระบวนการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ ไม่สามารถทำลายพันธะเชื่อมข้ามภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชได้หรือทำลายได้เพียงบางส่วนจึงทำให้สตาร์ชสามารถต้านการพองตัวในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนส่งผลให้โปรไฟล์ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM ของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ ยังคงมีลักษณะเป็นแกรนูลอยู่ ยกเว้นที่สภาวะการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่มีทั้งผลของความดันและอุณหภูมิที่สูงและเป็นสภาวะที่รุนแรงจนทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการแตกตัวจนไม่เหลือความเป็นแกรนูลอยู่เลย โดย Ozturk, Koksel, Kahraman, and Ng (2009) ได้รายงานว่าการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอแก่สตาร์ชส่งผลกระทบให้เกิดการแตกตัวของเม็ดสตาร์ชได้มากเกินไปและส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเนื่องจากสตาร์ชได้รับทั้งความร้อนและความดันระหว่างการให้ความร้อนจึงทำให้มีความหนืดลดลง จึงอาจอธิบายได้ว่าสาเหตุที่สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อนึ่งความดันไอไม่แสดงความหนืด ในขณะที่ไม่หลงเหลือความเป็นกรนูลอยู่เลยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ให้ความร้อนสภาวะอื่นๆ ที่ยังคงมีความเป็นแกรนูล แต่ไม่แสดงความหนืด เพราะเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.8 โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน และสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ

4.13 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชข้าวดัดแปร

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC ของสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.10 พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน คือมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 173-175 องศาเซลเซียส ในขณะที่สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีอุณหภูมิในช่วง 187-189 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่สตาร์ชข้าวดัดแปรผ่านการให้ความร้อนในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงความชื้นสูง ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชสูญเสียความแข็งแรงไปบางส่วน กล่าวคืออาจเกิดการแตกตัวระหว่างหมู่แทนที่หรือ bound citrateกับสตาร์ชโมเลกุลไป จึงทำให้มีหมู่ OH อิสระในโมเลกุลของสตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ที่มีการปรับให้มีความชื้นมากเกินพอก่อนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนในระบบที่มีน้ำมากเกินพอจึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปจับกับโมเลกุลของสตาร์ชได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยการที่อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนดังกล่าวมีค่าสูง เนื่องจากเกิด amylose-lipid complex ขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาและกระบวนการให้ความร้อนในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่ลักษณะโครงผลึกของตัวอย่างดังกล่าวมี peak เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 19.8° (รูปที่ 3.10) Chatakanonda et al. (2000) รายงานว่า ครอสลิงค์สตาร์ชที่ผลิตด้วย STMP จากสตาร์ชข้าวที่เปอร์เซนต์ครอสลิงค์ 9.2, 26.2 และ29.2%มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่าสตาร์ชข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม โดยอุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าสูงขึ้นตามระดับการเกิด ครอสลิงค์ซึ่งยืนยันได้ว่าการเกิดครอสลิงค์ขึ้นภายในสตาร์ชโมเลกุลส่งผลให้สตาร์ชต้านการพองตัวจึงทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น และนอกจากนี้ยังเกิด amylose-lipid complex ขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิ 90-110 องศาเซลเซียส แต่มีพีค endoterm ขนาดเล็กกว่าสตาร์ชข้าวดิบและตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเกิดครอสลิงค์ด้วย STMP หรือการทำครอสลิงค์ที่สภาวะอื่นๆ มีผลที่ทำให้เกิด amylose-lipid complex ที่มีขนาดเล็กและไม่คงตัวขึ้น จึงส่งผลให้สตาร์ชดัดแปรด้วยสารเคมีมีค่าพลังงานเอนทาลปีที่ต่ำกว่าสตาร์ชดิบ

4.14 ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อลักษณะทางโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวดัดแปร

จากผลการทดลองหลังนำตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยกระบวนการแตกต่างกัน ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค Synchrotron XRD พบว่า สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ พบพีคที่ชัดเจนมากกว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนดังรูปที่ 3.9 และ 4.16 (ทั้งตัวอย่างที่ปรับและไม่ได้ปรับความชื้นก่อนการ

