

ผลของปริมาณความชื้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อการ
เกิดครอสลิงค์ สมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชมันสำปะหลัง
ดัดแปรโดยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรักชัน



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
กรกฎาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “ผลของปริมาณความชื้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อ
ระดับการเกิดครอสลิงค์ สมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร
โดยกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน”

ของนางสาวคณารักษ์ ทีบทอง

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาภัสรา แสงนาค)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา รุตรีตนมงคล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ศศิวิมล จิตรากร)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพร กงบังเกิด)

อนุมัติ

(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน ปฏิบัติราชการแทน
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

25 ก.ค. 2559

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา รุตรัตนมงคล ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ศศิวิมล จิตรากร กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ให้ความเอาใจใส่ ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ตั้งแต่การหาข้อมูล การวางแผน การดำเนินงาน การแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนปัญหาอื่นๆ ทัวไป จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จไปได้ด้วยดี และผู้จัดทำขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และผู้ร่วมทำวิจัย บิดา มารดา รวมถึงผู้ให้ กำลังทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการทำวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อทุกๆ ท่าน และสามารถนำไปประยุกต์ต่อยอดให้เกิดประโยชน์มากขึ้นได้อีกต่อไป

คนรักษ์ นีบทอง



ชื่อเรื่อง	ผลของปริมาณความชื้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อระดับการเกิดครอสลิงค์ สมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรโดยกระบวนการรีเอ็กทีฟ-เอ็กซ์ทรูชัน
ผู้วิจัย	คนารักษ์ หีบทอง
สถานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา รุติรัตนมงคล
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.ศศิวิมล จิตรรากร
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2558
คำสำคัญ	สตาร์ชมันสำปะหลัง รีเอ็กทีฟเอ็กซ์ทรูชัน ฟอสโฟรีเลตครอสลิงค์ สมบัติทางเคมีกายภาพ ความคงตัว

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเทคนิคครอสลิงค์ร่วมกับกระบวนการรีเอ็กทีฟเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ขนาดต้นแบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคแสดงพื้นที่ตอบสนองถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัจจัยการดัดแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (ร้อยละ 50 ถึง 85 โดยน้ำหนัก) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.05 ถึง 0.15 โมลาร์) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนัก) ต่อระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต ระดับการครอสลิงค์ สมบัติทางความหนืด ดัชนีการละลายน้ำ กำลังการพองตัวและค่าสีของสตาร์ชครอสลิงค์ การดัดแปรควบคุมอุณหภูมิของบารเรลที่ 40 องศาเซลเซียส ทำการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังและโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและป้อนสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ด้วยอัตรา 5.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์โดยตรงเพื่อปรับค่าพีเอช และความชื้น จากนั้นนำสตาร์ชที่ได้มาอบแห้ง บดละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช หยุดปฏิบัติโดยปรับค่าพีเอชเป็น 6.5 และล้างฟอสเฟต ส่วนเกินออกด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และผ่านการทำแห้งอีกครั้งหนึ่ง

ผลการทดลองพบว่าระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตของสตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้มีค่าตั้งแต่ 0.0100 ถึง 0.0298 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณความชื้นลดลง เมื่อทำการวิเคราะห์สมการถดถอยแล้วพบว่าระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear) ขณะที่ระดับการครอสลิงค์มีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ

ทั้งเชิงเส้นตรง (linear) เชิงเส้นโค้ง (quadratic) และเชิงปฏิสัมพันธ์ (interaction) การเกิดพันธะเชื่อมของหมู่ฟอสเฟตระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชทำให้ค่าการละลายน้ำและความหนืดของสตาร์ชลดลง สตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้สามารถแบ่งระดับการครอสลิงค์และสมบัติทางความหนืดได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำ (ร้อยละ 50 ถึง 70) ครอสลิงค์ระดับกลาง (ร้อยละ 71 ถึง 90) และครอสลิงค์ระดับสูง (มากกว่าร้อยละ 90) สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำมีค่าความหนืดที่ระดับสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และกำลังการพองตัวสูงที่สุด การครอสลิงค์โดยกระบวนการรีเอ็กซ์ทริบูชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางความร้อน รูปแบบผลึก และการบิดระนาบแสงของสตาร์ช จากการตรวจสอบความแข็งแรงของเจล สมบัติทางรีโอโลยี และความคงตัวต่อกรดและการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็งของสตาร์ชครอสลิงค์เปรียบเทียบกับตัวอย่างสตาร์ชควบคุม (ไม่ได้ผ่านกระบวนการครอสลิงค์) และสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ พบว่า สตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับครอสลิงค์ต่ำและกลางมีความแข็งแรงของเจล และความคงตัวต่อกรดและการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็งมากที่สุด

การดัดแปรสตาร์ชด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทริบูชันนี้สามารถดัดแปรสตาร์ชให้มีคุณสมบัติที่หลากหลายตามระดับการเกิดครอสลิงค์ เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและไม่ใช่อาหาร

Title INFLUENCES OF MOISTURE, SODIUM HYDROXIDE AND SODIUM TRIMETAPHOSPHATE ON DEGREE OF CROSS – LINKING, PHYSICO – CHEMICAL PROPERTIES AND STABILITIES OF CASSAVA STARCH MODIFIED BY REACTIVE EXTRUSION

Author Khanarak Heebthong

Advisor Assistant Professor Khanitta Ruttarattanamongkol, Ph.D.

Co - Advisor Sasivimon Chittrakorn, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.S. in Food Science and Technology, Naresuan University, 2015

Keywords Cassava starch, Reactive extrusion, Phosphorylated cross – linking, physico – chemical properties, Stabilities



ABSTRACT

This study aimed at investigating a modification of cassava starch through cross-linking reaction in combining with reactive extrusion (REX) process using a pilot-scale, co-rotating twin screw extruder. Response surface methodology (RSM) was used to evaluate the effects of moisture content (50 – 85% of dry weight starch), sodium hydroxide (NaOH) concentration (0.05 – 0.15 M) and sodium trimetaphosphate (STMP) level (0.5 – 2.0% of dry weight starch) on the degree of substitution (DS), degree of cross – linking, pasting properties, water solubility index (WSI), swelling power and color of starch. The modification was conducted at barrel temperature of 40°C. Cassava starch was blended with STMP and extruded at a feed rate of 5.3 kg/h. NaOH solution was directly injected to the inner barrel to adjust pH and moisture content of the starch melt. Starch extrudates were dried, grinded, and sieved through 100 mesh screening size. The powder slurry was adjusted to pH 6.5 to stop chemical reaction and washed with distilled water 3 times to remove free phosphate and dried again.

Results indicate that DS varied from 0.0100 to 0.0298 and increased as the STMP increased and moisture content decreased. Regression analysis showed that the DS of cross-linked cassava starch was significantly affected ($P < 0.05$) in linear terms, while the degree of cross-linking and pasting properties were affected significantly ($P < 0.05$) in linear, interaction, and quadratic terms. Introduction of phosphate cross – links into the starch restricted the mobility of the molecular structure, leading to a reduction in WSI and viscosities of starch. Degree of cross-linking was classified according to RVA profiles as the low degree of cross-linking (50-70%), medium degree of cross-linking (71-90%), and high degree of cross-linking (>90%), respectively. Starches with low degree of cross-linking yielded the highest peak viscosity, final viscosity and swelling power. Cross-linking reaction through REX altered thermal properties, crystalline patterns, and polarized light of starch and starch granules. The gel strength, rheological properties, and acid and freeze-thaw stability of cross-linked starch samples were also investigated. It was found that starch at low and medium cross-linking level showed higher gel strength, elasticity, and acid and freeze-thaw stabilities than those of high cross-linking, extruded control, and native samples.

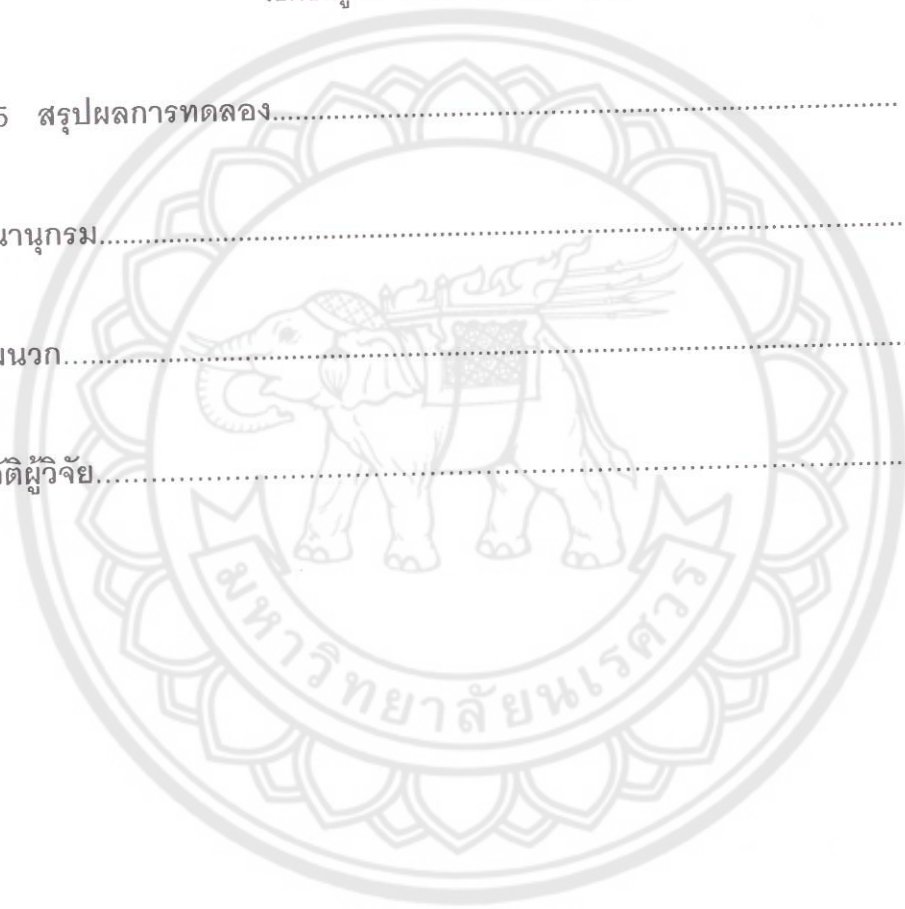
Cross-linked cassava starches with different degrees of cross-linking and functionalities were developed successfully using a pilot-scale REX, which could be utilised as food and non-food additives.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
แป้งและองค์ประกอบของแป้ง.....	6
แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch).....	14
แป้งดัดแปร (Modified starch).....	18
กระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซูชัน (Reactive extrusion).....	26
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
วัตถุดิบ.....	30
สารเคมี.....	30
เครื่องมือ.....	30
การดำเนินงาน.....	31
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	39
4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	40
ตอนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อระดับการแทนที่และระดับ การเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร.....	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของระดับการครองสรีรศาสตร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและ ความคงตัวของสตาร์ชครองสรีรศาสตร์จากกระบวนการรีแอกทีฟ- เอ็กซ์ทรูชัน	60
5 สรุปผลการทดลอง.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้วิจัย.....	97



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด.....	8
2	ลักษณะการเกิดเจลและการเย็นตัวของแป้ง.....	12
3	มูลค่าการส่งออกผลผลิตมันสำปะหลังปี พ.ศ. 2551.....	14
4	องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง.....	15
5	ข้อกำหนดโดยทั่วไปของแป้งมันสำปะหลังดิบ.....	16
6	ปฏิกิริยาการเกิดแป้งดัดแปร.....	22
7	ค่าซีเนอเรซิสของโยเกิร์ต.....	29
8	ระดับความเข้มข้นของปัจจัยแต่ละปัจจัยในแผนการทดลอง.....	33
9	แผนการทดลองแบบ Box-Behnken design 3 ปัจจัย (X_1 : ปริมาณน้ำ, ร้อยละ; X_2 : ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, โมลาร์; X_3 : ปริมาณ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต, ร้อยละ) 3 ระดับ และค่ากลาง 3 จุด.....	33
10	ค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการ ค่าพีเอช อุณหภูมิ และค่าสีของสตาร์ช มันสำปะหลังดัดแปรตามแผนการทดลอง สตาร์ชดิบ และสตาร์ชควบคุม.....	41
11	ปริมาณฟอสฟอรัส ระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต (DS) ระดับการเกิดครอสลิงค์ ของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรตามแผนการทดลอง สตาร์ชดิบและ สตาร์ชควบคุม.....	45
12	Regression equation coefficient	47
13	ระดับการครอสลิงค์ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่คัดเลือกและสภาวะการผลิต.....	59
14	สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชครอสลิงค์.....	61
15	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์.....	62
16	ค่าการละลายน้ำ และกำลังการพองตัวของสตาร์ชครอสลิงค์ต่างๆ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชดิบที่อุณหภูมิ 30 และ 80 องศาเซลเซียส.....	65
17	ค่าการซีเนอเรซิสคิดเป็นร้อยละ ของเจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร ระหว่างการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง.....	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
18 ความใสของสารละลายสตาร์ช และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจากสตาร์ชดิบ สตาร์ชควบคุมและสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับต่างๆ.....	73
19 สมบัติของสตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลางเปรียบเทียบกับสตาร์ชครอสลิงค์ ทางการค้า.....	81
20 ข้อกำหนดของสตาร์ชตัดแปรชนิดฟอสเฟต.....	95



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	6
2 X – ray pattern ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ.....	8
3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ ของแป้ง.....	11
4 รูปร่างเม็ดแป้งมันสำปะหลังภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	16
5 แป้งดัดแปรชนิดต่างๆ.....	18
6 ปฏิกิริยาการครอสลิงค์ของแป้งและโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต.....	24
7 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซเรย์ทูเดออร์ชนิดสกรูเดียว.....	27
8 การตั้งค่าเครื่องเอกซเรย์ทูเดออร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
9 ตัวอย่างสตาร์ชดัดแปรจากกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทราซัน.....	43
10 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักของสตาร์ช) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของสตาร์ช) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์.....	49
11 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของ สตาร์ช) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักของ สตาร์ช) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์.....	49
12 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างระดับการเกิดครอสลิงค์ของ สตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปัจจัยต่างๆ.....	52
13 แบบจำลองค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปัจจัยต่างๆ.....	53
14 RVA profiles ของสตาร์ชครอสลิงค์ตามแผนการทดลอง สตาร์ชควบคุม และ สตาร์ชดิบ.....	55
15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดครอสลิงค์ต่อค่าการละลายน้ำ (WSI) ของ สตาร์ชครอสลิงค์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดครออสลิงค์ต่อกำลังการพองตัว (swelling power) ของสตาร์ชครออสลิงค์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	58
17 DSC curves แสดงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชครออสลิงค์ที่ระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับสตาร์ชควบคุมและสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ.....	60
18 ความหนืดของสารละลายสตาร์ชครออสลิงค์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร ที่ค่าพีเอช 3.0 และ 7.0.....	69
19 การเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus (G') ตามอุณหภูมิของสตาร์ช มันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครออสลิงค์ 3 ระดับ.....	70
20 การเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus (G') ตามความถี่ของสตาร์ช มันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครออสลิงค์ 3 ระดับ.....	71
21 ลักษณะของสตาร์ชเพสท์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อให้ความร้อน 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	72
22 FTIR spectrum ของสตาร์ชควบคุม สตาร์ชดิบและสตาร์ชครออสลิงค์แต่ละระดับ...	75
23 X-ray diffractograms ของสตาร์ชครออสลิงค์แต่ละระดับ เปรียบเทียบกับสตาร์ช ควบคุม และสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ.....	76
24 โครงสร้างเม็ดสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (A-E) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (a-e) ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	78
25 ลักษณะเม็ดสตาร์ชภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	80

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาทางวิจัย

สตาร์ชเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตทางธรรมชาติที่สำคัญที่มีการใช้งานทั้งทางด้านอาหารและด้านอื่นๆ สตาร์ชได้จากหลากหลายแหล่ง เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง เผือก มัน เป็นต้น สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (native cassava starch) เป็นสตาร์ชที่ได้จากมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta*) ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งผลผลิตหลักและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมันสำปะหลังก่อให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่มีมูลค่าสูงอีกมากมาย โดยมีปริมาณการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลก และมีการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากที่สุด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 70) ผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย ได้แก่ มันเส้น มันอัดเม็ด สตาร์ชดิบและสตาร์ชดัดแปร ซึ่งเป็นวัตถุดิบให้กับโรงงานต่างๆ ทั้งเป็นสินค้าส่งออกและใช้ในประเทศ ผลผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังของประเทศไทยมีจุดเด่นคือผลิตได้จากมันสำปะหลังที่ไม่มีการตัดต่อทางพันธุกรรม มีความบริสุทธิ์สูง เป็นผงละเอียดสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความมันวาวเมื่อให้ความร้อนจะเกิดกาวยใส ให้ความหนืดสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 87-88) นอกจากนี้สมบัติเหล่านี้ สตาร์ชมันสำปะหลังยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้ในการผลิตอาหารมากมาย ทั้งเป็นส่วนประกอบหลักหรือแปรรูปเพื่อเป็นเครื่องปรุงรสอาหาร เช่น เป็นสารให้ความข้นหนืดในอาหาร เพิ่มเนื้อสัมผัสทดแทนไขมัน และยังใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น กระดาษ สิ่งทอ กาว และแอลกอฮอล์ เป็นต้น (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2555) แต่เนื่องจากข้อจำกัดการใช้งานของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ เช่น ไม่ทนต่อความร้อน แรงเฉือน กรด และการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง ในระหว่างกระบวนการผลิตอาหารที่มีการใช้ความร้อนและมีการผสมอย่างต่อเนื่อง ทำให้อาหารที่ผลิตได้มีความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป เกิดการซินเนอเรซิส (syneresis) และเกิดการคืนตัวหลังจากเกิดการเจลาติไนเซชัน (retrogradation) เป็นต้น (Singh, et al., 2007, pp. 2-3) ซึ่งเป็นปัญหาต่อกระบวนการผลิตอาหารที่ต้องการความคงตัวของความหนืด เช่น ในซอสและน้ำสลัด ที่ความหนืดจะสูงเมื่อหลังกระบวนการผลิต และจะลดลงเมื่อเก็บไว้ในระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงมีการดัดแปรโมเลกุลบางส่วน เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหาร และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าของสตาร์ชมันสำปะหลังโดยให้สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้น เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอทำให้เกิดความ

แข็งแรงของเส้นใยทนต่อแรงเสียดสีขณะถักทอ ในอุตสาหกรรมกระดาษทำให้กระดาษมีความเรียบเส้นใยยึดเกาะกันดี ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกเพื่อให้เกิดความแข็งแรงความยืดหยุ่นที่ดี เพิ่มความมันเงา ใช้ในทางการแพทย์เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียของเม็ดเลือดขณะเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ และใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อควบคุมการปล่อยสาร (Atichokudomchai and Varavinit, 2003; Lenaerts, et al., 1998) สำหรับทางด้านอาหารมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น ใช้เพื่อเพิ่มความหนืดในอาหารจำพวกซอสและโยเกิร์ต (Lobato-Calleros, et al., 2014) ลดการดูดซับน้ำมันในแป้งชุบทอด (Gamonpilas, et al., 2013) ใช้ในอาหารแช่เย็น แช่เยือกแข็ง ช่วยลดอัตราการคั้นตัวและลดการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Redmond, et al., 2004) ใช้ในอาหารที่ต้องผ่านความร้อนสูงหรือมีสภาพเป็นกรดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างการเก็บรักษา ใช้ในอาหารที่ต้องการเพิ่มเนื้อสัมผัสเพื่อลดต้นทุนการผลิต

