



การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่วในภาชนะแบบเปิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



การตัดแปรรสตารซ์มันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่วในภาชนะแบบเปิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

MODIFICATION OF TAPIOCA STARCH BY OPEN-PAN DRY HEATING



By

MISS Khemjiranat CHATCHAWAN

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements

for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2017

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การตัดแปรรสตา์ไขมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่วในภาชนะแบบเปิด
โดย	เชมจิราณัฐ ชัชวาลย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ )	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย )	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ถิรธรรมถาวร )	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาณี ตำนาวีระกุล )	

58403201 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : สตาร์ชดัดแปร, สตาร์ชมันสำปะหลัง, การคั่ว, ความร้อนขึ้น, ไฮโดรเทอร์มอล

นางสาว เขมจิราณัฐ ชัชวาลย์: การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่วในภาชนะแบบเปิด  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

ในการทำอาหารบางชนิดอาจมีการคั่วสตาร์ชในภาชนะเปิด เช่น หม้อหรือกระทะ ก่อนนำมาใช้เป็น ส่วนผสม การคั่วดังกล่าวจัดว่าเป็นกระบวนการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชวิธีหนึ่ง ด้วยการให้ความร้อนขึ้นหรือการทำไฮโดรเทอร์มอลที่ความชื้นในสตาร์ชค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากจะสูญเสียไประหว่างการคั่ว อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการดัดแปรสตาร์ชแบบนี้จะพัฒนาไปสู่การผลิต ระดับอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้น (9.5, 15 และ 20%) และ ระยะเวลาการคั่ว (0, 10, 20 และ 30 นาที) ต่อสมบัติต่าง ๆ ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วในหม้อเปิดที่วาง บนเตาไฟฟ้าซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 200 องศาเซลเซียส และมีการกวนที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที โดยพบว่าเมื่อ ระยะเวลาการคั่วเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของสตาร์ชได้เพิ่มสูงขึ้น ความชื้นของสตาร์ชลดลง จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นได้ว่าการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วไม่ส่งผลต่อลักษณะเชิงสัญญาณของเม็ดสตาร์ช และเม็ดสตาร์ชยังคง มีใบรีฟริงเจนส์อยู่ มีรูปแบบโครงสร้างผลึกจาก X-ray diffractometer เป็นชนิดเอ (A) เช่นเดิม ดัชนีความขาวของ สตาร์ชดัดแปรส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การคั่วสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้ ความสามารถในการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การคั่วอาจทำให้ความสามารถในการละลายและ กำลังการพองตัวของสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าลดลง เพิ่มขึ้น หรือไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับ ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาในการคั่ว เมื่อวิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืดของสตาร์ชดัดแปรส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความหนืดต่าง ๆ อาจลดลง เพิ่มขึ้น หรือไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับสภาวะในการคั่ว จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลลาทีโน เซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ชดัดแปรด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่ามีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ใกล้เคียงกัน โดยการเพิ่มระยะเวลาการคั่วทำให้ค่า  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีแนวโน้มลดลง ค่า  $T_0$  และ  $T_c - T_0$  ของรีโทรเกรดชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง ตัวอย่าง เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% มาประยุกต์ใช้ใน ผลิตภัณฑ์ขนมปังพบว่าได้คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นคุณลักษณะใน ด้านการละลายในปากที่ผู้ชิมชอบขนมปังที่ทำจากสตาร์ชที่ผ่านการคั่ว 20 นาทีมากที่สุด ขนมปังที่ทำจากสตาร์ชดัดแปรด้วยการคั่วทุกตัวอย่างมีความแข็งของเนื้อสัมผัสมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการคั่วอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการคั่วจึง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการดัดแปรสตาร์ชเชิงอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนต่ำ ไม่ใช้สารเคมี ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ได้สตาร์ชดัดแปรที่มีสมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

58403201 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : modified starch tapioca starch dry heating heat-moisture hydrothermal

MISS Khemjiranat CHATCHAWAN: Modification of Tapioca Starch by Open-pan Dry Heating Thesis advisor : Assistant Professor Doctor Eakaphan Keowmaneechai

In cooking of some foods, starches may be roasted in open containers, e.g., pot or pan, before being used as an ingredient. This dry heating is considered as a physical starch modification process to improve the starch properties by a heat-moisture or hydrothermal treatment with a gradual loss of moisture during roasting. However, there are no studies on the factors involved in this kind of starch modification to develop it into industrial production. The objective of this research was to study the effects of initial moisture content (9.5, 15 and 20%) and roasting time (0, 10, 20 and 30 min) on properties of tapioca starch roasted in a pot placed on an electric hot plate set at 200 °C with agitation at 80 rpm. It was found that starch temperature elevated but starch moisture content decreased with increasing roasting time. From microscopy, it was shown that the roasting process did not affect morphology of starch granules, which still maintained their birefringence. Crystalline structure revealed by a X-ray diffractometer indicated that the roasted starches reserved type A structure pattern. Most of the roasted starches had statistically insignificant whiteness indices. Roasting the starch with high initial moisture contents resulted in significantly reduced water absorption at room temperature. The dry heating caused solubility and swelling power of the starch at different temperatures to be decreased, increased or unchanged significantly depending on initial starch moisture content and roasting time. As analyzed by Rapid Visco Analyzer (RVA), most of the modified starches were not significantly different in pasting temperatures. Their viscosities decreased, increased or unchanged significantly depending on roasting conditions. Thermal properties upon gelatinization and retrogradation of the starches were analyzed by Differential Scanning Calorimeter (DSC). It was found that the starches were similar in  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c-T_o$  and enthalpy ( $\Delta H$ ). Longer roasting times tended to decrease  $T_c-T_o$  and  $\Delta H$  for gelatinization.  $T_o$  and  $T_c-T_o$  for retrogradation were not significantly different among samples. The starches roasted at initial moisture content of 9.6% were applied to make Thai cookies (Khanom Ping). The cookies got no significant difference in hedonic scores for all attributes except the one made from the starch roasted for 20 min had the highest score for disintegration in the mouth. The cookies made from the roasted starches showed higher hardness than the one made from the native starch. Therefore, roasting is an alternative industrial starch modification that is low in cost, chemical-free, safe for consumers and environment-friendly for producing modified starches with a wider range of physicochemical properties and applications.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างมากจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ที่ได้ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษา และกรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น แนวทางในการแก้ปัญหา ความเอาใจใส่และความเมตตาตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเรียนและงานวิจัย รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนมาตั้งแต่เด็กในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องนิสิตปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างมากทั้งร่างกายและแรงใจตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความช่วยเหลือและส่งเสริม ตลอดจนการสนับสนุนด้านกำลังทรัพย์ และกำลังใจอย่างเต็มที่มาโดยตลอด



เชมจิราณัฐ ชัชวาลย์



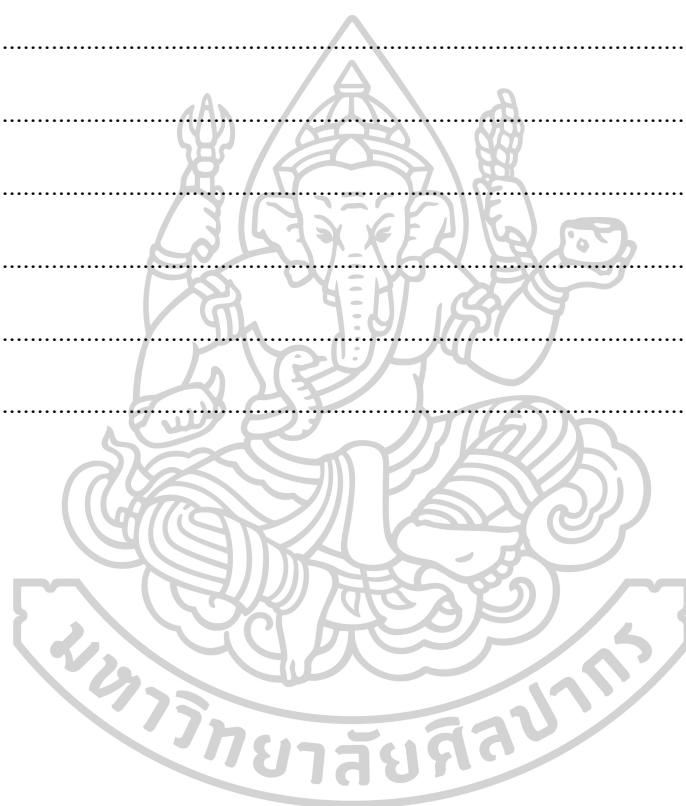
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	11
สารบัญภาพ .....	14
บทที่ 1 .....	16
บทนำ.....	16
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	17
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	17
บทที่ 2 .....	18
การตรวจเอกสาร.....	18
2.1 สตาร์ช .....	18
2.1.1 อะไมโลส .....	18
2.1.2 อะไมโลเพกติน .....	19
2.1.3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ช .....	20
2.2. สมบัติของสตาร์ช .....	24
2.2.1 ความชื้น.....	24
2.2.2 การพองตัวและการละลาย .....	24
2.2.3 ความหนืด.....	25

2.2.4 การเกิดเจลาทีโนเซชัน .....	26
2.2.5 การคืนตัวของสตาร์ช .....	28
2.3 การตัดแปร์สตาร์ชด้วยความร้อนขึ้น .....	30
2.4 ผลของการตัดแปร์ด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติของสตาร์ช.....	34
2.4.1 ผลต่อลักษณะทางสีฐานของเม็ดสตาร์ช .....	34
2.4.2 ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก .....	35
2.4.3 ผลต่อการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ช.....	36
2.4.4 ผลต่อสมบัติด้านความหนืด.....	37
2.4.5 ผลต่อการเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ช .....	38
2.5 การนำสตาร์ชที่ตัดแปร์ด้วยความร้อนขึ้นไปใช้ประโยชน์ .....	39
2.6 การคั่ว.....	41
บทที่ 3 .....	42
ระเบียบวิธีวิจัย .....	42
3.1 วัตถุประสงค์.....	42
3.1.1 วัตถุประสงค์ในการตัดแปร์สตาร์ชด้วยวิธีการคั่ว .....	42
3.1.2 วัตถุประสงค์ในการทำขนมผิง .....	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	42
3.3 การตัดแปร์สตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่ว.....	43
3.4 การตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปร์ด้วยวิธีการคั่ว.....	44
3.4.1 ความชื้น .....	44
3.4.2 ลักษณะทางสีฐาน.....	44
3.4.3 ไบรีฟริงเจนซ์ .....	45
3.4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึก.....	45
3.4.5 ดัชนีความขาว.....	45

3.4.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ.....	45
3.4.7 ความสามารถในการละลายและกำลัการพองตัว.....	45
3.4.8 ความหนืด.....	45
3.4.9 เนื้อสัมผัสของเจล .....	45
3.4.10 สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชัน .....	45
3.5 การทดสอบการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการคั่วในผลิตภัณฑ์ขนม ผิง.....	46
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างขนมผิง .....	46
3.5.2 การหาปริมาตรจำเพาะของขนมผิง .....	46
3.5.3 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมผิง .....	46
3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมผิง.....	46
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ .....	46
บทที่ 4 .....	48
ผลการทดลองและการวิจารณ์ .....	48
4.1 ความชื้น.....	48
4.2 ลักษณะทางสีฐาน .....	49
4.3 ไบรีฟริงเจนซ์ .....	50
4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึก .....	52
4.5 ดัชนีความขาว .....	55
4.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ .....	55
4.7 ความสามารถในการละลายและการพองตัว .....	56
4.8 สมบัติด้านความหนืด .....	62
4.9 เนื้อสัมผัสของเจล.....	66
4.10 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชัน.....	67

4.11 ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง.....	72
4.12 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมปังด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring.....	73
4.13 ประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสโดย Texture Analyzer.....	73
บทที่ 5 .....	75
สรุป.....	75
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	94
ภาคผนวก ง.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	103



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน .....	21
ตารางที่ 2 วิธีการเตรียมสตาร์ชตัดแปรชนิดต่างๆ.....	31
ตารางที่ 3 คุณสมบัติและประโยชน์ของสตาร์ชตัดแปร .....	33
ตารางที่ 4 สภาวะการตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังโดยวิธีการคั่วที่ระดับความชื้นเริ่มต้น และ ระยะเวลาการให้ความร้อนแตกต่างกัน.....	44
ตารางที่ 5 ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วโดย สตาร์ชมีความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	54
ตารางที่ 6 ดัชนีความขาวของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและ ระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	55
ตารางที่ 7 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (g/g solid) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	56
ตารางที่ 8 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	57
ตารางที่ 9 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	57
ตารางที่ 10 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	58
ตารางที่ 11 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	59
ตารางที่ 12 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	60
ตารางที่ 13 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	60

ตารางที่ 14 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	61
ตารางที่ 15 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	61
ตารางที่ 16 อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature) (องศาเซลเซียส) ของสตาร์ช มันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน.....	63
ตารางที่ 17 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่ว ที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน.....	64
ตารางที่ 18 เบรกดาวน์ (breakdown) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	65
ตารางที่ 19 เซ็ทแบค (setback) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้น เริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน.....	66
ตารางที่ 20 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่ว ที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน.....	66
ตารางที่ 21 ค่าความแข็ง (N) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและ ระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	67
ตารางที่ 22 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลทิโนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	70
ตารางที่ 23 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการ คั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	71
ตารางที่ 24 ปริมาตรจำเพาะของขนมฝั่งที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้น เริ่มต้น 9.6% และระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	72
ตารางที่ 25 ค่าความแข็ง (Hardness) (N) โดย Texture Analyzer ของขนมฝั่งที่ทำจากสตาร์ชมัน สำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% และระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	73
ตารางที่ 26 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ของขนมฝั่งที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% และระยะเวลา คั่วแตกต่างกัน .....	74

ตารางที่ 27 อุณหภูมิทุกๆ 2 นาทีของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปรด้วยวิธีการคั่ว .....	94
ตารางที่ 28 ความชื้นของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการคั่ว.....	95



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะไมโลสซึ่งเกิดจากน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นตรง .....	18
ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส.....	19
ภาพที่ 3 โครงสร้างของอะไมโลเพกตินที่จุดเกิดกิ่งก้านของพันธะ $\alpha$ -1-6.....	20
ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐานซึ่งมีความกว้างของชั้นอยู่ในช่วง 5-6 และ 2-5 นาโนเมตร ตามลำดับ .....	21
ภาพที่ 5 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกภายในเม็ดสตาร์ชแบบ A, B และ C.....	22
ภาพที่ 6 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกภายในเม็ดสตาร์ชแบบ A, B และ V.....	23
ภาพที่ 7 รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างแบบ A และแบบ B .....	23
ภาพที่ 8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง rapid visco analyzer (RVA) .	26
ภาพที่ 9 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน .....	27
ภาพที่ 10 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส .....	29
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสตาร์ชมันสำปะหลังขณะคั่ว .....	48
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อผ่านการตัดแปรโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน.....	48
ภาพที่ 13 ภาพถ่ายของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 500 เท่า.....	49
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 3,500 เท่า.....	50
ภาพที่ 15 ภาพถ่ายของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	51
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายแสดงลักษณะไบรฟริงเจนของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	51



ภาพที่ 17 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 9.6% ที่ผ่านการ ตัดแปรโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน.....	52
ภาพที่ 18 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 15% ที่ผ่านการ ตัดแปรด้วยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน.....	53
ภาพที่ 19 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 20% ที่ผ่านการ ตัดแปรโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน.....	53
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลที่โนเซนซ์ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและ หลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	68
ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ก่อนและ หลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	69
ภาพที่ 22 ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง X-ray diffractometer.....	86
ภาพที่ 23 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	96
ภาพที่ 24 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	96
ภาพที่ 25 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	97
ภาพที่ 26 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	97
ภาพที่ 27 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	98
ภาพที่ 28 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 15% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	99
ภาพที่ 29 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน .....	100
ภาพที่ 30 วัสดุอุปกรณ์ในการตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่ว .....	101

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

สตาร์ชมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหาร โดยสตาร์ชจะทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับอาหารในด้านโภชนาการ เนื้อสัมผัส ความคงตัว ความสะดวกในการแปรรูป เช่น เป็นตัวทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์ขนมหวานบางชนิด เก็บรักษาความชื้นในผลิตภัณฑ์ขนมอบทำให้ไส้พายและซูปมีความเหนียว ป้องกันการติดพิมพ์ เป็นต้น (Considine, 2012)

อย่างไรก็ตามสตาร์ชธรรมชาติ (native starch) มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ที่ทำให้ไม่เหมาะสมกับชนิดอาหาร กระบวนการผลิตและการเก็บรักษา เช่น ช่วงการให้ความเหนียวแคบ เกิดการคืนตัวได้ง่าย ไม่ทนต่อกรด ความร้อนและการกวนในกระบวนการแปรรูป เป็นต้น จึงต้องแก้ปัญหานี้โดยนำสตาร์ชธรรมชาติไปดัดแปรเพื่อปรับปรุงสตาร์ชให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น มีช่วงให้ความเหนียวกว้างขึ้น หรือมีความเหนียวต่ำลง เกิดเจลและให้ความเหนียวได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำลง คงทนต่อสภาวะต่างๆ ในกระบวนการแปรรูป และมีความคงตัวดีขึ้น (Light, 1990) ตรงต่อความต้องการของผู้บริโภคและอุตสาหกรรม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชทางกายภาพหรือทางเคมีทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชหรือโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งมีหลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะมี ความแตกต่างกันตามความต้องการในการนำไปใช้งาน

การคั่วเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับอาหารแห้งโดยไม่ใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นตัวกลาง อาหารจะถูกกวน คน พลิกกลับอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ความร้อนส่งผ่านไปยังอาหารอย่างทั่วถึง การคั่วสตาร์ชก็เป็นวิธีการดั้งเดิมที่มีมานานในการเตรียมสตาร์ชวัตถุดิบเพื่อทำขนมบางชนิด เช่น ขนมฝักรวมโก้ ขนมสัมปันนี โดยจะนำสตาร์ชมาคั่วจนสุกได้ที่ สังเกตจากสตาร์ชจะล่อนไม่ติดกระทะ การคั่ว นับเป็นการวิธีการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพที่ยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย

แม้ว่าประเทศไทยมีการผลิตสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ได้เป็นปริมาณมาก แต่มีการนำไปผลิตเป็นสตาร์ชดัดแปรไม่มากนัก การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นในการสร้างทางเลือกในการดัดแปรสตาร์ชโดยวิธีการคั่วซึ่งเป็นวิธีการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ ทำได้ง่ายและน่าจะเป็นอีกทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากสตาร์ช โดยได้ทำการศึกษาสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาในการคั่วที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สามารถนำไปพัฒนาการผลิตสตาร์ชตัดแปรร  
จากมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อผลิตและตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการคั่วโดย  
มีความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาในการคั่วแตกต่างกัน
2. เพื่อทดสอบการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปรรด้วยวิธีการคั่วนี้ใน  
ผลิตภัณฑ์ขนมผิง

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การคั่วสตาร์ชจัดเป็นการเตรียมวัตถุดิบก่อนการทำขนมไทยบางชนิดที่มีมาแต่โบราณ ซึ่งการ  
คั่วสตาร์ชนี้มีความคล้ายคลึงกับการตัดแปรรสตาร์ชทางกายภาพ การให้ความร้อนชื้น (heat-  
moisture treatment) โดยใช้อุณหภูมิสูงและความชื้นสตาร์ชต่ำ สตาร์ชตัดแปรรที่ได้จะยังไม่เกิด  
เจลาทีไนเซชันแต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้



## บทที่ 2

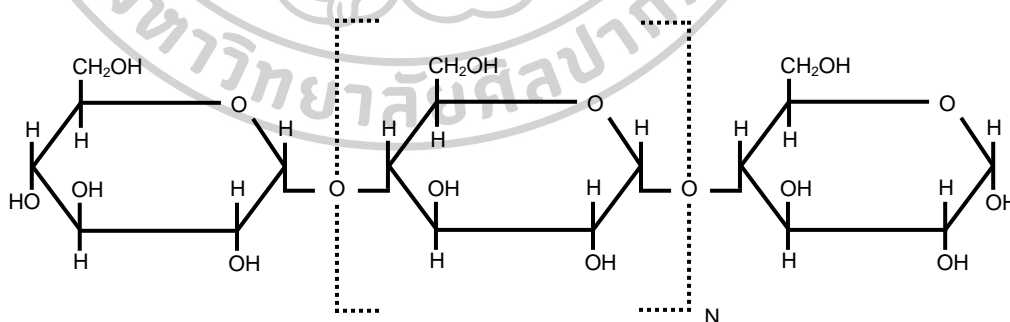
### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 สตาร์ช

สตาร์ช (starch) เป็น พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่พบในพืช เช่น เมล็ดธัญพืช พืชหัว และถั่วเมล็ดแห้ง มีน้ำตาลกลูโคส (glucose) เป็นมอนอเมอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -1,4 ได้เป็นโครงสร้างแบบอะไมโลส (amylose) และที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -1,4 กับ  $\alpha$ -1,6 ได้เป็นอะไมโลเพกติน (amylopectin) (Hizukuri, 1986)

##### 2.1.1 อะไมโลส

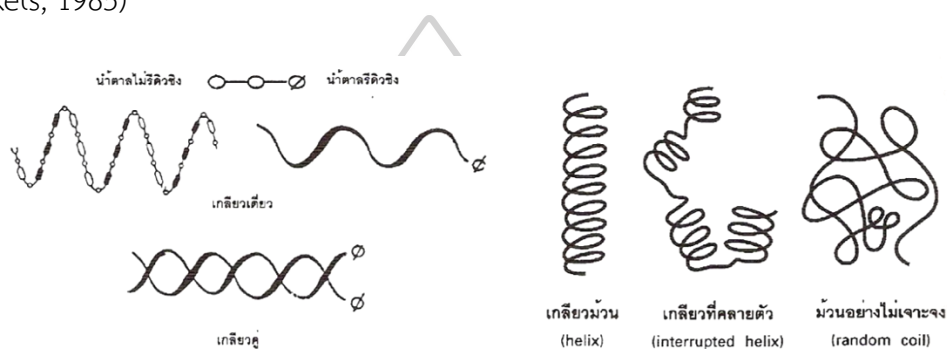
อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage ดังภาพที่ 1 น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง  $10^5$ - $10^6$  ดาลตัน และมีค่าระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) ที่แตกต่างกันไปตามสตาร์ชแต่ละชนิด อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล ฟีนอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิวและไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์และไอโอดีน อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส (Hizukuri, 1986)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะไมโลสซึ่งเกิดจากน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ  $\alpha$ -1-4

ที่มา: (Swinkels, 1985)

สำหรับตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช โดย อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั่วทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) และส่วนผลึก (crystalline regions) อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบ เป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพกตินอยู่ใจกลางเม็ดสตาร์ช สำหรับอะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ ตามขอบของเม็ดสตาร์ช อะไมโลสจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่ คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) ดังภาพที่ 2 การที่อะไมโลส จะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำลายอุณหภูมิจำนวนและขนาดโมเลกุลของอะไมโลส (Swinkels, 1985)



ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา: (Swinkels, 1985)

### 2.1.2 อะไมโลเพกติน

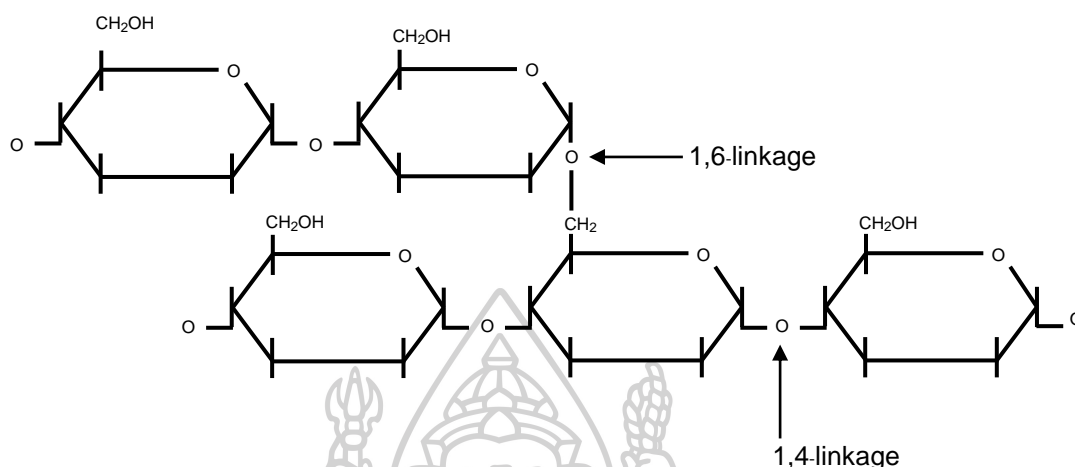
อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ประกอบด้วยส่วนที่เป็น เส้นตรงของกลูโคสเชื่อมกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาซึ่งเป็น พอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 glycosidic linkage (Swinkels, 1985) แสดงดังภาพที่ 3 หน่วยย่อยกลูโคสที่มีพันธะชนิด  $\alpha$ -1,6 มี อยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณกลูโคสในอะไมโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกติน ในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วยและมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำเนื่องจากอะไมโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง (กล้านรงค์ ศรีรอด & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสายโมเลกุล 3 ชนิด คือ

1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสาย ชนิดนี้ (unreached structure)

2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้าง อะไมโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9 : 1

3) สาย C (C-chain) แบบสายแกน ซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ซึ่ง 1 หมู่ ในอะไมโลเพกติน แต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



ภาพที่ 3 โครงสร้างของอะไมโลเพกตินที่จุดเกิดกิ่งก้านของพันธะ  $\alpha$ -1-6  
ที่มา: (Swinkels, 1985)

หน่วยความยาวของสาย (unit chain lengths) หรือเรียกสั้นๆ ว่าความยาวของสาย (chain lengths, CL) ของอะไมโลเพกตินมีความสัมพันธ์กับลักษณะผลึกของสตาร์ชแต่ละชนิด โดยสตาร์ชที่มีผลึกแบบ A (CL ประมาณ 14-20 หรือน้อยกว่า 20) จะมีความยาวของสายอะไมโลเพกตินสั้นกว่าแบบ B (CL ประมาณ 16-22 หรือมากกว่า 22) (Hizukuri, 1986)