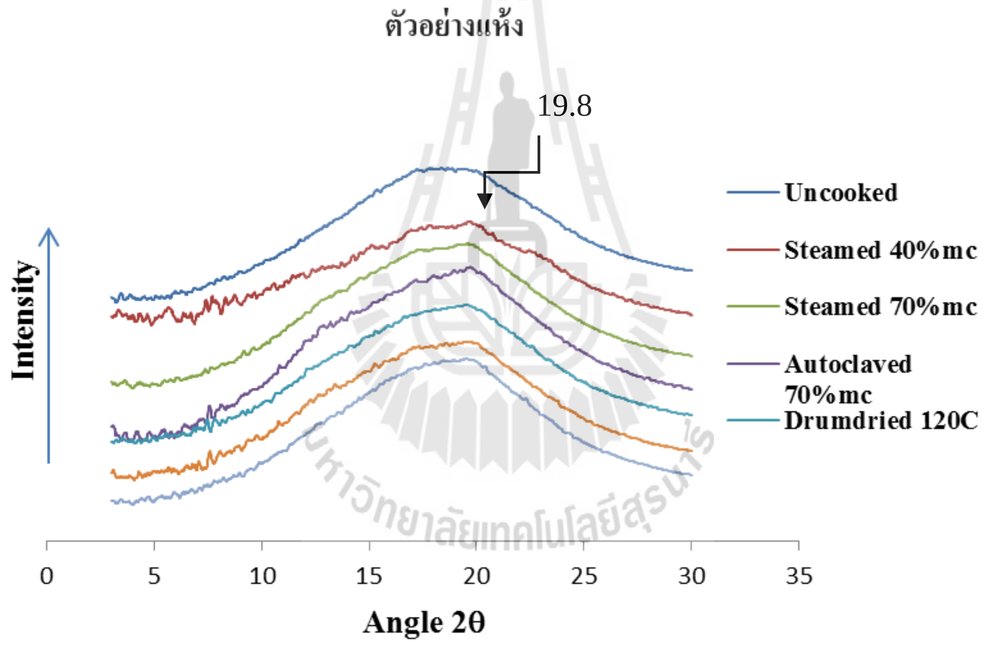
ตารางที่ 3.10 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ

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

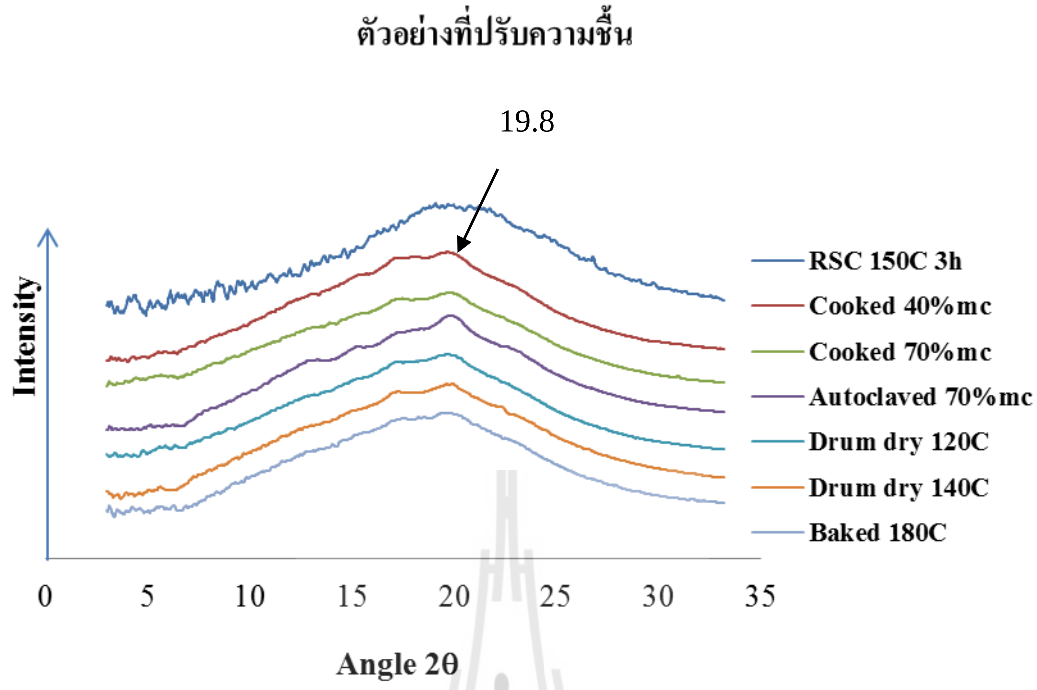
$^{a-c}$Mean values follow by different letters within the same column are significantly different (*$p<0.05$*)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิเคราะห์) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกพบว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนยังคงมีลักษณะผลึกเหมือน A-type เล็กน้อย คือปรากฏพีคคู่ (doublet peak) กว้างๆ ที่ 2θ ที่ตำแหน่ง 17 และ 18° ในขณะที่สตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนทุกสภาวะแสดงลักษณะความเป็นผลึกแบบ Vh-type คือมีพีคชัดเจนที่ 2θที่ 19.8° แสดงให้เห็นว่ากระบวนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ ส่งเสริมให้เกิดการจัดเรียงตัวของ Amylose-lipid complexes ขึ้น เนื่องจากเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง(100-180°C) ในสภาวะที่มีน้ำปานกลางและมาก อาจทำให้มีอะมิโลสอิสระบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชได้ง่าย จึงทำให้สามารถรวมตัวกับไลปิดที่มีอยู่ได้ง่ายขึ้น (Le Bail Bizot, Ollivon, Keller, Bourgaux, and Buleon, 1999; Shin et al., 2009) ซึ่งจะสังเกตได้จากพีคของตัวอย่างสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะที่ชัดเจนกว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 3.9 และ 3.10)