การดัดแปรสตาร์ชมีหลายวิธีแบ่งออกเป็นการดัดแปรทางเคมี ชีวภาพและกายภาพ การดัดแปรทางชีวภาพ เช่น การตัดต่อพันธุกรรม การดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพ ได้แก่ การดัดแปรด้วยความร้อนและความร้อนชื้น เช่น การดัดแปรสตาร์ชพีรีเจิลด้วยเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ การดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Pérez-Sira and González-Parada, 1997) ส่วนการดัดแปรทางเคมี ได้แก่ การใช้กรดการย่อยด้วยเอนไซม์ ปฏิกริยาออกซิเดชัน ปฏิกริยาอีเทอร์ฟิเคชัน เอสเทอร์ฟิเคชันและการครอสลิงค์ เป็นต้น การดัดแปรสตาร์ชโดยกระบวนการฟอสฟอไรเลชัน (Phosphorylation) เป็นการดัดแปรสตาร์ชทางเคมีโดยการทำให้เกิดอนุพันธ์ของสตาร์ช เช่น เอสเทอร์ฟิเคชัน ครอสลิงกิง โดยใช้สารเคมี เช่น ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต โซเดียมโพลีฟอสเฟต ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลสตาร์ชด้วยฟอสเฟต ซึ่งปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชมีผลต่อสมบัติทางรีโอโลยี สมบัติทางความร้อน โครงสร้าง และคุณค่าทางโภชนาการ (Mirmoghtadaie, et al., 2009, pp. 711-713) สตาร์ชดัดแปรที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ ปริมาณ ระยะเวลาและกระบวนการในการดัดแปร เช่น การเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้อนุพันธ์สตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ทำให้สตาร์ชมีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ และความหนืดมีความคงตัวในอุณหภูมิต่ำ การเกิดปฏิกริยาครอสลิงค์นั้นจะทำให้สตาร์ชที่ได้มีพันธะที่แข็งแรงขึ้น การพองตัวและการละลายลดลง การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเกิดช้าที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ชดิบ และความหนืดคงตัวในอุณหภูมิสูง (จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 14-15; Rutenberg and Solarek, 1984) ทั้งนี้ การดัดแปรสตาร์ชเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารกำหนดปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชดัดแปรแตกต่างกันตามประเภทของสตาร์ช เช่น สตาร์ชดัดแปรชนิดโมโนและไดสตาร์ชฟอสเฟตกำหนดให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ช

ดัดแปรจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลีไม่เกิน ร้อยละ 0.5 และไม่เกินร้อยละ 0.4 ในสตาร์ชอื่นๆ ส่วนในอะซิทธิลเลตสตาร์ชฟอสเฟตกำหนดให้มีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.14 ในสตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.04 ในสตาร์ชอื่นๆ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2535) การผลิตสตาร์ชดัดแปรโดยกระบวนการฟอสไฟรีเลชันโดยทั่วไปจะให้เกิดปฏิกิริยาในสภาวะต่าง โดยการผสมสารแขวนลอยของสตาร์ชกับสารเคมีในสารละลายต่าง ซึ่งจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์ (Wongsagonsup, et al., 2014, p. 657) จากนั้นล้างสารเคมีส่วนเกินออกและอบให้แห้ง ทำให้เกิดของเสียปริมาณมากจากการใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสูง เป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี และต้นทุนในการกำจัด โดยในทางอุตสาหกรรม การลดระยะเวลาการผลิต สารเคมี ขั้นตอน และของเสีย ถือเป็นสิ่งจำเป็นต่อกระบวนการผลิตสตาร์ชดัดแปร

กระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซูชัน (reactive extrusion) เป็นกระบวนการดัดแปรสตาร์ชวิธีหนึ่งที่สามารถผลิตสตาร์ชครอสลิงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าของสตาร์ชมันสำปะหลังได้ เนื่องจากในกระบวนการนี้เกิดแรงเฉือนและความร้อนที่สามารถควบคุมได้ แรงการเกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์เป็นกระบวนการต่อเนื่อง ใช้เวลาการเตรียมตัวอย่างน้อย สามารถผลิตสตาร์ชครอสลิงค์ได้ปริมาณมากในระยะเวลาสั้น เหมาะสำหรับการผลิตปริมาณมาก โดยเฉพาะในทางอุตสาหกรรม โดยข้อมูลการศึกษาการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้กระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซูชันส่วนใหญ่จะใช้เครื่องเอ็กซูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) เช่น การผลิตสตาร์ชครอสลิงค์ด้วยไซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Nabeshima and Grossmann, 2001, pp. 347-348; Seker and Hanna, 2005, p. 542) การดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดเพื่อเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (Murúa-Pagola, et al., 2009, p. 381) ซึ่งเครื่องเอ็กซูเดอร์ชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) เป็นเอ็กซูเดอร์ชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าชนิดสกรูเดี่ยวในด้านการผสม การนวด และการลำเลียง เป็นต้น และอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการดัดแปรสตาร์ชเพื่อปรับปรุงการผลิตสตาร์ชดัดแปรได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรด้วยปฏิกิริยาฟอสไฟรีเลชันด้วยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซูชันโดยใช้เครื่องเอ็กซูเดอร์ชนิดสกรูคู่ โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ในขั้นตอนการดัดแปรสตาร์ช ได้แก่ ปริมาณความชื้นของสตาร์ชขณะดัดแปร ความเข้มข้นของสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณไซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ที่มีผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของสตาร์ช เช่น ระดับการแทนที่ด้วยโมโนเอสเทอร์และไดเอสเทอร์ ระดับการครอสลิงค์ ความหนืด สี สมบัติทางเคมีกายภาพ การละลายน้ำ กำลังการพองตัว สมบัติทางความร้อน สมบัติทางรีโอโลยี และการคงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง

การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด – ด่าง และการเปลี่ยนแปลงความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อระดับการแทนที่และระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ดัดแปรจากกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน
2. เพื่อศึกษาผลของระดับการครอสลิงค์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ (ค่าการละลายน้ำ กำลังการพองตัว สมบัติทางความร้อน ความหนืด สมบัติทางรีโอโลยี) ความคงตัว (ความคงตัวต่อสภาวะกรด ความร้อน การแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน

ขอบเขตการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักในการทดลอง ได้แก่ สตาร์ชมันสำปะหลังทางการค้า (POLYMATE CO., LTD., TH) ศึกษาผลของการดัดแปรโดยใช้เทคนิคแสดงพื้นที่ตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) โดยปัจจัยการดัดแปร ได้แก่ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Sigma - Aldrich Inc., St. Louis, MO) ปริมาณร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนักของสตาร์ช ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 ถึง 0.15 โมลาร์ เป็นสารปรับความเป็นด่างและปรับความชื้นที่ระดับร้อยละ 50 ถึง 85 โดยน้ำหนักของสตาร์ช ในกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชันใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ (บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด รุ่น CTE – D25L32) ป้อนตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 5.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วการหมุนของสกรู 200 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องที่ 40 องศาเซลเซียส ใช้ดาย (die) รูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดัดแท่งสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเป็นชิ้นเล็กๆ อบให้แห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช จากนั้นหยุดปฏิกิริยาด้วยการปรับค่าพีเอชเป็น 6.5 และล้างฟอสฟอรัสส่วนเกินออกด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษากระบวนการดัดแปร ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการดัดแปรสตาร์ชต่อปริมาณฟอสฟอรัส ระดับการแทนที่ (degree of substitution) สมบัติทางความร้อน ระดับการเกิดครอสลิงค์ (degree of cross – linking) โดยใช้เทคนิคแสดงพื้นที่ตอบสนอง

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของระดับการครอสลิงค์ของสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพต่างๆ ได้แก่ สี การดูดซับน้ำ การละลาย สมบัติทางความหนืด สมบัติทางรีโอโลยี สมบัติทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเกิดผลึก ความต้านต่อความร้อนและกระบวนการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งของสตาร์ชครอสลิงค์ที่คัดเลือกได้จากการทดลองตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบ และสตาร์ชควบคุม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มมูลค่าให้วัตถุดิบทางการเกษตรในประเทศ
2. ได้เทคโนโลยีและกระบวนการดัดแปรสตาร์ชที่ลดระยะเวลาการผลิต เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องและสามารถขยายการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้
3. ทราบถึงปัจจัยที่สำคัญในการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรจากปฏิกิริยาฟอสโฟ-รีเลชั่นและครอสลิงค์โดยกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน
4. เป็นแนวทางในการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมอาหารและบรรจุภัณฑ์

บทที่ 2

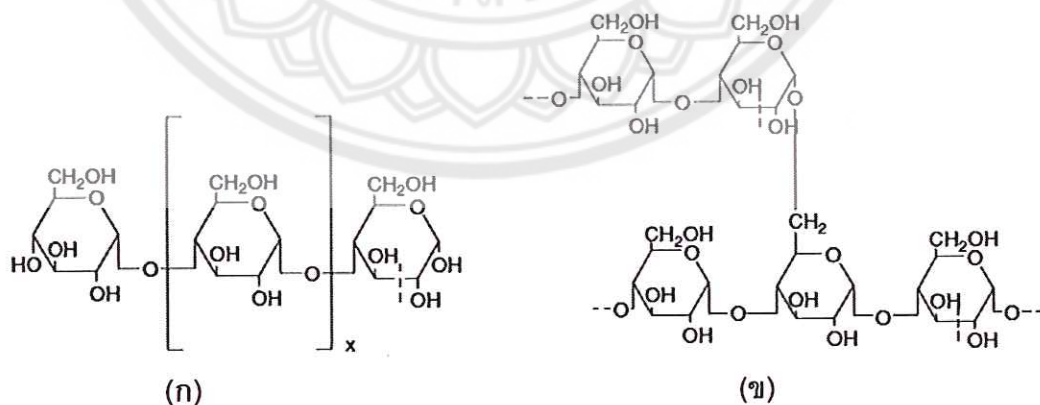
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แป้งและองค์ประกอบของแป้ง

แป้ง องค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของพืชในส่วนของคาร์โบไฮเดรต ได้จากแหล่งสะสมอาหารของพืช ทั้งราก หัว ลำต้น เมล็ด เช่น หัวมัน เผือก บีท เมล็ดธัญพืช ข้าว ข้าวโพด บาร์เลย์ ข้าวสาลี ใช้เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารหลายชนิด ซึ่งแป้งจากพืชชนิดต่างๆ และแหล่งที่มาแตกต่างกันจะมีความแตกต่างกันทั้งส่วนประกอบและสมบัติของแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 12-29)

1. องค์ประกอบของแป้ง

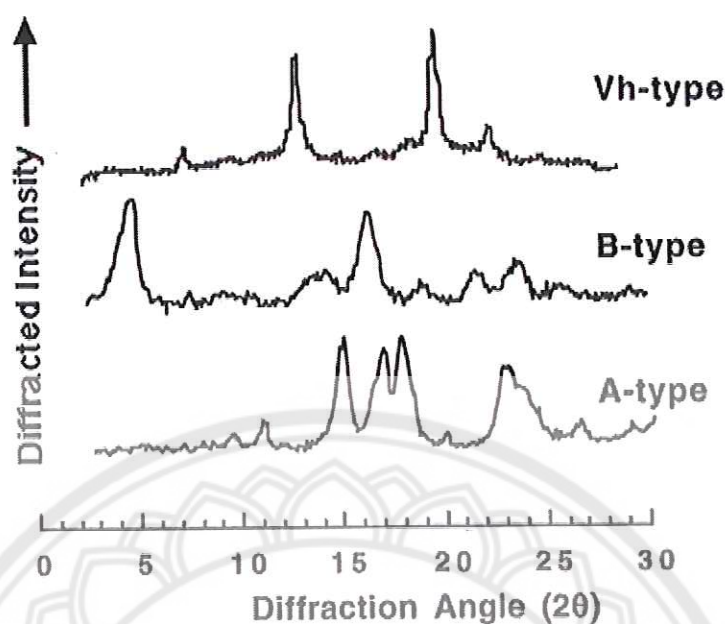
แป้งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ โครงสร้างของเม็ดแป้งเป็นสายของพอลิแซ็กคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะ 1-4 ไกลโคซิดิก องค์ประกอบ 2 ชนิดหลักๆ ของโมเลกุลแป้ง คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน ดังภาพ 1 โดยน้ำหนักโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดโพลีเมอร์ที่ต่างกัน (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลส ทำให้แป้งมีสมบัติแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดวิโทรกราเดชันลดลง เช่นเดียวกับปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติของแป้งมีความแตกต่างกันด้วย



ภาพ 1 โครงสร้างของอะไมโลส (ก) และอะไมโลเพกติน (ข)

อะไมโลสเป็นสายพอลิแซคคาไรด์สายตรงหรือมีกิ่งก้านเล็กน้อย โดยมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป ประมาณ 10^5 - 10^6 ดาลตัน และกระจายอยู่ในส่วนต่างๆ ของเม็ดแป้ง ทั้งในกลุ่มของอะไมโลเพกติน ในส่วนของอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) โดยอะไมโลสที่มีโมเลกุลเล็กจะอยู่บริเวณขอบเม็ดแป้งและส่วนที่มีโมเลกุลใหญ่จะอยู่บริเวณกลางเม็ดแป้งร่วมกับอะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นสายพอลิแซคคาไรด์ที่มีกิ่งก้านมาก ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1-6 ไกลโคซิดิก ในส่วนของกิ่งก้านมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน ลักษณะโครงสร้างกิ่งของอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เป็นสายที่ไม่มีกิ่งอื่นเชื่อมกับสายนี้ อีก จะเชื่อมต่อกับตำแหน่งเดียว สาย B (B-chain) เป็นสายที่มีกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นอีก 2 สายขึ้นไป และสาย C (C-chain) เป็นสายหลักที่มีหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ อะไมโลเพกตินจะประกอบด้วยสาย C 1 สาย ในแต่ละโมเลกุล โครงสร้างของอะไมโลเพกตินมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ทั้งในส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อม (amorphous) การจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพกตินที่เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ทำให้เม็ดแป้งคงทนต่อกรดและเอนไซม์ เกิดได้จากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ความแน่นของการจัดเรียงของเกลียวคู่แสดงเป็นค่าความเป็นผลึก (crystallinity) ซึ่งมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง แป้งจากธัญพืชหรือแป้งที่มีอะไมโลสสูงจะมีค่าความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 15 ในขณะที่แป้งจากพืชหัวหรือแป้งที่มีอะไมโลสต่ำจะมีค่าความเป็นผลึก 45 ถึง 50% ทั้งนี้ แป้งแต่ละชนิดจะมีการเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างกันด้วย วิเคราะห์ได้จากการหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างผลึกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบ A-type เป็นลักษณะการเรียงตัวอย่างหนาแน่น เช่น ในแป้งข้าว แป้งสาลี มีลักษณะที่คู่ชัดเจน มีมุมหักเห (2θ) ที่ 17° และ 18° และพีคที่ 23° โครงสร้างผลึกแบบ B-type เป็นการเรียงแบบไม่หนาแน่น พบในแป้งจากพืชหัว เกิดพีคคู่ที่ 22° และ 24° และพีคที่ 5.6° และ 17° ขนาดเล็ก และผลึกแบบ C-type ที่จะมีทั้ง A-type และ B-type ผสมกัน พบในแป้งจากพืชตระกูลถั่วและแป้งจากพืชหัวบางชนิด จะเกิดพีคที่ 5.6° เป็นพีคขนาดเล็ก และพีคขนาดใหญ่ที่ 17° และ 17.9° (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 29-33) และยังมีลักษณะผลึกแบบ V-type ที่เป็นลักษณะผลึกที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) หรือกับสารที่มีขั้วอื่นๆ ซึ่งจะเกิดพีคที่ 13° และ 20° (Jonhed, 2006; Derycke, et al., 2005) ดังภาพ 2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิดแสดงใน ตาราง 1



ภาพ 2 X – ray pattern ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ

ที่มา: Buléon, et al., 1998 as cited in Song, 2011, p. 8

ตาราง 1 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด

	แป้ง ข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้ง มันฝรั่ง	แป้ง มันสำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว
อะไมโลส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	28	28	21	17	0
อะไมโลเพกติน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	72	72	79	83	100
สัดส่วนอะไมโลสต่อ อะไมโลเพกติน	1000	1000	200	150	0

ที่มา: ดัดแปลงจาก Swinkels, 1985 อ้างอิงใน จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 7

นอกจากอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแล้วในเมล็ดแป้งยังมีองค์ประกอบอื่นๆ อยู่ด้วย ทั้งที่ติดอยู่ที่ผิวของเมล็ดแป้งและในเมล็ดแป้ง องค์ประกอบเหล่านี้มีผลให้คุณสมบัติต่างๆ ของแป้ง มีความแตกต่างกันองค์ประกอบอื่นๆ ที่ติดอยู่กับเมล็ดแป้ง ได้แก่

1.1 ไขมัน มีผลให้ความหนืดของแป้งแตกต่างกัน แป้งจากพืชรากจะมีปริมาณ ไขมันน้อยกว่าแป้งจากธัญพืช โดยทั่วไปแป้งจะมีไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 และถูกกำจัดออกใน กระบวนการผลิต ไขมันจะกระจายอยู่ที่เมล็ดแป้ง ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปกรดไขมันอิสระ หรือเกิด สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลส - ไขมัน ปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นทำให้การละลายและการพอง ตัวลดลง สูญเสียความใสของฟิล์ม

1.2 โปรตีน จะอยู่ที่ผิวของเมล็ดแป้ง มีผลต่อการเกิดสี การกระจายตัว การทำ ปฏิกริยากับน้ำ เนื่องจากโปรตีนทำให้เมล็ดแป้งมีประจุขึ้น และยังมีผลต่อการเกิดกลิ่นรส โดยแป้ง จากพืชหัวจะมีปริมาณโปรตีนประมาณร้อยละ 0.1 ซึ่งน้อยกว่าแป้งจากธัญพืช (ร้อยละ 0.2 ถึง 0.4) และแป้งที่มีขนาดเมล็ดแป้งเล็กจะมีปริมาณโปรตีนที่มากกว่าแป้งที่ขนาดเมล็ดแป้งใหญ่

1.3 เถ้า จะพบแร่ธาตุที่สามารถพบได้ในพืช เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส โดยฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืชจะพบในรูปของฟอสโฟลิปิด ส่วนในพืชหัวจะพบใน รูปหมู่ฟอสเฟต โดยจะเชื่อมอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 ของ กลูโคส ปริมาณฟอสเฟตส่งผลต่อการพองตัวและความหนืดของแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 27) โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า ร้อยละ 0.1 ยกเว้นแป้งมันฝรั่งที่มีพันธะฟอสเฟตเอสเทอร์ในส่วนของอะไมโลเพกติน ทำให้มี ปริมาณฟอสฟอรัสสูงถึงร้อยละ 0.3 ถึง 0.4 (อิสราภรณ์ เอ็มรัตน์, 2550, หน้า 29)

2. สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง

2.1 การละลายน้ำและการพองตัว

แป้งดิบมีสมบัติในการละลายน้ำต่ำ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากใน โครงสร้างเมล็ดแป้ง ทำให้แป้งดิบไม่ละลายน้ำเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน แต่เมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนในส่วนผลึกนี้ถูกทำลาย แป้งสามารถจับกับน้ำด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ได้ และพองตัว รวมถึงมีละลายได้มากขึ้น การพองตัวและการละลายของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของ แป้ง ความแข็งแรงของโครงสร้าง ส่วนประกอบ การตัดแปร และปริมาณน้ำ โดยแป้งที่มีปริมาณ อะไมโลสต่ำจะละลายได้เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่วนแป้งที่มีอะไมโลสสูง จะละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า (ชนิดา หันสวาสดี, 2551, หน้า 50) แป้งจากธัญชาติมีจำนวนพันธะ ไฮโดรเจนในโครงสร้างสูง จึงมีการพองตัวและการละลายต่ำ แป้งจากรากจะมีการพองตัวและ การละลายในน้ำสูงกว่า และมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำกว่า ส่วนแป้งจากพืชหัวจะมี

การพองตัวสูง เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของพันธะอ่อน และฟอสเฟตในแป้งทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้า (จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 9)

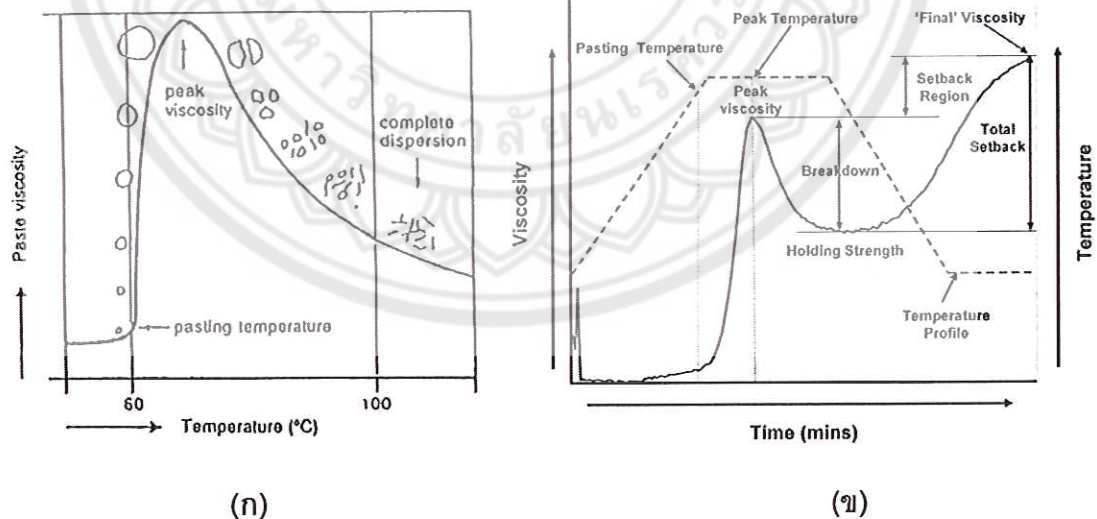
2.2 เจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

ในโมเลกุลของเม็ดแป้งดิบจะเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งแป้งดิบโดยทั่วไปจะละลายในน้ำเย็นและพองตัวได้ยาก แต่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนนี้ การละลายและการพองตัวจึงเพิ่มขึ้น การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งเกิดเมื่อแป้งดูดซับน้ำและพองตัวเมื่อได้รับความร้อน อุณหภูมิที่แป้งเริ่มเกิดการพองตัวเรียกว่าอุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) โดยจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส การเจลาตินในเซชันของแป้งจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งเปลี่ยนแปลงไป เช่น การละลาย การพองตัว การสูญเสียโครงสร้างผลึก สมบัติของไบรฟริงเจนซ์ เป็นต้น (Hoover, 2001) การเกิดการเจลาตินในเซชันของแป้งแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการนี้ไม่สามารถผันกลับได้ เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง การสลายพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลแป้งเริ่มเกิดในส่วนของอสังฐานและตามด้วยส่วนของผลึก การศึกษาการเจลาตินในเซชันของแป้งโดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งและสมบัติทางความหนืดโดยวิธีต่างๆ ควบคู่กัน การวิเคราะห์โดย DSC จะอธิบายถึงพลังงานในการหลอมละลาย (melting) และการเกิดลักษณะคล้ายแก้ว (glass transition) การเจลาตินในเซชันเป็นกระบวนการแบบดูดพลังงาน (endothermic) (Jonhed, 2006, pp. 20-21) แป้งจะพองตัวเต็มที่หลังจากให้ความร้อนมากขึ้น และเม็ดแป้งแตกออก ทำให้อะไมโลสที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหลุดออกมา ความหนืดของแป้งจะลดลง และเมื่อลดอุณหภูมิลง จะเกิดการเรียงตัวใหม่ที่เชื่อมด้วยพันธะไฮโดรเจนอีก เกิดโครงสร้างที่อุ้มน้ำ แต่ไม่มีการดูดน้ำเพิ่ม เรียกว่า การรีโทรกราเดชัน (retrogradation) (Hoover, 2001) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การเรียงตัวจะหนาแน่นขึ้น และจะปล่อยน้ำออกจากโครงสร้าง เรียกว่า การซินเนอเรซิส (syneresis) การเกิดรีโทรกราเดชันเกิดได้ 2 แบบ คือ การเกิดรีโทรกราเดชันเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน จะเกิดการเรียงตัวเป็นตะกอนขุ่น และการเกิดรีโทรกราเดชันในสารละลายแป้งความเข้มข้นสูงเมื่อให้ความเย็นอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดเป็นเจลยึดหยุ่น เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวแบบร่างแห แป้งที่เกิดการรีโทรกราเดชันจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ เพราะมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่อ่อนแอกว่า (Sasaki, et al., 2000)

2.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งที่มีผลให้องค์ประกอบ ขนาด รูปร่างแตกต่างกัน และการดัดแปรแป้งทำให้โครงสร้างและสมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเจลาติไนเซชันของแป้ง เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนจะค่อยๆ ดูดซับน้ำและพองตัวมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำรอบเม็ดแป้งลดลง ความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการดูดน้ำอย่างเต็มที่ จนมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และเม็ดแป้งจะแตกออก ปล่อยอะไมโลสออกมา เกิดเป็นสารละลายขุ่นหนืด (starch paste) ซึ่งจะเกิดเป็นช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ จากนั้น ความหนืดจะลดลงจากความหนืดสูงสุดอย่างรวดเร็ว (breakdown) ซึ่งบอกถึงความคงตัวของแป้งในกระบวนการให้ความร้อน (Adebowale and Lawal, 2003) และเมื่อลดอุณหภูมิลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสหรือการเกิดรีโทรกราเดชัน ดังภาพ 3 ความหนืดที่เพิ่มขึ้น (setback) เป็นค่าที่แสดงถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน หรือในอาหารแช่เยือกแข็ง

การวัดความหนืดของแป้งทำได้หลายวิธี เช่น การวัดโดยบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) บราเบรนเดอร์ (Brabender amylograph) เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer) และ Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้น



ภาพ 3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ (ก)
และผลการวิเคราะห์ความหนืดโดย RVA (ข)

- Peak Viscosity = ความหนืดสูงสุดในช่วงของการให้ความร้อน เป็นจุดที่เกิดการเจลาติไนเซชันสมบูรณ์ จุดที่บอกความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิร้อน (RVU, cP)
- Trough = ความหนืดต่ำสุดระหว่างทำให้เย็น (RVU, cP)
- Breakdown = ความแตกต่างของความหนืดต่ำสุดและความหนืดสูงสุด ถ้ามีค่าน้อย แสดงถึงว่าเม็ดแป้งมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง (RVU, cP)
- Final Viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง บ่งชี้การเกิดเจล (RVU, cP)
- Total Setback = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด แสดงถึงความสามารถในการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน หรือการรีโทรกราเดชัน (RVU, cP)
- Setback Region = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด แสดงถึงความแข็งแรงของเจล (RVU, cP)
- Peak Time = เวลาที่เกิด peak viscosity (นาที)
- Pasting Temperature = อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด เมื่อมีการให้ความร้อน เม็ดแป้งจะเริ่มดูดซึมน้ำเข้าไป เกิดการพองตัวและเริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้น (°C)

ค่าความหนืด และลักษณะของเจลแป้งแต่ละชนิดในระหว่างการเจลาติไนเซชัน แสดงใน ตาราง 2

ตาราง 2 ลักษณะการเกิดเจลและการเย็นตัวของแป้ง

แป้ง	ความหนืดแป้ง ขณะร้อน	ลักษณะ เนื้อสัมผัส	ความใส	ความคงตัวต่อ รีโทรกราเดชัน	ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง -ละลายน้ำแข็ง	แรงต้าน แรงเคียน
ข้าวโพด	ปานกลาง	สั้น-แข็ง	ขุ่น	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
ข้าวเหนียว	ปานกลาง-สูง	นุ่ม-เหนียว	ใส	สูง	กลาง	ต่ำ
มันฝรั่ง	สูงมาก	ยาว-เหนียว	ใส	กลาง	ต่ำ	ต่ำ
ข้าวเจ้า	ปานกลาง-ต่ำ	สั้น-แข็ง	ขุ่นเล็กน้อย	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
สาคุ	ปานกลาง-สูง	ยาว-เหนียว	ใส	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
มันสำปะหลัง	สูง	ยาว-เหนียว	ใส	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
สาลี	ปานกลาง-ต่ำ	นุ่ม-สั้น	ขุ่นเล็กน้อย	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Pomeranze, 1991 อ้างอิงใน ชนิดา หันสวาสดี, 2551, หน้า 54

2.4 การเกิดฟิล์ม

ในอุตสาหกรรมอาหารจะใช้แป้งในรูปของแป้งเปียกเพื่อเพิ่มความหนืดในอาหาร หรือใช้เคลือบผิวผลิตภัณฑ์ก่อนทำให้แห้ง ซึ่งจะเกิดเป็นลักษณะฟิล์มเพื่อเป็นสารเชื่อมคล้ายกาว หรือเคลือบเพื่อให้พื้นผิวเรียบ ซึ่งฟิล์มจากแป้งจะมีความใส เป็นเงา แป้งที่มีความสามารถในการกระจายตัวในน้ำได้ดีจะสามารถเกิดฟิล์มที่ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากเกิดการรีโทรกราเดชันน้อย ในขณะที่แป้งจากธัญชาติที่มีอะไมโลสและไขมันสูงจะเกิดการรีโทรกราเดชันในระหว่างการทำให้แห้ง ทำให้ฟิล์มที่ได้ละลายน้ำได้น้อย มีความชุ่ม และเปราะบาง โดยทั่วไปการผลิตฟิล์มจากแป้งนิยมใช้แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เพราะให้ความมันเงา มีความยืดหยุ่น และแข็งแรง

3. ชนิดของแป้ง

3.1 แป้งข้าวเจ้า (rice starch)

แป้งข้าวเจ้ามีลักษณะเม็ดแป้งหลายเหลี่ยม ขนาดเล็ก ประมาณ 4 ถึง 8 ไมโครเมตร มีโปรตีนเกาะอยู่ที่เมล็ดข้าวอย่างหนาแน่น และจะกำจัดออกได้โดยการแช่ใน สารละลายด่าง แป้งข้าวเจ้ามีคุณสมบัติในการเกิดเจลลิตในเซชันที่ 70 องศาเซลเซียส

3.2 แป้งข้าวโพด (maize starch หรือ corn starch)

เป็นแป้งจากเมล็ดข้าวโพด เม็ดแป้งลักษณะทรงกลมหรือเหลี่ยมขนาดกลาง ประมาณ 5 ถึง 25 ไมครอน ในอุตสาหกรรมใช้ในการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ฟรุคโตส และ อุตสาหกรรมกระดาษ แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn starch) มีองค์ประกอบคืออะไมโลเพกตินเพียงชนิดเดียว โดยไม่มีอะไมโลสเป็นส่วนประกอบเลย ซึ่งจะมีลักษณะความหนืดที่ดี นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกาว และสารให้ความข้นหนืด

3.3 แป้งสาลี (wheat flour)

แป้งสาลีมีลักษณะเม็ดแป้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ เม็ดแป้งขนาดเล็ก (1 ถึง 10 ไมครอน) ทรงกลม และเม็ดแป้งขนาดใหญ่ (20 ถึง 45 ไมครอน) คล้ายเมล็ดถั่ว แป้งสาลีนิยมใช้ใน อุตสาหกรรมขนมอบ อุตสาหกรรมผลิตกาวและน้ำตาล

3.4 แป้งมันฝรั่ง (potato flour)

เม็ดแป้งมันฝรั่งมีรูปร่างเป็นวงรี ขนาดใหญ่ ประมาณ 15 ถึง 121 ไมครอน ลักษณะคล้ายเปลือกหอย ในอุตสาหกรรมนำมาใช้การผลิตอาหารหลายชนิด ใช้ผลิตอาหารสัตว์ กระดาษ สิ่งทอ และกาว (ชนิดา หันสวาสดี, 2551, หน้า 12-14)

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

มันสำปะหลัง (Cassava) เป็นพืชหัวหรือราก มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz มีแหล่งกำเนิดในเขตร้อนของทวีปอเมริกา โดยมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป เช่น cassava, tapioca, yucca, mandioca และ manioc มันสำปะหลังเป็นพืชหลักของประเทศ ไทย โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และตะวันออก เนื่องจากขยายพันธุ์ได้ง่าย ทนแล้ง โรคและแมลง ช่วงการเก็บเกี่ยวนาน มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง

มันสำปะหลังที่นิยมปลูกในประเทศไทยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้ประดับตกแต่ง ใช้บริโภค และใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป โดยพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยมาจาก 2 แหล่ง คือ พันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร ซึ่งปัจจุบันมี 9 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ระยอง 1, ระยอง 3, ระยอง 60, ระยอง 90, ระยอง 5, ระยอง 72, ระยอง 7, ระยอง 9 และระยอง 11 (CMR35-22-196) และ พันธุ์จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3 สายพันธุ์ ได้แก่ เกษตรศาสตร์ 50, ห้วยบง 60 และ ห้วยบง 80 แต่ละสายพันธุ์จะให้ปริมาณและลักษณะของแป้งที่แตกต่างกัน (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2555) มันสำปะหลังกลุ่มที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป จะไม่นิยมบริโภคเป็นอาหารโดยตรง เนื่องจากปริมาณไซยาไนด์สูง รสชาติขม แต่มักใช้แปรรูป เป็นแป้ง สาकुมันเส้น มันอัดเม็ด ทั้งใช้ในประเทศและส่งออก โดยแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะใช้ ในประเทศประมาณร้อยละ 40 ในอุตสาหกรรมอาหาร ผงชูรส สาकु สลารให้ความหวาน นอกจากนี้ จะส่งออกแล้วจะใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ กรด และแอลกอฮอล์ (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2555) ซึ่งมูลค่าการส่งออกผลผลิตมันสำปะหลังจำแนกตาม ประเภทผลผลิต ดังตาราง 3

ตาราง 3 มูลค่าการส่งออกผลผลิตมันสำปะหลังปี พ.ศ. 2551

ผลผลิต	มูลค่าการส่งออก (ล้านเหรียญสหรัฐฯ)	ร้อยละ
แป้ง	454.87	32.21
แป้งดัดแปร	419.30	29.69
มันอัดเม็ด	266.59	18.88
มันเส้น	198.67	14.07
อื่นๆ	72.83	5.16

ที่มา: กระทรวงพาณิชย์, 2552 อ้างอิงใน ปรรณนา ปรรณนาดี และคณะ, 2552, หน้า 3

1. โครงสร้างและองค์ประกอบของมันเป็นสำปะหลัง

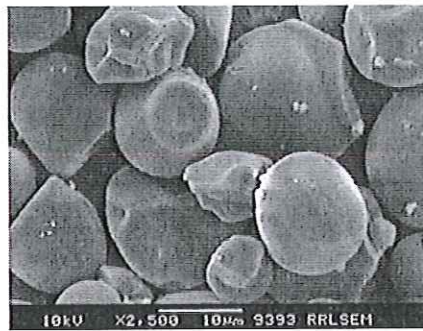
ในหัวมันสำปะหลังเป็นมีองค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ น้ำ แป้ง เยื่อใย และไซยาไนด์ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณเป็นร้อยละต่อน้ำหนักหัวมัน
น้ำ	60.21 – 75.32
เปลือก	4.08 – 14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87 – 41.88
ไซยาไนด์	2.85 – 39.27 ppm
แป้ง	71.9 – 85.0
โปรตีน	1.57 – 5.78
เยื่อใย	1.77 – 3.95
เถ้า	1.20 – 2.80
ไขมัน	0.06 – 0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59 – 8.66

ที่มา: กัลลฉนวนรงค์ ศรีรอต และคณะ, 2542, หน้า 4

องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังมีความแตกต่างจากแป้งชนิดอื่น โดยมีปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เถ้าต่ำกว่าแป้งชนิดอื่น ปริมาณอะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 17 ถึง 20) น้ำหนักอะไมโลสและอะไมโลเพกตินสูงกว่าแป้งชนิดอื่น ลักษณะเม็ดแป้งกลมหรือรูปไข่ ผิวเรียบ อาจมีรอยบุ๋ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมโครเมตร ดังภาพ 4 แป้งเป็นผงละเอียด สีขาว ไม่มีกลิ่น และรส มีความมันวาว เมื่อให้ความร้อนจะเกิดกาวใส



ภาพ 4 รูปร่างเม็ดแป้งมันสำปะหลังภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

ที่มา: Simi and Abraham, 2007 อ้างอิงใน จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 9

แป้งมันสำปะหลังไทยเป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังที่ปรับปรุงพันธุ์แบบธรรมชาติ (conventional Breeding) โดยไม่ตัดต่อพันธุกรรม (Non – Genetically Modified Organisms หรือ Non – GMOs) ซึ่งถือเป็นลักษณะเด่นของแป้งมันของไทย และยังมีลักษณะเด่นอื่นๆ เมื่อใช้งาน เช่น มีสีขาว ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น มีความคงตัวสูง ไม่เปลี่ยนแปลงสีของอาหาร สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแป้งชนิดอื่นในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย (ปรารภนา ปรารภนาดี และคณะ, 2552, หน้า 17) โดยแป้งมันสำปะหลังทางการค้ามีข้อกำหนดทั่วไปดัง ตาราง 5

ตาราง 5 ข้อกำหนดโดยทั่วไปของแป้งมันสำปะหลังดิบ

คุณลักษณะ	ปริมาณกำหนด
ความชื้น	ไม่เกิน ร้อยละ 13
ปริมาณแป้ง	ไม่ต่ำกว่า ร้อยละ 85
เถ้า	ไม่เกิน ร้อยละ 0.2
ค่าพีเอช	5.0 ถึง 7.0
ความขาว	ไม่ต่ำกว่า 90 (Kett scale)
ความหนืดที่ความเข้มข้น 6%	600 BU
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ไม่เกิน 30 ppm
ไซยาไนด์	nil