### 2.1.3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ช

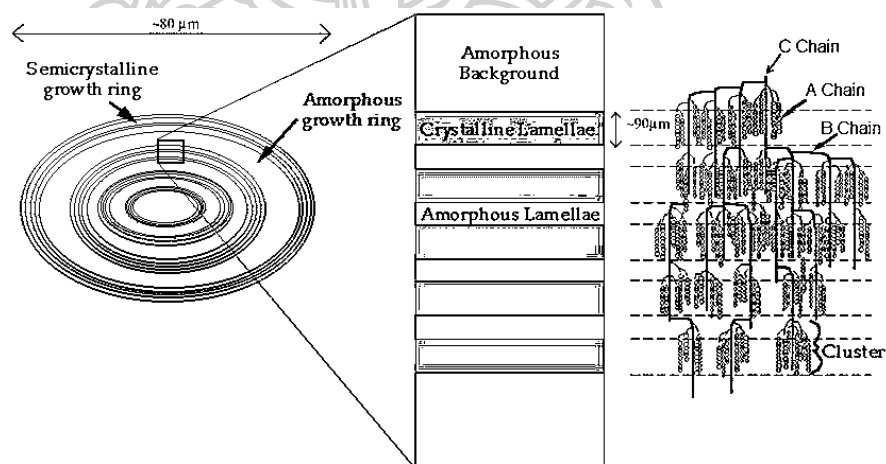
โครงสร้างเม็ดสตาร์ช (starch granule) ประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่อัดกันแน่นอยู่ภายใน อะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ จะแตกต่างกันไปตามระดับของพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization, DP) เฉลี่ย รวมทั้งปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ดังแสดงในตารางที่ 1 เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystallinity) โดยสายสั้นของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) สตาร์ชในธรรมชาติจะมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 15-45 (Zobel, 1988) โครงสร้างที่เป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายยาวของอะไมโลเพกติน แสดงดังภาพที่ 4 (Jacobs & Delcour, 1998)



ตารางที่ 1 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

แหล่งของสตาร์ช	ปริมาณ อะไมโลส (ร้อยละ)	ปริมาณ อะไมโลเพกติน (ร้อยละ)	ขนาดโมเลกุล(DP)เฉลี่ยของ	
			อะไมโลส	อะไมโล- เพกติน
ข้าวเจ้า	17	83		
-ชนิดอินดิกา (Indica)			1,000	4,700
-ชนิดจาโปนิกา (Japonica)			1,100	12,800
ข้าวเหนียว	1	99	-	-
ข้าวโพด	28	72	930	8,200
มันสำปะหลัง	17	83	2,600	-
มันฝรั่ง	21	79	4,900	9,800
ข้าวสาลี	28	72	1,300	4,800

ที่มา: (Hizukuri, 1985)

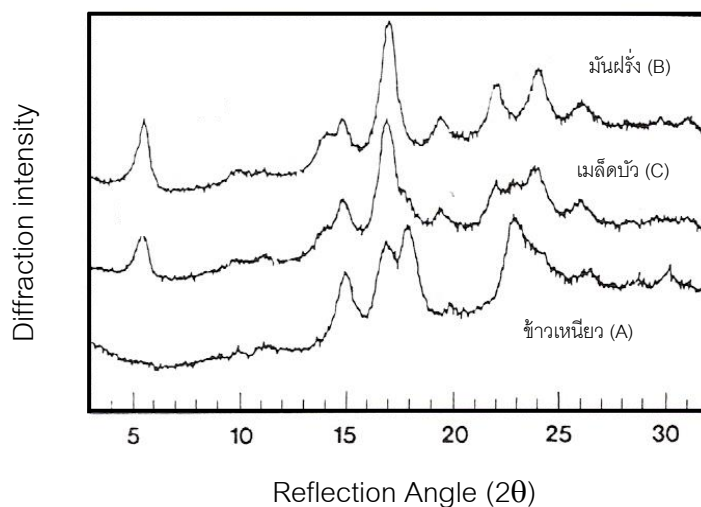


ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนเปลือกและส่วนอณูฐานซึ่งมีความกว้างของชั้นอยู่ในช่วง 5-6 และ 2-5 นาโนเมตร ตามลำดับ

ที่มา: (Jacobs & Delcour, 1998)

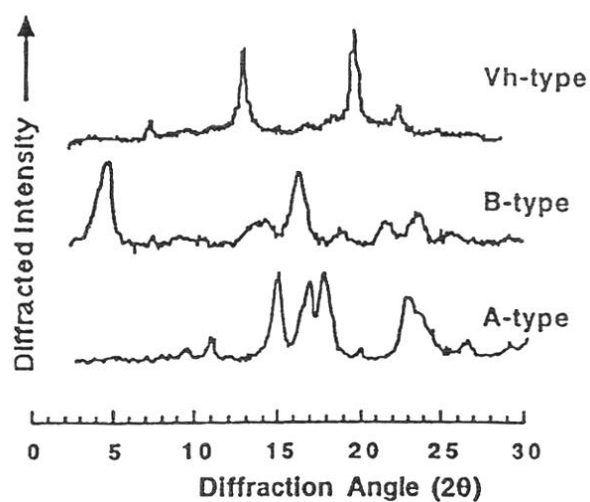
โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ซมี 4 แบบ คือ แบบ A, B, C และ V จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ซโดยเครื่อง X-ray diffractometer โครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคที่ตำแหน่ง 17 และ  $17.9^{\circ}2\theta$  พบในสตาร์ซจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ แบบ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 5.6 และ  $17^{\circ}2\theta$  พบในสตาร์ซจากพืชหัวหรือจากพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 49 (Zobel, 1988) แบบ C เป็นลักษณะที่รวมกันของแบบ A และ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 5.6 และ  $17.9^{\circ}2\theta$  พบใน สตาร์ซจากพืชตระกูลถั่ว (Hizukuri et al., 1996) แสดงดังภาพที่ 5 แบบ V จะให้พีคที่ตำแหน่งในช่วง 7-8, 13, 19-20 และ  $22-23^{\circ}2\theta$  แสดงดังภาพที่ 6 อันเป็นรูปแบบที่เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ซกับสารอื่น เช่น กับไอโอดีน แอลกอฮอล์ และไขมัน (fatty acid และ monoglycerides) เป็นต้น หรือขณะเกิดเจลลาทีโนเซชัน (Hibi et al., 1990)

การที่สตาร์ซแต่ละชนิดมีปริมาณความเป็นผลึก (relative crystallinity) แตกต่างกัน เนื่องจากมีความแตกต่างของ 1) ขนาดของผลึก 2) การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ภายในส่วนโครงสร้างผลึก 3) ความยาวเฉลี่ยของอะไมโลเพกติน และ 4) อัตราส่วนโดยโมลของอะไมโลเพกตินสายสั้น (DP 10-13) (Gunaratne & Hoover, 2002)



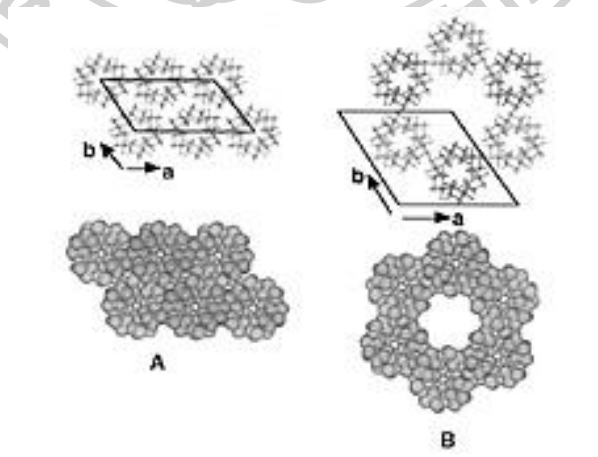
ภาพที่ 5 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกภายในเม็ดสตาร์ซแบบ A, B และ C  
ที่มา: (Hizukuri et al., 1996)





ภาพที่ 6 รูปแบบ X-ray diffraction ของผลึกภายในเม็ดสตาร์ชแบบ A, B และ V  
ที่มา: (Buléon et al., 1998)

ลักษณะผลึกภายในเม็ดสตาร์ชแบบ A และ B มีความแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ (double helixes) และปริมาณน้ำในโครงสร้าง โดยผลึกแบบ B มีการจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะเฮกซาโกนอลยูนิตเซลล์ (hexagonal unit cell) โดยมีช่องว่างขนาดใหญ่ตรงกลางซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ 36 โมเลกุลต่อยูนิตเซลล์ ในขณะที่ผลึกแบบ A การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะโมโนคลินิคยูนิตเซลล์ (monoclinic unit cell) ซึ่งมีสายเกลียวคู่ตรงกลางของโครงสร้างทำให้จับกับโมเลกุลของน้ำได้น้อยกว่า (Buléon et al., 1998; Gunaratne & Hoover, 2002) แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างแบบ A และแบบ B  
ที่มา: (Buléon et al., 1998)

## 2.2. สมบัติของสตาร์ช

### 2.2.1 ความชื้น

ปริมาณความชื้นของสตาร์ชจะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในสถานที่หรือบริเวณเก็บรักษาสตาร์ช ถ้าความชื้นในบรรยากาศลดลงสตาร์ชจะคลายความชื้นไปในบรรยากาศมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นสตาร์ชจะทำการดูดความชื้นจากบรรยากาศมากขึ้นด้วยเพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล อย่างไรก็ตามความชื้น ณ จุดสมดุล (equilibrium moisture) ของสตาร์ชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ภายใต้สภาพบรรยากาศปกติในสตาร์ชธรรมชาติจะมีความชื้นโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 10–20% ปริมาณความชื้น ณ จุดสมดุลของสตาร์ชทุกชนิดนั้นจะน้อยเมื่อบรรยากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ และที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นศูนย์ปริมาณความชื้นของสตาร์ชจะเข้าใกล้ศูนย์ด้วย

### 2.2.2 การพองตัวและการละลาย

น้ำที่อยู่ในเม็ดสตาร์ชมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ น้ำในผลึก น้ำที่ถูกยึดเกาะ (bound water) และน้ำในรูอิสระ (free water) โดยมีการจับกับสตาร์ชได้แน่นจากมากไปน้อยตามลำดับ สตาร์ชที่มีความชื้นร้อยละ 8-10 สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าสตาร์ชที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของสตาร์ชจะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [ $n(C_6H_{10}O_6 \cdot H_2O)$ ]

สตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กันโดยตรงหรืออาศัยน้ำเป็นตัวกลางเชื่อมต่อ แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสภาพที่มีน้ำ โมเลกุลของน้ำจะแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ช โดยเริ่มจากส่วนอสัณฐาน ทำให้เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงอุณหภูมิหนึ่งที่เป็นอุณหภูมิกว้าง (อุณหภูมิเจลาติไนซ์) จะเกิดการทำลายโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช ทำให้สูญเสียสมบัติการหักเหแสงโพลาไรซ์ไป โดยระหว่างที่เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่มีขนาดเล็กและอิสระภายในเม็ดสตาร์ชจะละลายออกมาอยู่ในส่วนสารละลาย เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่และแตกในที่สุดจะทำให้เกิดสภาพการละลายมากขึ้น (Hizukuri, 1985)

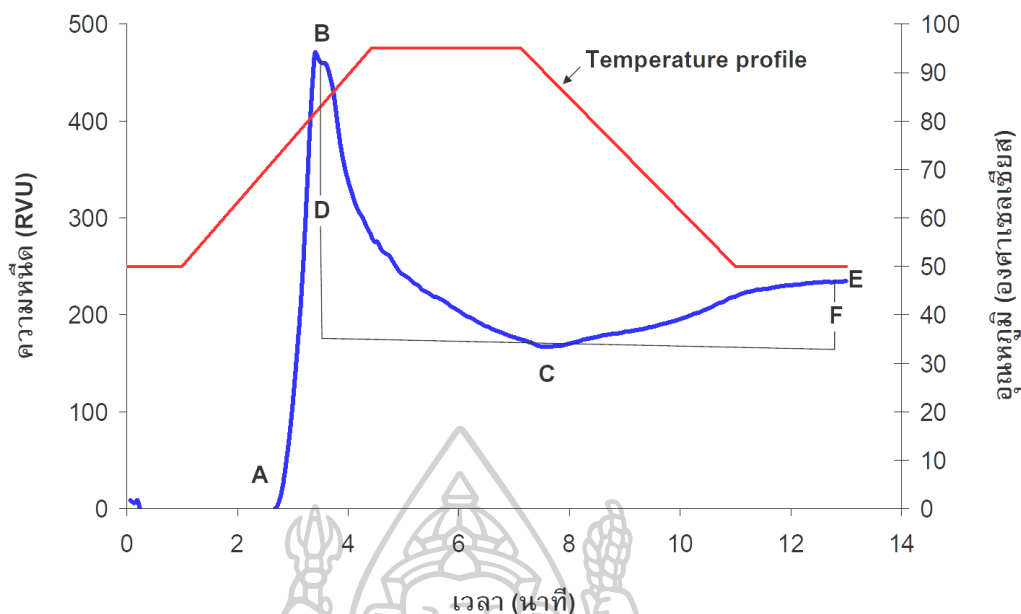
ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ช ได้แก่ 1) ชนิดของสตาร์ช สตาร์ชจากธัญพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ขั้นตอน ซึ่งแสดงถึงการจับกันระหว่างโมเลกุลหรือมีพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชุด คือพันธะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช ในขณะที่สตาร์ชจากส่วนหัวและรากของพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลายขั้นเดียว 2) จำนวนและชนิดของพันธะในระดับโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช โดยปัจจัยที่มีผลต่อ

จำนวนพันธะ ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ส่วนประกอบและการกระจายตัวของร่างแห ภายในเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของ โมเลกุล การจัดเรียงตัว และความยาวของสาขาในอะไมโลเพกติน เป็นต้น 3) องค์ประกอบในเม็ด สตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เช่น สตาร์ชข้าวโพดที่ ถูกสกัดไขมันออกจะมีการพองตัวอย่างอิสระและเป็นรูปแบบเดียวกันดีกว่าสตาร์ชข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันในธรรมชาติของสตาร์ชข้าวโพดจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช 4) ปริมาณน้ำ ที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว โดยในสภาวะที่มีปริมาณน้ำอยู่น้อยจะทำให้การพองตัวอย่างอิสระ ของเม็ดสตาร์ชและการละลายหรือการกระจายตัวของอะไมโลสออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชถูกยับยั้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

### 2.2.3 ความหนืด

ความหนืดของสตาร์ชสุก (paste) เมื่ออุณหภูมิของสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำสูงกว่าช่วงอุณหภูมิ เจลาทีไนเซชัน เม็ดสตาร์ชแต่ละเม็ดจะเกิดเจลาทีไนเซชันและพองตัวเต็มตัวอย่างอิสระ โมเลกุลของ สตาร์ชที่อมน้ำเต็มที่จะแยกตัวออกจากร่างแหของพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ช แล้วกระจายสู่ สารละลายรอบ ๆ เม็ดสตาร์ชที่พองตัวจะแตกได้ง่ายขึ้นหากมีการผสมที่รุนแรง ความหนืดของสตาร์ช สุกนอกจากจะเกิดขึ้น เนื่องจากสมบัติของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาภายใน ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชสายสั้นๆ ที่ละลายน้ำออกมากับส่วนของเม็ดสตาร์ชที่กระจายตัวอยู่ด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอด & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

การวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านกระแสวิทยา (rheological properties) ของสตาร์ชเป็น การวัดสมบัติทางด้านความหนืดในระหว่างการพองตัวและการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ช ซึ่ง สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brabender visco amylograph และเครื่อง rapid visco analyzer (RVA) โดยเครื่องจะระบุค่าอุณหภูมิในช่วงการเกิดเจลาทีไนเซชันต่าง ๆ ดังภาพที่ 8 ในช่วงเริ่มต้นของ การเพิ่มอุณหภูมิสารแขวนลอยสตาร์ชในน้ำจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเม็ดสตาร์ชเกิดการ พองตัวอย่างเต็มที่ให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นความหนืดจะลดลงเมื่อเม็ดสตาร์ชที่ พองตัวเกิดการแตกออกจากการกวนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดเม็ดสตาร์ชที่เกิดการแตกสลายจะ ส่งผลให้ความหนืดของสตาร์ชมีค่าลดลงจนถึงความหนืดต่ำสุด (through) และเมื่อสตาร์ชถูกทำให้ เย็นลง โมเลกุลสตาร์ชบางส่วนจะสามารถรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งเกิดเป็นเจล เรียกว่าการเกิด รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลอะไมโลสที่รวมตัวกัน โดยความสามารถใน การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชทราบได้จากค่า เซ็ทแบค (setback)



ภาพที่ 8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง rapid visco analyzer (RVA) โดย A = อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature), B = ความหนืดสูงสุด (peak viscosity), C = ความหนืดต่ำสุด (trough), D = ความหนืดลดลงหรือความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown), E = ผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback) และ F = ความหนืดสุดท้าย (final viscosity)

#### 2.2.4 การเกิดเจลาทีนเซชัน

เจลาทีนเซชัน (gelatinization) ของเม็ดสตาร์ช เกิดจากโมเลกุลน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชเป็นผลให้เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช กลไกการเกิดเจลาทีนเซชันมี 2 ขั้นตอน

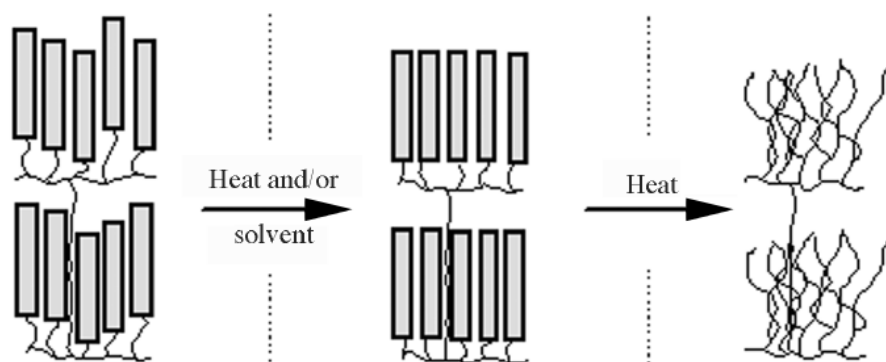
- 1) ขั้นตอนที่ 1 การกระจายของน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ช

เมื่อนำเม็ดสตาร์ชมากระจายตัวในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวแบบผันกลับได้ และยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างที่มีสมบัติไปรีพรีนเจนซ์ได้

- 2) ขั้นตอนที่ 2 การพองตัวและการหลอมเหลว

เมื่อนำสารแขวนลอยสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำมากพอ เช่น ความชื้นประมาณร้อยละ 70 มาให้ความร้อน ผลิตภัณฑ์เม็ดสตาร์ชที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โดยมีน้ำเข้าไปในช่องว่างของเม็ดสตาร์ชและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว ในระหว่างการให้ความ

ร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐาน ระบบจะดูดความร้อน (endothermic process) เพื่อให้บริเวณอสัณฐานเปลี่ยนสภาพจากของแข็งคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) เรียกว่าการเกิดกลาสทรานซิชัน (glass transition) โดยมีน้ำที่มีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติกไทเซอร์และความร้อน ทำให้ระบบมีความหนืดลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะดูดความร้อนครั้งที่สอง ทำให้บริเวณผลึกเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิหลอมเหลวนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงอันดับหนึ่ง (first-order transition) ในช่วงนี้เม็ดสตาร์ชจะแตกออก อะไมโลสซึ่งละลายน้ำได้จะออกจากเม็ดสตาร์ชเข้าสู่สารละลาย ส่วนอะไมโลเพกตินซึ่งจับกันแน่นจะเกิดเป็นเจล ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การเกิดเจลาทีไนเซชัน” และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “อุณหภูมิเจลาทีไนเซชัน” (gelatinization temperature) การเปลี่ยนแปลงภายในเม็ดสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลาทีไนเซชันแสดงในภาพที่ 9 โดยเม็ดสตาร์ชจะถูกทำลายจากผลของความร้อนและ/หรือตัวทำละลายบางชนิด ทำให้เกิดการคลายเกลียวของเกลียวคู่



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในการเกิดเจลาทีไนเซชัน

ที่มา : (Biliaderis et al., 1980)

การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาทีไนเซชัน นอกจากการสังเกตการเปลี่ยนสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดคุณลักษณะทางด้านความร้อนของสตาร์ช การเกิดเจลาทีไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นคุณลักษณะทางด้านความร้อนที่สำคัญของสตาร์ช ผลของ DSC จะสามารถวัดปริมาณการเกิดเจลาทีไนเซชัน (Biliaderis et al., 1980) และรีโทรเกรเดชันซึ่งสังเกตได้จากกราฟเอนโดเทอร์ม (endotherm) ที่ให้ผลค่าอุณหภูมิเริ่ม

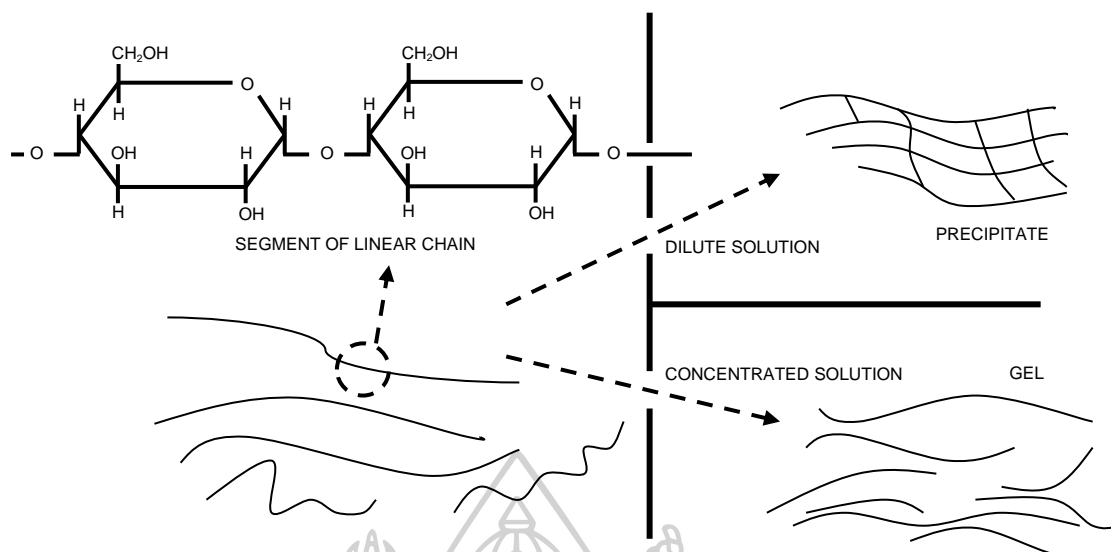


เปลี่ยนแปลง (onset temperature;  $T_0$ ) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature;  $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature;  $T_c$ ) และค่าเอนทาลปี ( $\Delta H$ )

### 2.2.5 การคืนตัวของสตาร์ช

ปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เกิดขึ้นหลังจากสตาร์ชเกิดเจลลาทีนเซชันแล้ว อุณหภูมิต่ำลง โมเลกุลอะไมโลสและสายโซ่ด้านนอกที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพกตินจะเกิดการจัดเรียงตัวกัน โดยโมเลกุลอะไมโลสซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถที่จะหมุนตัวเองให้ไปเรียงตัวในแนวขนานกับโมเลกุลอะไมโลสด้วยกันเอง หรือกับส่วนที่เป็นเส้นตรงในโมเลกุลอะไมโลเพกติน จนเข้าใกล้กันมากพอที่จะทำให้เกิดการยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือพันธะวาเลนซ์ขั้นที่สอง (secondary valence) (Wurzburg, 1986) อะไมโลสมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดรีโทรเกรเดชัน ในสตาร์ชสุกที่มีอะไมโลสในความเข้มข้นน้อยจะเกิดการเรียงตัวได้มาก จึงมีการรวมตัวกันขึ้นจนอาจเกิดการตกตะกอนได้ แต่ถ้ามีอะไมโลสในความเข้มข้นมากอาจเกิดการเรียงตัวเป็นบางส่วนของโมเลกุลอะไมโลสเนื่องจากการกีดขวางทางโครงสร้าง (steric hindrance) ทำให้ได้เจลซึ่งมีลักษณะเป็นร่างแหสามมิติขึ้นมา โดยมีพันธะไฮโดรเจนอยู่เฉพาะตรงส่วนที่โมเลกุลเข้าใกล้กัน (ภาพที่ 10) (Wurzburg, 1986) ส่วนอะไมโลเพกตินมีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อย โมเลกุลจะเข้าใกล้กันเพื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ยาก โดยทั่วไปสตาร์ชจากพืชหัวและรากจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ช้ากว่าสตาร์ชจากธัญพืช เนื่องจากสตาร์ชจากพืชหัวและรากเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว เม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลสตาร์ชทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำ โมเลกุลอะไมโลสจึงเกิดการรวมตัวกันใหม่ได้ยาก แต่สตาร์ชจากธัญพืชเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่เกิดการแยกตัวกันออกยังอยู่ใกล้ชิดกันทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ได้ง่ายกว่า ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างการพองตัวของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กันหรือระหว่างชั้นส่วนของโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายซึ่งจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้

การคืนตัวของสตาร์ชสุกและสารละลายสตาร์ชทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายน้ำในสตาร์ชสุก เกิดการตกตะกอนของอนุภาคสตาร์ชที่ไม่ละลายทำให้เกิดเจล และน้ำถูกบีบออกมาจนเจลได้ในการคืนตัวของสตาร์ชถ้าเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่นดังภาพที่ 10 ซึ่งแสดงกลไกการคืนตัวของสตาร์ช



ภาพที่ 10 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส

ที่มา: (Wurzburg, 1986)

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของสตาร์ชสูง สตาร์ชสามารถคืนตัวได้ดีในช่วง pH 5-7 ซึ่งสตาร์ชสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้สตาร์ชจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของสตาร์ชอาจจะใช้เกลือของ monovalent anion และ cation calcium nitrate และ urea (Swinkels, 1985)

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ DP ของอะไมโลสเท่ากับ 100-200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100-160 องศาเซลเซียส ส่วนอะไมโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน การรวมตัวกันของเกลียวคู่ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นส่วนผลึกของสตาร์ช การเกิดรีโทรเกรเดชันจะสัมพันธ์กับการสูญเสียโครงสร้างของอะไมโลส การเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอะไมโลส และการรวมตัวกันของชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของอะไมโลส การเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลสจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 1 วัน) (Zhou et al., 2002) ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลเพกตินจะมีอัตราการเกิดได้ช้า

กว่าอะไมโลส ซึ่งอาจใช้เวลาหลายสัปดาห์ (Zhou et al., 2002) เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากทำให้เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้

### 2.3 การตัดแปรรสตาซ์ด้วยความร้อนขึ้น

สตาซ์ตัดแปรรสตาซ์สำหรับอุตสาหกรรมอาหารตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาซ์ เช่น สตาซ์มันสำปะหลัง สตาซ์ข้าวโพด สตาซ์มันฝรั่ง สตาซ์ข้าวสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์ จากเดิม ด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ

การตัดแปรรสตาซ์มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขจุดด้อยที่ทำให้สตาซ์ธรรมชาติไม่เหมาะสมกับชนิดอาหารและกระบวนการแปรรูป เช่น ต้องใช้ความร้อนสูงและเวลานานในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน สูญเสียความหนืดได้ง่าย ไม่ทนต่อ กรด ความร้อน และแรงเฉือนจากการกวน ให้ความหนืดมากเกินไปสำหรับผลิตภัณฑ์บางอย่าง ไม่สามารถให้เนื้อสัมผัสได้ตามต้องการ ไม่คงตัวต่ออุณหภูมิต่ำและการละลายหลังการแช่เยือกแข็ง ไม่มีหมู่ทางหน้าที่ที่ซับซ้อน เป็นต้น การตัดแปรรสตาซ์ด้วยวิธีการเฉพาะที่เหมาะสมจะช่วยแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ได้ (Light, 1990) โดยการนำสตาซ์ไปผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ได้สตาซ์ตัดแปรรที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2 และ 3 อย่างไรก็ตามปัจจุบันผู้บริโภคตระหนักถึงความสำคัญของความปลอดภัยในอาหารจึงพยายามหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีในอาหารหรือวัตถุดิบอาหาร การตัดแปรรสตาซ์ทางฟิสิกส์หรือทางกายภาพด้วยความร้อนร่วมกับความชื้นโดยไม่มีการใช้สารเคมีจึงเป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจ การตัดแปรรโดยวิธีความร้อนขึ้น (heat-moisture treatment; HMT) นั้นเป็นวิธีการตัดแปรรทางกายภาพที่จัดอยู่ในกลุ่ม hydrothermal treatment

มีผู้ให้คำจำกัดความของการตัดแปรรด้วยความร้อนขึ้นไว้ว่าเป็นการตัดแปรรสตาซ์โดยให้ความชื้นในระดับต่ำ (น้อยกว่า 35% w/w) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเป็นกลาสแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาซ์ โดยมีระยะเวลาการตัดแปรรที่แน่นอน (Gunaratne & Hoover, 2002) โดยทั่วไปความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแปรรด้วยความร้อนขึ้นคือ ร้อยละ 10-30, 100-120 องศาเซลเซียส และ 0.5-16 ชั่วโมง ตามลำดับ การให้ความร้อนขึ้นคือการตัดแปรรสตาซ์ในสถานะที่มีปริมาณน้ำจำกัด แต่มีการให้ความร้อนในระดับที่สูง

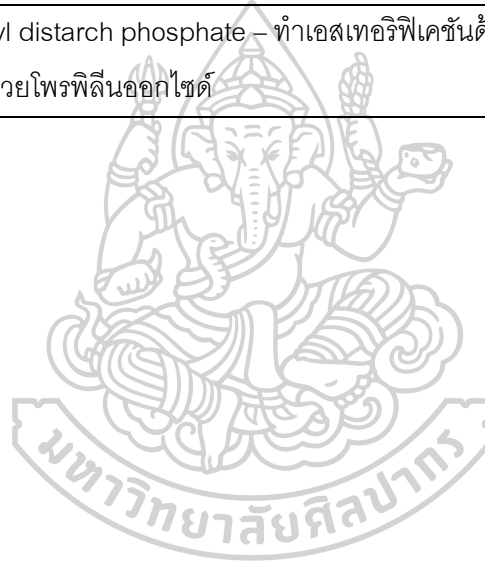


ตารางที่ 2 วิธีการเตรียมสตาร์ชตัดแปรชนิดต่างๆ

การตัดแปร	ชนิดการตัดแปร	การเตรียม
ทางกายภาพ	การให้ความร้อนขึ้น	ให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเกิดเจลลาทีโนเซชันโดยมีความชื้นที่จำกัด
	พรีเจลลาทีโนเซชัน	เตรียมเจลกึ่งสำเร็จรูป/และพองตัวโดยใช้น้ำเย็น โดยใช้วิธี/ Drum Drying/ การสเปรย์และการเอ็กซ์ทรูชันโดยมีตัวทำละลายในกระบวนการ
Conversion	การย่อยด้วยกรด	ใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก หรือกรดซัลฟิวริก
	การย่อยด้วยเอนไซม์	ทำในสารละลายของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเกิดเจลลาทีโนเซชันด้วย amylolytic enzyme
	การใช้ต่าง	ใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
	ออกซิเดชัน การฟอกขาว/	ใช้กรดเปอร์อะซิติก และหรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ โซเดียมคลอไรต์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ / โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต
Derivatization	อีเทอร์ิฟิเคชัน	สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล - ทำอีเทอร์ิฟิเคชันด้วยโพรพิลีนออกไซด์
	เอสเทอร์ิฟิเคชัน	สตาร์ชอะซิเตท - ทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์หรือไวนิลอะซิเตท
		Acetylated distarch adipate - ทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์และอะดีปิกแอนไฮไดรด์
	สตาร์ชไซโตเดียมออกทีนิลซัคซิเนท - ทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยออกทีนิลซัคซิเนทแอนไฮไดรด์	
การเชื่อมข้าม		โมโนสตาร์ชฟอสเฟต - ทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยกรดอะซิติกไฮดรอกซีโพรพิล ไฮโดรเจนหรือโพแทสเซียมอะซิโตนฟอสเฟต หรือ ไฮโดรเจนไตรฟอสเฟต
		ไดสตาร์ชฟอสเฟต - ทำเอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยไฮโดรเจนไตรเมตาฟอสเฟตหรือฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์
		Phosphated distarch phosphate - ทำการเชื่อมข้ามระหว่างโมโนสตาร์ชฟอสเฟตและไดสตาร์ชฟอสเฟต

การดัดแปร	ชนิดการดัดแปร	การเตรียม
การดัดแปรร่วม		Acetylated distarch phosphate – ทำเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตหรือฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ร่วมกับทำเอสเทอร์ฟิเคชันโดยอะซีติกแอนไฮไดรด์หรือวินิลอะซีเตท
		Hydroxypropyl distarch phosphate – ทำเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต หรือฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ร่วมกับอีเทอร์ฟิเคชันด้วยโพรพิลีนออกไซด์

ที่มา: (Singh et al., 2007)



ตารางที่ 3 คุณสมบัติและประโยชน์ของสตาร์ชดัดแปร

การดัดแปร	สมบัติ	ประโยชน์
พรีเจลาทีไนเซชัน	สามารถกระจายตัวได้ในน้ำเย็น	ใช้ในอาหารสำเร็จรูป
การย่อยด้วยกรดหรือเอนไซม์	ลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ยับยั้งและลดความหนืด เพิ่มการเกิดรีโทรเกรดชันและแชตแบค	ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน
การออกซิเดชัน/การฟอกขาว	ความหนืดต่ำ ความใสสูงและมีความคงตัวต่ออุณหภูมิต่ำ	ใช้กับเบตเทอร์และขนมปังสำหรับการเคลือบอาหาร ใช้เป็นตัวจับและตัวก่อฟิล์มในขนมหวาน เป็นตัวสร้างเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์นม
ไพโรคอนเวอร์ชัน (เด็กซ์ทรีไนเซชัน)	มีการละลายสูงต่ำ ขึ้นอยู่กับการดัดแปร ความหนืดต่ำ มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงสูง	ใช้เป็นวัตถุเคลือบในอาหารหลายประเภท มีความสามารถในการเกิดฟิล์มได้ดี และใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ขนมอบและนม
อีเทอร์ิฟิเคชัน	เพิ่มความใสของสตาร์ช ให้ความหนืด ลดการเกิดซีเนอริซิสและเพิ่มความคงตัวต่อการแช่แข็งละลายของผลิตภัณฑ์	ใช้กับอาหารหลากหลาย เช่น น้ำเกรวี่ น้ำจิ้ม ซอส ใ้พายผลไม้และพุดดิ้ง
เอสเทอร์ิฟิเคชัน	มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนเซชันและรีโทรเกรดชันต่ำ ความคงตัวในการเกิดเจลาต้า ความใสสูง	ใช้ในอาหารแช่เย็นและแช่เยือกแข็ง เช่นเป็นตัวสร้างความคงตัวของอิมัลชันและใช้สำหรับการทำเอนแคปซูลเลชัน
การเชื่อมข้าม	ความคงตัวของเม็ดสตาร์ชสูงเมื่อพองตัว ทนต่ออุณหภูมิ แรงเฉือนและสภาวะกรดสูงได้	ใช้เป็นสารให้ความหนืดและให้เนื้อสัมผัสในซूप ซอส น้ำเกรวี่ ขนมอบและผลิตภัณฑ์นม
การดัดแปรร่วม	มีความคงตัวต่อการกรด อุณหภูมิและการลดขนาดด้วยแรงกล ยืดระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรดชันในระหว่างการเก็บรักษา	ใช้ในอาหารกระป๋อง อาหารแช่เย็นและแช่เยือกแข็ง น้ำสลัด พุดดิ้งและน้ำเกรวี่

ที่มา: (Singh et al., 2007)

## 2.4 ผลของการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อสมบัติของสตาร์ช

### 2.4.1 ผลต่อลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ช

จากการตัดแปรสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ความชื้นสตาร์ชร้อยละ 30 แล้วนำสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรไปทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการให้ความร้อนขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช (Hoover & Manuel, 1996) เช่นเดียวกับการทดลองของเม็ดสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่า การตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยสตาร์ชทั้งสองชนิดยังคงรูปร่างที่สมบูรณ์เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ สตาร์ชไม่เกิดรอยแตกร้าหรือผิดรูปไปจากเดิม (Kulp & Lorenz, 1981)

สตาร์ชข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ถั่วแขก มันเทศ และมันฝรั่งผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยให้ความชื้นร้อยละ 10-30 หลังการตัดแปรไม่พบการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเช่นกัน แต่ในสตาร์ชข้าวโอ๊ตบางส่วนพบการเกาะเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดสตาร์ชหลังให้ความร้อนขึ้น (Hoover & Vasanthan, 1994) ผลของการศึกษาการตัดแปรด้วยวิธีให้ความร้อนขึ้นแก่สตาร์ชนิวโคโคแยม (new cocoyam) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยทำการแปรผันความชื้นของสตาร์ชร้อยละ 18-27 พบว่าการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเม็ดสตาร์ช (Lawal, 2005)

เมื่อนำตัดแปรสตาร์ชทุเรียน สตาร์ชเผือก สตาร์ชนิวโคโคแยม สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่ง (สตาร์ชจากพืชหัวและราก) ไปทำการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 30 พบว่าการตัดแปรสตาร์ชไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช โดยที่ผิวของเม็ดสตาร์ชทุกชนิดมีความเรียบและไม่ถูกทำลาย (Gunaratne & Hoover, 2002)

จากการตัดแปรสตาร์ชถั่วที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยเม็ดสตาร์ชถั่วยังคงรูปร่างทรงกลมและทรงรีที่มีขนาดแตกต่างกันไป

## 2.4.2 ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก

แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยปรับความชื้นของแป้งเป็นร้อยละ 25 พบว่าแป้งทั้งสองชนิดยังคงรูปแบบผลึกแบบ A แต่มีความหนาแน่นของผลึกและความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากโครงสร้างอะไมโลเพกตินถูกทำให้แตกสลายไปด้วยความร้อนในระหว่างการตัดแปร ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของอะไมโลเพกตินมีจำนวนลดลง และเกิดโมเลกุลขนาดเล็กของอะไมโลเพกตินเพิ่มขึ้น โดยส่วนอะไมโลเพกตินที่ถูกทำให้แตกสลายนั้นเป็นสายโซ่ตรงด้านนอก หรือสาย A ของโครงสร้าง (พิณทิพย์ รัมภากาภรณ์, 2547)

เมื่อสตาร์ชจากพืชหัวและราก ได้แก่ สตาร์ชมันฝรั่ง มันเทศ (มีโครงสร้างผลึกโดยธรรมชาติเป็นแบบ B) นิวกโคแยม เผือก และมันสำปะหลัง (มีโครงสร้างผลึกโดยธรรมชาติเป็นแบบ A) ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่ความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ พบว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ได้แก่ สตาร์ชมันฝรั่ง และมันเทศ จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B ผสมกับแบบ A ( $B + A$ ) และค่าร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (% relative crystallinity) ลดลง ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการเกิดดีไฮเดรชัน คือ มีการระเหยของน้ำในช่องตรงกลางของโครงสร้างผลึกแบบ B ออกไป (ปกติผลึกแบบ B จะจับน้ำได้ 36 โมเลกุล) จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่ไปที่บริเวณส่วนกลางของโครงสร้างแทนที่โมเลกุลของน้ำนั้นในระหว่างการให้ความร้อนขึ้น และส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ช และ/หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกใหม่ ส่วนสตาร์ชนิวกโคแยม เผือก และมันสำปะหลังที่มีโครงสร้างผลึกโดยธรรมชาติเป็นแบบ A หลังผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะโครงสร้างผลึกและร้อยละความเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Gunaratne & Hoover, 2002)

จากการตัดแปรสตาร์ชนิวกโคแยมที่ด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าการตัดแปรสตาร์ชไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกในสตาร์ชนิวกโคแยม โดยสตาร์ชยังคงรูปแบบผลึกแบบ A (Lawal, 2005)

จากการตัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 90-130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความชื้นร้อยละ 17-26 พบว่าหลังการตัดแปรลักษณะผลึกมีการเปลี่ยนจากแบบ B เป็นแบบ B+A และเมื่อมีการให้ความร้อนในระดับสูงที่สุด คือ 130 องศาเซลเซียส ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนมาเป็นชนิด A ทั้งหมด เนื่องจากการให้ความร้อนที่สูงจะทำให้เกิดการตัดแบ่งโมเลกุลอะไมโลเพกตินสายหลัก ซึ่งเกิดจากพันธะโควาเลนต์ในสายเกลียวคู่อะไมโลเพกตินถูกทำให้แตกสลายลงด้วยความร้อน

ทำให้มีจำนวนอะไมโลเพกตินมากพอที่จะเกิดการสร้างโครงสร้างผลึกใหม่ที่สมบูรณ์และ/หรือมีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้น (Vermeylen et al., 2006)

#### 2.4.3 ผลต่อการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ช

เมื่อนำแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 90, 105 และแป้งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 60 มาผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 105 และ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 และ 60 นาที โดยมีการปรับความชื้นให้เป็นร้อยละ 20 และ 25 พบว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวทั้งสองชนิดมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น การลดลงของกำลังการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 เกิดจากการคลายเกลียวของเกลียวคู่ในส่วนโครงสร้างผลึก ส่วนในแป้งข้าวเจ้าอาจเป็นผลมาจากการคลายเกลียวคู่ในส่วนโครงสร้างผลึกและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด (พิณทิพย์ รัชมกการณ, 2547)

จากการตรวจสอบสตาร์ชถั่วและสตาร์ชโกโก้แยมที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยปรับความชื้นของสตาร์ชให้เป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชโกโก้แยมมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะเพิ่มความเป็นผลึกและการเปลี่ยนแปลงของแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุล ก่อให้เกิดการจับตัวกันของเกลียวคู่ของสายอะไมโลเพกติน ทำให้จำกัดการพองตัวและการละลาย และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด (Adebowale & Lawal, 2003) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยตู้อบลมร้อนที่สภาวะเดียวกัน โดยพบว่าค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชทั้งสองชนิดลดลงตามสภาวะของการดัดแปรที่สูงขึ้น และพบว่าค่าการละลายของสตาร์ชข้าวสาลีที่เพิ่มขึ้นตามสภาวะการดัดแปรส่วนค่าการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าลดลงตามสภาวะการดัดแปรที่สูงขึ้น (Kulp & Lorenz, 1981)

การพองตัวและการละลายที่มีค่าลดลงหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นในพบสตาร์ชประเภทหัวและราก ได้แก่ สตาร์ชมันฝรั่ง เผือก มันเทศ และมันสำปะหลัง โดยการละลายที่ลดลงหลังการดัดแปรเกิดจากการสร้างพันธะใหม่ขึ้นระหว่าง 1) อะไมโลสกับอะไมโลส 2) อะไมโลสกับอะไมโลเพกติน และ 3) อะไมโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ในระหว่างการให้ความร้อนและความชื้นขณะทำการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นส่งผลให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นส่วนที่สามารถจับกับน้ำได้มีจำนวนลดลง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการละลายจะมีผลต่อการพองตัวด้วยเช่นกัน (Gunaratne & Hoover, 2002) สอดคล้องกับผลการศึกษาของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นของสตาร์ชขนุน (Lawal, 2005) การพองตัวของสตาร์ชที่ลดลงหลังผ่านการดัดแปรด้วย



วิธีการให้ความร้อนขึ้นได้ถูกอธิบายไว้ว่า แรงในส่วนของการยืดสายเกลียวคู่ไว้ด้วยกันนั้นเป็นแรงหลัก ที่ให้ความแข็งแรงในส่วนโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชและทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถคงรูปไว้ได้ การให้ความร้อนและความชื้นในกระบวนการการตัดแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นจะไปทำลายพันธะดังกล่าว ทำให้เกิดการคลายตัวของสายเกลียวทั้งที่อยู่ในลักษณะของสายอิสระและที่อยู่ร่วมกับโครงสร้างส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชลดลงได้เช่นกัน (Cooke & Gidley, 1992)

#### 2.4.4 ผลต่อสมบัติด้านความหนืด

เมื่อสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวผ่านการตัดแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นได้ส่งผลให้สตาร์ชข้าวมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง rapid visco analyzer โดยสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปจะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) เซ็ทเบค และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) มีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาวะการตัดแปรรูปที่สูงขึ้น (พิณทิพย์ รัมภาภรณ์, 2547)

สตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเพิ่มขึ้นตามสภาวะการตัดแปรรูปที่สูงขึ้น และมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกสภาวะในการตัดแปรรูป ยกเว้นการตัดแปรรูปที่ระดับความชื้นร้อยละ 24 และ 27 จะมีค่าความหนืดสูงสุดที่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการตัดแปรรูปทำให้สตาร์ชมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นและมีการจัดเรียงตัวใหม่ภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและภายในเม็ดสตาร์ชที่แข็งแรง (Adebowale & Lawal, 2003) นอกจากนี้สตาร์ชยังมีค่าเซ็ทเบคที่ลดลง โดยค่าเซ็ทเบคเป็นค่าที่ใช้บอกอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ส่วนค่าความหนืดต่ำสุดเป็นค่าที่วัดความอ่อนแอของสตาร์ชเมื่อสตาร์ชเกิดการพองตัวและถูกทำให้แตกออก โดยการตัดแปรรูปสตาร์ชส่งผลให้สตาร์ชที่เกิดการพองตัวทนต่อแรงเฉือนและความร้อนมากยิ่งขึ้น

เมื่อสตาร์ชมันเทศที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันผ่านการให้ความร้อนขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุด อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าเบรกดาวนและความหนืดขณะร้อนมีค่าลดลง แต่มีค่าความหนืดขณะเย็นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาของการตัดแปรรูปนานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะร้อน ความหนืดขณะเย็นมีค่าลดลง ส่วนในกรณีของสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงขึ้นไป เมื่อทำการให้ความร้อนเป็นเวลา 4-16 ชั่วโมงจะไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดสูงสุดและค่าเบรกดาวนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำจำกัดหรือน้ำน้อยกว่าร้อยละ 30 โดยทั่วไปจะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลง และมีค่าความหนืดขณะเย็นเพิ่มมากขึ้น การให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่อุณหภูมิสูงกว่าการเกิดการเจลลาทีไนเซชัน (มากกว่า 120 องศาเซลเซียส)

จะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเสียสภาพเกิดการแตกตัวและความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว (Collado & Corke, 1999) สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นโดยไม่โครเวฟเป็นเวลา 60 นาที ปรับความชื้นเป็น 20% พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้านความหนืด โดยสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าความหนืดต่ำสุดเพิ่มขึ้น ในขณะที่สตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าความหนืดต่ำสุดลดลง (Anderson & Guraya, 2006)

#### 2.4.5 ผลต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ช

เมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าการดัดแปรสตาร์ชส่งผลให้ค่าอุณหภูมิจุดเริ่มต้น (onset temperature;  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature;  $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (conclusion temperature;  $T_c$ ) ช่วงกว้างในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ( $T_c - T_o$ ) และค่าเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) ของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยค่า  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  และ  $(T_c - T_o)$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่ใช้ในการดัดแปร และเอนทาลปีมีค่าลดลง (Adebowale & Lawal, 2003) เกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิปิด ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ในส่วนอสัณฐานลดลง ทำให้ค่า  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  และ  $(T_c - T_o)$  มีค่าสูงขึ้น และอาจเกิดจากการดัดแปรส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลสซึ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ภายในส่วนอสัณฐาน จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ส่วนอสัณฐานเกิดการพองตัวและเกิดการทำลายโครงสร้างผลึกได้ (Hoover & Manuel, 1996)

เมื่อสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 100 และ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 นาที พบว่าภายหลังการดัดแปรสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเกิดเจลที่เพิ่มขึ้นในสตาร์ชทั้งสองชนิด และค่าเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าลดลง ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงของเอนโดเทอร์มโดยพบว่าพีคหายไปภายหลังจากการดัดแปรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการให้ความร้อน 20 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึกของสตาร์ชข้าวเหนียวแตกสลายได้โดยง่ายเมื่อถูกดัดแปร และการดัดแปรที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนแปลงเอนโดเทอร์มของสตาร์ชทั้งสองชนิดซึ่งมีพีคที่หายไป (Lu. et al., 1996) อันเป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการเสื่อมสลายในส่วนอะไมโลเพกตินโดยโมเลกุลใหญ่ๆ มีจำนวนลดลงและมีโมเลกุลเล็ก ๆ เพิ่มมากขึ้น การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นยังส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของโครงสร้างทางโมเลกุลของสตาร์ช (Kulp & Lorenz, 1981) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยมีการปรับความชื้นเป็นร้อยละ 25 แล้วพบว่า



สตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่า  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  และ  $(T_c - T_o)$  ที่สูงขึ้น ในขณะที่เอนทัลปีมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างอะไมโลเพกตินของแป้งข้าวถูกทำให้แตกออกด้วยความร้อน ซึ่งเห็นได้จากการที่ระดับความเป็นผลึกลดลงเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่เหลืออยู่หรืออาจเปลี่ยนแปลงไปนี้มีความคงทนต่อความร้อนได้มากกว่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งข้าวที่ผ่านการดัดแปรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (พิณทิพย์ รัมภากาภรณ์, 2547)

เมื่อสตาร์ชจากพืชหัวและรากผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 30 พบว่าสตาร์ชมีค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  เพิ่มขึ้น ส่วนเอนทัลปีมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเกลียวคู่ทั้งในส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นผลึกของสตาร์ชถูกทำลายภายหลังการดัดแปร (Gunaratne & Hoover, 2002)

จากการดัดแปรสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่งที่ด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง โดยมีการปรับความชื้นของสตาร์ชเป็นร้อยละ 18, 21, 24 และ 27 พบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดมีค่าอุณหภูมิที่เจลลาทีโนเซชันเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าพลังงานเอนทัลปีลดลงภายหลังการดัดแปร โดยสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าพลังงานเอนทัลปีที่ลดลงมากกว่าสตาร์ชข้าวสาลี เนื่องจากผลของการดัดแปรทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลในส่วนอสัณฐานทำให้เกิดโครงสร้างผลึกใหม่หรือเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกเดิม และเกิดโครงสร้างผลึกขนาดเล็กที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม (Stephen, 1995) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ ค่า  $T_o$ ,  $T_p$  และ  $T_c$  ที่สูงขึ้นภายหลังการดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด และค่าพลังงานเอนทัลปีมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการดัดแปรทำให้ส่วนผลึกของสตาร์ชเกิดการเสื่อมสลายโดยส่วนผลึกที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์จะเกิดการเสื่อมสลายได้โดยง่าย โมเลกุลของอะไมโลเพกตินที่เหลือจึงกลายเป็นโครงสร้างผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันสูงขึ้น และการเกิดเอนโดเทอร์มใหม่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากการดัดแปรสตาร์ชทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนอสัณฐานที่อยู่ในโครงสร้างส่วนผลึก (intercrystalline amorphous region) เปลี่ยนมาเป็นในส่วนของอสัณฐานแทน ซึ่งอาจทำให้สายโซ่สั้นๆ ในโครงสร้างส่วนผลึกมีความเป็นอิสระมากขึ้นและเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่ สตาร์ชจึงมีความคงทนต่อพลังงานความร้อนมากกว่าเดิม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลเพกตินสายสั้นๆ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนและความชื้นในการดัดแปร ทำให้สตาร์ชมีความคงตัวต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น (Lim et al., 2001)

## 2.5 การนำสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นไปใช้ประโยชน์

สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นจะมีความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลาย (freeze-thaw) ที่ดี เมื่อนำไปใช้เป็นส่วนของไส้พายพบว่าทำให้ได้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสและการยอมรับที่ดีจากผู้บริโภค (Abraham, 1993)

สตาร์ชมันเทศที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจะให้เนื้อสัมผัสเจลที่มีค่าความแข็ง (hardness) และการเกาะติดพื้นผิว (adhesiveness) เพิ่มขึ้น และสตาร์ชสุก (paste) มีความคงตัวต่อแรงเฉือนมากขึ้น (Collado & Corke, 1999)

เมื่อศึกษาผลของสตาร์ชข้าวโพดอะไมโลสสูงที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติของโดและขนมปัง พบว่าการทดแทนสตาร์ชตัดแปรที่ร้อยละ 20 จะช่วยเพิ่มสมบัติในการดูดซึมน้ำและความคงตัวในการผสมของโด แต่จะทำให้ความยืดหยุ่นของโดลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชปกติ และปริมาตรของขนมปังที่มีส่วนผสมของสตาร์ชตัดแปรจะลดลงมากกว่าสตาร์ชปกติ แต่เมื่อมีการใช้สตาร์ชตัดแปรร่วมกับเนยขาว (shortening) จะช่วยให้สตาร์ชตัดแปรมีปริมาตรขนมปังมากกว่าเดิม และบริเวณขอบของขนมปังจะมีคุณภาพดีขึ้น (Miyazaki & Morita, 2005) ในกรณีของการตัดแปรสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าการให้ความร้อนขึ้นจะช่วยพัฒนาคุณภาพของขนมปังและขนมอบ โดยขนมปังและขนมอบจะมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น เนื้อผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่แน่นแข็งลดลง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากสตาร์ชข้าวสาลีจะมีคุณภาพลดลง (Kulp & Lorenz, 1981)

เมื่อศึกษาผลของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นและการแช่सानเนื้อ (annealing) ต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่มีระยะเวลาในการทำให้อุสุก และค่าความเหนียวลดลง (Hormdok & Noomhorm, 2007)

แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยรังสีไมโครเวฟสามารถนำไปใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็ง โดยมีการใช้แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรเป็นส่วนผสมในเส้นก๋วยเตี๋ยวเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวต่อการคืนรูปสภาพจากเยือกแข็งได้ดียิ่งขึ้น แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยรังสีไมโครเวฟจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลที่ในเซชันและค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรแทนแป้งข้าวเจ้าในสูตรน้ำแป้งจะทำให้สมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปสภาพจากสภาพเยือกแข็งของเส้นก๋วยเตี๋ยวดีขึ้นเมื่อนำเส้นที่ปรับปรุงมาผลิตเป็นผัดไทยแช่เยือกแข็ง พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวมีเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จากการศึกษาการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวพาสเจอร์ไรซ์โดยการใช้แป้งตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นและวิธีการใช้รังสียูวี ทดแทนแป้งข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่าการตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นทำให้แป้งตัดแปรมีอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลที่ในเซชันสูงขึ้น แต่มีค่ากำลังการพองตัวและค่าความหนืดสูงสุดลดลงส่วนแป้งตัดแปรโดยการปรับความชื้นของแป้งและฉายรังสียูวี พบว่าแป้งมีค่ากำลังการพองตัวและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลที่ในเซชันไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง โดยการตัดแปรแป้งทั้งสองวิธีนี้ทำให้แป้งมีสีคล้ำขึ้น การทดแทนด้วยแป้งตัดแปรที่ผ่านการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวพาสเจอร์ไรซ์มีค่าแรงตึงสูงกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ไม่ผสมแป้งตัดแปร ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผสมแป้งตัดแปรด้วยรังสียูวีนั้น

เมื่อพาสเจอร์ไรซ์แล้วมีค่าแรงตัดไม้แตกต่างจากเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งปกติ (โอโนซา สุขสมบูรณ์ et al., 2547)

เมื่อนำสตาร์ช 9 ชนิดมาตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ปรับความชื้นเป็นร้อยละ 20 ในหม้อนึ่งไอน้ำ จากนั้นทำให้แห้งแล้วนำไปเป็นส่วนผสมสำหรับทำสตาร์ชทอดห่อปุระเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร พบว่า สตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร มี water evaporation และ breaking strength แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสตาร์ช สตาร์ชที่มาจากธัญพืชเมื่อใช้เป็นส่วนผสมของสตาร์ชชุบทอดห่อปุระได้ให้เนื้อสัมผัสที่กรอบกว่าสตาร์ชที่มาจากพืชหัวหรือรากซึ่งให้ลักษณะที่แฉะมากกว่า และเมื่อใช้สตาร์ชตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นแทนสตาร์ชไม่ตัดแปร พบว่าสตาร์ชชุบทอดมีความกรอบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในสตาร์ชที่มาจากพืชหัวหรือรากจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (Matsunaga et al., 2003)

## 2.6 การคั่ว

การคั่วเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับอาหารแห้งโดยไม่ใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นตัวกลาง อาหารจะถูกคนไปเรื่อยๆ มีการกวน พลิกกลับอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ความร้อนส่งผ่านไปยังอาหารอย่างทั่วถึง อาหารที่ผ่านการคั่วจะมีความชื้นต่ำ เกิดกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์และเกิดสีน้ำตาลจากความร้อน เช่น การคั่วงา การคั่วข้าว การคั่วพริก เป็นต้น

การคั่วสตาร์ชหรือแป้งเป็นวิธีการดั้งเดิมที่มีมานานในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำขนมผิง ขนมโก๋ ขนมสัมปันนี โดยก่อนผลิตจะนำสตาร์ชหรือแป้งมาคั่วจนสุกได้ที่ซึ่งสังเกตจากสตาร์ชหรือแป้งจะไม่ติดกระทะ การคั่วจัดเป็นการวิธีการตัดแปรสตาร์ชทางกายภาพที่ต้นทุนต่ำและรวดเร็ว

การตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการคั่วจะมีลักษณะการตัดแปรคล้ายกับการใช้ความร้อนขึ้น (heat-moisture treatment) เนื่องจากเป็นการใช้ความร้อนสูงที่สภาพความชื้นต่ำเหมือนกัน แต่จะต่างกันตรงส่วนที่การคั่วมักทำในภาชนะเปิดซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำจากการระเหยระหว่างการคั่ว ขนมที่นิยมนำสตาร์ชมันสำปะหลังมาคั่วก่อนการผลิต ได้แก่ ขนมผิง ขั้นตอนการผลิตขนมผิงเริ่มจากการเอาสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วสุกมาผสมกับหัวกะทิและน้ำตาลจนเหนียว แล้วปั้นเป็นก้อนกลม นำมาผิงกับไฟหรือย่างไฟ แต่ปัจจุบันตัดแปรลงมาอบในเตาอบ ขนมผิงจะมีลักษณะก้อนกลม โปร่งเบา มีรูพรุน เมื่อรับประทานจะมีความกรอบละลายในปากได้ มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีรสชาติหวานและความรู้สึกเป็นผงภายในปาก

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบ

##### 3.1.1 วัตถุดิบในการตัดแปรรสตา์ชด้วยวิธีการคั่ว

สตาร์ชมันสำปะหลัง (tapioca starch) จากบริษัท อุตสาหกรรมสตาร์ชไทย จำกัด สตาร์ชมีความชื้นร้อยละ 9.6

##### 3.1.2 วัตถุดิบในการทำขนมผิง

- 1) สตาร์ชมันสำปะหลัง ตามหัวข้อ 3.1.1
- 2) หัวกะทิยูเอชทีที่บรรจุกล่อง (ตราขาวเกาะ)
- 3) น้ำตาลทรายขาว (ตราวังขนาย)
- 4) ไข่แดงของไข่ไก่ (ตราเทสโก้โลตัส ขนาด XL)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (WTB Binder, R3-controller series, Germany)
- อ่างน้ำไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Stuart Scientific, SBS 30, USA)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก (Sartorius, BP 3100S, Germany)
- เครื่องวัดความหนืดสตาร์ช (rapid visco analyzer, RVA) (Newport Scientific, Model RVA-4, Australia)
- เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) (Perkin Elmer 8000, USA)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (Jeol, JSM-5410, Japan)
- เครื่อง X-ray diffractometer (DESKTOP X-ray diffractometer, MiniflexII, Rigaku, Japan)
- เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) (Stable Micro System, TA-XT 2I England)
- เครื่องวัดสี (colorimeter) (Color-view™ Spectrophotometer, Model 9000, USA)

- เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (Hettich Zentrifugen, Universal 16/16R, Germany)
- เครื่องกวน (stirring motor) (IKA, RW 20 digital, Thailand)
- แท่นให้ความร้อน (hot plate) (Scilogex, MS7-H550-S LED Digital, Germany)
- หม้อสแตนเลสขนาด 22 เซนติเมตร (ตราม้าลาย)
- ตะแกรงร่อน 600 ไมครอน (No. 30) (Retsch, Germany)
- หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร
- เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์
- แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน (magnetic bar)
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- ที่คีบ (tongs และ forceps)
- เทอร์โมมิเตอร์
- ไมโครมิเตอร์
- ขวดน้ำกลั่น

### 3.3 การตัดแปรสตาarch สำหรับหลังด้วยวิธีการคั่ว

3.3.1 นำสตาarch สำหรับหลัง (tapioca starch) ที่มีความชื้นร้อยละ 9.5 (wet basis) มาปรับความชื้นโดยเตรียมสตาarch สำหรับหลัง 1,500 กรัม (dry basis) มาเติมน้ำโดยการพ่นฝอยโดยใช้ฟ็อกกี้สเปรย์น้ำที่ละนิด แล้วเขย่าจนได้ความชื้นร้อยละ 15 และ 20 (wet basis) (ปริมาตรน้ำที่สเปรย์ได้จากการคำนวณในภาคผนวก ก)

3.3.2 ใส่ถุงพลาสติกที่ปิดสนิท เก็บไว้ให้สตาarch เข้าสู่สมดุลความชื้นเป็นเวลา 1 วันในตู้แช่เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.3.3 นำสตาarch ออกมาวางไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ร้อนสตาarch ผ่านตะแกรงขนาด 600 ไมครอน (No. 30) (Retsch, Germany)

3.3.4 จากนั้นนำสตาarch สำหรับหลัง 300 กรัม (dry basis) ที่มีความชื้นร้อยละ 9.5, 15 และ 20 (wet basis) มาคั่วในหม้อสแตนเลสขนาด 22 เซนติเมตรที่วางบนแท่นให้ความร้อน (hot plate) ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 200 องศาเซลเซียส และมีการกวนที่ความเร็ว 80 rpm นาน 0, 10, 20, และ 30 นาที จะได้ตัวอย่างสตาarch ตัดแปร ดังตารางที่ 4

3.3.5 ทำการวัดอุณหภูมิของสตาarch ภายในหม้อทุกๆ สองนาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำมาพักไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท



ตารางที่ 4 สภาวะการตัดแปรรสตา์ไขมันสำปะหลังโดยวิธีการคั่วที่ระดับความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาการให้ความร้อนแตกต่างกัน

Sample	Moisture Content (%)	Heating Time (min)	Abbreviation
1	9.6	0	Mc 9.6% 0 min
2	9.6	10	Mc 9.6% 10 min
3	9.6	20	Mc 9.6% 20 min
4	9.6	30	Mc 9.6% 30 min
5	15	0	Mc 15% 0 min
6	15	10	Mc 15% 10 min
7	15	20	Mc 15% 20 min
8	15	30	Mc 15% 30 min
9	20	0	Mc 15% 0 min
10	20	10	Mc 15% 10 min
11	20	20	Mc 15% 20 min
12	20	30	Mc 15% 30 min

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติของสตา์ไขมันสำปะหลังที่ตัดแปรรด้วยวิธีการคั่ว

การตรวจสอบสมบัติของสตา์ไขมันสำปะหลังที่ตัดแปรรด้วยวิธีการคั่วได้แสดงวิธีอย่างละเอียดที่ภาคผนวก ข โดยสมบัติที่ได้ตรวจสอบมีดังนี้

#### 3.4.1 ความชื้น

ทำการวัดปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบในตู้อบลมร้อน (AOAC, 2005)

#### 3.4.2 ลักษณะทางสัณฐาน

ทำการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสตา์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (Walker, 1978)

### 3.4.3 ไปรีฟริงเจนซ์

ทำการตรวจสอบลักษณะกากบาทไปรีฟริงเจนซ์ของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์ (light microscope)

### 3.4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึก

ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Cheetham & Tao, 1998)

### 3.4.5 ดัชนีความขาว

นำตัวอย่างสตาร์ชบรรจุมาวัดสีในรูปของค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดสี (Color-view™ Spectrophotometer, Model 9000, USA)

### 3.4.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำโดยวิธีที่ดัดแปลงจาก (Anderson & Guraya, 2006)

### 3.4.7 ความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัว

ทำการศึกษาความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัวตามวิธีของ (Schoch, 1964)

### 3.4.8 ความหนืด

ทำวิเคราะห์พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง rapid visco analyser (RVA) (Schoch, 1964)

### 3.4.9 เนื้อสัมผัสของเจล

ทำการทดสอบค่าแรงกด (compressive test) ของเจลสตาร์ชสุกที่ได้ หลังจากผ่านการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจาก (Saartrat et al., 2005)

### 3.4.10 สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลที่ไนเซชันและรีโทรเกรเดชัน

ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชในการเกิดเจลที่ไนเซชันและรีโทรเกรเดชันตามวิธีที่ดัดแปลงจาก (กล้าณรงค์ ศรีรอด & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



### 3.5 การทดสอบการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยวิธีการคั่วในผลิตภัณฑ์ขนมฝิง

#### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างขนมฝิง

ซึ่งเตรียมตัวอย่างส่วนผสม (สตาร์ช 250 กรัม น้ำตาลทรายขาว 100 กรัม กะทิยูเอชที 200 กรัม และไข่แดงของไข่ไก่ 50 กรัม) นำกะทิยูเอชทีมาเคี่ยวจนแตกมัน (2 นาที) เติมน้ำตาลลงไปเคี่ยวต่ออีก 2 นาที ยกออกจากเตา พักไว้ให้พออุ่น (45-50 องศาเซลเซียส) นำไปวัด °Brix (ให้ได้ประมาณ 69-73 °Brix) เติมน้ำตาลลงไป คนให้เข้ากัน พักไว้ทำการร่อนสตาร์ชด้วยตะแกรงร่อนแป้ง แบ่งสตาร์ชครึ่งหนึ่งเติมลงในของเหลวที่พักไว้ ตะลอมให้เข้ากัน เติมน้ำตาลส่วนที่เหลือ ตะลอมให้เข้ากัน นำไปตีด้วยเครื่องผสม Kitchen Aid โดยใช้หัวผสมรูปใบไม้ที่ความเร็วปานกลาง 3 นาที นำไปใส่ภาชนะปิดสนิท พักไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำมานวดให้เข้ากัน ปั้นเป็นลูกกลม ๆ ลูกละ 1.5-2 กรัม จัดเรียงในถาด และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12-15 นาที นำขนมออกมาพักให้เย็น เก็บใส่ภาชนะปิดสนิท

#### 3.5.2 การหาปริมาณจำเพาะของขนมฝิง

วัดปริมาณจำเพาะของขนมฝิงด้วยการแทนที่เมล็ดงาขาวโดย วางขนมฝิงลงบนภาชนะ 5 ชั้น จากนั้นใส่งาขาวจนเต็ม ทำการชั่งน้ำหนักแล้วนำไปคำนวณ

#### 3.5.3 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมฝิง

นำผลิตภัณฑ์ขนมฝิงที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ใช้ผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ได้ใช้โปรแกรมทดสอบทางประสาทสัมผัส (SU Sense, Food technology, Silpakorn university) โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ ลักษณะปรากฏ (appearance), สี (color), ลักษณะเนื้อสัมผัส(texture), การละลายในปาก (disintegration in Mouth), กลิ่นขณะรับประทาน (flavor), รสชาติ (taste) และความชอบโดยรวม (Overall liking)

#### 3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมฝิง

ทำการวัดค่า hardness โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) พร้อมหัววัดรูปทรงกระบอกขนาด p/50 เลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ compression

### 3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางเคมีกายภาพใช้แผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ completely randomized design (CRD) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ (replications) ใช้โปรแกรม

วิเคราะห์ทางสถิติ Statistix 9.0 ทำการวิเคราะห์ analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละสิ่งทดลอง (treatment) ด้วยวิธี LSD (least significance difference) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

การวิเคราะห์ผลทางประสาธสัมพันธ์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี duncan's new multiple ranges test (DMRT) ด้วยโปรแกรม SPSS version 16.0 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางประสาธสัมพันธ์ใช้แผนการทดลองแบบ RCBD โดยกำหนดให้ผู้ชิมเป็น block

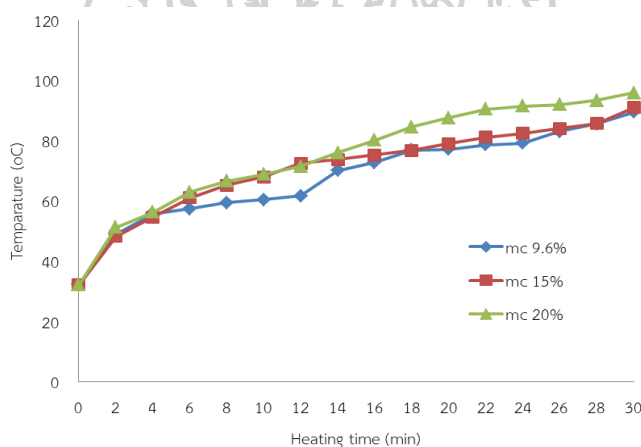


## บทที่ 4

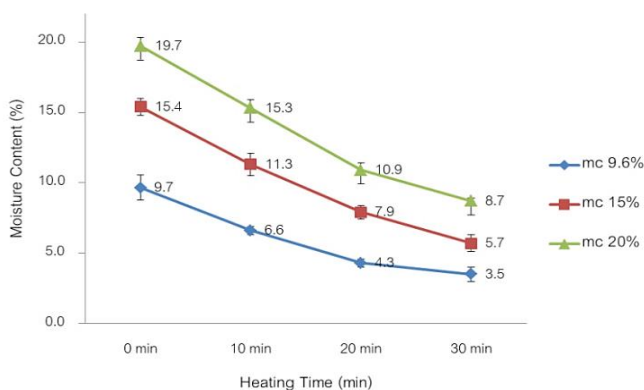
### ผลการทดลองและการวิจารณ์

#### 4.1 ความชื้น

การคั่วเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับอาหารโดยไม่ใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นตัวกลาง สตาร์ชได้ถูกกวนไปเรื่อย ๆ อย่างสม่ำเสมอ ทำให้อุณหภูมิของสตาร์ชสูงขึ้นและความชื้นของสตาร์ช ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาในการคั่วเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12 ตามลำดับ โดยความชื้นของสตาร์ชได้ลดลงจาก 9.6, 15 และ 20% เหลือเพียง 3.5, 5.7 และ 8.7% ตามลำดับและเป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิของสตาร์ชทุกระดับความชื้นจะไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสตลอดระยะเวลาการคั่วนาน 30 นาที



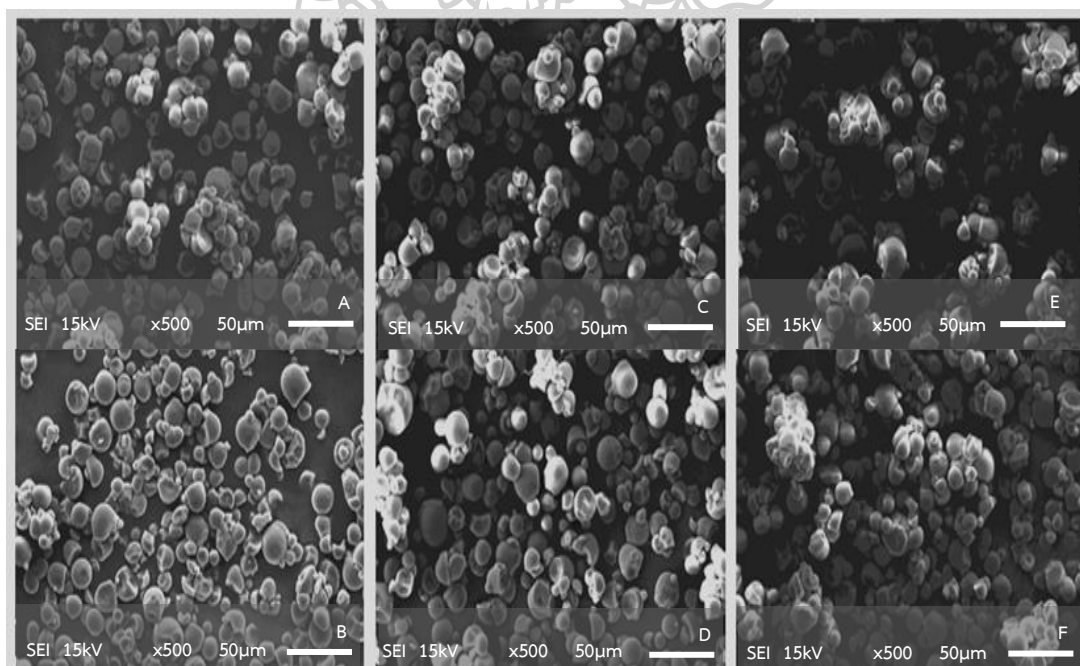
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสตาร์ชมันสำปะหลังขณะคั่ว



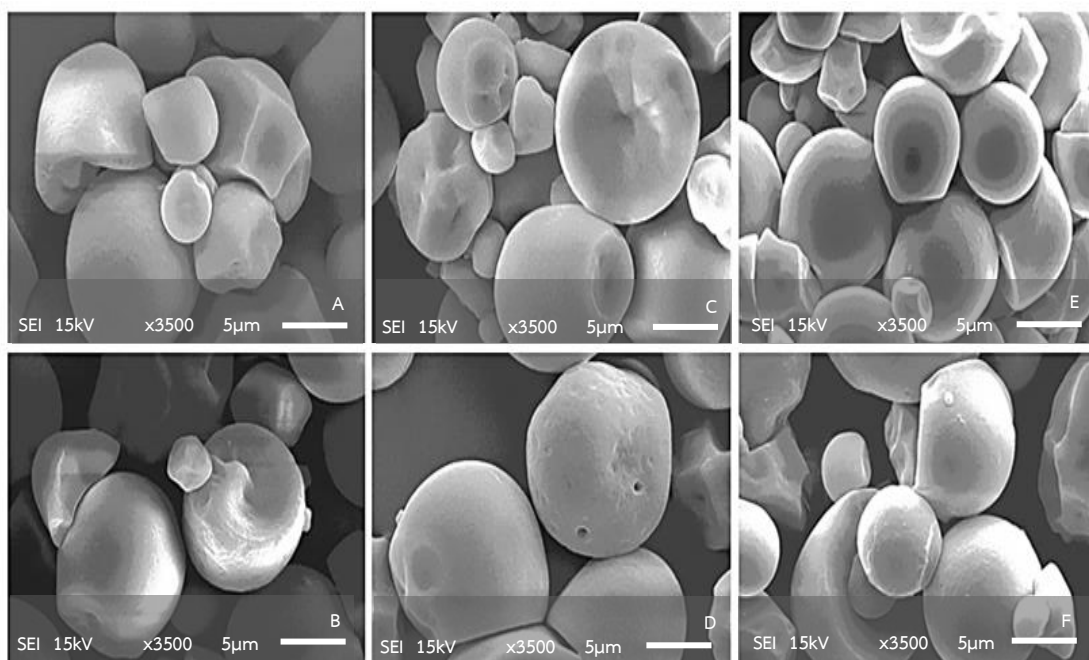
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อผ่านการคั่วโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

## 4.2 ลักษณะทางสัณฐาน

จากการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อถ่ายภาพที่กำลังขยาย 500 และ 3,500 เท่า (ภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับ) สตาร์ชมันสำปะหลังมีลักษณะกลม ผิวเรียบ บางส่วนมีปลายตัด เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชด้วยคั่วจะเห็นได้ว่าเม็ดสตาร์ชทุกชนิดยังมีขนาดและลักษณะไม่แตกต่างกันไปจากเดิม เช่นเดียวกับการทดลองของ (Gunaratne & Hoover, 2002; Hoover & Manuel, 1996; Lawal, 2005) ที่รายงานว่าการให้ความร้อนขึ้นไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช อย่างไรก็ตาม เม็ดสตาร์ชก่อนและหลังการดัดแปรด้วยการคั่วจะมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชก่อนคั่วจะมีการเกาะกลุ่มกันมาก หลังการคั่วเม็ดสตาร์ชจะเกาะกลุ่มกันน้อยลง สตาร์ชหลังคั่วที่มีความชื้นต่ำกว่าจะมีการเกาะกลุ่มกันของเม็ดสตาร์ชน้อยมากกว่า ดังภาพที่ 13 แถวบนคือสตาร์ชก่อนคั่วที่ 9.6, 15 และ 20% แถวล่างคือสตาร์ชที่ผ่านการคั่ว 30 นาที โดยมีความชื้นเริ่มต้น 9.6, 15 และ 20% ตามลำดับ และมีความชื้นสุดท้าย 3.5, 5.7 และ 8.7% ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ภาพถ่ายของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 500 เท่า  
 A) ความชื้น 9.6% ก่อนคั่ว; B) ความชื้น 9.6% หลังคั่ว 30 นาที;  
 C) ความชื้น 15% ก่อนคั่ว; D) ความชื้น 15% หลังคั่ว 30 นาที;  
 E) ความชื้น 20% ก่อนคั่ว และ F) ความชื้น 20% หลังคั่ว 30 นาที



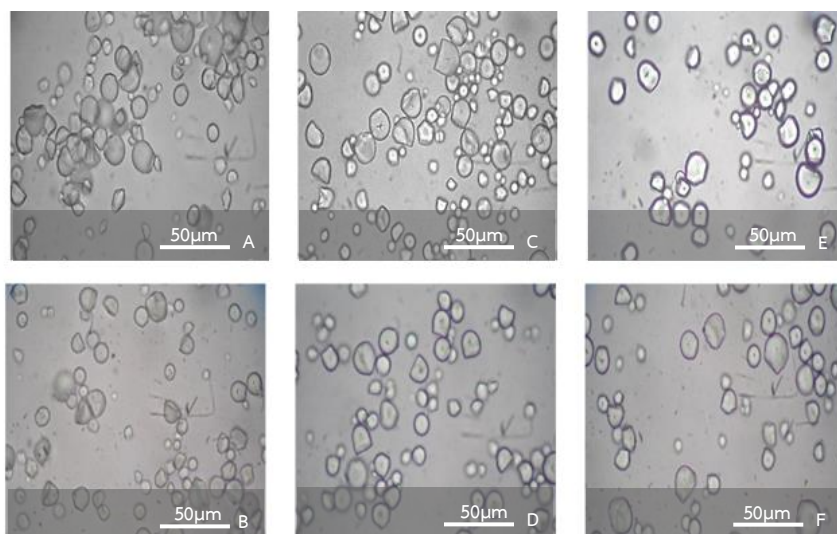
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 3,500 เท่า

- A) ความชื้น 9.6% ก่อนคั่ว; B) ความชื้น 9.6% หลังคั่ว 30 นาที;  
 C) ความชื้น 15% ก่อนคั่ว; D) ความชื้น 15% หลังคั่ว 30 นาที;  
 E) ความชื้น 20% ก่อนคั่ว และ F) ความชื้น 20% หลังคั่ว 30 นาที

#### 4.3 ไบริฟริงเจนซ์

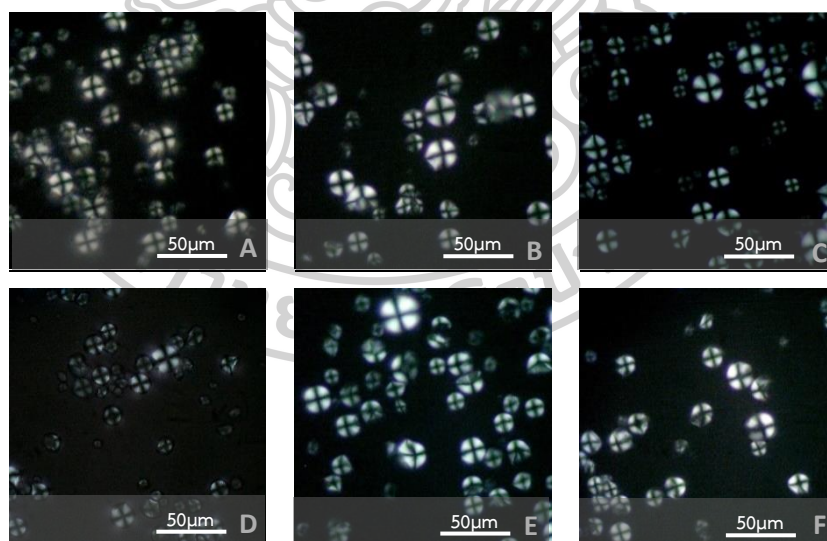
เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) พบว่าเม็ดสตาร์ไขมันสำปะหลังมีลักษณะกลมเรียบ โดยเม็ดสตาร์ชก่อนและหลังการคั่วมีลักษณะปรากฏคงเดิมไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 15) เมื่อตรวจดูภายใต้แสงโพลาไรซ์พบว่าเม็ดสตาร์ชยังคงมีไบริฟริงเจนซ์ (birefringence) อยู่ แสดงว่าเม็ดสตาร์ชยังคงมีโครงสร้างผลึกที่เป็ยงเบนแสงโพลาไรซ์ได้ การตัดแปรด้วยวิธีการคั่วสตาร์ชไม่ทำให้เกิดเจลาทีไนเซชันที่ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสูญเสียโครงสร้างผลึกไปอย่างสมบูรณ์