รูปที่ 3.9 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ไม่ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)



รูปที่ 3.10 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของ (Crystallinity) สตาร์ชข้าวดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ (ผ่านการปรับความชื้น) ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสภาวะในการผลิตสตาร์ชซิเตรททนย่อยต่อเอนไซม์ด้วยกรดซิเตริก โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซิตริกตั้งแต่ 10 – 40 % (w/v) พบว่าการผลิตสตาร์ชซิเตรทโดยใช้สสารละลายกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้น 20 % (w/v) ทำให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้มีปริมาณ RS สูงที่สุด และเมื่อย่อยสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสก่อนนำไปผลิตเป็นสตาร์ชซิเตรท พบว่าสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ 0.5 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้สตาร์ชซิเตรทที่มีปริมาณ RS สูงที่สุด และสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ 1 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายกรดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณ RS ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ RS ที่ผลิตได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าระยะเวลาที่ในการย่อยสตาร์ชด้วนเอนไซม์และระยะเวลาในการแช่สารละลายกรดส่งผลต่อปริมาณ RS ของสตาร์ชซิเตรทที่ผลิตได้ และปริมาณ RS ที่ได้จะแปรผันตามปริมาณกรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Bound citric acid) โดยสตาร์ชวิเตรทที่ผลิตได้จากทุกสภาวะที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติในการต้านต่อการพองตัวและการละลาย และไม่เกิดการเจลาติไนเซชันในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ จึงส่งผลให้สตาร์ชซิเตรทที่ได้ไม่เกิดความหนืด

สตาร์ชข้าวดัดแปรสามารถทนต่อสภาวะในการให้ความร้อนด้วยการนึ่งและแบบลูกกลิ้งได้ดี เนื่องจากสูญเสียปริมาณ RS น้อยมาก เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยการอบและหม้อนึ่งความดันไอที่มีการสูญเสียปริมาณ RS มากที่สุด ซึ่งทำให้ทราบว่าความร้อนและความดันไอปริมาณสูงมีผลต่อการทำลายโครงสร้างของสตาร์ชข้าวดัดแปรมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ไม่เหลือความเป็นเม็ดสตาร์ช และการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในสภาวะที่มีความชื้นปานกลางถึงสูงทำให้เกิด Amylose-lipid complexes ขึ้นในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลของ DSC ที่ตัวอย่างมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูง

ดังนั้นสตาร์ชข้าวดัดแปรที่ได้ จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นปานกลางถึงสูง ด้วยกระบวนการให้ความร้อนแบบการนึ่งและแบบลูกกลิ้ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้ยังคงหลงเหลือ RS ในปริมาณที่สูง

บรรณานุกรม

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสาร มอก. ที่ 1073 – 2535. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใ กรุงเทพฯ. 11 หน้า

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 303 หน้า.