ที่มา: ดัดแปลงจาก Breuninger, et al., 2009, p. 550

2. การใช้ประโยชน์

แป้งมันสำปะหลังนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารหลายชนิด เพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัส ให้ความหนืด ผลิตภัณฑ์ปรุงแต่งรสอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติก และดัดแปรเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร โดยแป้งมันสำปะหลังถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหารและขนมหลายชนิด นำมาผลิตเป็นเม็ดสาคู โดยการขึ้นรูปเป็นเม็ดเล็กๆ ร่อนคัดขนาด และอบให้แห้ง เป็นต้น

สารเพิ่มความข้นหนืด แป้งมันสำปะหลังมีสมบัติในการให้ความข้นหนืดเมื่อได้รับความร้อน และถูกนำมาใช้ในอาหารเพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัส เช่น ใช้ในซอส น้ำสลัด เป็นต้น

อุตสาหกรรมเครื่องปรุงรส เช่น น้ำส้มสายชู (Vinegar) ผลิตจากกรดอะซิติกจากการหมักแอลกอฮอล์จากมันสำปะหลังด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Acetobactor* แล้วเจือจางด้วยน้ำให้ได้มาตรฐาน การผลิตผงชูรสจากมันสำปะหลังเป็นการลดต้นทุนและการเกิดของเสีย ซึ่งน้อยกว่าการใช้กากน้ำตาล และไลซีน

สารให้ความหวานน้ำเชื่อม กลูโคสไซรัป ฟรุคโตสไซรัป และมอลโตเดกซ์ทริน ผลิตได้จากการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดหรือเอนไซม์ด้วยระดับการย่อยที่แตกต่างกัน เอนไซม์ที่ใช้ได้แก่ อะไมเลส กลูโคอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส โดยน้ำเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะใส ใช้ในอุตสาหกรรมลูกกวาด ครีมเทียม เครื่องดื่ม แยม อาหารกระป๋อง ขนม และยาสีฟัน เป็นต้น

แอลกอฮอล์ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย มีตลอดทั้งปี ราคาถูก จึงเหมาะสมในการนำไปผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเทียบเท่าน้ำมันเบนซิน

อุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อเป็นสารเชื่อมประสานและเคลือบแผ่นกระดาษให้มีความเรียบและมัน

อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้แป้งเพื่อเคลือบเส้นไหม เพื่อให้มีความเรียบและคงทนต่อการเสียดสีขณะซักทอ

บรรจุภัณฑ์พลาสติก ซึ่งผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชั่น ทำให้แป้งมันสำปะหลังเกิดการหลอมรวมผสานกับสารเคมี เกิดความยืดหยุ่น

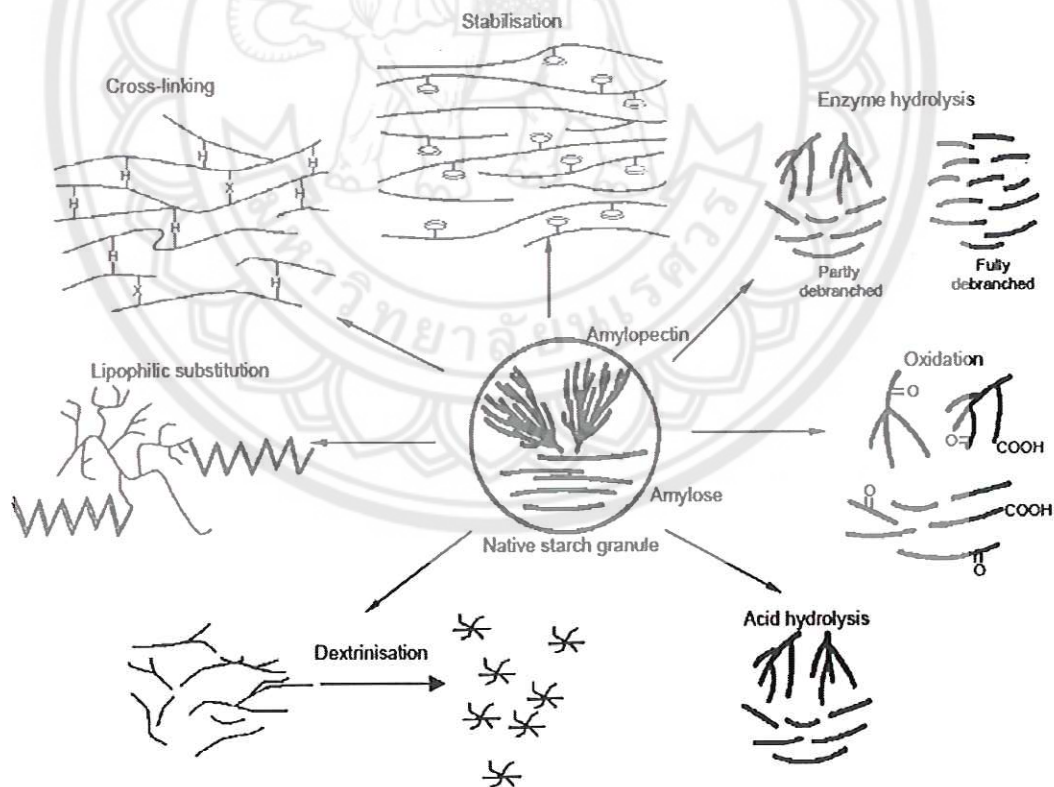
อุตสาหกรรมยา เพื่อใช้เป็นเนื้อของยาเม็ด และสารเคลือบเม็ดยาเพื่อควบคุมการปลดปล่อยตัวยา

แป้งดัดแปร เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ง่าย จึงมีการดัดแปรสมบัติเพื่อให้มีลักษณะเหนียว หนว้น หนนกรดต่างมากขึ้น โดยการดัดแปรมีหลายวิธี เช่น การดัดแปรทางกายภาพ การใช้ความร้อนขึ้นด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

โมเลกุลของเม็ดแป้งจะถูกเจลาติไนเซชัน ทำให้สมบัติทางความหนืดเปลี่ยนไป ใช้เพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัส การตัดแปรรูปทางเคมี เช่น การผลิตแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ใช้เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ ช่วยให้น้ำรวมตัวกับน้ำมัน แป้งคาร์บอกซีเมทิลใช้ในยาสีฟัน ยาเม็ด เพื่อเป็นสารช่วยยึดและช่วยในการแตกตัว แป้งอะซิทธิเลท แป้งออกซิโดซ์แป้งครอสลิงค์ เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 149, 153)

แป้งดัดแปร (Modified starch)

ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1073 – 2535 แป้งดัดแปร คือ ผลิตภัณฑ์จากแป้งที่นำมาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือกายภาพด้วยปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ความร้อน เอนไซม์ หรือสารเคมี เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากแป้งดิบจะมีคุณสมบัติที่ถูกรบกวนในการใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น ไม่ทนต่อความร้อนและแรงเฉือน ความหนืดเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงมีการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ ดังภาพ 5



ภาพ 5 แป้งดัดแปรชนิดต่างๆ

วัตถุประสงค์ในการดัดแปรแป้ง คือ เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของแป้ง เช่น ให้คงทนต่อการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง และสภาวะการผลิตต่างๆ เกิดเจลได้ดี ปรับเปลี่ยนการละลาย การคืนตัว สมบัติการเป็นกาว หรือสมบัติความชอบน้ำของแป้ง เป็นต้น โดยส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ได้ดีนั้นเป็นส่วนอสัณฐานของอะไมโลเพกตินในเม็ดแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 129) แป้งดัดแปรแป้งตามวิธีการผลิตได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แป้งดัดแปรทางชีวภาพ

เป็นการดัดแปรทางพันธุกรรมของพืชในส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินให้ได้ตามต้องการ ได้แก่ แป้งอะไมโลสูง และแป้งอะไมโลต่ำ

2. แป้งดัดแปรทางกายภาพ

การดัดแปรแป้งทางกายภาพเป็นการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาจากสารเคมี เช่น ใช้วิธีการบด โม้ ลดขนาดเม็ดแป้ง ใช้ความร้อน ความชื้น เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของแป้ง เป็นต้น

2.1 ฟรีเจลาติไนเซชัน (pregelatinization)

ดัดแปรได้โดยการให้ความร้อนแป้งจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน และทำให้แห้งโดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย หรือเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อาจมีการเติมสารเพื่อปรับปรุงหรือช่วยในกระบวนการผลิต เช่น สารละลายการเกาะกันของผงแป้ง สารให้กลิ่นรส วัตถุประสงค์ของการผลิตแป้งชนิดนี้เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป จะใช้เป็นสารให้ความหนืดในแป้งที่ไม่ต้องให้ความร้อนจนสุก แป้งที่ได้จะมีการละลายได้ดีในน้ำเย็น มีการพองตัวดี เช่น ในเครื่องปรุงรส ซอสต่างๆ ไล่พาย ใช้ในขนมอบเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นและเนื้อสัมผัสที่ดี ใช้สำหรับเตรียมกาวในขั้นตอนการทำกระดาษ (ชนิดา หันสวาสดี, 2551, หน้า 97-100)

2.2 การลดขนาดแป้งทางกล

เป็นการลดขนาดเม็ดแป้งโดยการบด โม้ ในน้ำหรือแอลกอฮอล์ ทำให้แป้งมีขนาดโมเลกุลเล็กลง มีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับใช้ทดแทนไขมันในอาหารที่มีเนื้อละเอียด เช่น ไอศกรีม

2.3 แป้งละลายน้ำเย็น

แป้งชนิดนี้ดัดแปรได้โดยการปรับสภาพแป้งในสภาวะต่างและกรดในแอลกอฮอล์

2.4 Annealing

เป็นการดัดแปรโดยการให้ความร้อนแก่ในขณะที่ยังอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชันนั้นๆ

2.5 การดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

เป็นการดัดแปรโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงร่วมกับความชื้นสูง ทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น แป้งผลิตภัณฑ์ B - type เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วนเป็น A - type

Colonna, et al. (1987) พบว่าการดัดแปรแป้งสาลีโดยใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชันและเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 90 ถึง 180 องศาเซลเซียส ปรับความชื้นเป็นร้อยละ 19 ถึง 44 ทำให้เกิดการหลอมเหลวและเกิดฟองอากาศ ส่วนกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะตัดสายอะไมโลสและอะไมโลเพกตินให้สั้นลง ทำให้เกิดการดูดซับน้ำได้ง่าย และอุ้มน้ำมากขึ้น

3. แป้งดัดแปรทางเคมี

การดัดแปรแป้งทางเคมีส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันและแป้งอยู่ในสภาวะแขวนลอย จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเม็ดแป้งในส่วนผลึกและอสัณฐาน และจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีเมื่อเม็ดแป้งชุ่มน้ำหรืออยู่ในด่างและเกิดการพองตัว ในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้หลายวิธีการร่วมกัน โดยระดับการดัดแปรจะแสดงในรูปของค่าระดับการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่แทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนกลูโคส (degree of substitution: DS) ซึ่งสามารถเกิดการแทนที่ได้ที่คาร์บอนได้ที่ตำแหน่ง 2 3 และ 6 ดังนั้น การแทนที่สูงที่สุดคือ DS = 3 (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, ม.ป.ป., หน้า 183) หรือในรูปโมลของสารที่เข้าไปแทนที่ (Molar substitution, MS) การดัดแปรแป้งทางเคมี ได้แก่

3.1 แอซิดทีนนิ่ง (Acid thinning)

เป็นการลดขนาดโมเลกุลของแป้งโดยใช้กรดเจือจางจนได้ความหนืดตามที่ต้องการ แป้งที่ได้จะมีความหนืดต่ำที่อุณหภูมิสูงและจะแข็งเมื่อมีการคั้นตัว

3.2 เดกซ์ตรีไนเซชัน (Dextrinization)

เป็นการดัดแปรโดยใช้ความร้อนหรือความร้อนกับกรด เพื่อลดขนาดโมเลกุลหรือเปลี่ยนการจับเกาะซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น มอลโตเดกซ์ทริน

3.3 ออกซิเดชัน (Oxidation)

ผลิตโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้งกับสารออกซิไดซ์ (ทางการค้าใช้โซเดียมหรือแคลเซียมไฮโปคลอไรท์) หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งจะเปลี่ยนเป็นหมู่อื่นๆ เช่น คีโตน คาร์บอกซิลหรือหมู่แอลดีไฮด์ แป้งจะมีสีซีดจาง ละลายน้ำได้ดี ความหนืดต่ำ คงตัวดี

3.4 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นการตัดแปรงโดยการย่อยด้วยเอนไซม์หรือกรด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแปรงเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กๆ

3.5 การเกิดอนุพันธ์ (Derivatives)

เป็นการเกิดอนุพันธ์ของแปรงด้วยการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้แก่ อีเทอร์ริฟิเคชัน เอสเทอร์ริฟิเคชัน และครอสลิงกิง การเกิดอนุพันธ์ของแปรงตัดแปรงชนิดต่างๆ แสดงในตาราง 6

อีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) เป็นการเกิดปฏิกิริยาของแปรงกับหมู่อีเทอร์ แปรงจะมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันตามหมู่อีเทอร์ที่มาแทนที่ เช่น ความเหนียวสูง คงทนต่อการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง เหมาะกับอาหารแช่เย็น แช่เยือกแข็ง มีการละลายดี การคืนตัวต่ำ ทนต่อกรด - ด่าง เกลือ และเอนไซม์ (แปรงไฮดรอกซีแอลคิล) สามารถละลายและพองตัวในน้ำเย็นได้ และมีความใส (แปรงคาร์บอกซีเมทิลและแปรงแคทไอออนิก)

เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) เป็นการเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอสเทอร์ แปรงมีความหนืดที่คงตัว ให้เนื้อสัมผัสที่ดี แปรงเอซีเทตินิยมใช้เพื่อให้ความข้นหนืดและความคงตัว แปรงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากการเกิดปฏิกิริยาฟอสไฟรีเลชันในสภาวะต่างๆ จะมีความหนืดสูง คงตัว เกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำ นิยมใช้ในอาหารเพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัส อาหารอิมัลชัน

ครอสลิงกิง (Cross - linking) เป็นการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุลแปรง ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลโดยแปรงจะแข็งแรงมากขึ้น การพองตัวลดลง ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง ทนต่อความร้อน สภาวะกรดและแรงเฉือน (Yook, et al., 1993, pp. 405-407) ส่วนใหญ่การครอสลิงค์จะมีการสร้างพันธะเชื่อม 1 พันธะ ต่อทุก 100 ถึง 3000 หน่วยกลูโคส แปรงครอสลิงค์มีหลายชนิดและผลิตในหลายสภาวะ ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ โดยปกติจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินในเซชันหรือไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่างเพื่อกระตุ้นให้โมเลกุลแปรงแตกตัวเป็นประจุลบและสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยาได้ (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, ม.ป.ป., หน้า 185-186) เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในสภาวะต่างๆ จะได้ไดสตาร์ชฟอสเฟต โซอิพิคลอไรไฮดรินในสภาวะต่างๆ ได้ไดสตาร์ชกลีเซอรอลที่ทนต่อสภาวะกรด - ด่าง และแรงเฉือน โซอะซิติกแอนไฮไดรด์กับกรดอะซิติกในสภาวะต่างๆ อ่อนได้ไดสตาร์ชอะซิเตตที่ทนต่อสภาวะกรด เป็นต้น สารที่นิยมใช้ในการผลิตแปรงครอสลิงค์สำหรับอาหาร ได้แก่ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต เนื่องจากมีความปลอดภัยสูง โดยกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสในแปรง

ดัดแปรโมโนและไดสตาร์ซฟอสเฟตไม่เกินร้อยละ 0.5 ในแง่ดัดแปรจากแป้งมันฝรั่งและแป้งสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.4 ในแง่ดัดแปรจากแป้งชนิดอื่นๆ

แป้งฟอสเฟตหรือไดสตาร์ซฟอสเฟต สามารถผลิตได้โดยการเติมฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์อย่างช้าๆ ลงในน้ำแป้งในสภาวะต่างจนเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ และปรับให้เป็นกลาง กรอง ล้างฟอสฟอรัสส่วนเกิน และอบแห้ง ส่วนการผลิตไดสตาร์ซฟอสเฟตโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะต้องใช้ความร้อนช่วยที่อุณหภูมิประมาณ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส และปรับค่าพีเอช เป็น 10 ถึง 12 (ชนิดา หันสวาสดี, 2551, หน้า 142)

ตาราง 6 ปฏิกิริยาการเกิดแป้งดัดแปร

ประเภทการดัดแปร	ปฏิกิริยา
อีเทอร์ิฟิเคชั่น	
ไฮดรอกซีเอคิลสตาร์ซ	
- เอคิลลีนออกไซด์	$\text{St-OH} + \text{H}_2\text{C} \begin{array}{l} \diagup \text{C-R} \\ \diagdown \text{O} \end{array} \xrightarrow{\text{NaOH}} \text{St-O-CH}_2 \begin{array}{l} \text{R} \\ \\ \text{OH} \end{array}$
เอสเทอร์ิฟิเคชั่น	
สตาร์ซอะซิเตต	
- ไวนิลอะซิเตต	$\text{St-OH} + \text{CH}_2 = \text{CH} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{CH}_3 \xrightarrow{\text{NaOH}} \text{St-O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{CH}_3 + \text{CH} = \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{OH}$
- อะซิติกแอนไฮไดรด์	$\text{St-OH} + \text{CH}_3 - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{CH}_3 \xrightarrow{\text{NaOH}} \text{St-O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{CH}_3 + \text{CH} = \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{OH}$
- ออร์โทฟอสเฟต	$\text{St-OH} + \text{NaH}_2\text{PO}_4 / \text{H}_2\text{HPO}_4 \xrightarrow{\quad} \text{St-O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{P} \begin{array}{l} \\ \text{OH} \\ \\ \text{O}^- \text{Na}^+ \end{array}$
คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ซ	
- โมโนคลอโรอะซิติก	$\text{St-OH} + \text{ClCH}_2\text{COOH} \xrightarrow{\quad} \text{St-O} - \overset{\text{ONa}}{\parallel} \text{C} = \text{O} \begin{array}{l} \\ \text{CH}_2 \end{array}$
ครอสลิงกิง	
- ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{P} \\ \\ \text{Cl} \quad \text{Cl} \quad \text{Cl} \end{array} + \text{StOH} \xrightarrow{\text{NaOH}} \text{St-O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{P} \begin{array}{l} \\ \text{OH} \\ \\ \text{O}^- \text{Na}^+ \end{array} - \text{St} + \text{NaCl}$