ภาพที่ 15 ภาพถ่ายของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 40 เท่า

- A) ความชื้น 9.6% ก่อนคั่ว; B) ความชื้น 9.6% หลังคั่ว 30 นาที;  
 C) ความชื้น 15% ก่อนคั่ว; D) ความชื้น 15% หลังคั่ว 30 นาที;  
 E) ความชื้น 20% ก่อนคั่ว และ F) ความชื้น 20% หลังคั่ว 30 นาที



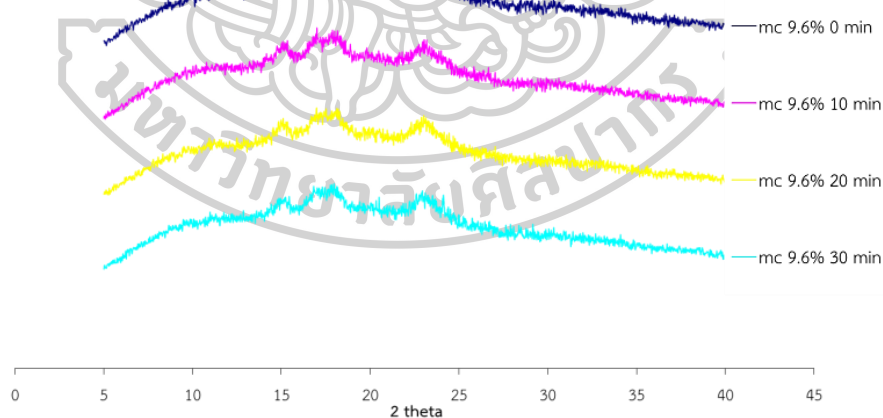
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายแสดงลักษณะไบรฟริงเจนของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 40 เท่า

- A) ความชื้น 9.6% ก่อนคั่ว; B) ความชื้น 9.6% หลังคั่ว 30 นาที;  
 C) ความชื้น 15% ก่อนคั่ว; D) ความชื้น 15% หลังคั่ว 30 นาที;  
 E) ความชื้น 20% ก่อนคั่ว และ F) ความชื้น 20% หลังคั่ว 30 นาที

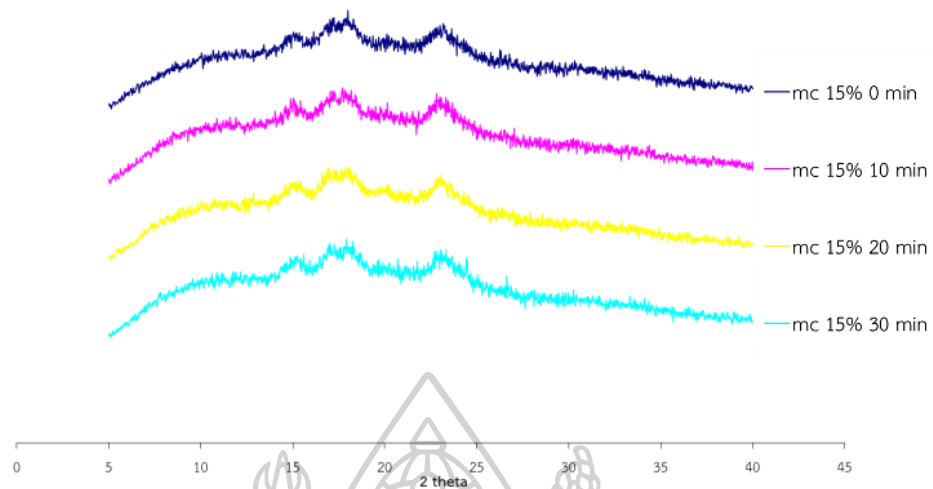


#### 4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึก

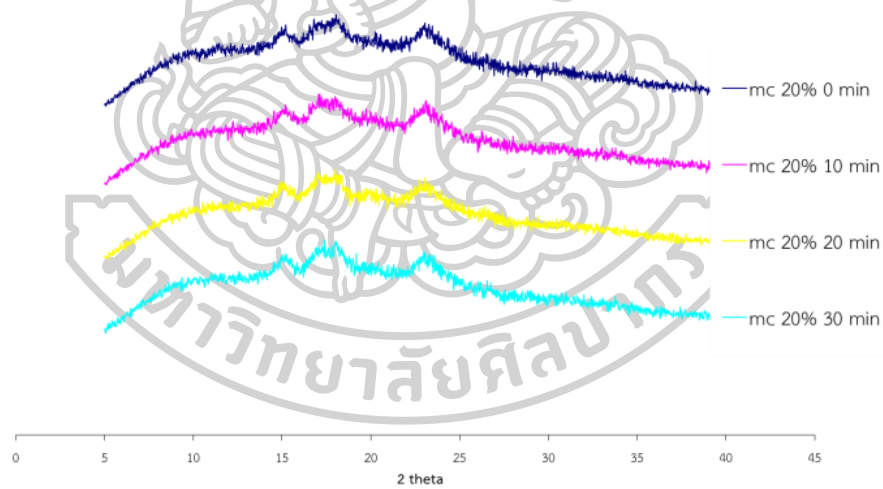
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ซมันส์สำปะหลังด้วยเครื่อง x-ray diffractometer แสดงในภาพที่ 17 ซึ่งพบว่าสตาร์ซมันส์สำปะหลังจะแสดงโครงสร้างผลึกแบบ A คือเกิดพีคที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $15^\circ$  สองพีคเชื่อมติดกันที่  $17$  และ  $18^\circ$  อีกหนึ่งพีคที่  $23^\circ$  ทั้งนี้ทั้งนี้มีการรายงานว่ สตาร์ซมันส์สำปะหลังอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 แบบ โดยสามารถตรวจพบลักษณะผลึกได้ ทั้งแบบ A และแบบ C จากลักษณะรูปแบบของ X-ray diffractograms ของสตาร์ซมันส์ก่อนการคั่ว (0 min) และสตาร์ซมันส์หลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาการคั่วต่าง ๆ มีลักษณะโครงสร้างของผลึกและร้อยละความเป็นผลึกไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน น่าจะเป็นเพราะการดัดแปรสตาร์ซด้วยวิธีการคั่วในภาชนะเปิดนี้ให้ผลการดัดแปรระดับต่ำ โดยระดับการดัดแปรที่ใช้นี้ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกที่เห็นได้ชัด ซึ่งคล้ายกับการศึกษาการดัดแปรสตาร์ซด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้นที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้าง (Hoover & Manuel, 1996) ต่างจากสตาร์ซอื่นที่พบว่าหลังผ่านการให้ความร้อนชื้นจะแล้วมีความเข้มของพีคมีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างผลึกถูกทำลาย หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของพันธะคู่ในส่วนของโครงสร้างผลึก (Adebowale & Lawal, 2003)



ภาพที่ 17 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ซมันส์สำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 9.6% ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 18 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ไขมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 15% ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 19 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ไขมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 20% ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการคั่วด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วโดยสตาร์ชที่มีความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Crystallinity (%)
mc 9.6% 0 min	7.54
mc 9.6% 10 min	5.63
mc 9.6% 20 min	6.48
mc 9.6% 30 min	5.98
mc 15% 0 min	6.57
mc 15% 10 min	5.40
mc 15% 20 min	8.87
mc 15% 30 min	7.12
mc 20% 0 min	6.02
mc 20% 10 min	6.24
mc 20% 20 min	6.62
mc 20% 30 min	6.78

ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชที่ผ่านการคั่วทุกตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าสตาร์ชดิบความชื้นเริ่มต้น 9.6% ที่ไม่ผ่านการคั่ว ยกเว้นสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้น 15% ผ่านการคั่ว 20 นาที ในกรณีที่สตาร์ชดัดแปรที่มีค่าร้อยละความเป็นผลึกลดลงเช่นนี้อาจเกิดจากความชื้นหรือความร้อนในการดัดแปรได้ทำลายความเป็นผลึกของสตาร์ช (Takaya et al., 2000) โดยโครงสร้างอะไมโลเพกตินถูกทำให้แตกสลายไปด้วยความร้อนในระหว่างการดัดแปร ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของอะไมโลเพกตินมีจำนวนลดลงและเกิดโมเลกุลขนาดเล็กของอะไมโลเพกตินเพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนอะไมโลเพกตินที่ถูกทำให้แตกสลายนั้นเป็นสายโซ่ตรงด้านนอก หรือสาย A ของโครงสร้าง (Lu et al., 1996) ความร้อนทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ ทำให้ความแข็งแรงของพันธะในการจับกันของโมเลกุลลดลง โดยน้ำจะมีส่วนในการทำลายความเป็นระเบียบของอะไมโลเพกติน (Adebowale & Lawal, 2003)

#### 4.5 ดัชนีความขาว

ดัชนีความขาวของสตาร์ชที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่ว (0 นาที) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ไม่มีความแตกต่างของดัชนีความขาวอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาการคั่วเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดัชนีความขาวของสตาร์ชที่ผ่านการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6 และ 15% มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 6 ดัชนีความขาวของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	92.50±0.38 <sup>a, AB</sup>	92.17±0.10 <sup>b, B</sup>	92.60±0.22 <sup>a, A</sup>	92.47±0.11 <sup>a, AB</sup>
15	93.03±0.22 <sup>a, A</sup>	92.17±0.13 <sup>b, B</sup>	92.50±0.19 <sup>a, AB</sup>	91.83±0.63 <sup>a, B</sup>
20	92.53±0.63 <sup>a, A</sup>	92.83±0.32 <sup>a, A</sup>	92.73±0.10 <sup>a, A</sup>	92.40±0.15 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 4.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ จากตารางที่ 7 ความชื้นสตาร์ชตั้งต้นที่มาก จะทำให้ความสามารถในการดูดน้ำของสตาร์ชลดลงจนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติได้ และสตาร์ชที่ผ่านการคั่วจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำน้อยกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการคั่วโดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้น 15 และ 20% ที่ปรากฏความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญได้หลังคั่ว 20 และ 30 นาทีตามลำดับ ทั้งนี้ถ้าหากอะไมโลสในโครงสร้างสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นอาจมีผลให้การดูดน้ำของเม็ดสตาร์ชลดลง (Hoover & Manuel, 1996)

ตารางที่ 7 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (g/g solid) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	2.78±0.45 <sup>a, A</sup>	2.36±0.08 <sup>a, A</sup>	2.55±0.02 <sup>a, A</sup>	2.65±0.14 <sup>a, A</sup>
15	2.45±0.10 <sup>ab, A</sup>	2.39±0.16 <sup>a, A</sup>	2.19±0.07 <sup>b, B</sup>	2.19±0.03 <sup>b, B</sup>
20	2.17±0.08 <sup>b, A</sup>	2.05±0.06 <sup>b, B</sup>	2.18±0.04 <sup>b, A</sup>	2.03±0.03 <sup>b, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 4.7 ความสามารถในการละลายและการพองตัว

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยสตาร์ช (starch suspension) ในน้ำ เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวและจะทำให้บางส่วนของสตาร์ชละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดที่สามารถละลายได้ในน้ำ ในตารางที่ 13 ถึง 16 เป็นความสามารถในการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วที่น้ำอุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส

ความสามารถการละลายที่ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่วไม่แตกต่างกันมากนัก มีช่วงความสามารถการละลาย 2.57–4.56% โดยสตาร์ชความชื้น 20% ที่ไม่ผ่านการคั่วมีความสามารถในการละลายสูงที่สุด และสตาร์ชความชื้น 15% ที่ผ่านการคั่ว 30 นาที มีความสามารถในการละลายน้อยที่สุด

ตารางที่ 8 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	2.88±0.26 <sup>b, B</sup>	2.67±0.33 <sup>a, B</sup>	2.71±0.59 <sup>a, B</sup>	3.89±0.39 <sup>a, A</sup>
15	2.79±0.21 <sup>b, B</sup>	2.77±0.33 <sup>a, B</sup>	3.57±0.12 <sup>a, A</sup>	2.58±0.26 <sup>b, B</sup>
20	4.56±0.70 <sup>a, A</sup>	2.72±0.94 <sup>a, B</sup>	3.60±1.07 <sup>a, AB</sup>	2.82±0.64 <sup>b, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่วอยู่ในช่วง 8.39-13.14% และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ยกเว้นสตาร์ชความชื้น 9.6% ที่ผ่านการคั่วนาน 30 นาที มีความสามารถในการละลายลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ )

ตารางที่ 9 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	12.82±1.96 <sup>a, A</sup>	11.47±5.14 <sup>a, A</sup>	10.81±1.03 <sup>a, A</sup>	11.39±0.67 <sup>a, A</sup>
15	13.14±0.91 <sup>a, A</sup>	11.59±2.83 <sup>a, A</sup>	12.30±1.80 <sup>a, A</sup>	11.01±2.34 <sup>a, A</sup>
20	11.00±0.62 <sup>a, A</sup>	11.75±2.26 <sup>a, A</sup>	10.12±0.69 <sup>a, A</sup>	11.08±3.01 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



จากความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่วที่ระยะเวลาการคั่วเดียวกัน พบว่าความชื้นเริ่มต้นไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายของสตาร์ช และที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ระยะเวลาการคั่วไม่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสตาร์ช ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้น 20% สตาร์ชที่ผ่านการคั่วมีความสามารถในการละลายลดน้อยลง โดยที่ระยะเวลาการคั่ว 30 นาที มีผลทำให้ความสามารถในการละลายของสตาร์ชคั่วลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ

ตารางที่ 10 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	14.19±3.59 <sup>a, A</sup>	18.33±9.05 <sup>a, A</sup>	12.10±2.43 <sup>a, A</sup>	13.94±4.02 <sup>a, A</sup>
15	15.42±2.85 <sup>a, B</sup>	13.96±0.66 <sup>a, BC</sup>	11.57±0.74 <sup>a, C</sup>	18.49±0.96 <sup>a, A</sup>
20	16.40±4.96 <sup>a, A</sup>	11.88±0.88 <sup>a, AB</sup>	14.07±7.44 <sup>a, AB</sup>	10.68±1.70 <sup>a, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่ว พบว่าความชื้นเริ่มต้นไม่มีผลต่อความสามารถในการละลายที่ระยะเวลาในการคั่ว นาน 20 แล 30 นาที สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วมีความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้น โดย สตาร์ชที่ผ่านการคั่วจะมีความสามารถในการละลายอยู่ในช่วง 16.90 - 25.71% ส่วนสตาร์ชที่ไม่ผ่านการคั่วจะมีช่วงของความสามารถในการละลายที่ 13.36 - 16.18%

ตารางที่ 11 ความสามารถในการละลาย (%) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	13.36±1.39 <sup>a, B</sup>	25.71±2.97 <sup>a, A</sup>	16.90±9.46 <sup>a, AB</sup>	23.40±5.03 <sup>a, A</sup>
15	16.18±2.70 <sup>a, A</sup>	20.41±1.54 <sup>b, A</sup>	18.87±2.37 <sup>a, A</sup>	21.77±4.72 <sup>a, A</sup>
20	14.22±4.10 <sup>a, B</sup>	20.52±1.95 <sup>b, A</sup>	17.92±1.64 <sup>a, AB</sup>	19.76±2.28 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการละลายที่น้ำอุณหภูมิต่างกันในช่วง 60 – 90 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความสามารถในการละลายสูงมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สตาร์ชมันสำปะหลังมีความสามารถในการละลายมากที่สุด เช่นเดียวกับสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความชื้นมีคาร์บอนไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความชื้นและอุณหภูมิในการตัดแปร มีสาเหตุเนื่องมาจากเกิดการแตกสลายของโมเลกุลสตาร์ชบางส่วนภายในเม็ดสตาร์ชในระหว่างการทำการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความชื้นทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีโอกาสดูด (leaching) ออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการที่โครงสร้างบางส่วนมีการเกิดเจลที่ในเซชันโดยเฉพาะบริเวณผิวภายนอกของเม็ดสตาร์ชทำให้บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ที่จะจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้นและสามารถดูดน้ำกลับ (rehydrate) ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีโอกาสดูดออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชและเกิดการละลายเพิ่มมากขึ้น (Kulp & Lorenz, 1981; Lawal, 2005)

กำลังการพองตัวของที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วแสดงไว้ในตารางที่ 12 พบว่าที่ระยะเวลาการคั่ว 10 และ 20 นาทีความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ชไม่มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ช กำลังการพองตัวของที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วจะมีค่าน้อยและอยู่ในช่วงแคบๆ คือ 5.96 – 6.97 เนื่องจากอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสยังไม่สูงพอที่จะทำให้เม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังเกิดเจลที่ในเซชันดูดน้ำและพองตัวได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 12 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	5.96±0.63 <sup>a, B</sup>	5.89±0.15 <sup>a, B</sup>	6.36±0.35 <sup>a, AB</sup>	6.97±0.20 <sup>a, A</sup>
15	6.37±0.56 <sup>a, A</sup>	5.86±0.67 <sup>a, A</sup>	6.82±0.10 <sup>a, A</sup>	6.85±0.60 <sup>ab, A</sup>
20	5.98±0.49 <sup>a, B</sup>	6.41±0.13 <sup>a, AB</sup>	6.75±0.32 <sup>a, A</sup>	6.09±0.39 <sup>b, AB</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 13 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	19.01±1.30 <sup>a, A</sup>	16.94±4.60 <sup>a, A</sup>	16.30±1.09 <sup>b, A</sup>	17.93±1.56 <sup>a, A</sup>
15	17.84±0.92 <sup>a, A</sup>	18.02±0.84 <sup>a, A</sup>	17.87±0.95 <sup>ab, A</sup>	18.08±0.85 <sup>a, A</sup>
20	17.51±1.53 <sup>a, A</sup>	17.91±0.23 <sup>a, A</sup>	19.09±0.48 <sup>a, A</sup>	17.01±2.00 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วแสดงไว้ในตารางที่ 13 พบว่าที่ระยะเวลาการคั่วเดียวกันนั้นความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ชไม่มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ช ยกเว้นสตาร์ชที่คั่ว 20 นาที มีกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นเริ่มต้นที่ 9.6% และเมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาการคั่วสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกันพบว่า กำลังการพองตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p >$

0.05) ส่วนกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วแสดงไว้ในตารางที่ 14 พบว่าการคั่วสตาร์ชและความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ชไม่มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ )

ตารางที่ 14 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	21.89±1.49 <sup>a, A</sup>	20.70±2.05 <sup>a, A</sup>	20.80±0.83 <sup>a, A</sup>	21.95±1.69 <sup>a, A</sup>
15	21.14±3.61 <sup>a, A</sup>	20.35±0.31 <sup>a, A</sup>	20.43±2.31 <sup>a, A</sup>	20.12±1.48 <sup>a, A</sup>
20	20.50±0.97 <sup>a, A</sup>	20.94±2.43 <sup>a, A</sup>	20.55±1.46 <sup>a, A</sup>	19.62±1.54 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 15 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	19.73±3.56 <sup>a, A</sup>	23.59±2.26 <sup>a, A</sup>	22.09±2.59 <sup>a, A</sup>	24.22±0.95 <sup>a, A</sup>
15	23.81±2.29 <sup>a, A</sup>	24.49±7.31 <sup>a, A</sup>	21.35±3.43 <sup>a, A</sup>	21.82±2.64 <sup>a, A</sup>
20	21.33±1.32 <sup>a, A</sup>	20.28±0.44 <sup>a, A</sup>	19.76±1.66 <sup>a, A</sup>	23.83±1.12 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วแสดงไว้ในตารางที่ 15 พบว่าการคั่วสตาร์ชไม่มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) และความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ชก็ไม่มีผลต่อกำล้างการพองตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ยกเว้นสตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 20% ที่ผ่านการคั่ว 30 นาที มีกำล้างการพองตัวลดลงน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณากำล้างการพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วและไม่ผ่านการคั่วเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันจะแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งโดยมากจะไม่มีนัยสำคัญ สำหรับที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่าค่ากำล้างการพองตัวของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่ระดับความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 9.6 และ 15 นั้นระยะเวลาการตัดแปรให้ผลไม่แตกต่างกันและไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่ที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ระยะเวลาการคั่ว 30 นาที มีกำล้างการพองตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญอย่างชัดเจน ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นที่กล่าวว่า หากมีสภาวะในการตัดแปรที่รุนแรงพออาจจะทำให้เกิดการทำลายพันธะและแรงบางส่วนที่ยึดสายเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินซึ่งอยู่ในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชลง (Cooke & Gidley, 1992) รวมทั้งอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ของของโครงสร้างผลึกเดิมทำให้เกิดการสร้างพันธะใหม่ระหว่างโมเลกุลสตาร์ชเพิ่มขึ้น เช่น การเกิดพันธะระหว่างสายอะไมโลสและ/หรืออะไมโลสกับไขมันในระหว่างการให้ความร้อนขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและเป็นสาเหตุที่ทำให้สตาร์ชมีการพองตัวลดลง (Gunaratne & Hoover, 2002) ด้วยเหตุนี้การตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการคั่วนั้นมีสภาวะที่ไม่รุนแรง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.8 สมบัติด้านความหนืด

จากการศึกษาพฤติกรรมความหนืดของสตาร์ชทั้ง 12 ตัวอย่าง ที่ความเข้มข้น 8% (โดยน้ำหนักแห้ง) ด้วยเครื่อง RVA พบว่า อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น ของสตาร์ชไม่ผ่านการคั่วและผ่านการคั่วมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นจะอยู่ในช่วง 71.97 - 73.53 องศาเซลเซียส โดยที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกันการคั่วไม่ได้ทำให้อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ยกเว้นการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 15% และที่ระยะเวลาการคั่วเดียวกันความชื้นเริ่มต้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 16 อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature) (องศาเซลเซียส) ของสตาร์ช มันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	72.77±0.29 <sup>a, A</sup>	72.17±0.85 <sup>a, A</sup>	72.50±0.45 <sup>a, A</sup>	72.23±0.39 <sup>a, A</sup>
15	72.20±0.49 <sup>a, B</sup>	73.01±0.50 <sup>a, A</sup>	71.97±0.60 <sup>a, B</sup>	72.53±0.48 <sup>a, AB</sup>
20	72.77±0.05 <sup>a, A</sup>	72.50±0.46 <sup>a, A</sup>	72.23±0.51 <sup>a, A</sup>	72.73±0.30 <sup>a, A</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าความหนืดสูงสุดแสดงดังตารางที่ 17 สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 9.6% เมื่อผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วได้มีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้น 15 และ 20% มีความหนืดสูงสุดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญยกเว้น สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 20% และระยะเวลาการคั่ว 30 นาทีมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงในกรณีของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชหลังการให้ความร้อนขึ้นจะมีค่าแตกต่างกันไป คือสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการตัดแปร เช่น สตาร์ชมันเทศ (Collado & Corke, 1999) ข้าวฟ่างสีขาว (Olayinka et al., 2008) นิวโคโคแยม (Lawal, 2005) และสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรในระดับสูง จะมีค่าความหนืดสูงสุดลดต่ำลงเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนพันธะเป็นจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง จนส่งผลขัดขวางหรือยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชจึงทำให้ความหนืดของสตาร์ชลดลง (Lawal, 2005) แต่ถ้าสภาวะที่ใช้ในการตัดแปรต่ำๆ หรือปานกลางจะส่งผลทำให้สตาร์ชมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น มีสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลจากการยึดเกาะกันระหว่างสายอะไมโลสด้วยกันเอง และ/หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมันภายในเม็ดสตาร์ช ระหว่างการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น (Hoover & Manuel, 1996) โดยในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของพันธะในระดับหนึ่งจะส่งผลในทางบวก คือทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อความร้อนและแรงเฉือนหรือเกิดการพองตัวได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในสตาร์ชที่ถูกตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นในระดับต่ำและปานกลาง ส่วนในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของพันธะ



เป็นจำนวนมากจนทำให้เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมาก ๆ จะส่งผลในทางลบ คือจะเกิดการขัดขวางหรือการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วยการให้ความร้อนขึ้นในระดับสูงมีค่าความหนืดสูงสุดลดลง ดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อจะทำลายพันธะดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชดัดแปรมีค่าสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 17 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	201.60±2.04 <sup>b, C</sup>	207.70±2.88 <sup>a, B</sup>	206.10±1.09 <sup>ab, B</sup>	214.27±2.33 <sup>a, A</sup>
15	209.53±0.09 <sup>a, A</sup>	205.20±2.53 <sup>ab, A</sup>	210.67±4.47 <sup>a, A</sup>	203.30±6.41 <sup>b, A</sup>
20	203.23±0.93 <sup>b, A</sup>	200.73±2.11 <sup>b, AB</sup>	202.40±3.95 <sup>b, A</sup>	196.93±0.74 <sup>b, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าเบรกดาว์นแสดงดังตารางที่ 18 สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 9.6% เมื่อผ่านการคั่วจะมีค่าเบรกดาว์นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ระยะเวลาการคั่ว 30 นาที ส่วนสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้น 15% และ 20% เมื่อผ่านการคั่วนาน 30 นาทีจะมีค่าเบรกดาว์นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเบรกดาว์นเป็นค่าที่อธิบายถึงความทนทานของเม็ดสตาร์ชต่อการให้ความร้อนและการกวน ค่าเบรกดาว์นมีค่าลดลงจะมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชมีความคงตัวต่อความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการหุงต้มได้เพิ่มขึ้น มีการแตกสลายของเม็ดสตาร์ชลดลง ซึ่งถ้าหากเบรกดาว์นมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเม็ดสตาร์ชมีความคงทนน้อยลงหรือจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้นกว่าเดิมเมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือน (พิณทิพย์ รัมภกาภรณ์, 2547)