พรศักดิ์ มนัสศิริเพ็ญ. (2534). การทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอก. **วารสารอาหาร**. 3:178-181.

วิไล รังสาดทอง. (2543). **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, พิมพ์ครั้งที่ 1 เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน, กรุงเทพฯ.

Adebiyi, A. B., Omojola, M. O., Orishadipe, A. T., Afolayan, M. O., and Olalekan, D. (2011). TACCA starch citrate-A potential pharmaceutical excipient. **Archives of Applied Science Research**. 3(6): 114-121.

Agboola, S. O., Akingbala, J. O., and Oguntmein, G. B. 1991. Production of low substituted cassava starch acetates and citrates. **Starch/Stärke.** 43: 13-15.

Aggarwal, P., and Dollimore, D. (1998). A thermal analysis investigation of partially hydrolyzed starch. **ThermochimicaActa.** 319: 17–25.

Alsaffar, A. A. (2010). Effect of thermal processing and storage on digestibility of starch in whole wheat grains. **Journal of Cereal Science.** 52: 480-485.

Aparicio-Saguilán, A., Flores-Huicochea, E., Tovar, J., García-Suárez, F., Gutiérrez-Meraz, F., and Bello-Pérez, L.A. (2005). Resistant Starch-rich Powders Prepared by Autoclaving of Native and Lintnerized Banana Starch: Partial Characterization. **Starch/Stärke**. 57(9): 405-412.

Apinan, S., Yujiro, I., Hidefumi, Y., Takeshi, F.,Myllarinen, P., and Forssell, P. 2007. Visual observation of hydrolyzed potato starch granules by alpha-amylase with confocal laser scanning microscopy. **Starch/Stärke**. 59**:** 543-548.

AOAC Method. 2002.02. AACC Report: The definition of dietary fiber: **Cereal Food Wolrd.** 46:112-126.

BeMiller, J.N., and Lafayette, W. (1997). Starch modification: challenges and prospects. **Starch/ Stärke.** 49: 127-131

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

Boonstra, D.J., and Berkhout, F. (1975). Preparation of redispersible hydrophobic starch derivatives. United States Patent, US3891624.

Castro, L., and Aguilera, J. M. 2007. Fracture properties and microstructure of low moisture starch probes. **Drying Technology.**25**:** 147–152.

Chatakanonda, P., Varavinit, S., and Chinachoti, P. 2000. Effect of Crosslinking on Thermal and Microscopic Transitions of Rice Starch. **Lebensmittel-Wissenchaft and Technology.** 33: 276-284.

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.G., and Kerr, W.L. 2003. Effects of chemical modification of wheat starch on molecular mobility as studied by pulsed 1H NMR. **Lebensmittel-Wissenchaft and Technology.** 51: 1–8.

Chowdary, K. P. R., and Enturi, V. (2011). Enhancement of dissolution rate and formulation development of efavirenz tablets employing starch citrate-a new modified starch. **Journal of Applied Pharmaceutical Science.** 1(5): 119-123.

Chung, H. J., Shin, D. H., and Lim, S. T. 2008. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starch. **Food Research International.** 4: 579-585.

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).

Dastidar, T. G., and Netravali, A. N. (2012). ‘Green’crosslinking of native starches with malonic acid and their properties. **Carbohydrate polymers**. 90(4), 1620-1628.

Ebihara, K., Nakai, Y., and Kishida, T. (2006). Hydroxypropyl-distarch phosphate from potato starch increase fecal output, but does not reduce zinc, iron, calcium, and magnesium apsorption in rats. **Journal of Food science.** 71(2): 163-168.

Englyst, H. N., and Hudson, G. J. (1992). The classification and measurement of dietary carbohydrates. **Food chemistry**. 57(1), 15-21.