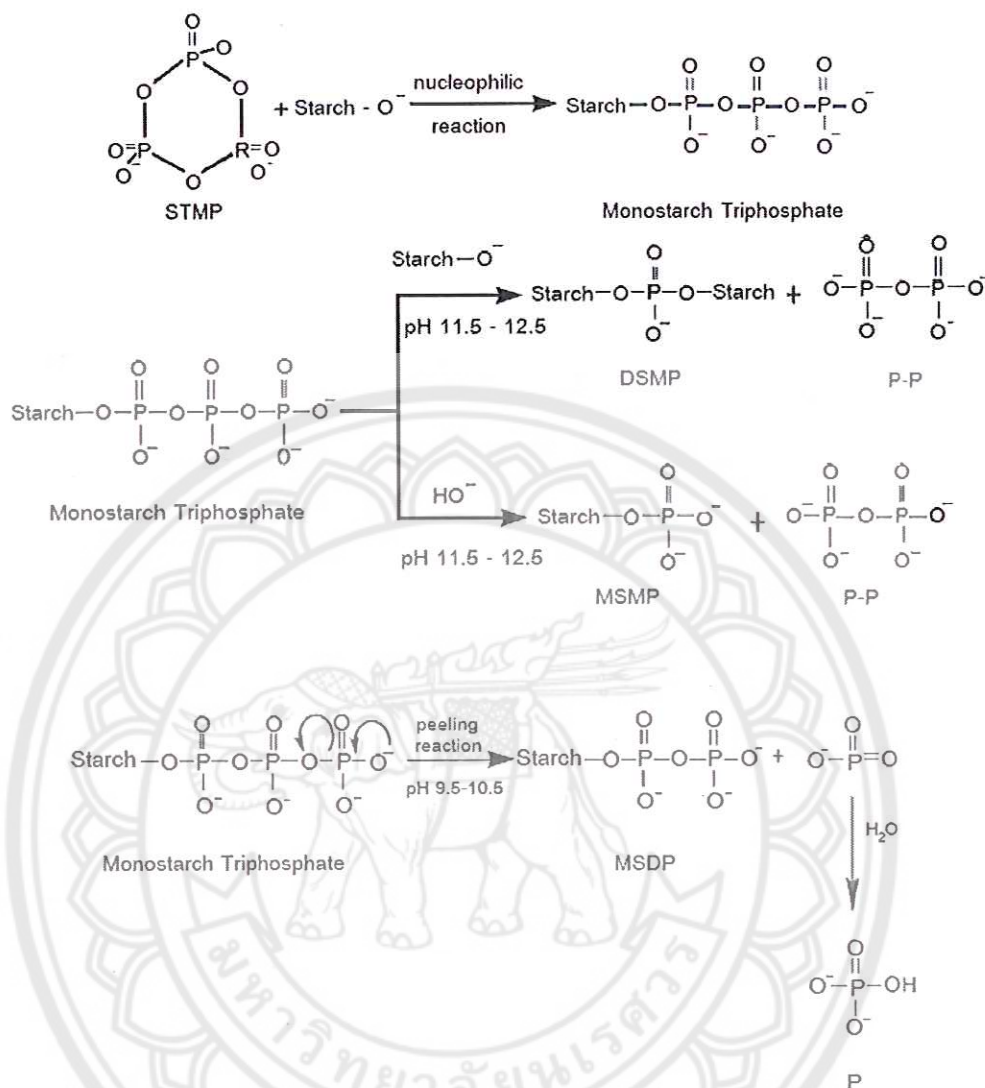
ตาราง 6 (ต่อ)

ประเภทการดัดแปร	ปฏิกิริยา
- โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต	$2\text{StOH} + \text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9 \xrightarrow{\text{Alkali catalyst}} \text{St}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ONa}}{\text{P}}}-\text{O}-\text{St}$
- EPI	$2\text{StOH} + \text{EPI} \xrightarrow{\text{Alkali catalyst}} \text{St}-\text{O}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{St}$

หมายเหตุ: St. = สตาร์ช

ที่มา: ดัดแปลงจาก Singh, et al., 2007, p. 4

แป้งดัดแปรไตรโพลีฟอสเฟตโดยการครอสลิงค์จะมีความคงทนต่อกรดและด่างอ่อน มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงกว่าแป้งดิบ และมีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าแป้งดิบ เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการครอสลิงค์ช่วยยึดโครงสร้างของเม็ดแป้ง จึงเกิดการพองตัวและแตกตัวช้าลง เกิดการเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำลง การผลิตแป้งครอสลิงค์โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในสถานะต่างจะเกิดปฏิกิริยาเมื่อไฮโดรเจนไอออนในโมเลกุลแป้งสูญเสียไปในสถานะต่าง ทำให้ได้แป้งแอลกอฮอล์ไอออน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่อโดยทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในหมู่ฟอสเฟตของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและเกิดการพันธะเชื่อมระหว่างแป้งกับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเป็นโมโนสตาร์ชไตรโพลีฟอสเฟต (monostarch tripolyphosphate: MSTP) และเมื่อเกิดปฏิกิริยากับแป้งแอลกอฮอล์ไอออนอีกจะได้ไตรโพลีฟอสเฟต (distarch monophosphate: DSMP) และไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate: P – P) แต่หากเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลจะได้โมโนสตาร์ชโมโนฟอสเฟต (monostarch monophosphate: MSMP) และไพโรฟอสเฟต (จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 21-22) โดยการเกิดปฏิกิริยาดัง ภาพ 6



ภาพ 6 ปฏิกริยาการครอสลิงค์ของแป้งและโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต

หมายเหตุ: STMP = โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต, DSMP = ไดสตาร์ชโมโนฟอสเฟต, MSMP =
โมโนสตาร์ชโมโนฟอสเฟต, MSDP = โมโนสตาร์ชไดฟอสเฟต, P-P = ไพโรฟอสเฟต

ที่มา: Sang, et al., 2007 อ้างอิงใน จารุณี โลกสุวรรณ, 2549, หน้า 22

Wongsagonsup, et al. (2005) ศึกษาการใช้ STMP (ร้อยละ 2, 5 และ 10) และ STPP (ร้อยละ 1, 2, 4 และ 6) ดัดแปรแป้งข้าว ซึ่งพบว่าค่าความหนืดสูงสุด breakdown และความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ STMP เนื่องจากแป้งกับ STPP จะเกิดปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชันซึ่งเกิดพันธะเชื่อมโมเลกุลเพียงเล็กน้อย เม็ดแป้งถูกทำลายได้ง่าย แต่จะเกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์เมื่อใช้ STMP ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของเม็ดแป้งความหนืดจึงลดลง

Silva, et al. (2006) ศึกษาถึงผลของปริมาณฟอสฟอรัสและอุณหภูมิต่อพลังงานในการทำละลายโครงสร้างของแป้ง โดยผลิตแป้งข้าวโพดครอสลิงค์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสมีผลต่อค่ายังโมดูลัส พลังงานจำเพาะแรงเฉือน และแรงดึงในการทำละลายโครงสร้างของแป้งครอสลิงค์ ซึ่งแป้งครอสลิงค์ที่มีโครงสร้างแข็งแรงที่สุดผลิตที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และมีปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 0.0132

Mounsey and O'Riordan (2008) ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวที่มีระดับอะไมโลสต่างๆ (2.5, 15 และ 28%) โดยปฏิกิริยาครอสลิงค์ด้วย STMP จากนั้นเติมในซีสเทียม ซึ่งพบว่าซีสเทียมที่เติมแป้งดัดแปรมีการละลายน้อยกว่าที่ไม่เติมแป้ง และมีขนาดเม็ดไขมันเล็กกว่าเมื่อตรวจดูโครงสร้างภายใต้กล้อง SEM แสดงให้เห็นว่ามีสมบัติในการเกิดอิมัลชันที่ดีและมีความแข็งแรง

Sang, et al. (2010) ศึกษาการดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชัน (โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต) ในสภาวะที่ค่าพีเอช 9, 10, 11 และ 12 ซึ่งจะได้แป้งที่มีปริมาณของฟอสเฟตรูปแบบต่างๆ และการย่อยสลายแตกต่างกัน โดยแป้งจะมีความคงตัวที่ค่าพีเอช 9 และเริ่มเปลี่ยนแปลง การครอสลิงค์เป็นสตาร์ชไดเอสเทอร์จะเริ่มเกิดที่ค่าพีเอช 11.5 และที่ค่าพีเอช 12 ระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตเอสเทอร์จะลดลงประมาณร้อยละ 22 แต่เกิดไดเอสเทอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 18 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้แป้งเกิดการทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ส่วนที่ค่าพีเอชสูงกว่า 12 จะมีปริมาณฟอสเฟตไดเอสเทอร์ทั้งหมดลดลง

อิสราภรณ์ เอ็มรัตน์ และคณะ (2554) ศึกษาการดัดแปรแป้งพุทธรักษาโดยการครอสลิงค์ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่ระดับต่างๆ (ร้อยละ 0.005 ถึง 0.5) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งแป้งดัดแปรที่ได้มีเม็ดแป้งลักษณะเหมือนแป้งดิบ มีปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 0.032 ถึง 0.042 สูงขึ้นตามปริมาณ STMP โดยความหนืดของแป้งจะสูงขึ้นเมื่อดัดแปรด้วยระดับ STMP ร้อยละ 0.005 ถึง 0.1 แต่ลดลงที่ระดับปริมาณ STMP ร้อยละ 0.2 และ 0.5 และมีความคงตัวต่อแรงเฉือนมากกว่าแป้งดิบ ส่วนแป้งที่ดัดแปรที่ระดับ STMP ร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 จะมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็งมากกว่าแป้งดิบ

Mbougueng, et al. (2012) รายงานว่าวิธีอะซิติลเลชั่นแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง จะทำให้ปริมาณอะไมโลสและความชื้นของแป้งสูงขึ้น แป้งมีการดูดซับน้ำและการละลายที่ อุณหภูมิสูงมากขึ้น อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเจลาติเซชันของแป้งลดลง

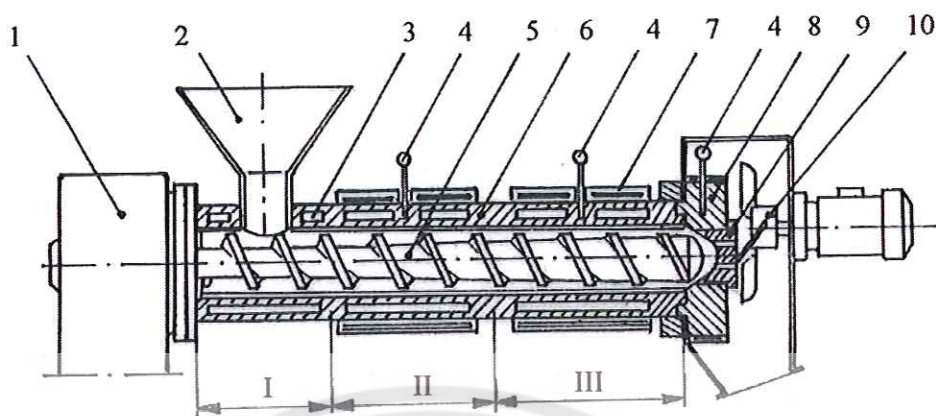
Wongsagonsup, et al. (2014) ศึกษาการผลิตแป้งครอสลิงค์โดยการผสมไซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟตและไซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ถึง 6.0 โดยน้ำหนักของ แป้ง ที่ค่าพีเอช 11 และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยานาน 3 ชั่วโมง โดย พบว่าความชื้นของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารครอสลิงค์ และเมื่อเติมลงในซूप เพื่อเป็นสารให้ความข้นหนืดในปริมาณร้อยละ 1.0 จะให้เนื้อสัมผัสที่ดีและมีความคงทนต่อสภาวะ ต่างๆ มากขึ้น

ปัจจุบันการดัดแปรแป้งอาจใช้การดัดแปรหลายวิธีร่วมกันเพื่อให้แป้งดัดแปรสมบัติ เหมาะสมในหลายด้าน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ เพื่อความสะดวก ความรวดเร็วในการผลิต รวมถึงลดต้นทุนในกระบวนการผลิต เป็นต้น

กระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน (Reactive extrusion)

1. เอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่รวมเอาหลายกระบวนการเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสม (mixing) การนวด (kneading) การทำให้สุก (cooking) และการทำให้เกิดรูปร่าง (shaping) ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการผลิตอาหารประเภทขนมขบเคี้ยว โดยผลิตภัณฑ์จากเครื่อง เอ็กซ์ทรูเดอร์แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบพองสุกทันที (direct expansion) ซึ่งจะเกิดการสุกและ พองตัวทันทีที่ออกจากหน้าตาย สามารถรับประทานได้ทันที หรือมีการทำแห้งก่อน แต่ไม่ จำเป็นต้องทำให้สุกอีก และอีกแบบคือไม่สุกพองทันที (indirect expansion) ซึ่งจะได้เป็น ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่ต้องผ่านกระบวนการอื่นก่อน เช่น การต้ม ทอด อบ เป็นต้น (ประชา บุญญศิริกุล, 2537, หน้า 235-248) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วยหลายส่วนประกอบ ดังที่แสดง ใน ภาพ 7



ภาพ 7 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว

หมายเหตุ: 1 = engine, 2 = feeder, 3 = cooling jacket, 4 = thermocouple,
5 = screw, 6 = barrel, 7 = heating jacket, 8 = head,
9 = net, 10 = cutter,
I = transport section, II = compression section, III = melting and plasticization section

ที่มา: Mościcki, et al., 2009 as cited in Mościcki, et al., 2013, p. 320

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวนิยมใช้กับวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหยาบ เช่น เกล็ดข้าวโพด เมล็ดธัญชาติ เป็นต้น ส่วนเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จะทำให้เกิดการผสมที่ดีและสม่ำเสมอกว่าแบบสกรูเดี่ยวสามารถใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลาย ทั้งแบบผงละเอียด ผงหยาบ และปริมาณความชื้นต่างๆ โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่สามารถแบ่งได้ตามการหมุนของสกรู ได้แก่ แบบหมุนตามและแบบหมุนตรงข้าม และแบ่งตามการซ้อนทับกันของสกรู เป็นต้น ลักษณะและสภาวะการทำงานของเครื่อง ทั้งอุณหภูมิของบารเรล อัตราการหมุนของสกรู การจัดเรียงสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ส่วนประกอบ ลักษณะสาย จะมีผลต่อการผสม แรงเฉือน ความดันภายในและภายนอก และการลำเลียงวัตถุดิบไปตามท่อของเครื่อง และมีผลไปถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Chang, 2003, p. 129) ซึ่งแรงเฉือนและอุณหภูมิของบารเรลเป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการนี้ อุณหภูมิบารเรลที่สูงทำให้เกิดการหลอมเหลวสูง เกิดการพองตัวที่ดี และความชื้นของอาหารต่ำเมื่อออกจากเครื่อง (Chaiyakul, et al., 2009) ส่วนแรงเฉือนที่มากก่อให้เกิดการผสมที่ดี เกิดการทำลายโครงสร้าง

ต่างๆ เกิดปฏิกิริยาได้สูง โดย Guha, et al. (1998) รายงานว่าการดูดน้ำของแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันเร็วกว่าแป้งปกติ นอกจากนี้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นกระบวนการต่อเนื่อง เหมาะสมสำหรับการใช้เพื่อตัดแปรคุณสมบัติของแป้ง (Shanavas, 2013, p. 25)

2. การศึกษาการตัดแปรแป้งโดยเอกซ์ทรูชันและการใช้ในอาหาร

Nabeshima and Grossmann (2001) ศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งพรีเจลและครอสลิงค์จากกระบวนการรีเอกทีฟเอกซ์ทรูชันด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้แป้งเกิดการเจลาติไนเซชันด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดการครอสลิงค์ที่ดีด้วยหมู่ฟอสเฟตจากโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต โดยมีค่าการแทนที่สูงสุดเป็น 1.5×10^4 ซึ่งการครอสลิงค์และการเกิดเจลาติไนเซชันจะทำให้แป้งที่ได้มีการดูดซับน้ำที่สูง และการครอสลิงค์จะทำให้แป้งเกิดเจลที่แข็งแรงขึ้นตามปริมาณฟอสเฟตและความเป็นด่าง ทนต่ออุณหภูมิและแรงเฉือนมากขึ้น แต่มีความเหนียวและการละลายลดลง

Seker, et al. (2003) ศึกษาผลของการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยวและชนิดสกรูคู่ในการตัดแปรแป้งโดยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตต่อปริมาณการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสและแป้ง โดยการใช้เอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่ความเร็วสกรู 160 รอบต่อนาที และสกรูเดี่ยวที่ 180 รอบต่อนาที เป็นสถานะที่ให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากัน จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในเอกซ์ทรูเดอร์เท่ากัน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เกิดปฏิกิริยากับแป้งทั้งในเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่และสกรูเดี่ยวไม่แตกต่างกัน และการเพิ่มความเร็วมอเตอร์ทำให้ระยะเวลาในการตัดแปรแป้งลดลง

Seker and Hanna (2005) ศึกษาการผลิตแป้งครอสลิงค์ด้วยกระบวนการฟอสโฟรีเลชันโดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วสกรูต่างๆ (40, 90 และ 140 รอบต่อนาที) และปรับความชื้นเริ่มต้นของแป้งเป็นร้อยละ 40, 50 และ 70 ซึ่งแป้งที่ได้มีการละลายที่ลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการดูดซับน้ำ

Murúa-Pagola, et al. (2009) ศึกษาการตัดแปรแป้งข้าวโพดด้วยการเตรียมอนุพันธ์ (acetylated, *n*-octenylsuccinylated starch: *n*-OSA และ phosphorylated starch) โดย ใช้กระบวนการรีเอกทีฟเอกซ์ทรูชันในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยวและใช้แป้งตัดแปรในการเอนแคปซูลเส้นสารให้กลิ่นรส (น้ำมันฉิวส้ม) โดยแป้งตัดแปรที่ได้จากการเตรียมมีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ มีส่วนของไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิก และเป็นสารเอนแคปซูลเส้นที่ดี มีปริมาณการคืนกลับของน้ำมันสูงถึงร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก

Pedrosa Silva Clerici, et al. (2009) ศึกษาการใช้แป้งข้าวที่ดัดแปรโดยใช้กรดแล็กติกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในกระบวนการเอกซทราซันที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปัง ซึ่งจะให้ขนมปังที่มีสีและเนื้อสัมผัสเหมือนขนมปังจากแป้งสาลี แต่มีปริมาตรที่ต่ำกว่า

แป้งดัดแปรบางชนิดมีสมบัติในการทนต่อสภาวะต่างๆ ในการผลิต เช่น ทนต่อสภาพกรดในอาหารรสเปรี้ยว น้ำสลัด อาหารที่มีส่วนผสมของผลไม้ เป็นต้น เนื่องจากจะให้ความเหนียวที่คงตัวได้นาน ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาการใช้สารประกอบอื่นเพื่อใช้แทนแป้งดัดแปรมากมาย เช่น Agudelo, et al. (2014) ศึกษาการใช้แป้งมันสำปะหลังดิบปริมาณร้อยละ 10 ร่วมกับเพกตินเพื่อเป็นสารให้ความเหนียวของฟิลลิ่งผลไม้ที่มีค่าพีเอช 3.0 ถึง 3.2

Lobato-Calleros, et al. (2014) ศึกษาการใช้แป้งข้าวโพดดิบ แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทางเคมีในปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เพื่อผลิตโยเกิร์ตไขมันต่ำจากหางนม โดยพบว่าการเติมแป้งทำให้ได้โยเกิร์ตที่มีความเหนียวที่คงตัว มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 15 วันต่ำ ในขณะที่โยเกิร์ตไขมันเต็มมีความเหนียวต่ำ และมีค่าร้อยละการชีเนอเรซิสสูง ดังแสดงใน ตาราง 7