ตารางที่ 18 เบรกดาวน์ (breakdown) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	113.43±2.42 <sup>b, B</sup>	116.90±2.19 <sup>a, B</sup>	116.60±1.13 <sup>ab, B</sup>	122.57±3.06 <sup>a, A</sup>
15	120.37±0.76 <sup>a, A</sup>	117.63±1.93 <sup>a, AB</sup>	119.73±2.33 <sup>a, AB</sup>	115.40±3.69 <sup>b, B</sup>
20	114.97±2.04 <sup>b, A</sup>	113.40±2.26 <sup>a, AB</sup>	114.87±1.03 <sup>b, A</sup>	110.33±1.26 <sup>b, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าเซ็ทเบคแสดงไว้ในตารางที่ 19 สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 9.6, 15 และ 20 เมื่อผ่านการคั่ว 10, 20 และ 30 นาทีจะมีค่าเซ็ทเบคไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะมีค่าไม่ต่างจากสตาร์ชที่ไม่ได้คั่วอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นสตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 20% เมื่อผ่านการคั่ว 30 นาทีจะมีค่าเซ็ทเบคลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่าเซ็ทเบคเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช หรือการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันเมื่อสตาร์ชเย็นตัวลง สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรสตาร์ชจะมีค่าเซ็ทเบคเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้ามซึ่งบ่งชี้ว่าสตาร์ชเกิดการรีโทรเกรเดชันได้เพิ่มสูงขึ้น แต่จากการทดลองบางส่วน (Collado & Corke, 1999; Lawal, 2005; Olayinka et al., 2008) พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นมีค่าเซ็ทเบคลดต่ำลง

ค่าความหนืดสุดท้าย แสดงไว้ในตารางที่ 20 สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 9.6% เมื่อผ่านการคั่วจะมีค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ระยะเวลาการคั่ว 30 นาที ส่วนสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้น 20% เมื่อผ่านการคั่ว 30 นาทีจะมีค่าความหนืดสุดท้ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 19 เซ็ทเบค (setback) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	47.03±1.83 <sup>b, A</sup>	47.93±1.18 <sup>a, A</sup>	49.10±0.53 <sup>a, A</sup>	48.60±4.13 <sup>a, A</sup>
15	50.73±0.72 <sup>a, A</sup>	48.87±1.95 <sup>a, A</sup>	48.60±2.79 <sup>a, A</sup>	48.00±3.63 <sup>a, A</sup>
20	48.23±1.25 <sup>ab, A</sup>	46.53±0.67 <sup>a, AB</sup>	47.20±1.27 <sup>a, AB</sup>	45.43±1.06 <sup>a, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 20 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) (RVU) ของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	135.23±0.69 <sup>b, B</sup>	138.70±1.88 <sup>a, AB</sup>	138.57±2.17 <sup>a, AB</sup>	140.27±1.38 <sup>a, A</sup>
15	139.90±1.44 <sup>a, A</sup>	136.47±0.86 <sup>ab, A</sup>	139.57±1.12 <sup>a, A</sup>	135.90±3.38 <sup>ab, A</sup>
20	137.50±1.40 <sup>ab, A</sup>	133.87±2.38 <sup>b, B</sup>	134.73±1.97 <sup>b, AB</sup>	132.00±2.59 <sup>b, B</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 4.9 เนื้อสัมผัสของเจล

เมื่อนำเจลสตาร์ชที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 4.8 ด้วยเครื่อง RVA มาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 วันแล้วนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer ได้ผลดังตารางที่ 21 สตาร์ชความชื้นเริ่มต้น 15% ที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่วมีความแข็งของเจลไม่แตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ค่าความแข็งของเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดรีโทรกราเดชันที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 21 ค่าความแข็ง (N) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Moisture Content (%)	Heating Times (min)			
	0	10	20	30
9.6	1375.61±40.66 <sup>a, BC</sup>	1382.66±45.32 <sup>a, AB</sup>	1483.81±51.37 <sup>a, A</sup>	1278.44±72.58 <sup>b, C</sup>
15	1276.07±59.56 <sup>b, A</sup>	1291.65±45.30 <sup>b, A</sup>	1274.48±40.43 <sup>b, A</sup>	1208.86±64.98 <sup>b, A</sup>
20	1168.44±16.55 <sup>c, B</sup>	1410.49±29.45 <sup>a, A</sup>	1416.23±51.41 <sup>a, A</sup>	1445.00±53.57 <sup>a, A</sup>

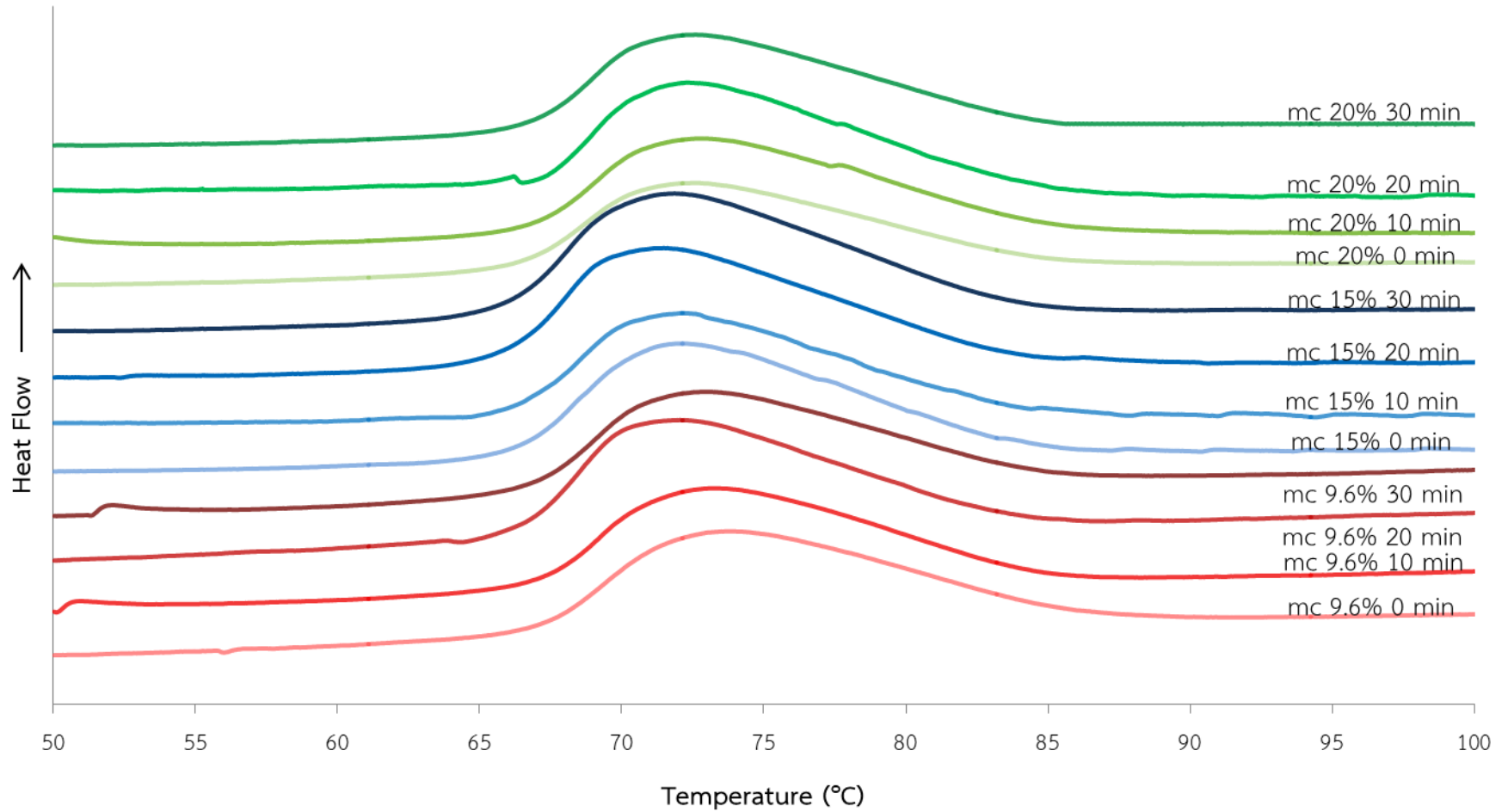
a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

A,B,C = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกันในแถวเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

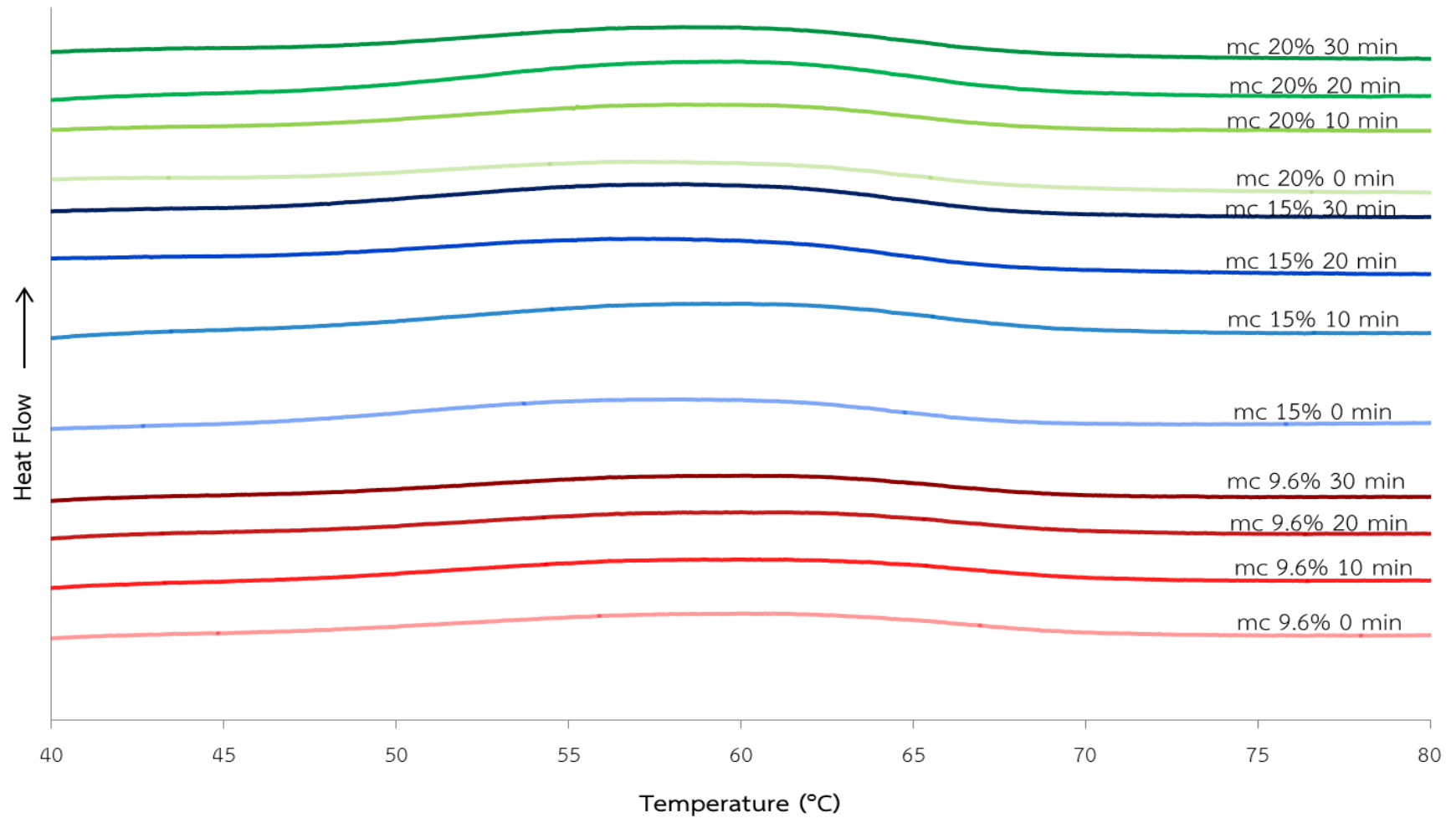
#### 4.10 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชัน

ค่าที่ได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ประกอบด้วย อุณหภูมิในการเริ่มเกิดฟิค ( $T_0$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของฟิค ( $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดฟิค ( $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิในการเกิดฟิค ( $T_c - T_0$ ) และพลังงานหรือเอนทัลปีในการเกิดฟิค ( $\Delta H$ ) การเกิดเจลลาทีโนเซชันเกี่ยวข้องกับการคลายตัว และการสลายตัวพันธะภายนอกของอะไมโลเพกตินซึ่งอยู่รวมกันในลักษณะเกลียวคู่ โดยจะเกิดการหลอมเหลวในระหว่างการเกิดเจลลาทีโนเซชัน โดยเริ่มต้นสตาร์ชจะมีการจับกับน้ำ และเกิดการพองตัวของส่วนอสัณฐานในเม็ดสตาร์ช และต่อมาก็เกิดการยึดและทำลายโครงสร้างส่วนผลึกตามมา (Hoover & Manuel, 1996)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วมีลักษณะเส้นกราฟคล้ายกันโดยจะมีฟิคหลัก 1 ฟิค (ภาพที่ 20) และมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (ตารางที่ 22) ใกล้เคียงกันการเพิ่มระยะเวลาการคั่วทำให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดฟิค ( $T_c - T_0$ ) มีแนวโน้มแคบลงและค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ไขมันสำปะหลังที่ก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



ตารางที่ 22 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Temperature (°C)				Enthalpy ( $\Delta H$ ; J/g)
	$T_o$	$T_p$	$T_c$	$T_c - T_o$	
mc 9.6% 0 min	63.66±0.31 <sup>abc</sup>	72.70±0.75 <sup>ab</sup>	87.92±0.64 <sup>a</sup>	24.26±0.80 <sup>a</sup>	15.59±0.61 <sup>a</sup>
mc 9.6% 10 min	64.28±0.53 <sup>ab</sup>	73.20±0.15 <sup>a</sup>	87.65±0.76 <sup>a</sup>	23.37±1.26 <sup>ab</sup>	14.56±0.28 <sup>cb</sup>
mc 9.6% 20 min	63.64±0.62 <sup>abc</sup>	72.42±0.51 <sup>b</sup>	86.87±2.64 <sup>ab</sup>	23.22±2.66 <sup>ab</sup>	14.22±0.78 <sup>cde</sup>
mc 9.6% 30 min	64.02±0.85 <sup>abc</sup>	72.24±0.50 <sup>b</sup>	86.51±1.01 <sup>ab</sup>	22.49±1.77 <sup>abc</sup>	13.76±0.10 <sup>e</sup>
mc 15% 0 min	64.96±1.77 <sup>a</sup>	72.04±0.09 <sup>bc</sup>	85.31±0.80 <sup>b</sup>	20.35±2.54 <sup>c</sup>	14.24±0.35 <sup>cde</sup>
mc 15% 10 min	64.15±0.36 <sup>abc</sup>	72.68±0.48 <sup>ab</sup>	87.55±0.36 <sup>a</sup>	23.40±0.01 <sup>ab</sup>	15.42±0.39 <sup>ab</sup>
mc 15% 20 min	62.83±0.43 <sup>c</sup>	71.37±0.19 <sup>c</sup>	86.06±0.68 <sup>ab</sup>	23.23±1.03 <sup>ab</sup>	14.74±0.01 <sup>bc</sup>
mc 15% 30 min	63.60±0.6 <sup>abc</sup>	72.26±0.44 <sup>b</sup>	86.35±0.56 <sup>ab</sup>	22.75±0.41 <sup>abc</sup>	14.54±0.07 <sup>cde</sup>
mc 20% 0 min	63.50±0.37 <sup>bc</sup>	72.45±0.30 <sup>b</sup>	85.23±0.99 <sup>b</sup>	21.73±1.15 <sup>abc</sup>	14.00±0.48 <sup>cde</sup>
mc 20% 10 min	63.97±1.27 <sup>abc</sup>	72.25±0.33 <sup>b</sup>	86.53±0.81 <sup>ab</sup>	22.56±2.01 <sup>abc</sup>	14.54±0.70 <sup>cd</sup>
mc 20% 20 min	63.74±0.95 <sup>abc</sup>	72.65±0.36 <sup>ab</sup>	85.66±1.35 <sup>b</sup>	21.92±1.23 <sup>abc</sup>	13.94±0.66 <sup>de</sup>
mc 20% 30 min	64.40±0.79 <sup>ab</sup>	72.21±0.43 <sup>b</sup>	85.16±0.98 <sup>b</sup>	20.77±1.76 <sup>bc</sup>	14.16±0.18 <sup>cde</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 23 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Temperature (°C)				Enthalpy ( $\Delta H$ ; J/g)
	T <sub>o</sub>	T <sub>p</sub>	T <sub>c</sub>	T <sub>c</sub> -T <sub>o</sub>	
mc 9.6% 0 min	47.19±0.31 <sup>a</sup>	61.03±0.75 <sup>a</sup>	68.59±0.64 <sup>ab</sup>	21.41±0.80 <sup>a</sup>	3.32±0.61 <sup>c</sup>
mc 9.6% 10 min	50.16±0.53 <sup>a</sup>	60.99±0.15 <sup>a</sup>	68.89±0.76 <sup>a</sup>	18.73±1.26 <sup>a</sup>	3.77±0.28 <sup>bc</sup>
mc 9.6% 20 min	44.69±0.62 <sup>a</sup>	59.27±0.15 <sup>abc</sup>	67.99±2.64 <sup>ab</sup>	23.31±2.66 <sup>a</sup>	3.83±0.78 <sup>bc</sup>
mc 9.6% 30 min	48.09±0.85 <sup>a</sup>	60.10±0.50 <sup>abc</sup>	67.56±1.01 <sup>ab</sup>	19.47±1.77 <sup>a</sup>	3.39±0.10 <sup>c</sup>
mc 15% 0 min	45.87±1.77 <sup>a</sup>	59.20±0.09 <sup>abc</sup>	68.00±0.80 <sup>ab</sup>	22.14±2.54 <sup>a</sup>	3.83±0.35 <sup>bc</sup>
mc 15% 10 min	48.37±0.36 <sup>a</sup>	60.12±0.48 <sup>abc</sup>	67.90±0.36 <sup>ab</sup>	19.53±0.01 <sup>a</sup>	2.75±0.39 <sup>c</sup>
mc 15% 20 min	46.62±0.43 <sup>a</sup>	59.27±0.19 <sup>abc</sup>	66.91±0.68 <sup>ab</sup>	20.29±1.03 <sup>a</sup>	3.13±0.01 <sup>c</sup>
mc 15% 30 min	48.76±0.60 <sup>a</sup>	60.63±0.44 <sup>ab</sup>	67.86±0.56 <sup>ab</sup>	19.10±0.41 <sup>a</sup>	3.39±0.07 <sup>c</sup>
mc 20% 0 min	48.40±0.37 <sup>a</sup>	57.97±0.30 <sup>c</sup>	66.57±0.99 <sup>b</sup>	18.16±1.15 <sup>a</sup>	4.85±0.48 <sup>ab</sup>
mc 20% 10 min	49.15±1.27 <sup>a</sup>	58.41±0.33 <sup>bc</sup>	67.92±0.81 <sup>ab</sup>	18.77±2.01 <sup>a</sup>	5.45±0.70 <sup>a</sup>
mc 20% 20 min	44.24±0.95 <sup>a</sup>	60.59±0.36 <sup>ab</sup>	69.01±1.35 <sup>a</sup>	24.79±1.23 <sup>a</sup>	3.04±0.66 <sup>c</sup>
mc 20% 30 min	44.42±0.79 <sup>a</sup>	59.87±0.43 <sup>abc</sup>	68.12±0.98 <sup>ab</sup>	23.69±1.76 <sup>a</sup>	3.93±0.18 <sup>bc</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชันซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับบางส่วนของการเกิดเจลลาทีนในเซชันพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการคั่วมีลักษณะกราฟคล้ายกันโดยจะมีพีคหลัก 1 พีค (ภาพที่ 21) และมีอุณหภูมิต่างๆ และเอนทัลปีในการเกิดรีโทรเกรเดชันไม่แตกต่างกันและแนวโน้มเอนทัลปีโดยมีค่า อุณหภูมิในการเริ่มเกิดพีค ( $T_0$ ) และช่วงอุณหภูมิในการเกิดพีค ( $T_C - T_0$ ) ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการเกิดรีโทรเกรเดชันของทุกตัวอย่าง ยกเว้นสตาร์ชที่ความชื้น 20% ที่ไม่ผ่านการคั่วและป้อนการคั่ว 10 นาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

#### 4.11 ปริมาตรจำเพาะของขนมฝิง

เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 9.6% ที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการคั่ว นาน 10, 20 และ 30 นาที ไปทดสอบการใช้ประโยชน์ในการนำมาเตรียมเป็นขนมฝิงแล้วตรวจสอบคุณลักษณะของขนมฝิงที่ได้ในด้านต่างๆ จากการวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปรรด้วยวิธีการคั่วและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรให้ขนมฝิงที่มีปริมาตรจำเพาะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 24) แสดงถึงการตัดแปรรสตาร์ชมันสำปะหลังโดยวิธีการคั่วไม่ส่งผลต่อการพองตัวหรือการขึ้นฟูของขนมฝิง

ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังผ่านการคั่วที่ความชื้น 15% และ 20% เมื่อนำมาผสมแล้วพบว่าไม่สามารถปั้นเป็นเม็ดทรงกลมสวยได้ โดยสตาร์ชคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 15% ให้ขนมฝิงที่มีลักษณะแบนลง ส่วนสตาร์ชคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ไม่สามารถนำมาปั้นเป็นก้อนได้เลย เมื่อนำมาผสมแล้วพบว่าที่ได้มีลักษณะเหนียว ติดมือ

ตารางที่ 24 ปริมาตรจำเพาะของขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% และระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Specific volume (ml/g)
mc 9.6% 0 min	1.30±0.09 <sup>a</sup>
mc 9.6% 10 min	1.65±0.06 <sup>a</sup>
mc 9.6% 20 min	1.30±0.25 <sup>a</sup>
mc 9.6% 30 min	1.56±0.41 <sup>a</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 4.12 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมฝิงด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring

เมื่อทำการเตรียมขนมฝิงตามที่ได้อธิบายในข้อ 4.11 แล้วนำขนมฝิงที่ได้ไปทำการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้ชิมด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ผ่านโปรแกรมทดสอบทางประสาทสัมผัส (SU Sense, Department of Food Technology, Silpakorn University) โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ ลักษณะปรากฏ (appearance), สี (color), ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture), การละลายในปาก (disintegration in mouth), กลิ่นขณะรับประทาน (flavor), รสชาติ (taste) และความชอบโดยรวม (overall liking) (ตารางที่ 26) โดยได้ใช้ผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน พบว่ามีเพียงคุณลักษณะเดียวที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ คือการละลายในปาก โดยผู้ชิมชอบขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชที่ผ่านการคั่ว 20 นาทีมากที่สุด

#### 4.13 ประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสโดย Texture Analyzer

เมื่อทำการเตรียมขนมฝิงที่ได้อธิบายในข้อ 4.11 แล้วนำขนมฝิงที่ได้มาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) (N) ของขนมฝิง ที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการคั่วมีความแข็งเพิ่มมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการคั่วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยระยะเวลาในการคั่วไม่มีผลต่อความแข็งของขนมฝิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 25 ค่าความแข็ง (Hardness) (N) โดย Texture Analyzer ของขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% และระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Hardness (N)
mc 9.6% 0 min	75.89±14.04 <sup>b</sup>
mc 9.6% 10 min	113.51±14.75 <sup>a</sup>
mc 9.6% 20 min	114.55±11.77 <sup>a</sup>
mc 9.6% 30 min	116.58±11.73 <sup>a</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 26 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ของขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% และระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

Sample	Appearance	Color	Texture	Disintegration in mouth	Flavor	Taste	Overall liking
mc 9.6% 0 min	6.51±1.69 <sup>a</sup>	6.54±1.32 <sup>a</sup>	6.27±1.39 <sup>a</sup>	6.19±1.81 <sup>ab</sup>	6.30±1.63 <sup>a</sup>	6.30±1.56 <sup>a</sup>	6.54±1.52 <sup>a</sup>
mc 9.6% 10 min	6.54±1.54 <sup>a</sup>	6.59±1.28 <sup>a</sup>	6.11±1.24 <sup>a</sup>	6.08±1.28 <sup>ab</sup>	6.46±1.35 <sup>a</sup>	6.49±1.37 <sup>a</sup>	6.38±1.26 <sup>a</sup>
mc 9.6% 20 min	6.54±1.43 <sup>a</sup>	6.54±1.33 <sup>a</sup>	6.00±1.58 <sup>a</sup>	6.27±1.45 <sup>b</sup>	6.14±1.38 <sup>a</sup>	6.54±1.35 <sup>a</sup>	6.43±1.37 <sup>a</sup>
mc 9.6% 30 min	6.35±1.46 <sup>a</sup>	6.32±1.25 <sup>a</sup>	5.95±1.29 <sup>a</sup>	5.62±1.42 <sup>a</sup>	6.16±1.48 <sup>a</sup>	6.22±1.25 <sup>a</sup>	6.24±1.14 <sup>a</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## บทที่ 5

### สรุป

สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการคั่วมีสมบัติในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้  
 ลักษณะทางสัณฐานของสตาร์ชตัดแปรด้วยวิธีการคั่วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชยังคงเดิม แต่การตัดแปรสตาร์ชด้วยการคั่วจะทำให้เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น และเมื่อนำเม็ดสตาร์ชไปส่องกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์พบว่าเม็ดสตาร์ชยังคงมีไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) ของโครงสร้างผลึกอยู่

ลักษณะโครงสร้างผลึกจาก x-ray diffractometer ของสตาร์ชมันสำปะหลังเป็นโครงสร้างสตาร์ชแบบ A และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างเมื่อผ่านการตัดแปร

ดัชนีความขาวของสตาร์ชส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การคั่วสตาร์ชที่ความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

อุณหภูมิน้ำที่สูงขึ้นจะทำให้สตาร์ชมีกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายที่เพิ่มมากขึ้น การตัดแปรสตาร์ชด้วยการคั่วอาจทำให้ความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัวของสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าลดลง เพิ่มขึ้น หรือไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาในการคั่ว

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชตัดแปรเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง rapid visco analyser (RVA) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของสตาร์ชตัดแปรส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สตาร์ชตัดแปรที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงขึ้น แต่สตาร์ชคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 20% นาน 30 นาที มีความหนืดสูงสุดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การคั่วสตาร์ชนาน 30 นาทีที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ทำให้ค่าเบรกดาวน์ (break down) เพิ่มขึ้น แต่ที่ความชื้นเริ่มต้น 15 และ 20% ทำให้ค่าเบรกดาวน์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สตาร์ชคั่วมีค่าเซ็ทแบค (setback) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นสตาร์ชคั่วที่เริ่มต้น 20% นาน 30 นาที มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชตัดแปรด้วย differential scanning calorimeter (DSC) พบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดพิก (onset temperature,  $T_0$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของพิก (peak temperature,  $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้ายในการ



เกิดฟีด (conclusion temperature,  $T_C$ ) ช่วงอุณหภูมิในการเกิดฟีด ( $T_C - T_O$ ) และเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยการเพิ่มระยะเวลาการคั่วทำให้ค่า  $T_C - T_O$  และ  $\Delta H$  ในการเกิดเจลลาที่ในเซชันมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า  $T_O$  และ  $T_C - T_O$  ในการเกิดรีโทรเกรเดชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% มาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมฝิง พบว่าได้คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นคุณลักษณะในด้านการละลายในปากที่ผู้ชิมชอบขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชที่ผ่านการคั่ว 20 นาทีมากที่สุด และเมื่อนำขนมฝิงไปทดสอบความแข็งของเนื้อสัมผัสพบว่าขนมฝิงที่ทำจากสตาร์ชดัดแปรด้วยการคั่วทุกตัวอย่างมีความแข็งมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการคั่วอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นการคั่วสตาร์ชจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการดัดแปรสตาร์ชเชิงอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนต่ำ ไม่ใช่สารเคมี ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ได้สตาร์ชดัดแปรที่มีสมบัติทางเคมีกายภาพและการนำไปประยุกต์ใช้ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น



## รายการอ้างอิง

- Abraham, E. T. (1993). Stabilization of paste viscosity of cassava starch by heat moisture treatment. *Starch-Stärke*, 45(4), 131-135.
- Adebowale, K. O., & Lawal, O. S. (2003). Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. *Food Hydrocolloids*, 17(3), 265-272.
- Anderson, A. K., & Guraya, H. S. (2006). Effects of microwave heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches. *Food Chemistry*, 97(2), 318-323.
- AOAC. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International*: AOAC international.
- Biliaderis, C. G., Maurice, T. J., & Vose, J. R. (1980). Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*, 45(6), 1669-1674.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International journal of biological macromolecules*, 23(2), 85-112.
- Cheetham, N. W. H., & Tao, L. (1998). Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. *Carbohydrate Polymers*, 36(4), 277-284.
- Collado, L. S., & Corke, H. (1999). Heat-moisture treatment effects on sweetpotato starches differing in amylose content. *Food Chemistry*, 65(3), 339-346.
- Considine, D. M. (2012). *Foods and food production encyclopedia*: Springer Science & Business Media.
- Cooke, D., & Gidley, M. J. (1992). Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. *Carbohydrate Research*, 227, 103-112.
- Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydrate Polymers*, 49(4), 425-437.
- Hibi, Y., Kitamura, S., & Kuge, T. (1990). Effect of lipids on the retrogradation of cooked

- rice. *Cereal Chem*, 67(1), 7-10.
- Hizukuri, S. (1985). *Relationship Between the Distribution of the Chain Length of Amylopectin and the Crystalline Structure of Starch Granules* (Vol. 141).
- Hizukuri, S. (1986). Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*, 147(2), 342-347.
- Hizukuri, S., Kozuma, T., Yoshida, H., Abe, J., Takahashi, K., Yamamoto, M., & Nakamura, N. (1996). Properties of *Flavobacterium odoratum* KU Isoamylase. *Starch - Stärke*, 48(7-8), 295-300. doi:10.1002/star.19960480713
- Hoover, R., & Manuel, H. (1996). The Effect of Heat-Moisture Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Normal Maize, Waxy Maize, Dull Waxy Maize and Amylomaize V Starches. *Journal of Cereal Science*, 23(2), 153-162.
- Hoover, R., & Vasanthan, T. (1994). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal, legume, and tuber starches. *Carbohydrate Research*, 252, 33-53.
- Horndok, R., & Noomhorm, A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. *LWT - Food Science and Technology*, 40(10), 1723-1731.
- Jacobs, H., & Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. *Journal of agricultural and food chemistry*, 46(8), 2895-2905.
- Kulp, K., & Lorenz, K. (1981). Heat-moisture treatment of starches. I. Physicochemical properties. *Cereal Chem*, 58(1), 46-48.
- Lawal, O. S. (2005). Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 37(5), 268-277.
- Light, J. M. (1990). Modified food starches: Why, what, where, and how. *Cereal Foods World*, 35(11), 1081-1092.
- Lim, S. T., Chang, E. H., & Chung, H. J. (2001). Thermal transition characteristics of heat-moisture treated corn and potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 46(2), 107-115.