Han, J. A., and Bemiller, J. N. 2007. Preparation and physical characteristics of slowly digestion modified food starch. **Carbohydrate polymers**. 74: 787-796.

Hirashima, M., Takahashi, R., and Nishinari, K. (2004). Effects of citric acid on the viscoelasticity of cornstarch pastes. **Journal of agricultural and food chemistry**. 52(10), 2929-2933.

Hirsch, J.B., and Kokini, J.L. 2002. Understanding the mechanism of cross-linking agents ($POCl_3$, STMP, and EPI) through swelling behavior and pasting properties of cross-linked waxy maize starches. **Cereal Chemistry.** 79: 102–107.

Hwang, D. K., et al. 2009. In-vitro digestibility of hydroxypropylated and cross-linkied waxy and non waxy rice starches. **Starch/Stärke**. 61: 20-27.

Jacobs, H., and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modification of granular starch, with retention of the granular structure: A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 46: 2895-2905.

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., Shreckumar, J. N., and Rajasetharam, K. N. (2007). Studies on the properties of citrate derivatives of cassava starch (Manihot esculenta Crantz) starch synthesized by microwave technique. **Journal of the Science of Food and Agriculture.** 87: 871-879.

Jyothi, A. N., Moorthy, S. N., and Rajasetharam, K. N. (2007). Studies on the synthesis and Properties of hydroxypropyl derivatives of cassava (Manihot esculenta Crantz) starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture.** 87: 1964-1972.

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: 183–192.

Kaur, L., Singh, N., and Singh, J. 2004. Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starches. **Carbohydrate Polymers.** 55: 211-223.

Khondkar, D., Tester, R. F., and Karkalas, J. (2009). Effect of cross-linking on the resistance to enzymatic ydrolysis of waxy maize starch and low-methoxy pectin**.** **Food Hydrocolloids**. 23(2): 387-393**.**

Kim, M., and Lee, S. 2002. Characteristics of crosslinked potato starch and starch-filled linear low-density polyethylene films. **Carbohydrate Polymers.** 50: 331–337.

Kim, M. J., et al. (2008). Resistant glutarate starch from adlay: Preparation and properties. **Carbohydrate polymers**. 67: 366-374.

Klaushofer, H., Berghofer, E., and Steyrer, W. 1978. Starch citrate - production and technical application properties. **Starch/Stärke.** 30: 47-55.

Koo, S. H., Lee, K. Y., and Lee, H. G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. **Food Hydrocolloids**. 24: 619-625.

Le Bail, P., Bizot, H., Ollivon, M., Keller, Bourgaux, G., and Buleon, A. (1999). Monitoring the crystallization of amylose–lipid complexes during maize starch melting by synchrotron X-Ray diffraction. **Biopolymers**. 50: 99-110.

Li, S., Gao, Q., and Ward, R. (2011). Physicochemical properties and in vitro digestibility of resistant starch from mung bean (Phaseolus radiatus) starch. **Starch/Stärke.** 63: 171-178.

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 acetylated ae, wx, and normal maize starch. **Carbohydrate Polymers.** 34: 283–289.

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. **Iran. Polym. J**. 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.

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.

Nakazawa, Y., and Wang, Y.-J. (2003). Acid hydrolysis of native and annealed starches and branch-structure of their Naegeli dextrins. **Carbohydrate Research**. 338(24): 2871-2882.

Narkrugsa, W. (1993). Study on the feasibility of starch citrate production by microwave technique. In **The Proceeding of the 31th Kasetsart University Annual Conference during 2nd-7th Feb 1993**. Bangkok, Thailand: Kasetsart University

Nugent, A. P. (2005). Health properties of resistant starch. **Nutrition Bulletin**. 30(1)ฃ 27-54

Omojola, M. O., Orishadipe, A. T., Afolayan, M. O., and Adebiyi, A. B. (2012). Preparation and physicochemical characterization of icacina starch citrate - a potential pharmaceutical / industrial starch. **Agriculture and Biological Journal of North America.** 3(1): 11-16.

Orozco-Martínez, T., and Betancur-Ancona, D. (2004). Indigestible starch of P. lunatus obtained by pyroconversion: Changes in physicochemical properties. **Starch/Stärke**, 56(6); 241-247.