ตาราง 7 ค่าชีเนอเรซิสของโยเกิร์ต

โยเกิร์ต	ค่าชีเนอเรซิสวันที่ 1 (กรัมต่อ 100 กรัม)	ค่าชีเนอเรซิสวันที่ 15 (กรัมต่อ 100 กรัม)
โยเกิร์ตไขมันเต็มไม่เติมแป้ง (ตัวอย่างควบคุม)	12.8 ± 0.0 ^b	23.6 ± 2.6 ^c
โยเกิร์ตลดไขมันเต็มแป้งข้าวโพด	7.4 ± 0.3 ^c	8.4 ± 0.4 ^b
โยเกิร์ตลดไขมันเต็มแป้งข้าวโพด ดัดแปรทางเคมี	5.3 ± 0.3 ^b	9.7 ± 0.6 ^c
โยเกิร์ตลดไขมันเต็มแป้งมันสำปะหลัง ดัดแปรทางเคมี	2.5 ± 0.2 ^a	5.8 ± 0.5 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P < 0.05$)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Lobato-Calleros, et al., 2014, p. 112

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ

1. สตาร์ชมันสำปะหลังทางการค้า (บริษัท โพลีเมท จำกัด ประเทศไทย)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า เส้นใย
คาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2000) และปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

2. สตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงค์ทางการค้า

ตัดแปรด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตโดย บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด
ประเทศไทย

สารเคมี

1. โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (A.R. grade: Sigma-Aldrich Inc., MO)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade: RCI Labscan limited, TH)
3. กรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade: RCI Labscan limited, TH)
4. กรดอะซิติก (A.R. grade: RCI Labscan limited, TH)

เครื่องมือ

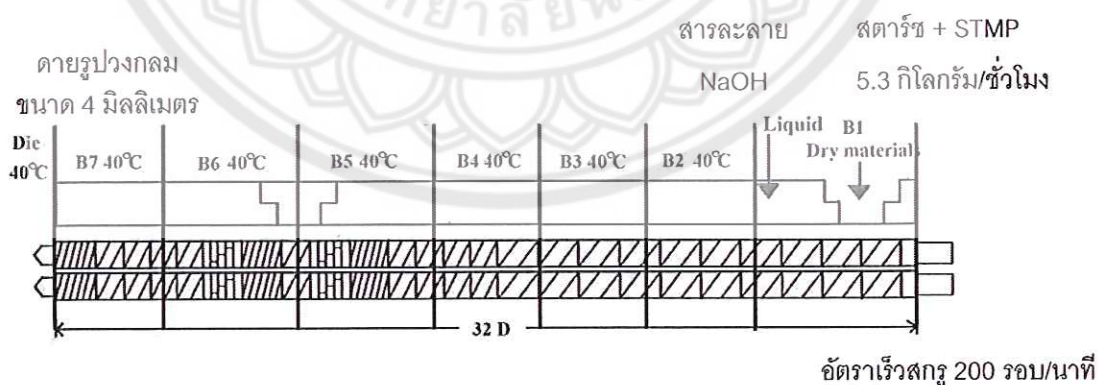
1. เครื่องเอกซเรย์ชนิดสกรูคู (Chareon Tut, CTE – D25L32, TH)
2. ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Kitipoom equipment, KPO700, TH)
3. เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (Mettler Toledo, FEP20 FiveEasy™ PLUS pH)
4. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา (Delta TRAX, 11063)
5. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ชนิด UV - visible detector (Hach, DR/4000, USA)
6. เครื่องวัดสี (Hunter lab, DP900, USA)
7. เครื่องวัดความเร็วสูง
8. ช่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Polyscience, 8205, USA)
9. เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
10. Differential Scanning Calorimetry (DSC 1, Mettler-Toledo Inc.)
11. Rheometer (Gemini 200 HR Nano, Malvern-Bohlin Instruments, UK)

12. XRD (Panalytical, Expert)
13. FTIR (Perkin Elmer, Spectrum GX)
14. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหาร (Brookfield, OTS25, USA)
15. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุ (ICP-OES, OPTIMA8000)
16. เครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Rapid Visco-Analyzer)
17. Polarized light microscope (Meiji MX4300H, Japan)
18. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (HITACHI, S-3400N)

การดำเนินงาน

1. การตัดแปรสตาร์ไขมันสำปะหลังด้วยกระบวนการรีแอกทีฟเอกซ์ทรักชัน

ศึกษากระบวนการรีแอกทีฟเอกซ์ทรักชันที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ไขมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่จากบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด รุ่น CTE – D25L32 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 24.70 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D) เท่ากับ 32 ใช้อัตราการป้อนตัวอย่างของแห้ง 5.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (สตาร์ชผสมกับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้นตามแผนการทดลองและเติมลงไปนีสตาร์ชขณะดำเนินเครื่องให้มีความชื้นตามที่กำหนด ตั้งค่าอุณหภูมิของบารเรล (barrel) ทั้ง 7 โซน เป็น 40 องศาเซลเซียส อัตราการหมุนของกรู 200 รอบต่อนาที และใช้ดาย (die) รูปวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดังภาพ 8



ภาพ 8 การตั้งค่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง

คำนวณพลังงานจำเพาะของกระบวนการ (specific mechanical energy: SME) ของเครื่องในแต่ละตัวอย่าง ตามสมการ 1

$$SME = \frac{2\pi n \tau}{60MFR} \quad (1)$$

เมื่อ	SEM	=	พลังงานจำเพาะของกระบวนการ (kW h/kg)
	π	=	ค่าคงที่ ($\frac{22}{7}$)
	n	=	อัตราเร็วของสกรู (rpm)
	τ	=	ทอร์ก (Nm)
	MFR	=	อัตราการไหลของตัวอย่าง (kg/h)

ระดับของปัจจัยต่างๆ คำนวณตามอัตราการป้อนตัวอย่างของแห้ง ได้แก่ สตาร์ชผสมกับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) โดยปรับอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์ ควบคุมไม่ให้ตัวอย่างเกิดการเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดการ 'ไหม้' ในการทดลองคำนวณอัตราการป้อนของเหลวเป็นปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช) คำนวณช่วงระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามอัตราการป้อนของเหลวที่ใช้ โดยให้ทุกตัวอย่างสตาร์ชตัดแปรที่ได้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8 ถึง 11 และมีลักษณะเป็นแท่ง ผิวเรียบ ไม่เหลวหรือพองมากเกินไป สีไม่เข้มหรือเกิดรอยไหม้

2. แผนการทดลอง

ศึกษาปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อสมบัติของสตาร์ชตัดแปร ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนักของสตาร์ช) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.05 ถึง 0.15 โมลาร์) และความชื้น (ร้อยละ 50 ถึง 85 โดยน้ำหนักของสตาร์ช) แต่ละปัจจัยกำหนดเป็น 3 ระดับ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Box – Behnken ดัง ตาราง 8 และ 9 โดยมีค่ากลาง 3 จุด เตรียมตัวอย่างควบคุมโดยไม่ผสมโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตาราง 8 ระดับความเข้มข้นของปัจจัยแต่ละปัจจัยในแผนการทดลอง

Factor	Low level (-1)	Median level (0)	High level (+1)
X_1 : Moisture content (% w/w starch)	50	67.5	85
X_2 : NaOH concentration (M)	0.05	0.1	0.15
X_3 : STMP content (% w/w starch)	0.5	1.25	2.0

ตาราง 9 แผนการทดลองแบบ Box-Behnken design 3 ปัจจัย (X_1 : ปริมาณน้ำ, ร้อยละ; X_2 : ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, โมลาร์; X_3 : ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต, ร้อยละ) 3 ระดับ และค่ากลาง 3 จุด

Run	Sample	Coded values			Actual values		
		X_1	X_2	X_3	Moisture (% w/w starch)	NaOH (M)	STMP (% w/w starch)
1	014	0	-1	1	67.5	0.05	2
2*	007	0	0	0	67.5	0.1	1.25
3	006	1	-1	0	85	0.05	1.25
4	015	-1	0	1	50	0.1	2
5	002	-1	0	-1	50	0.1	0.5
6	003	1	0	-1	85	0.1	0.5
7	004	0	1	-1	67.5	0.15	0.5
8	013	1	1	0	85	0.15	1.25
9	017	0	1	1	67.5	0.15	2
10	012	-1	1	0	50	0.15	1.25
11	005	-1	-1	0	50	0.05	1.25
12*	008	0	0	0	67.5	0.1	1.25

ตาราง 9 (ต่อ)

Run	Sample	Coded values			Actual values		
		X_1	X_2	X_3	Moisture (% w/w starch)	NaOH (M)	STMP (% w/w starch)
13	001	0	-1	-1	67.5	0.05	0.5
14	016	1	0	1	85	0.1	2
15*	009	0	0	0	67.5	0.1	1.25

หมายเหตุ: * = ค่ากลาง

หาสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัย (second order polynomial model)

ด้วยโปรแกรม Design – Expert 6.0.2 ตามสมการ (2)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2)$$

เมื่อ	Y	=	คุณสมบัติของสตาร์ชครอสลิงค์
	β	=	สัมประสิทธิ์
	X_1	=	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช)
	X_2	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)
	X_3	=	ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช)

3. การเตรียมสตาร์ชหลังดัดแปร

ดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชันตามแผนการทดลอง ตัดแต่งสตาร์ชที่ผ่านดาเยเป็นชิ้นเล็กๆ อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง บดให้ละเอียด (วัดค่าพีเอชของสารละลายสตาร์ชในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จากนั้นหยุดปฏิกิริยาและล้างฟอสเฟตส่วนเกิน โดยการละลายสตาร์ชในน้ำกลั่น อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเป็น 1 ต่อ 4 และปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 9000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ปรับค่าพีเอชเป็น 6.5 และล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง บดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนทำการวิเคราะห์

ตอนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อระดับการแทนที่และระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร

1. ปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่

1.1 ปริมาณฟอสฟอรัส (AOAC, 2000)

ซึ่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่หลอดย่อย เติมสารละลาย Nitric : Perchloric อัตราส่วน 2 : 1 ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง และย่อยด้วย Block Digestion จนสารละลายใส และปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุ ICP – OES รุ่น OPTIMA8000 เทียบกับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

1.2 ระดับการแทนที่ (Degree of substitution; DS)

คำนวณค่าระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตในสตาร์ชครอสลิงค์ตามวิธีการคำนวณของ Nabeshima and Gross-mann (2001, p. 348) ตามสมการ (3)

$$\text{Degree of substitution} = \frac{162P}{(3100 - 124P)} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } P = \text{ปริมาณฟอสฟอรัส (\%)}$$

2. สมบัติทางความหนืดและระดับการครอสลิงค์

2.1 คุณสมบัติทางความหนืดโดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

วิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วย Rapid Visco-Analyzer โดยค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงในสตาร์ชจนมีความชื้นร้อยละ 8 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และค้างไว้เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึง 45 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.2 ระดับการเกิดครอสลิงค์ (Degree of cross – linking)

คำนวณค่าระดับการเกิดครอสลิงค์จากความหนืดของสตาร์ชดิบและสตาร์ชครอสลิงค์ตามวิธีการคำนวณของ Koo, et al. (2010, p. 620) ตามสมการ (4)

$$\text{Degree of cross - linking (\%)} = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ	A	=	ความหนืดสูงสุดของสตาร์ชดิบ
	B	=	ความหนืดสูงสุดของสตาร์ชครอสลิงค์

แสดงพื้นที่ตอบสนองของปัจจัยต่างๆ ต่อระดับการแทนที่และระดับการเกิดครอสลิงค์ และหาสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ (2) และแบ่งกลุ่มสตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้ตามระดับการเกิดครอสลิงค์หรือระดับการแทนที่เพื่อศึกษาใน ตอนที่ 2

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของระดับการครอสลิงค์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน

ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับการครอสลิงค์ต่างๆ ตามที่คัดเลือกจากแต่ละกลุ่มได้จากผลการทดลองตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและและสตาร์ชควบคุมจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่ดัดแปรด้วยปริมาณความชื้นร้อยละ 67.5

1. สมบัติทั่วไป

1.1 สี (Hunter lab)

วัดค่าสี L^* , a^* , b^* ของสตาร์ชดิบด้วยเครื่องวัดสีระบบ Hunter lab และคำนวณค่า ΔE ของสตาร์ชครอสลิงค์เปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบตามสมการ (5)

$$\Delta E = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}} \quad (5)$$

1.2 คุณสมบัติทางความร้อนโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

เตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์โดยชั่งสตาร์ช 5 มิลลิกรัม ใส่แพนอลูมิเนียมผสมน้ำกลั่น 10 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC 1, Mettler-Toledo Inc.) จากอุณหภูมิ 20 ถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้แพนเปล่าเป็นตัวอ้างอิง และใช้แก๊สไนโตรเจนผ่านด้วยอัตราการไหล 50 ไมโครลิตรต่อนาที

บันทึกค่า T_{on} (onset temperature), T_p (peak temperature), T_{en} (end set temperature) และ ΔH (enthalpy)

1.3 ค่าการละลายน้ำ และกำลังการพองตัว (water solubility index และ Swelling factor) (Lee, et al., 2012, p. 165)

ซึ่งสตาร์ช 2.5 กรัม (W_1) ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่ซึ่ง น้ำหนักแล้ว เติมน้ำ 30 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิท เขย่าและแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 30 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที เทส่วนใสใส่ใน moisture can ที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแล้ว และชั่งน้ำหนัก ตะกอนหลังปั่นเหวี่ยง (W_2) อบส่วนใสและ moisture can ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 6 ชั่วโมง) บันทึกน้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง (W_3) โดยค่าการละลาย (WSI) และกำลังการพองตัว (Swelling factor) คำนวณได้จากสมการ (6) และ (7)

$$\text{การละลายน้ำ (WSI)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง (} W_3 \text{)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (} W_1 \text{)}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Swelling factor} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนหลังปั่นเหวี่ยง (} W_2 \text{)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (} W_1 \text{)}} \quad (7)$$

2. สมบัติทางรีโอโลยีและความคงตัว

วิเคราะห์สมบัติทางการไหลและสมบัติความคงตัวในตัวอย่างสตาร์ชโครอสลิงค์ที่ แบ่งกลุ่มได้ตามระดับการแทนที่และระดับการเกิดโครอสลิงค์ในการศึกษาตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับ สตาร์ชควบคุมและสตาร์ชดิบ

2.1 คุณสมบัติทางรีโอโลยี (Wongsagonsup, et al., 2014, p. 658)

วิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rotational rheometer (Gemini 200 HR Nano, Malvern-Bohlin Instruments, UK) ใช้ระบบการวิเคราะห์แบบ parallel plate ใช้หัววิเคราะห์ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างเพลทเป็น 500 ไมโครเมตร โดยวิเคราะห์ linear line ของตัวอย่าง ในช่วง 0.1 ถึง 100 % strain ที่ ความถี่ 1 เฮิร์ต ก่อนทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ Frequency sweep

เตรียมสารละลายสตาร์ชตามวิธีของ Osundahunsi, et al. (2011, p. 1917) โดยให้มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในน้ำกลั่น ผสมเป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้น ต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ตัวอย่างทันที โดยให้อิมิตัวระหว่างเพลทเป็นเวลา 15 นาที ก่อนให้ความถี่ กำหนดช่วงความถี่เป็น 0.1 ถึง 20 เฮิร์ต (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 0.1% strain)

การวิเคราะห์ Temperature sweep

เตรียมสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในน้ำ กลั่น ผสมเป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนการวิเคราะห์ ปิดขอบระหว่างเพลทด้วยพาราฟินออย เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ วิเคราะห์ตัวอย่างที่ช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส (ความถี่ 1 เฮิร์ต และ 0.1% strain)

2.2 คุณสมบัติของเจล (Wattanachant, et al., 2003, p. 465)

เตรียมเจลจากสตาร์ชให้มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น เทใส่บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยให้มีความสูง 2 เซนติเมตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วิเคราะห์ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความเกาะติดกัน (cohesiveness) ของเจลด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ใช้หัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ให้แรงกดเป็นระยะทางครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่าง ด้วยความเร็ว 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

เตรียมสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหลอดทดลอง ปิดฝาให้สนิท ต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที ลดอุณหภูมิ และวัดค่าความใสโดยแสดงเป็นค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (%transmittance) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงชนิด UVVIS โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น blank ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

2.3 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง (Deetae, et al., 2008, p. 353)

เตรียมสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร ต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงและแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง วิเคราะห์การซีโนเรซิสของเจลสตาร์ชโดยปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000g เป็นเวลา 20 นาที คำนวณค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำที่ออกจากเจลต่อน้ำหนักเจล (ค่าร้อยละการซีโนเรซิส) เป็นระยะเวลา 5 รอบ

2.4 ความคงตัวต่อการกด (Luo, et al., 2009, p. 564)

วิเคราะห์ค่าความหนืด (shear viscosity) ของสารละลายสตาร์ช ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช 3.0 เปรียบเทียบกับที่ค่าพีเอช 7.0 โดยใช้ Rotational rheometer (Gemini 200 HR Nano, Malvern-Bohlin Instruments, UK) ใช้ระบบการวัดแบบ parallel plate ใช้หัววัดไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร โดยให้มีระยะระหว่างเพลท 500 ไมโครเมตร วิเคราะห์ด้วยอัตราเฉือน (shear rate) 0.01 ถึง 100

3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและการเกิดครอสลิงค์

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่แบ่งกลุ่มได้ตามระดับการเกิดครอสลิงค์ในการศึกษา ตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชควบคุม

3.1 ภาพถ่ายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช (Polarized light microscopy)

ถ่ายภาพลักษณะเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Meiji, MX4300H, Japan) ที่กำลังขยาย 50 เท่า

3.2 ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning electron microscopy: SEM)

ถ่ายภาพโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (HITACHI, S-3400N) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

3.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ประเมินหมู่โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชครอสลิงค์ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการดัดแปรเปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบด้วยเครื่อง FTIR (Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX)

3.4 X-ray diffraction (XRD)

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชครอสลิงค์หลังจากผ่านการดัดแปรที่สภาวะต่างๆ โดยเครื่อง XRD (Panalytical รุ่น Expert) ที่ 40 กิโลโวลต์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ ด้วยอัตรา 5° ต่อนาที โดยแสดงผล (2θ) ระหว่าง 5° ถึง 50° และ step size 0.1°

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ของแต่ละตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง และแสดงพื้นที่ตอบสนองจากปัจจัยต่างๆ ด้วยเทคนิคการแสดงผลที่ตอบสนอง นำผลที่ได้มาหาสมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ กับคุณสมบัติของสตาร์ชด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.2 ทดสอบความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยโปรแกรม SPSS 17.0

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้น ไชเดียมไฮดรอกไซด์และไชเดียมไตรเมตาฟอสเฟตต่อระดับการแทนที่และระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร

1. องค์ประกอบของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (Native cassava starch)