- Lu, S., Chen, C.-Y., & Lii, C. (1996). Gel-chromatography fractionation and thermal characterization of rice starch affected by hydrothermal treatment. *Cereal chemistry*, 73(1), 5-11.
- Lu, S., Chen, C.-Y., & Lii, C. (1996). Gel-chromatography fractionation and thermal characterization of rice starch affected by hydrothermal treatment. *Cereal Chemistry*, 73(1), 5-11.
- Matsunaga, K., Kawasaki, S., & Takeda, Y. (2003). Influence of physicochemical properties of starch on crispness of tempura fried batter. *Cereal chemistry*, 80(3), 339-345.
- Miyazaki, M., & Morita, N. (2005). Effect of heat-moisture treated maize starch on the properties of dough and bread. *Food Research International*, 38(4), 369-376.
- Olayinka, O. O., Adebowale, K. O., & Olu-Owolabi, B. I. (2008). Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch. *Food Hydrocolloids*, 22(2), 225-230.
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers*, 61(2), 211-221.
- Schoch, T. (1964). Swelling Power and Solubility of. *Methods in Carbohydrate Chemistry; Whistler, RL, Smith, RJ and Wolfrom, ML eds*, 106-108.
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, 21(1), 1-22.
- Stephen, A. M. (1995). *Food Polysaccharides and Their Applications*: Taylor & Francis.
- Swinkels, J. (1985). Composition and properties of commercial native starches. *Starch - Stärke*, 37(1), 1-5.
- Takaya, T., Sano, C., & Nishinari, K. (2000). Thermal studies on the gelatinisation and retrogradation of heat-moisture treated starch. *Carbohydrate Polymers*, 41(1), 97-100.
- Vermeulen, R., Goderis, B., & Delcour, J. A. (2006). An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 64(2), 364-375.
- Walker, D. (1978). Preparation of geological samples for scanning electron microscopy. *Scanning Electron Microscopy*, 1, 185-192.

- Wurzburg, O. B. (1986). *Modified starches-properties and uses*: CRC Press Inc.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2002). Composition and functional properties of rice. *International journal of food science & technology*, 37(8), 849-868.
- Zobel, H. F. (1988). Starch Crystal Transformations and Their Industrial Importance. *Starch - Stärke*, 40(1), 1-7.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- พิณทิพย์ รัสมิกาภรณ์. (2547). การตัดแปรรูปข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. . ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- อโนชา สุขสมบูรณ์, พัลลภ ไผพงศ์, กรกช หล่อโลหการ, กิตติญาณ์ เขียวเชิงค้ำ, มนต์ราม อินทศิริ, & อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). การใช้ประโยชน์จากสตาร์ชข้าว. งานวิจัยด้านพืช. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. : คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.





ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก

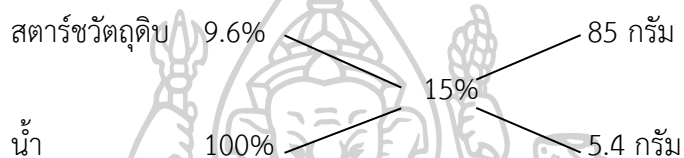
## วิธีการคำนวณในการปรับปริมาณความชื้นของสตาร์ช

การคำนวณปริมาณน้ำในการเติมลงสตาร์ชเพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ

## 1. ความชื้นเป้าหมาย 15% (wet basis)

1. สตาร์ชมันสำปะหลังวัตถุดิบมีความชื้น 9.6 % (wet basis): ดังนั้นสตาร์ช 100 กรัม มี dry solid อยู่ 90.4 กรัม (100-9.6 กรัม)

2. หาปริมาณน้ำที่ต้องเติม



3. ถ้าต้องการ dry solid 90.4 กรัม (85+5.4 กรัม) ต้องใช้สตาร์ชวัตถุดิบ 100 กรัม  
ถ้าต้องการ dry solid 1,500 กรัม ต้องใช้สตาร์ชวัตถุดิบ  $(1,500 \times 100) / 90.4 = 1,659.29$  กรัม

4. ถ้าสตาร์ชวัตถุดิบ 85 กรัม ต้องใช้น้ำผสม 5.4 กรัม

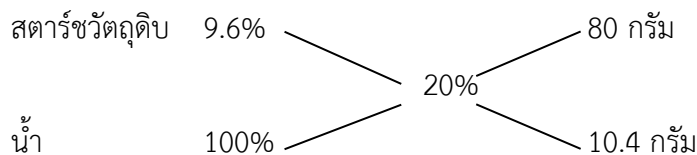
ถ้าสตาร์ชวัตถุดิบ 1,659.29 กรัม ต้องใช้น้ำผสม  $(1,659.29 \times 5.4) / 85 = 105.41$  กรัม

5. ดังนั้นต้องชั่งสตาร์ช 1,659.29 กรัม มาเติมน้ำโดยการพ่นฝอย 105.41 กรัม จะได้สตาร์ชที่มีความชื้น 15% รวม 1,764.70 กรัม (wet basis)

## 2. ความชื้นเป้าหมาย 20% (wet basis)

1. สตาร์ชมันสำปะหลังวัตถุดิบมีความชื้น 9.6 % (wet basis): ดังนั้นสตาร์ช 100 กรัม มี dry solid อยู่ 90.4 กรัม (100-9.6 กรัม)

2. หาปริมาณน้ำที่ต้องเติม



3. ถ้าต้องการ dry solid 90.4 กรัม (80+10.4 กรัม) ต้องใช้สตาร์ชวัตถุดิบ 100 กรัม

ถ้าต้องการ dry solid 1,500 กรัม ต้องใช้สตาร์ชวัตถุดิบ  $(1,500 \times 100) / 90.4 = 1,659.29$  กรัม

4. ถ้าสตาร์ชวัตถุดิบ 80 กรัม ต้องใช้น้ำผสม 10.4 กรัม

ถ้าสตาร์ชวัตถุดิบ 1,659.29 กรัม ต้องใช้น้ำผสม  $(1,659.29 \times 10.4) / 80 = 215.71$  กรัม

5. ดังนั้นต้องชั่งสตาร์ช 1,659.29 กรัม มาเติมน้ำโดยการพ่นฝอย 215.71 กรัม จะได้สตาร์ชที่มีความชื้น 20% รวม 1,875 กรัม (wet basis)

### 3. การคำนวณน้ำหนักสตาร์ชมันสำปะหลังที่นำมาตัดแปรด้วยวิธีคั่วเมื่อต้องการสตาร์ชมันสำปะหลัง 300 กรัม (dry basis)

1. สตาร์ชความชื้น 9.5% คือ ใน 100 กรัม มี dry solid อยู่ 90.4 กรัม
2. ถ้าต้องการ dry solid 90.4 กรัม ต้องชั่งสตาร์ช 100 กรัม
3. ถ้าต้องการ dry solid 300 กรัม ต้องชั่งสตาร์ช  $(300 \times 100) / 90.4 = 331.5$  กรัม



## ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์

### 1. การวัดปริมาณความชื้น

ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยการอบในตู้อบลมร้อน (AOAC, 2005)

1. โดยยอบด้วยอลูมิเนียมในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) นำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมที่อบแห้งแล้ว และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
3. นำถ้วยอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. นำไปชั่งน้ำหนัก อบซ้ำจนได้น้ำหนักคงที่ซึ่งค่าที่ได้จะแตกต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิกรัม บันทึกผลนำไปคำนวณ

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

### 2. การตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (Walker, 1978)

1. นำสตาร์ชมันสำปะหลังมาโรยให้กระจายตัวลงบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่งอลูมิเนียม (aluminum stab)
2. นำไปเคลือบทองโดยใช้ sputter coater โดยใช้ความดันในเครื่องต่ำกว่า 0.1 มิลลิบาร์ ใช้ระยะเวลาการเคลือบประมาณ 160 วินาที
3. วางแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบทองแล้ว ลงในช่องสำหรับใส่แท่งอลูมิเนียมภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. นำไปถ่ายภาพขยายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 500 และ 3,500 เท่าตามลำดับ

### 3. ไบริฟริงเจนส์

1. ทำการตรวจสอบลักษณะกาบาทไบริฟริงเจนส์ (birefringence) ของเม็ดสตาร์ช ดังนี้ เติมน้ำสตาร์ชความเข้มข้น 1 % (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก)

2. หยดน้ำสสารลงบนแผ่นสไลด์ 1-2 หยด และปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ นำแผ่นสไลด์ที่ได้มาวางภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (light microscope) ปรับระยะโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำที่สุด จนมองเห็นอนุภาคของเม็ดสสารชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 40 เท่า ปรับความละเอียดของภาพโดยใช้ปุ่มปรับภาพละเอียด

3. นำเลนส์โพลาไรซ์วางบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ หมุนเลนส์โพลาไรซ์ให้ได้สีพื้นหลังของภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะไบรีฟริงเจนส์ของเม็ดสสาร จากนั้นปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสสารภายใต้แสงโพลาไรซ์

#### 4. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสสารด้วยเครื่อง X-ray diffractometer การเตรียมสสารก่อนการวิเคราะห์ (Cheetham & Tao, 1998)

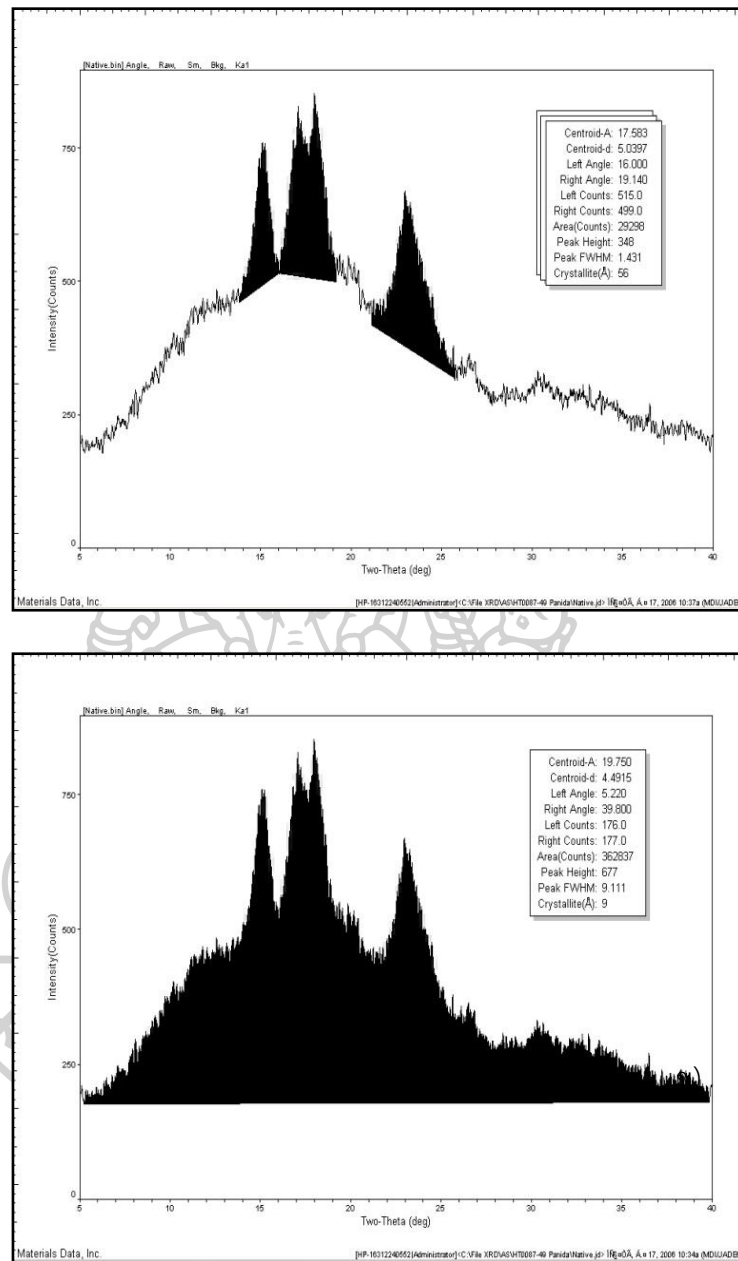
1. นำสสารทั้ง 3 ซ้ำ มาผสมกัน โดยซ้ละ 5 กรัม ใส่ถุงปิดสนิท ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ชั่งสสารประมาณ 7 กรัมใส่ลงในจานแก้ว (petri dish) และเกลี่ยสสารให้ทั่ว
3. นำจานแก้วที่มีสสารวางเรียงในโถดูดความชื้น (desiccator) ที่มีการเติมน้ำกลั่นด้านล่าง โถ ปิดฝาโถแล้วเก็บไว้ นาน 24 ชั่วโมง
4. ให้ตัวอย่างสสารที่จะนำไปวิเคราะห์มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน

#### การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

1. บรรจุสสารที่ปรับความชื้นแล้วลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ
2. นำตัวอย่างใส่ลงในเครื่อง โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ คือใช้เป้าหมาย (target) เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ สแกนที่มุมหักเหในช่วง  $5.00$  ถึง  $40.00^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $0.02^\circ$  2 ต่อวินาที
3. บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ และคำนวณค่าความเป็นผลึก (relative crystallinity) จากสมการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Cheetham and Tao (1998) ดังนี้คือ

$$\text{ค่าความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค} \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม}}$$

ค่าของพื้นที่ใต้พีค (A) และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B) สามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง X-ray diffractometer

ก) แสดงพื้นที่ใต้พีค (A) ข) แสดงพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B)

ที่มา: (Cheetham & Tao, 1998)

## 5. ค่าดัชนีความขาว

นำตัวอย่างสตร้าชมาวัดค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) ดังนี้

1. นำตัวอย่างสตร้าชมันสำปะหลังบรรจุในภาชนะใสทรงกระบอกสำหรับวัดสีของเครื่องวัดสี (colorimeter) (Color-view™ Spectrophotometer, Model 9000, USA)
2. ทำการวัดสีตัวอย่างสตร้าชโดยใช้ D65 10° เป็นแหล่งกำเนิดแสง และบันทึกค่าของสีที่วัดในระบบ Hunter เป็นค่า L\*, a\* และ b\* โดยค่า L\* หมายถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) +a\* หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ -a\* หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว +b\* หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ -b\* หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน
3. คำนวณค่าดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI)
4. ค่าดัชนีความขาว =  $100 - [(100-L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$

## 6. ความสามารถในการดูดซับน้ำ

ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ คัดแปลงจาก (Anderson & Guraya, 2006)

1. โดยชั่งตัวอย่างสตร้าช 0.3-0.5 กรัม (dry basis) เติมน้ำกลั่น 15 ml แช่ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 30 °C
2. กวนเขย่าตลอดเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วย เครื่องเหวี่ยงความเร็วรอบ 4,600 รอบ/นาที นาน 15 นาที
3. ดูดน้ำใส่ตลับน้ำหนัก moisture can ที่ทราบน้ำหนักแล้วจึงชั่งน้ำหนัก และนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C อบจนกระทั่งแห้ง น้ำหนักคงที่ นำไปเก็บไว้ใน desiccator ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก
4. ส่วนสตร้าชเปียกที่อยู่ในหลอดนำไปชั่งน้ำหนักทั้งหมด แล้วหักกลับน้ำหนักหลอดนำไปทำการคำนวณผลการทดลอง

## การคำนวณ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนสตร้าชหลังการปั่นเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตร้าชแห้งเริ่มต้น}}$$



## 7. ความสามารถการละลายและกำลังการพองตัว

ทำการทดสอบความสามารถการละลายและกำลังการพองตัว ดัดแปลงจาก (Anderson & Guraya, 2006)

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.3 – 0.5 กรัม (dry basis) นำตัวอย่างสตาร์ชใส่ในหลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร (ชั่งน้ำหนักหลอด เหวี่ยงให้ทราบน้ำหนักแน่นอนด้วย) เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร
2. แช่ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส กวนเขย่าตลอดเวลานาน 30 นาที
3. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยง (centrifuge) ความเร็วรอบ 4,600 rpm (รอบ/นาที) นาน 15 นาที
4. ดูดของเหลวใสตอนบนใส่ถ้วยอลูมิเนียม (moisture can) ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน (ต้องนำ moisture can ไปอบแห้งแล้วนำมาใส่โถดูดความชื้นหรือ desiccators ให้เย็น) แล้วจึงชั่งน้ำหนัก โดยดูดของเหลวส่วนใสให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อบจนกระทั่งแห้ง (น้ำหนักคงที่)
5. จัดบันทึกน้ำหนักไว้ ลบน้ำหนักของ moisture can ออกเป็นค่าน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ
6. ส่วนสตาร์ชเปียกที่อยู่ในหลอดนำไปชั่งน้ำหนักทั้งหมดแล้วหักลบน้ำหนักหลอด ออกเป็นน้ำหนักสตาร์ชที่พองตัวแล้ว ทำการคำนวณผลการทดลอง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชแห้งเริ่มต้น}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชแห้งเริ่มต้น} \times (100 - \text{เปอร์เซ็นต์การละลาย})}$$

## 8. ความหนืด

วิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง rapid visco analyser (RVA) (Schoch, 1964) ดังนี้

1. นำตัวอย่างสตาร์ชไปหาปริมาณความชื้นก่อนการวิเคราะห์
2. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 2 กรัม (dry basis) ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียม เติมน้ำกลั่นจนได้น้ำหนัก 25 กรัม โดยคำนวณปริมาณสตาร์ชและน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามร้อยละความชื้นของตัวอย่าง ตามสมการ

$$\text{ปริมาณสตาร์ช } S = \frac{2 \times 100}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})}$$

$$\text{ปริมาณน้ำ } W = 25 - S$$

3. ใส่ใบพัดกวน (paddle) ลงในภาชนะอะลูมิเนียม ยกใบพัดขึ้น-ลง 10 ครั้งให้ตัวอย่างสตาร์ชและน้ำกลั่นผสมกันดี ไม่มีการเกาะกันเป็นก้อน
4. ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามโปรแกรม STD1 ดังนี้
  - เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 960 รอบ/นาที
  - เวลา 10 วินาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที
  - เวลา 1 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที เริ่มให้ความร้อน
  - เวลา 4 วินาที 42 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที จนถึง
  - เวลา 7 วินาที 12 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และเริ่มให้ความเย็น
  - เวลา 11 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที จนถึง
  - เวลา 13 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที
5. ผลที่ได้คือค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำความเย็น (trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) การคืนตัว (setback) และอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature)

## 9. เนื้อสัมผัสของเจล

การทดสอบค่าแรงกด (compressive test) ของเจลสตาร์ชสุกที่ได้ หลังจากผ่านการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจาก (Saartrat et al., 2005)

1. นำเจลสตาร์ชที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน
2. นำเจลมาวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) และหัววัดรูปทรงกระบอกขนาด 50 มิลลิเมตร
3. เลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ TPA แล้วให้เครื่องทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม
  - mode: measure force in compression
  - option: return to start
  - pre-test speed : 1.5 mm/sec
  - test speed : 2.0 mm/sec
  - post-test speed: 2.0 mm/sec
  - distance: 20 mm, trigger type: 5 g

## 10. สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลที่โนเซชันและรีโทรเกรดชันด้วย

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของการเกิดเจลที่โนเซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ตามวิธีการดัดแปลงของ (กล้าณรงค์ ศรีรอด & เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 9-10 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำร้อยละ 70 ของน้ำหนักทั้งหมดโดยใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็ก (microsyring) ใส่ลงในถ้วยสเตนเลส (stainless steel pan)
2. ปิดฝาแล้วเก็บไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
3. นำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลที่โนเซชันโดยเครื่อง DSC โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส คงไว้ 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หาค่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่โนเซชัน ( $T_O$ ,  $T_P$ ,  $T_C$ ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลที่โนเซชัน ( $\Delta H$ ; J/g)
4. นำถ้วยตัวอย่างที่วิเคราะห์แล้วเก็บไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
5. นำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดรีโทรเกรดชันโดยเครื่อง DSC โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส คงไว้ 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 องศาเซลเซียสโดย

ใช้อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หาค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ( $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ( $\Delta H$ ; J/g)

### 11. ปริมาตรจำเพาะของขนมผิง

วัดปริมาตรจำเพาะของขนมผิงด้วยการแทนที่เมล็ดงาขาว ตัดแปลงจากวิธี โดย (Miyazaki & Morita, 2005) โดยวางขนมผิงลงบนภาชนะ 5 ชั้น จากนั้นใส่งาขาวจนเต็ม ทำการชั่งน้ำหนักแล้วนำไปคำนวณ

ปริมาตรจำเพาะ (มิลลิตร/กรัม) = ปริมาตรของผลิตภัณฑ์/น้ำหนักของผลิตภัณฑ์

### 12. การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมผิงด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring

การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมผิงด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ได้ใช้โปรแกรมทดสอบทางประสาทสัมผัส (SU Sense, Department of Food technology, Silpakorn university) โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ ลักษณะปรากฏ (appearance), สี (color), ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture), การละลายในปาก (disintegration in mouth), กลิ่นขณะรับประทาน (flavor), รสชาติ (taste) และความชอบโดยรวม (overall liking) โดยได้ใช้ผู้ชิมที่ไม่ได้ฝึกฝนจำนวน 50 คน



## แบบทดสอบวิธี 9 point-hedonic scoring

## ผลิตภัณฑ์ขนมผิง

ชื่อ.....วันที่.....ชุดที่.....A.....

**คำชี้แจง** กรุณาชิมตัวอย่างตามลำดับที่จากซ้ายไปขวา แล้วให้คะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดให้

1 = ไม่ชอบมากที่สุด

2 = ไม่ชอบมาก

3 = ไม่ชอบปานกลาง

4 = ไม่ชอบเล็กน้อย

5 = เฉยๆ

6 = ชอบเล็กน้อย

7 = ชอบปานกลาง

8 = ชอบมาก

9 = ชอบมากที่สุด

และกรุณาบ้วนปากด้วยน้ำเปล่าก่อนชิมตัวอย่างถัดไปทุกครั้ง

	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง
ลักษณะปรากฏ	.....	.....	.....	.....
สี	.....	.....	.....	.....
ลักษณะเนื้อสัมผัส	.....	.....	.....	.....
การละลายในปาก	.....	.....	.....	.....
กลิ่นขณะรับประทาน	.....	.....	.....	.....
รสชาติ	.....	.....	.....	.....
ความชอบโดยรวม	.....	.....	.....	.....