Ozturk, S., Koksel, H., Kahraman, K., and Ng, P. K. W. (2009). Effect of debranching and heat treatments on formation and functional properties of resistant starch from high amylose corn starches. **European Food Research and Technology**. 229: 115-125.

Papadimitriou, E. K., and J. R. Barton. (2009). Report: Factors affecting the content of potentially toxic elements in the biodegradable fraction of autoclaved household waste. **Waste Management and Research.** 27(7): 685-692.

Parchure, A. A., and Kulkarni, P. R. (1997). EFFect of food processing treatments on generation of resistant starch. **International Journal of Food Sciences and Nutrition.** 48: 257-260.

Perez, S., and Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch/Stärke**. 62: 389-420

Perry, N. K., Wepner, B., Berghofer, E., Miesenberger, E., and Tiefenbacher, K. (1999). Citrate Starch-Application as Resistant Starch in Different Food System. **Starch/Stärke.** 51: 354-361.

Puspasari, F., Nurachman1, Z., Noer, A. S., Radjasa, O. K., van der Maarel, M. J. E. C., and Natalia1, 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, S. (1995). **Food properties handbook.** New York: CRC Press.

Ratnayake, W. S., and Jackson, D. S. (2008). Thermal behavior of resistant starches RS2, RS 3, and RS 4. **Journal of Food Science.** 73(5): 356-366.

Rocha, T. d. S., Carneiro, A. P. d. A., and Franco, C. M. L. (2010). Effect of enzymatic on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. **Food Science and Technology (Campinas)**. 30(2): 544-551.

Roder, N., et al. (2009). Factors affecting the action of α-amylase on wheat starch: Effects of water availability. An enzymic and structural study. **Food chemistry**. 113(2): 471-478.

Roopa, S., and Premavalli, K. S. (2008). Effect of processing on starch fractions in different varieties of finger millet. **Food Chemistry.** 106: 875–882.

Sadeghi, A., Shahidi, F., Mortazavi, S. A., and Mahalati, M. N. (2008). Evaluation of different parameters effect on maltodextrin production by–amylase Termamyl 2-x. **World Applied Sciences Journal**. 3(1): 34-39.

Sajilata, M. G., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant Starch-A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.** 5: 1-17.

Sevenou, O., Hill, S. E., Farhat, I. A., and Mitchell, J. R. (2002). Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy. **International Journal of Biological Macromolecules.** 3: 79-85.

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, M. J. et al. (2007). Formation, characterization, and glucose response in mice to rice starch with low digestibility produced by citric acid treatment. **Journal of Cereal Science.** 45: 24-33.

Shin, S. I., Lee, C. J. Kim, M. J., Choi, S. J., Choi, H. J., Kim, Y., and Moon, T. (2009). Structural characteristics of low-glycemic response rice starch produced by citric acid treatment. **Carbohydrate Polymers**. 78: 588-595.

Shogren, K. L., and Biswas, A. (2006). Preparation of water-soluble and water swelling starch acetates using microwave heating. **Carbohydrate Polymers.** 64: 16-21.

Shon, K. J., and Yoo, B. (2006). Effect of acetylation on rheological properties of rice starch. **Starch/Stärke.** 58: 177-185.

Singh, J., Kaur, L., and McCarthy, O.J. (2007). Factors infiuencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications-a review. **Food Hydrocolloids**. 21: 1-22.

Srichuwong, S., Sunarti, T. C., Mishima, T., Isono, N., and Hisamatsu, M. (2005). Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. **Carbohydrate Polymers.** 60: 529-538.

Tester, R.F., Karkalas, J., and Qi, X. (2004). Starch structure and digestibility enzyme substrate relationship. **World's Poultry Science Journal**. 60: 185-195.

Tharanathan, R. T. (2005). Starch-value addition by modification. **Food Science and Nutrition.** 45: 371-384.

Toledo, R. T. (1999). **Fundamentals of food process engineering.** Aspen Publishers, Inc. MD.

Tovar, J., and Melito, C. (1996). Steam cooking and dry heating produce resistant starch in legumes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 44: 2642-2645.