สตาร์ชมันสำปะหลังดิบทางการค้าที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษานี้มีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000) ดังนี้ มีปริมาณความชื้นร้อยละ 10.98 ± 0.57 โปรตีนร้อยละ 0.08 ± 0.00 ไขมันร้อยละ 0.19 ± 0.00 เยื่อใยร้อยละ 1.23 ± 0.05 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 86.93 ± 0.20 โดยวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชได้ร้อยละ 97.18 ± 0.21 วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสตามวิธีของ Juliano (1971, p. 337) ได้ร้อยละ 16.62 ± 0.41 และในสตาร์ชมันสำปะหลังดิบปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 0.007 ซึ่งโดยทั่วไปสตาร์ชดิบจะมีปริมาณฟอสฟอรัสน้อย (Jonhed, 2006, p. 14) และฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Lim, et al., 1994, pp. 489-491)

2. พลังงานจำเพาะของกระบวนการ (specific mechanical energy: SME)

ค่าพีเอช อุณหภูมิ ลักษณะปรากฏ และค่าสี

ในขั้นตอนการดัดแปรสตาร์ชตามแผนการทดลอง คำนวณค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการ (SME) ในการดัดแปรสตาร์ชแต่ละตัวอย่างได้ดังแสดงในตาราง 10 ค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการอยู่ในช่วง 0.13 ถึง 0.18 kW h/kg ค่าพลังงานนี้เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตตัวอย่าง 1 กิโลกรัม โดยค่าที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณวัตถุดิบของแห้ง ปริมาณน้ำ อัตราเร็วในการปั่นวัตถุดิบ ความเร็วการหมุนของสกรู การจัดเรียงสกรู เป็นต้น

ค่าพีเอชของสารละลายสตาร์ชครอสลิงค์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของตัวอย่างสตาร์ชที่ได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 7.57 ถึง 10.16 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการศึกษาว่าเกิดปฏิกิริยาฟอสโฟไรเลตและครอสลิงค์ได้ (Sang, et al., 2010, pp. 325-326)

แห้งสตาร์ชหลังจากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์มีอุณหภูมิ 65 ถึง 95 องศาเซลเซียส เนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทราชันเกิดความร้อนจากการเสียดสีและแรงเฉือนจึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลสตาร์ชได้ และส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เช่นกัน

ตาราง 10 ค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการ ค่าพีเอช อุณหภูมิ และค่าสีของสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรรูปตามแผนการทดลอง สตาร์ชและสตาร์ชควบคุม

Sample/Run	Moisture (% w/w starch)	NaOH (M)	STMP (% w/w starch)	Temperature (°C)	pH	SME (kW h/kg)	L*	a*	b*	ΔE
Native	-	-	-	-	6.61	-	89.77±0.00 ^a	0.39±0.00 ⁱ	3.00±0.00 ⁱ	-
Control										
MC 50%	50	-	-	95.0	6.55	0.17	87.44±0.09 ^d	0.44±0.03 ^{ghi}	2.69±0.18 ^k	5.42±0.40 ^h
MC 67.5%	67.5	-	-	86.3	6.52	0.14	87.83±0.10 ^c	0.32±0.02 ^k	3.07±0.03 ^l	3.76±0.39 ^l
MC 85%	85	-	-	70.2	6.48	0.13	87.99±0.03 ^c	0.43±0.03 ^{hij}	2.61±0.07 ^k	3.18±0.10 ^l
1	67.5	0.05	2	88.0	7.57	0.14	86.31±0.16 ^l	1.16±0.02 ^b	5.03±0.11 ^b	11.99±1.07 ^b
2*	67.5	0.1	1.25	76.4	9.00	0.15	87.46±0.03 ^d	0.78±0.01 ^e	4.24±0.02 ^g	5.34±0.14 ^g
3	85	0.05	1.25	65.0	8.68	0.13	87.19±0.00 ^e	0.86±0.02 ^d	4.43±0.04 ^l	6.66±0.00 ^{ef}
4	50	0.1	2	89.0	7.60	0.18	86.96±0.09 ^l	0.95±0.03 ^c	4.54±0.09 ^{ef}	7.92±0.48 ^d
5	50	0.1	0.5	81.0	8.74	0.18	85.36±0.03 ^k	1.37±0.02 ^a	5.45±0.03 ^a	19.42±0.22 ^a
6	85	0.1	0.5	68.0	10.16	0.13	87.17±0.13 ^e	0.57±0.05 ^l	4.56±0.08 ^{de}	6.75±0.69 ^e
7	67.5	0.15	0.5	93.5	9.77	0.18	86.68±0.23 ^{gh}	0.49±0.05 ^g	4.08±0.06 ^h	9.58±1.46 ^d

ตาราง 10 (ต่อ)

Sample/Run	Moisture (% w/w starch)	NaOH (M)	STMP (% w/w starch)	Temperature (°C)	pH	SME (kW h/kg)	L*	a*	b*	ΔE
8	85	0.15	1.25	71.7	9.51	0.13	88.43±0.10 ^b	0.41±0.04 ^j	4.05±0.06 ^h	1.79±0.28 ^j
9	67.5	0.15	2	78.0	9.72	0.14	87.52±0.10 ^d	0.79±0.03 ^g	4.69±0.06 ^{cd}	5.07±0.42 ^f
10	50	0.15	1.25	91.0	8.82	0.18	86.26±0.26 ^{ij}	1.17±0.03 ^b	4.92±0.13 ^b	12.36±1.80 ^b
11	50	0.05	1.25	89.5	7.94	0.18	86.51±0.04 ^h	1.13±0.01 ^b	4.74±0.02 ^e	10.63±0.26 ^c
12*	67.5	0.1	1.25	82.8	9.09	0.15	86.80±0.05 ^{fg}	0.81±0.02 ^{de}	4.63±0.02 ^{cde}	8.82±0.31 ^d
13	67.5	0.05	0.5	76.0	8.82	0.15	86.11±0.10 ⁱ	0.83±0.03 ^{de}	4.95±0.02 ^b	13.40±0.75 ^b
14	85	0.1	2	77.0	9.19	0.13	88.29±0.06 ^b	0.46±0.04 ^{gh}	3.74±0.02 ⁱ	2.18±0.18 ⁱ
15*	67.5	0.1	1.25	79.9	9.21	0.15	86.79±0.04 ^{fg}	0.78±0.02 ^e	4.63±0.02 ^{cde}	8.86±0.25 ^d

หมายเหตุ: * = ค่ากลาง

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ลักษณะปรากฏของแป้งสตาร์ชหลังออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีความแตกต่างกัน
ดังแสดงใน ภาพ 9



ภาพ 9 ตัวอย่างสตาร์ชดัดแปรโดยกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน

ความแตกต่างของขนาด การพองตัว และสีของแป้งสตาร์ช เกิดเนื่องจากปัจจัยในการดัดแปร ทั้งปริมาณน้ำ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต โดยตัวอย่างที่ดัดแปรโดยใช้ปริมาณน้ำสูงจะมีสีของแป้งสตาร์ชที่ขาวขุ่น ผิวเรียบ และพองตัวน้อย เนื่องจากเมื่อมีปริมาณน้ำสูงทำให้เกิดการขับเคลื่อนในเครื่องได้ง่าย ลดแรงเฉือน ความดันภายในเครื่องน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้ น้ำต่ำ เมื่อออกจากเครื่องจึงเกิดการพองตัวที่น้อยกว่า และยังเกิดการเจลาติไนเซชันน้อยกว่า แป้งสตาร์ชจึงมีความขุ่นกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณน้ำต่ำจะมีสีเข้มใส และมีการพองตัวมากกว่า นอกจากนี้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังส่งผลให้แป้งสตาร์ชมีสีที่เข้มและใสขึ้นกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากทำให้เกิดการย่อยสตาร์ช โดยในงานวิจัยของ Song, et al. (2011, p. 210) พบว่าแป้งสตาร์ชจากเครื่อง

เอกซ์ทรูเดอร์ที่ไม่ครอสลิงค์มีสีขาวขุ่นและผิวเรียบ ในขณะที่แท่งสตาร์ชครอสลิงค์มีความใส สีเข้มขึ้นและผิวเริ่มขรุขระ ทั้งนี้ เมื่อบดละเอียดแท่งสตาร์ชทั้งหมดแล้วจะมีสีขาว ซึ่งเข้มกว่าสตาร์ชดิบเล็กน้อย ดังภาพ 9 ผงสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีลักษณะผงสีขาวสว่าง ในขณะที่สตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะมีสีเข้ม มีค่าสีเหลือง (b^*) สูงกว่า เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับค่าสีและลักษณะของแท่งสตาร์ช โดยมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งแสดงค่าสีที่เปลี่ยนแปลงโดยรวม (ΔE) เพิ่มขึ้นด้วย (ตาราง 10) โดยอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันและการใช้สารละลายต่างทำให้เกิดการย่อยสตาร์ชทำให้สีของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป

3. การศึกษาสมการถดถอยและแบบจำลองความสัมพันธ์ของปัจจัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส ระดับการแทนที่ (degree of substitution: DS) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และระดับการครอสลิงค์ (degree of cross – linking) ของตัวอย่างสตาร์ชตัดแปรตามแผนการทดลอง แสดงในตาราง 11 และผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย (β) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย (R^2) แสดงในตาราง 12

3.1 ปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่

ปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตของสตาร์ชครอสลิงค์โดยกระบวนการรีเอ็กทีฟเอกซ์ทรูชันในการศึกษานี้แสดงในตาราง 11 ปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear) กับปัจจัยในการผลิต มีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.9053 และ 0.8979 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตมากที่สุด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า 2 ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณฟอสฟอรัสและการแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟตในสตาร์ชครอสลิงค์ อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อปริมาณฟอสฟอรัสและต่อระดับการแทนที่แสดงในตาราง 12 และแบบจำลองความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อปริมาณฟอสฟอรัสและต่อระดับการแทนที่แสดงในภาพ 10 และ 11 ตามลำดับ

ตาราง 11 ปริมาณฟอสฟอรัส ระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต (DS) ระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรตามแผนการ
 • ทดลอง สตาร์ชดิบและสตาร์ชควบคุม

Sample/Run	Phosphorus (%)	Degree of substitution	Peak viscosity (cP)	Final Viscosity (cP)	Degree of cross-linking (%)
Native.	0.006±0.000 ^k	-	5,032.67 ± 23.97 ^a	3,213.00 ± 37.00 ^b	-
Control					
MC 50%	0.007±0.000 ^k	-	148.33 ± 25.32 ^k	429.00 ± 26.51 ^h	-
MC 67.5%	-	-	1,620.33 ± 35.12 ^d	1,690.33 ± 55.47 ^e	-
MC 85%	0.007±0.000 ^k	-	1,465.67 ± 43.65 ^e	1,649.67 ± 11.93 ^e	-
1	0.269±0.015 ^a	0.0284±0.00016 ^a	1,108.67 ± 18.01 ^g	1,930.67 ± 26.31 ^d	77.97 ± 0.36 ⁱ
2*	0.154±0.000 ⁱ	0.0162±0.0000 ⁱ	76.33 ± 4.16 ⁱ	182.67 ± 3.06 ^k	98.48 ± 0.08 ^a
3	0.141±0.002 ^g	0.0148±0.00002 ^g	158.00 ± 4.00 ^k	359.00 ± 8.66 ⁱ	96.86 ± 0.08 ^b
4	0.240±0.001 ^c	0.0253±0.00001 ^c	2,196.67 ± 40.20 ^c	3,185.33 ± 5.51 ^b	56.35 ± 0.80 ^h
5	0.120±0.003 ^f	0.0125±0.0000 ^h	880.67 ± 37.42 ^h	1,509.33 ± 41.48 ^f	82.50 ± 0.74 ^e
6	0.096±0.000 ⁱ	0.0100±0.00003 ⁱ	132.67 ± 6.81 ^k	277.33 ± 9.29 ^j	97.36 ± 0.14 ^b
7	0.073±0.006 ⁱ	0.0076±0.00006 ⁱ	232.00 ± 11.53 ^j	498.33 ± 38.37 ^g	95.39 ± 0.23 ^c

ตาราง 11 (ต่อ)

Sample/Run	Phosphorus (%)	Degree of substitution	Peak viscosity (cP)	Final Viscosity (cP)	Degree of cross-linking (%)
8	0.184±0.017 ^e	0.0194±0.0007 ^e	140.67 ± 2.89 ^k	140.33 ± 4.93 ^{lk}	97.20 ± 0.06 ^b
9	0.259±0.007 ^b	0.0273±0.0008 ^b	287.67 ± 7.37 ^l	425.33 ± 12.34 ^h	94.28 ± 0.15 ^d
10	0.216±0.002 ^d	0.0227±0.0002 ^d	49.00 ± 0.00 ^l	103.00 ± 2.00 ^l	99.03 ± 0.00 ^a
11	0.217±0.000 ^d	0.0229±0.0001 ^d	2,448.67 ± 39.80 ^b	3,422.33 ± 48.54 ^a	51.34 ± 0.79 ^j
12*	0.181±0.000 ^e	0.0191±0.0000 ^e	76.33 ± 2.08 ^l	183.33 ± 1.53 ^k	98.48 ± 0.04 ^a
13	0.097±0.003 ^l	0.0101±0.0004 ^l	1,223.00 ± 8.54 ^l	2,023.67 ± 10.02 ^c	75.70 ± 0.17 ^g
14	0.216±0.002 ^d	0.0227±0.0002 ^d	244.33 ± 6.11 ^l	265.00 ± 5.29 ^l	95.14 ± 0.12 ^c
15*	0.181±0.000 ^e	0.0191±0.0000 ^e	-	-	98.81 ± 0.06 ^a

หมายเหตุ: * = ค่ากลาง

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตาราง 12 Regression equation coefficient (model : $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 ; X_1 =$

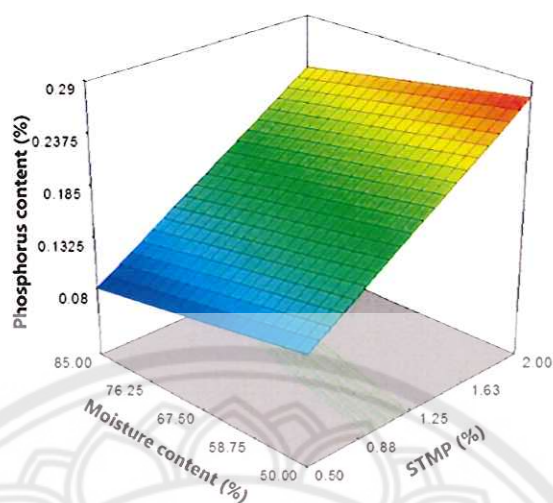
Water, $X_2 = \text{NaOH}$ and $X_3 = \text{STMP}$; WSI = Water solubility index) for response variables

Coefficient	Response variables								
	Phosphorus content	Degree of substitution	Degree of cross-linking	Peak viscosity	Final viscosity	WSI	Swelling power		
				viscosity	viscosity	30°C	80°C	30°C	80°C
β_0	0.1270	0.00663	98.59	13989.87	19163.56	6.19	14.29	7.59	12.44
Linear									
β_1	-0.0011*	-0.00006*	12.17*	-248.65*	-318.56*	-0.04*	-0.08*	-0.03*	-0.07*
β_2	-0.0156	-0.00083	10.50*	-77499.87*	-	-11.08*	-34.70*	-6.84	-50.67*
β_3	0.1021*	0.00541*	-3.40	-154.73	-748.57	-0.05	-1.07	-0.02	1.87
Quadratic					108926.49*				
β_{11}	-	-	-7.74*	1.29*	1.62*	-	-	-	-
β_{22}	-	-	-4.74	97824.33	162734.33	-	-	-	-
β_{33}	-	-	-8.01*	727.20*	1262.22*	-	-	-	-
Interaction									
β_{12}	-	-	-11.84*	680.68*	885.81*	-	-	-	0.63*

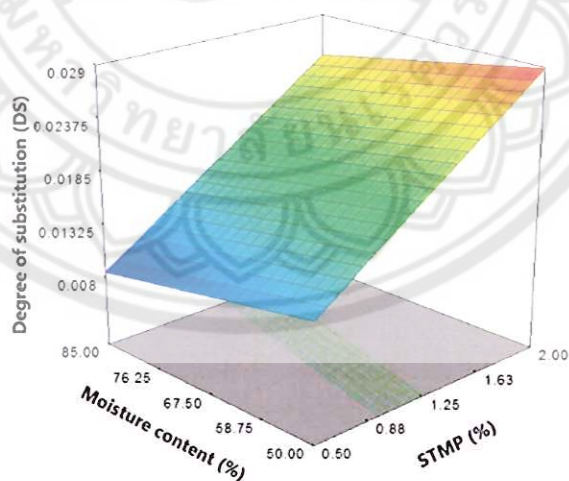
ตาราง 12 (ต่อ)

Coefficient		Response variables						
Phosphorus content	Degree of substitution	Degree of cross-linking	Peak viscosity	Final viscosity	WSI		Swelling power	
					30°C	80°C	30°C	80°C
β_{13}	-	5.98	-22.94	-32.16	-	-	-	-0.02
β_{23}	-	-0.84	1133.40	133.33	-	-	-	-1.92
R^2	0.8979	0.9599	0.9600	0.9671	0.7313	0.6420	0.5792	0.8615
Lack of fit	not significant	significant	significant	significant	not significant	not significant	not significant	not significant
	significant	significant	significant	significant	significant	significant	significant	significant

หมายเหตุ: * = มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพ 10 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์



ภาพ 11 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักของสตาร์ช) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์

การดัดแปรสสารฟอสเฟตเป็นการดัดแปรโดยการเกิดอนุพันธ์สสารแบบเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทั่วไปนิยมใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมออร์โทฟอสเฟต โพแตสเซียมออร์โทฟอสเฟต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตหรือกรดออร์โทฟอสฟอริก เพื่อให้เกิดโมโนสสารฟอสเฟตหรือใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตหรือฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ (POCl_3) เพื่อให้เกิดเป็นไดสสารฟอสเฟต โดยตามมาตรฐานของสสารดัดแปรฟอสเฟตเหล่านี้สามารถมีปริมาณฟอสฟอรัสได้ไม่เกินร้อยละ 0.4 (FAO JECFA, 2011) ในการศึกษาที่สสารโครอสลิงค์มีปริมาณฟอสฟอรัสหลังจากการล้างฟอสฟอรัสส่วนเกินออกแล้วอยู่ระหว่างร้อยละ 0.096 ถึง 0.283 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับสสารดัดแปรโดยกระบวนการโครอสลิงค์ ดังแสดงในตาราง 11 โดยมีปริมาณสูงกว่าฟอสฟอรัสในสสารดิบมาก ซึ่งในสสารดิบมีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.007 เนื่องจากฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากการแทนที่ด้วยฟอสเฟตจากโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่ใช้เป็นสารโครอสลิงค์ที่ศึกษาในช่วงร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 ตามที่เคยมีการศึกษาก่อนหน้า (Silva, et al., 2006, pp. 47-48; Wongsagonsup, et al., 2014, p. 657) และทดลองดัดแปรจริงด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อดำเนินการระดับการแทนที่ พบว่าสสารโครอสลิงค์ที่ได้มีค่าระดับการแทนที่ระหว่าง 0.0100 ถึง 0.0298 (ตาราง 11) โดยเมื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต ดังภาพ 10 และ 11 พบว่าปริมาณความชื้นและปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่ของสสารโครอสลิงค์ที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลทางสถิติ ($P > 0.05$) ต่อปริมาณฟอสฟอรัสและระดับการแทนที่ของสสาร ดังแสดงในตาราง 12 อาจเพราะในแผนการทดลองนี้ใช้ช่วงระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่าที่เอชเหมาะสมกับการเกิดการโครอสลิงค์ (9 ถึง 12) (Muhammad, et al., 2000, p. 87; Sang, et al., 2010) โดยมีการศึกษาพบว่าแบ่งสาจะจะมีระดับการเกิดโครอสลิงค์ที่ค่าพีเอช 9 (Polnaya, et al., 2013, pp. 1612-1614) และการโครอสลิงค์หรือการเกิดสสารไดเอสเทอร์จะเกิดที่ค่าพีเอชสูงกว่า 8.0 (Manoi and Rizvi, 2010, pp. 691-692)