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

ขอบคุณค่ะ

### 13. การตรวจสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมปัง

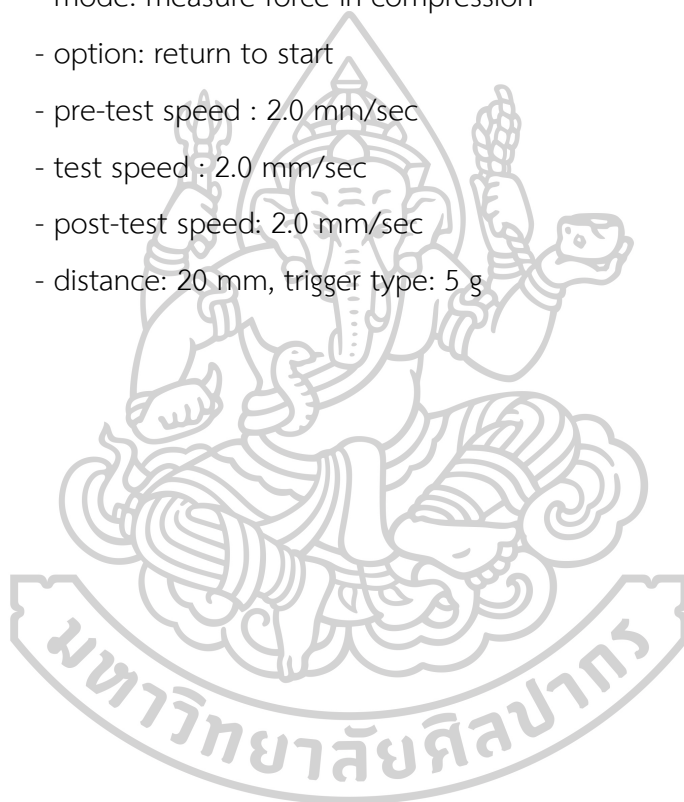
การตรวจสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมปังเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจาก (Saartrat et al., 2005)

1. นำขนมปังมาวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) และหัววัดรูปทรงกระบอกขนาด 50 มิลลิเมตร โดยทำการวัด 10 ครั้ง

3. เลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ compression แล้วให้เครื่องทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์

ควบคุม

- mode: measure force in compression
- option: return to start
- pre-test speed : 2.0 mm/sec
- test speed : 2.0 mm/sec
- post-test speed: 2.0 mm/sec
- distance: 20 mm, trigger type: 5 g





ภาคผนวก ค  
ผลการทดลอง

ตารางที่ 27 อุณหภูมิทุกๆ 2 นาทีของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ตัดแปรด้วยวิธีการคั่ว

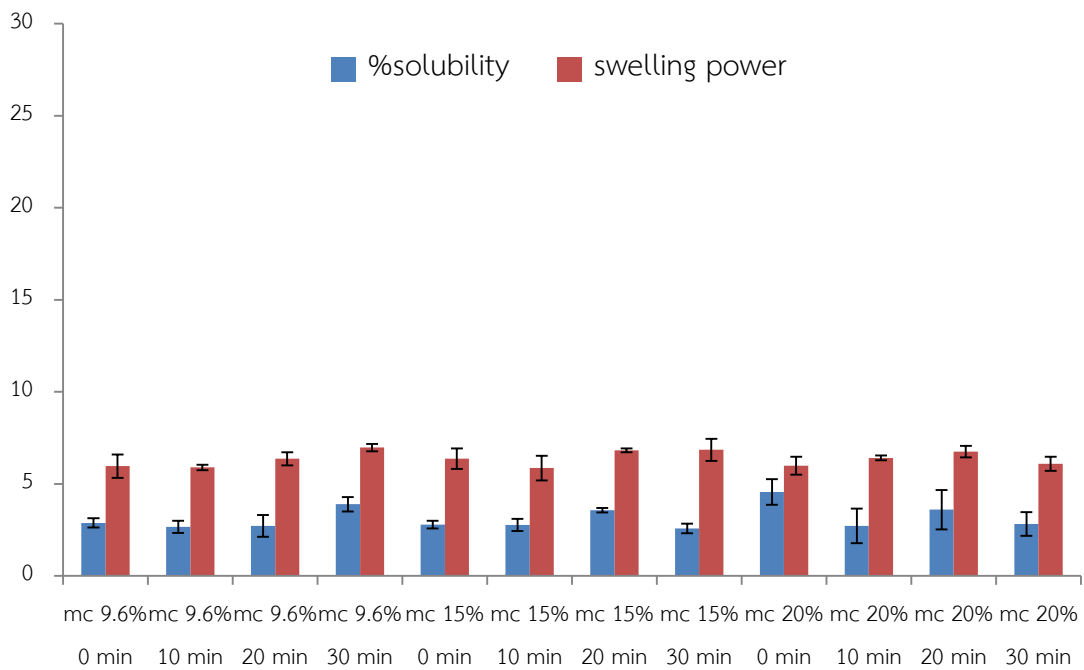
Heating time	Sample	Starch Temperature (°C)		
		mc 9.6%	mc 15%	mc 20%
0		32.2	32.2	32.2
2		49.0	48.2	51.3
4		55.8	54.6	56.3
6		57.4	61.1	62.9
8		59.4	65.2	66.6
10		60.4	68.0	68.8
12		61.7	72.5	71.5
14		70.1	73.7	76.0
16		72.7	75.2	80.1
18		76.9	76.7	84.6
20		77.1	79.0	87.6
22		78.6	81.1	90.5
24		79.1	82.4	91.4
26		83.0	84.0	92.0
28		85.6	85.7	93.4
30		89.4	91.0	95.9

ตารางที่ 28 ความชื้นของสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการคั่ว

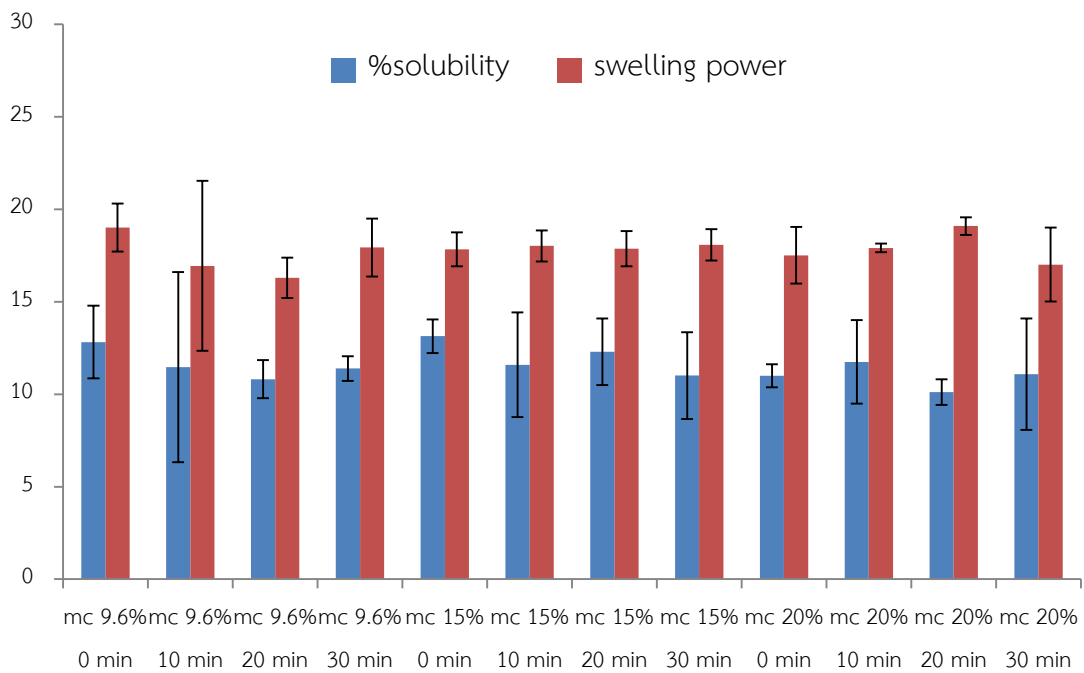
Sample	Moisture Content (%)
mc 9.6% 0 min	9.6±0.9 <sup>d</sup>
mc 9.6% 10 min	6.6±0.3 <sup>f</sup>
mc 9.6% 20 min	4.3±0.3 <sup>h</sup>
mc 9.6% 30 min	3.5±0.5 <sup>h</sup>
mc 15% 0 min	15.4±0.6 <sup>b</sup>
mc 15% 10 min	11.3±0.8 <sup>c</sup>
mc 15% 20 min	7.9±0.5 <sup>e</sup>
mc 15% 30 min	5.7±0.6 <sup>g</sup>
mc 20% 0 min	19.7±0.6 <sup>a</sup>
mc 20% 10 min	15.3±0.6 <sup>b</sup>
mc 20% 20 min	10.9±0.5 <sup>c</sup>
mc 20% 30 min	8.7±0.2 <sup>e</sup>

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

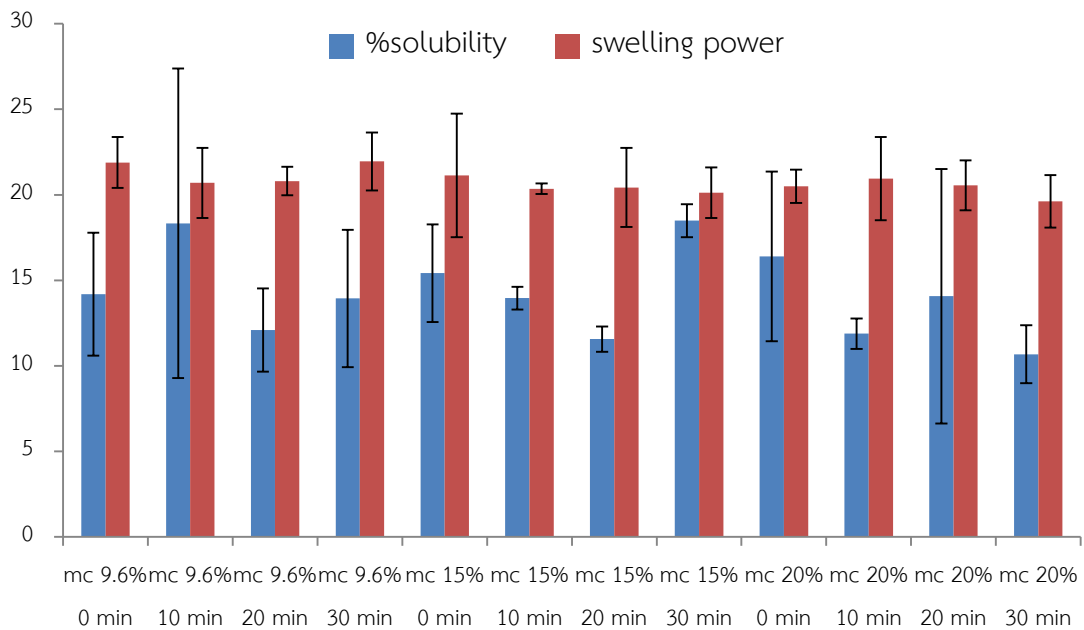




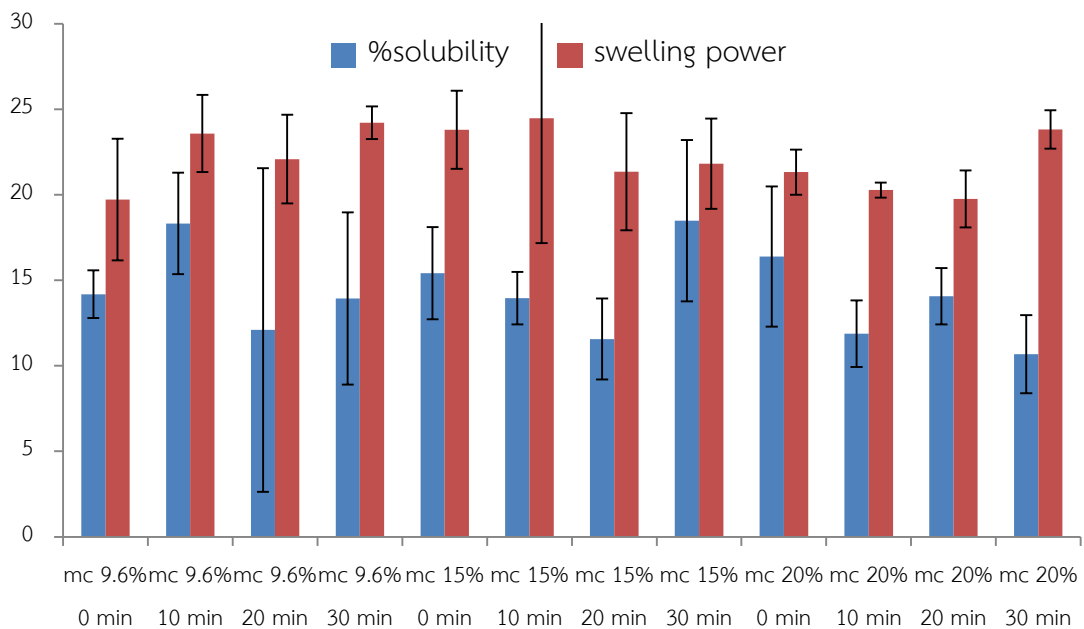
ภาพที่ 23 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสของสตาร์ซมันส์สำหรับก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



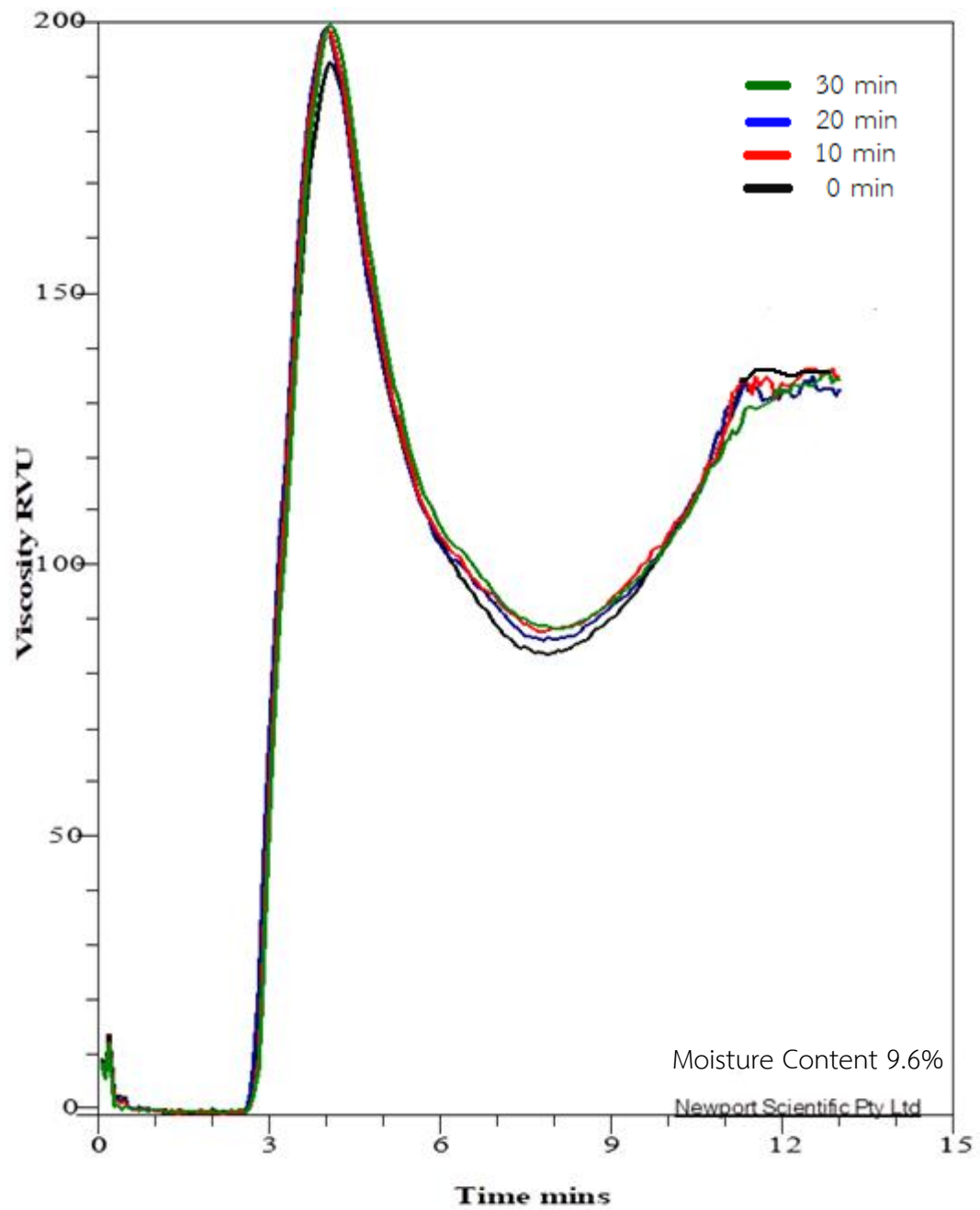
ภาพที่ 24 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของสตาร์ซมันส์สำหรับก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



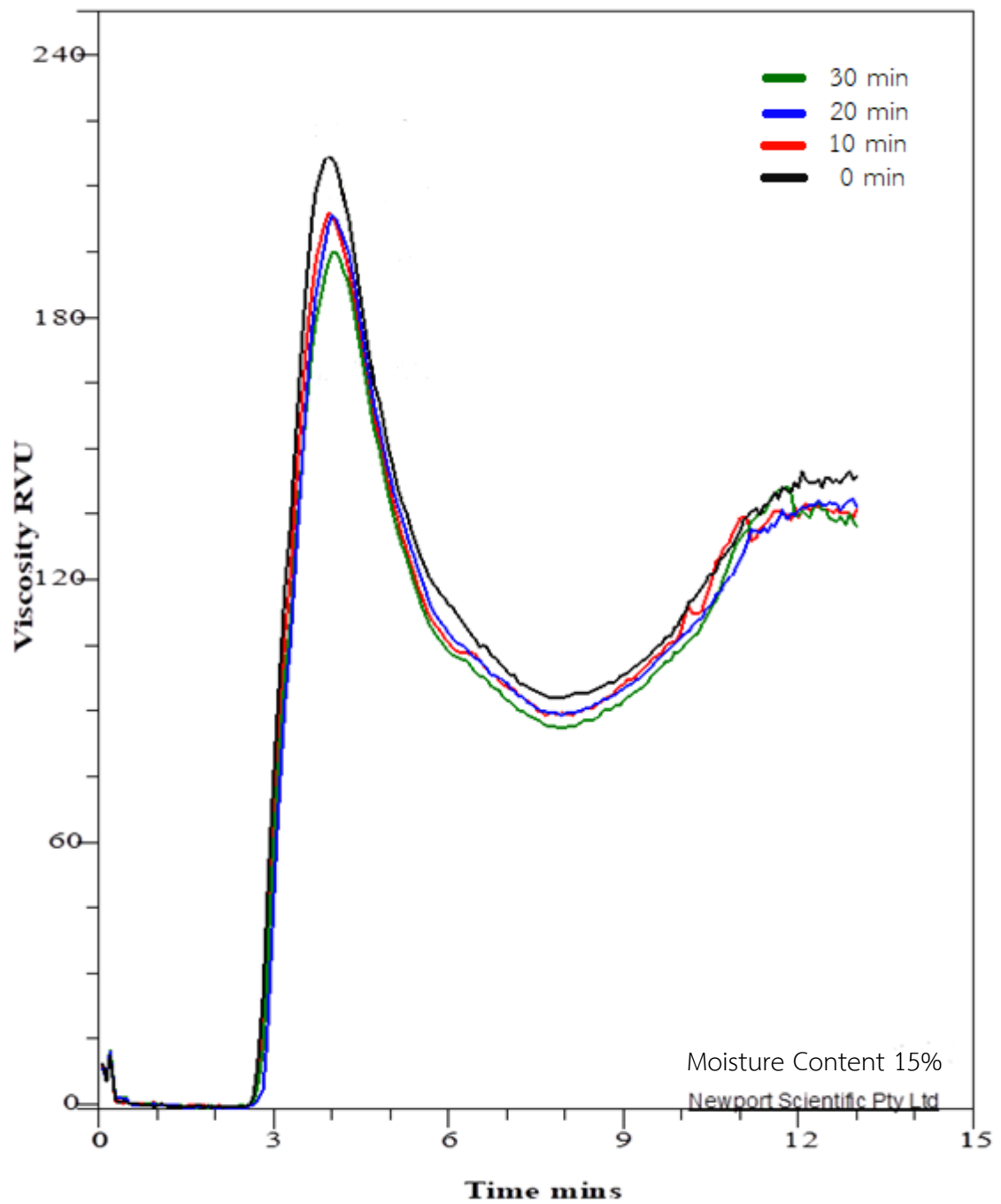
ภาพที่ 25 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



ภาพที่ 26 ความสามารถในการละลาย (%) และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของ สตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

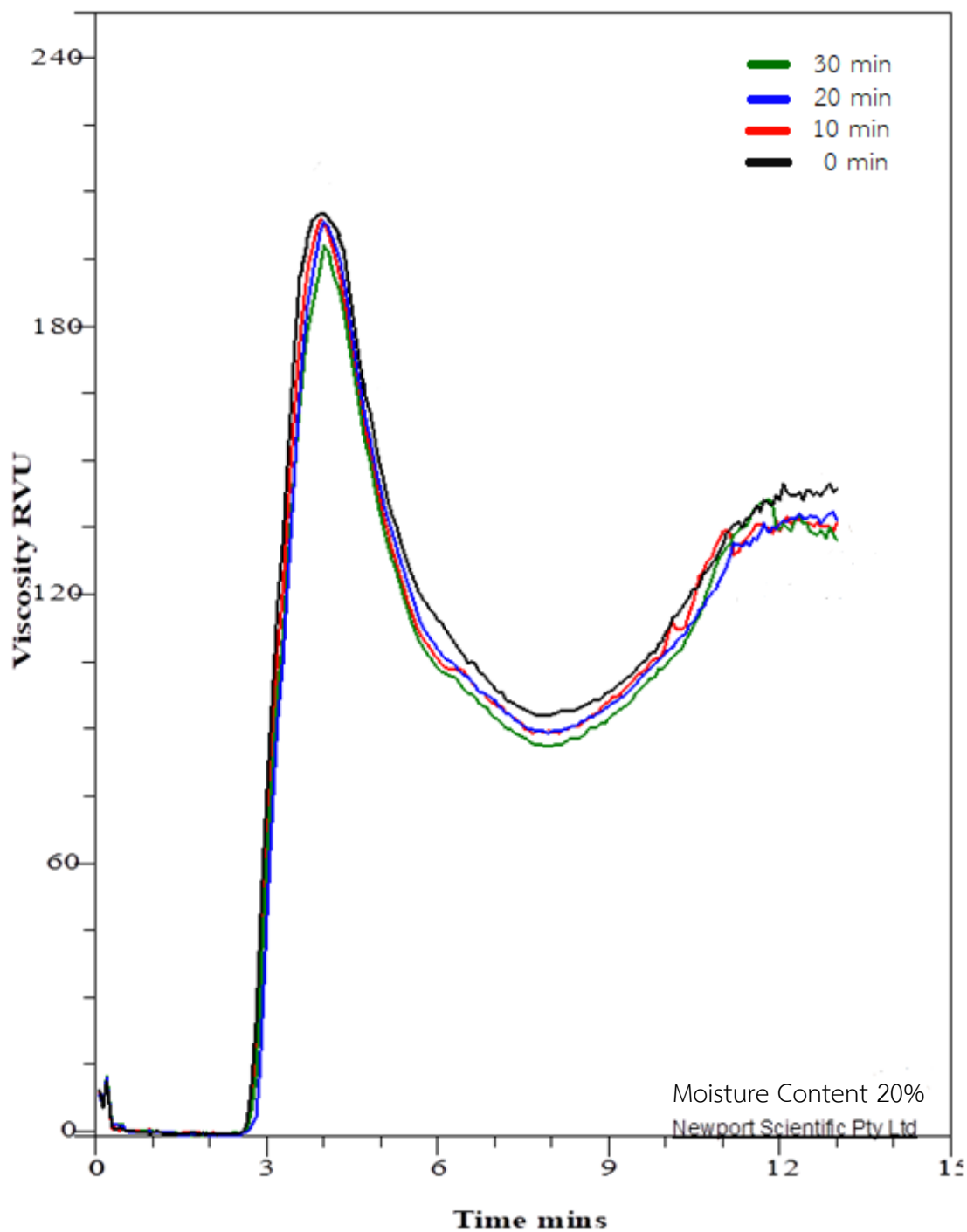


ภาพที่ 27 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 9.6% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน



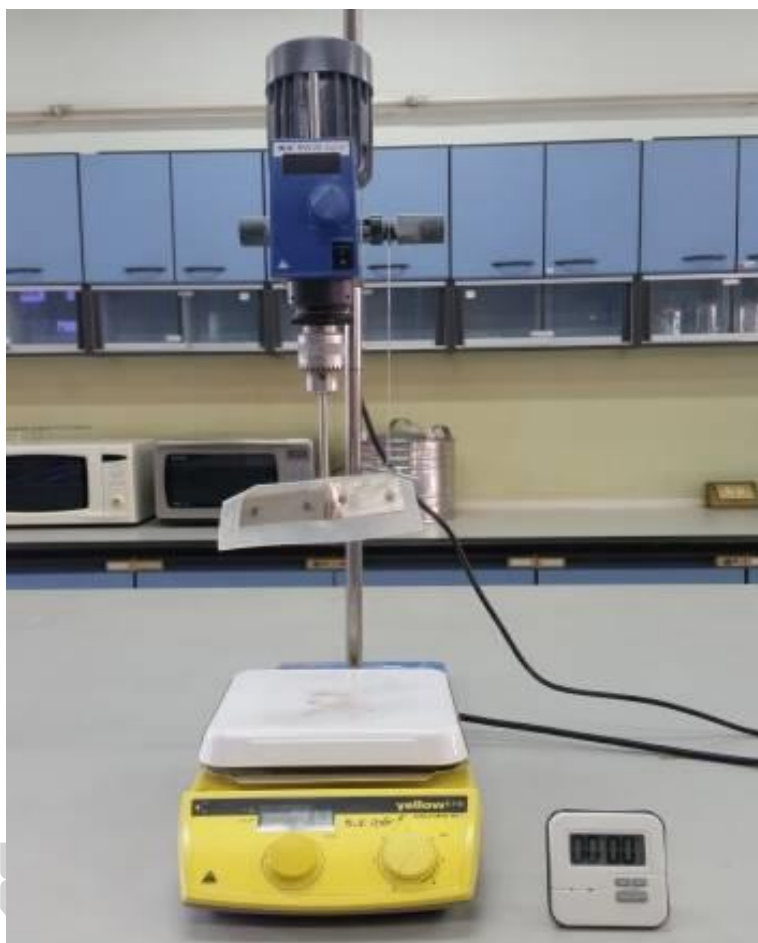
ภาพที่ 28 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 15% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน





ภาพที่ 29 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ไขมันสำปะหลังก่อนและหลังการคั่วที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ในระยะเวลาคั่วแตกต่างกัน

ภาคผนวก ง  
วัสดุอุปกรณ์ในการตัดแปรรสตาซ์ด้วยการคั่ว



ภาพที่ 30 วัสดุอุปกรณ์ในการตัดแปรรสตาซ์มันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่ว



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เขมจิราณัฐ ชัชวาลย์
วัน เดือน ปี เกิด	26 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด	เชียงราย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) เทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	หอพักเบญจรงค์ 81/1 ถ.ราชมรรคา ต.สนามจันทร์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	เขมจิราณัฐ ชัชวาลย์, เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 2560. การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการคั่วในภาชนะแบบเปิด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 3, 4 เมษายน 2560, ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่. หน้า 219-227