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

Vatanasuchart, N., Niyomwit, B., and Narasri, W. (2012). Resistant Starch, Physicochemical and Structural Properties of Bananas from Different Cultivars with an Effect of Ripening and Processing. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.).** 46: 461-472.

Wepner, B., Berghofer, E., Ella Miesenberger, W., Karl Tiefenbacher, K., and Perry N. K. (1999). Citrate Starch- Application as Resistant Starch in Different Food Systems. **Starch/Stärke**. 51(10): 354-361.

Whister, R. L., and Deniel, J. R. (1984). Molecular structure of starch. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, and E. F. Paschall (Eds.). **Starch: chemistry and technology.** (pp.153-178). 2nd Ed. Acadamic Press, Inc., Florida.

Wurzbug, O. B. (1986). **Modified Starches: Properties and Uses.** Florida: CRC Press.

Xie, X., and Liu, Q. (2004). Development and Physicochemical Characterization of New resistant Citrate Starch from Different Corn Starch. **Starch/Stärke.** 56: 364-370.

Xie, X., 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 crosslinked rice starch. **Cereal Chemistry.** 70: 596–601.

Yook, C., Pek, U.-H., and Park, K.-H. (1993). Gelatinization and Retrogradation Characteristics of Hydroxypropylated and Cross-linked Rices. **Journal of Food Science**. 58(2): 405-407. doi: 10.1111/j.1365-2621.1993.tb04285.x

Youshuang, C., Shirong H., Zhongfeng T., Xiaowei C., and Zengfang Z. 2011. Stuctural changes of cassava granules hydrolyzed by a mixture of α —amylase and glucoamylase. **Cereal Chemistry.** 85**:** 272-275.

Yussof, N. S., Utra, U., and Alias, A. K. (2013). Hydrolysis of native and cross-linked corn, tapioca, and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Starch/Stärke.** 65: 285-295.

Zobel, H. F. (1988). Molecules to granules: A comprehensive starch review. **Starch/Stärke.** 40(2): 44-50.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ / การประชุมระดับชาติและนานาชาติ

Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S**. 2009. Effect of extrusion paprameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

Dalai, N. and **Tongta, S**. 2009. Physiochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

Kiatponglarp, W. and **Tongta, S**. 2009.Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

Tongta, S. and Boonna, S. 2009.Physical modification of rice flour by extrusion. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

Tongta, S. and Kiatponglarp, W. 2009.Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

Dalai, N. and **Tongta, S**. 2009. Physiochemical and textural properties of high amylose rice during storage. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.

Boonna, S.,**Tongta, S**. and Piyachomkwan, K. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anahiem, CA, USA.

Dalai, N. and **Tongta, S**. 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage.Poster presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.

Boonna, S. and **Tongta, S**. 2008.Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch.Oral presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.

Apirattananusorn, S., **Tongta, S**., Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. J. Agric. Food. Chem. 56:8549-8557.

Rareunrom, K., **Tongta, S**. andYongsawatdigul, J. 2008.Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. Asian Journal of Food and Agro-Industry, 1(02):97-104.

Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. Khon Kaen University Research Journal. 12(4):431-441.

Boonna, S. and **Tongta, S**. 2007.Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

Kiatponglarp, W. and **Tongta, S**. 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

Siriboon, B. and **Tongta, S**. 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S**. 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour.Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.

Rareunrom, K., **Tongta, S**. andYongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog.Oral presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.

Siriboon, B. and **Tongta, S**. 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice.Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.

Kiatponglarp, W. and **Tongta, S**. 2007.Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch**.**Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):195-204.

Rareunrom, K., **Tongta, S**. and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):185-193.

Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S**. 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. J. Agric. Food. Chem., 55: 1463-1468.

Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S**. 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.

Kiatponglarp, W. and **Tongta, S**. 2006.Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch.Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.

Tongta, S., Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.

Tongta, S., Kiatponglarp, W. and K. Sriroth, K. 2004.Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In ' Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.

Rareunrom, K., **Tongta, S**. and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. Poster presentation The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.

Sottirattanapan, P. and **Tongta, S**. 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate.Suranaree Journal of Science and Technology. 10(3):220-229.

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266