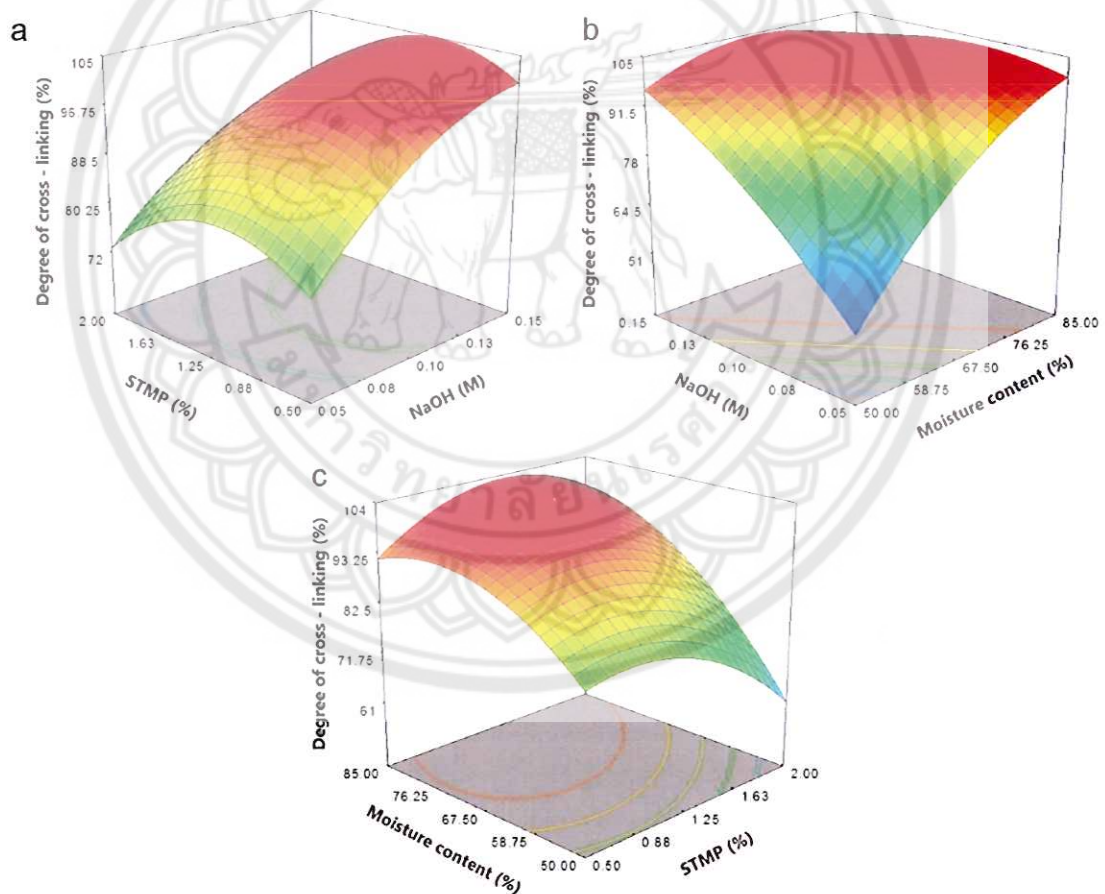
อิทธิพลอื่นๆ ในระหว่างการดัดแปร เช่น ชนิดและองค์ประกอบของสสารระยะเวลา อุณหภูมิ สารเคมี และวิธีการ ล้วนแล้วแต่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของสสารที่ได้ ซึ่งมีการศึกษาวิธีการดัดแปรสสารและรายงานถึงสมบัติต่างๆ ระดับการแทนที่และการเกิดโครอสลิงค์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ วิธีการดัดแปร และวิธีการวิเคราะห์ ซึ่งกระบวนการเอกซ์ทรูชันนั้นมีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนวิธีการได้หลากหลายตามความ

เหมาะสม ความแตกต่างของการดัดแปลงวิธีการ ขนาด และชนิดของเครื่องมือล้วนส่งผลต่อการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ช (Landerito and Wang, 2005) เช่น การศึกษาถึงระดับความชื้นต่างๆ ช่วงร้อยละ 40 ถึง 70 โดย Seker และ Hanna (2005, p. 542) เพื่อดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดครอสลิงค์ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชเป็น 10 ปรับอุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความชื้นและอัตราการหมุนของสกรูนั้นไม่มีผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้ ในขณะที่เดียวกัน Nabeshima and Grossmann (2001) พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงค์ด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตโดยเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยวมีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.012 และมีระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 0.0005 ซึ่งการที่จะเกิดการครอสลิงค์ที่ดีได้นั้นจะต้องมีการกวนผสมสตาร์ชกับสารเคมีที่ดี (Silva, et al., 2006) และการพรีเจลาติไนซ์สตาร์ชจะช่วยให้การดัดแปรเร็วขึ้นด้วย (Graf De, et al., 1995) การใช้เอกซ์ทรูเดอร์จึงสามารถส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ เนื่องจากความร้อนและแรงเฉือนในกระบวนการทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลง น้ำและสารเคมีต่างๆ สามารถผ่านแทรกเข้าไปในโมเลกุลได้ง่ายขึ้น (Burros, et al., 1987) จึงทำให้ระยะเวลาในการดัดแปรสตาร์ชลดลงได้ (Seker and Hanna, 2005) เช่น ในการศึกษาของ Landerito and Wang (2005) สตาร์ชฟอสเฟตดัดแปรด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตและโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ขนาดทดลอง ใช้ความเร็วการหมุนของสกรู 50 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิของบารเรลที่ 70 ถึง 145 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเพียง 2 ถึง 3 นาที โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับร้อยละ 1.63 ในขณะที่กระบวนการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีดั้งเดิมโดยทั่วไปนั้นใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาถึง 2 ชั่วโมง (Seker and Hanna, 2005) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและผิวเม็ดสตาร์ชเปิดออกได้ง่ายในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ใช้น้ำ ซึ่งจะช่วยให้ฟอสฟอรัสเข้าไปเชื่อมพันธะกับโมเลกุลสตาร์ชได้ดีขึ้นด้วย และเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นถึงค่าที่เหมาะสมต่อการเกิดครอสลิงค์จะยิ่งส่งเสริมปฏิกิริยานี้ (Muhammad, et al., 2000, pp. 86-88; O'Brien and Wang, 2009, pp. 466-467)

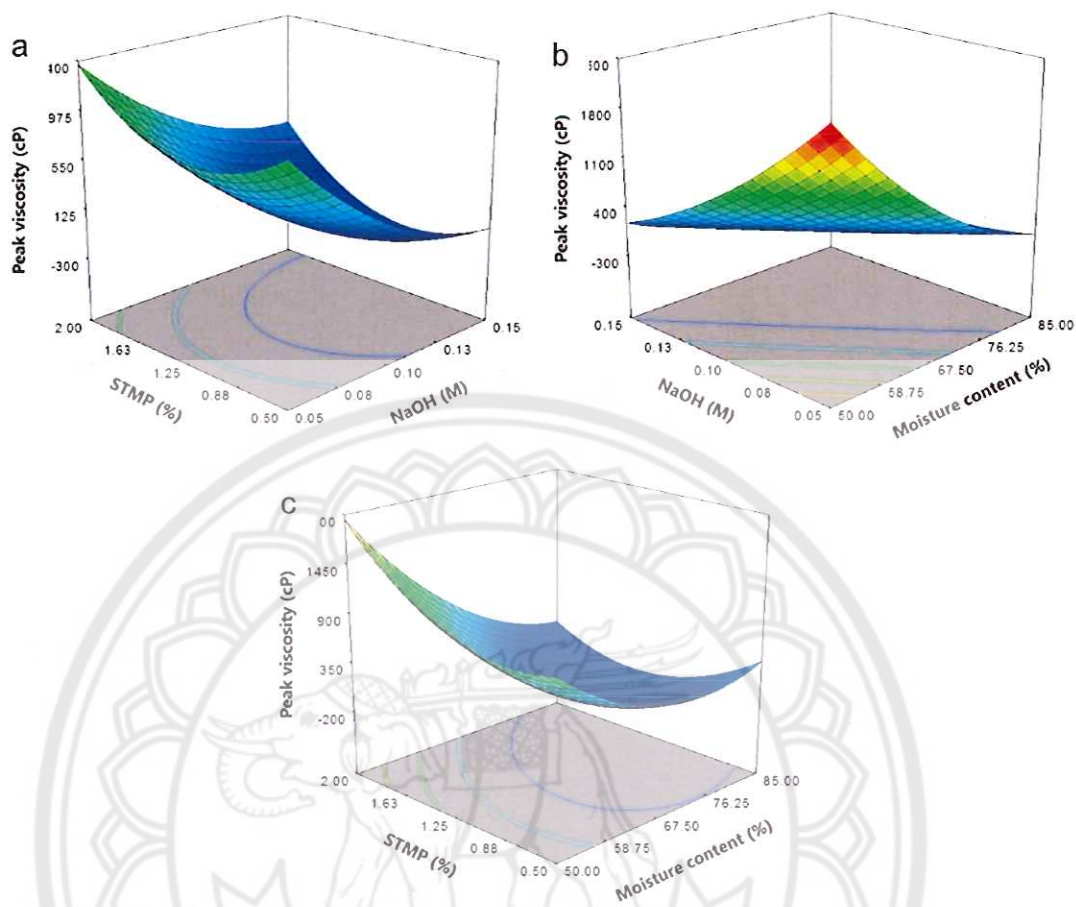
3.2 สมบัติทางความหนืดและระดับการเกิดครอสลิงค์

ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และระดับการครอสลิงค์ของสตาร์ชครอสลิงค์มีความสัมพันธ์กับทั้งความชื้นของสตาร์ชในระหว่างการดัดแปร ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตาราง 11 ตัวอย่างสตาร์ชครอสลิงค์ที่เตรียมตามแผนการทดลองมีระดับการครอสลิงค์ระหว่างร้อยละ 51.34 ถึง 99.03 โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงพื้นที่ตอบสนองของปัจจัย

การดัดแปรดังภาพ 13 และสมการความสัมพันธ์ทำนายระดับการครอสลิงค์มีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.9599 (ตาราง 12) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณความชื้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งกับความชื้นและปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และมีความสัมพันธ์เชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าความเหนียวของสตาร์ชจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นในภาพ 13 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวสูงสุดและความเหนียวสุดท้ายของสตาร์ชครอสลิงค์โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันกับปัจจัยในการดัดแปรนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.9600 และ 0.9671 ตามลำดับ (ตาราง 12)



ภาพ 12 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปัจจัยต่างๆ



ภาพ 13 แบบจำลองค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีผลจากปัจจัยต่างๆ

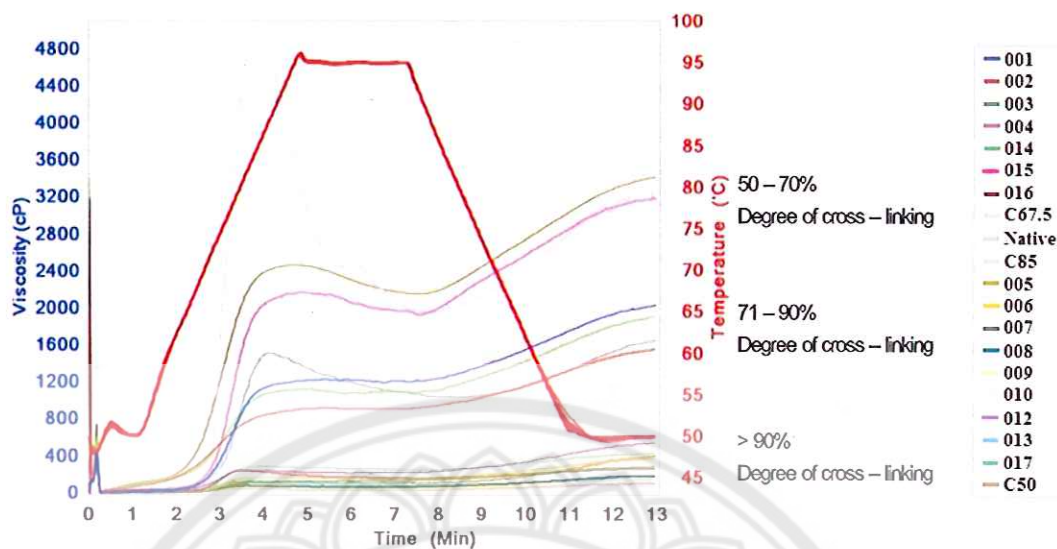
หมายเหตุ: (a) = แบบจำลองแสดงผลจากปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละ) และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์) ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 67.5

(b) = แบบจำลองแสดงผลจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์) และปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ที่ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ร้อยละ 1.25

(c) = แบบจำลองแสดงผลจากความชื้น (ร้อยละ) และปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (ร้อยละ) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมลาร์

ความหนืดของสตาร์ชเกิดจากการสลายโครงสร้างหรือจัดเรียงตัวของสายโซ่ โดยที่ค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายนั้นมีความสัมพันธ์กับการเกิดเจลลิต์ในเซชันของ สตาร์ช (Hagenimana, et al., 2006) และสามารถแสดงถึงระดับการเกิดครอสลิงค์ได้ สตาร์ช ครอสลิงค์ที่มีค่าระดับการครอสลิงค์สูงจะมีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายที่ลดลง จากสตาร์ชดิบมาก เนื่องจากการเกิดครอสลิงค์จะเกิดการสร้างพันธะเคมีที่แข็งแรงเชื่อมระหว่าง โมเลกุลสตาร์ช ทำให้เพิ่มความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช และยังเป็นการลดการจับน้ำรวมถึงการ เกิดเจลลิต์ในเซชันของสตาร์ช โมเลกุลของสตาร์ชครอสลิงค์จะแน่นหนา น้ำแทรกเข้าไปในโมเลกุล ได้ยาก สตาร์ชครอสลิงค์จึงเกิดลักษณะเพสต์ (paste) ได้ยากกว่า ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลง (Polnaya, et al., 2013; Choi and Kerr, 2004; Ratnayake and Jackson, 2008) ซึ่ง ใน การทดลองนี้ให้ผลที่สอดคล้องกัน ยกตัวอย่างเช่น สตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงค์ที่มีค่าระดับการ เกิดครอสลิงค์ร้อยละ 56.35 (sample 4) จะมีค่าความหนืดสูงสุด 2196 cP และมีค่าความหนืด สุดท้าย 3185 cP โดยสตาร์ชมันสำปะหลังดิบที่มีค่าความหนืดสูงสุด 5032 cP และความหนืด สุดท้าย 3213 cP ซึ่งความหนืดของสตาร์ชในลักษณะนี้อาจแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชครอสลิงค์ มีความคงทนต่อการสูญเสียโครงสร้างในสภาวะแรงเฉือนและอุณหภูมิสูง ความหนืดจึงมีการ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Liu, et al., 1999; Jyothi, et al., 2006; Wongsagonsup, et al., 2014)

ตัวอย่างสตาร์ชทั้งหมดจากแผนการทดลองมีสมบัติทางความหนืด (RVA profile) ที่แตกต่างจากสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ โดยเฉพาะค่าความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่าสตาร์ชดิบ และสตาร์ชครอสลิงค์ทุกตัวอย่างมีลักษณะความหนืดที่แตกต่างกันไป ดังภาพ 14



ภาพ 14 RVA profiles ของสตาร์ชครอสลิงค์ตามแผนการทดลอง สตาร์ชควบคุม และ สตาร์ชดิบ

จากลักษณะทางความหนืดที่แสดงในภาพ 14 สามารถแบ่งสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้เป็น 3 กลุ่ม ซึ่งอาจพิจารณาแบ่งกลุ่มตามระดับการแทนที่หรือระดับการครอสลิงค์ได้ โดยในการศึกษานี้พิจารณาตามค่าระดับการครอสลิงค์ เนื่องจากเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชในหลายคุณสมบัติ โดยเฉพาะค่าการละลายน้ำและกำลังการพองตัว ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของสตาร์ช ตัวอย่างที่แบ่งได้ทั้ง 3 กลุ่ม มีระดับการครอสลิงค์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ กลุ่มที่ 1 มีระดับการครอสลิงค์ต่ำ (ร้อยละ 50 ถึง 70) เป็นกลุ่มที่มีความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายสูง กลุ่มที่ 2 มีระดับการครอสลิงค์กลาง (ร้อยละ 71 ถึง 90) กลุ่มนี้จะมีความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายที่ต่ำกว่าในกลุ่มแรก ส่วนกลุ่มที่ 3 มีระดับการครอสลิงค์สูง (มากกว่าร้อยละ 90) เป็นกลุ่มที่มีความหนืดต่ำและค่อนข้างคงที่ตลอดการวิเคราะห์ ซึ่งหลังจากการแบ่งกลุ่มแล้วการศึกษาในขั้นต่อไปจะคัดเลือกตัวอย่างจากแต่ละกลุ่มมาศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวต่อสภาวะต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะของเม็ดสตาร์ชเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชควบคุมจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งจะแสดงผลการทดลองในลำดับถัดไป

3.3 ความสัมพันธ์ต่อการละลายน้ำและกำลังการพองตัว

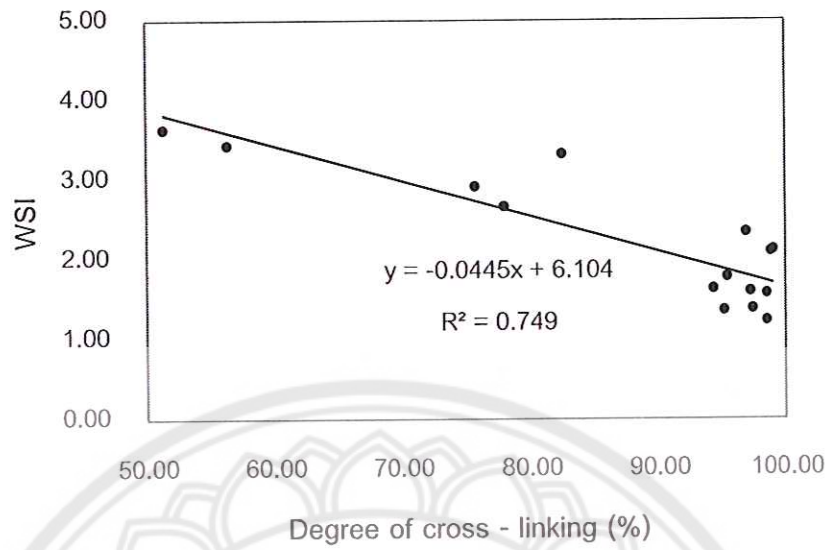
ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้น ปริมาณโซเดียมไทรเมตาฟอสเฟตและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการดัดแปรสตาร์ชต่อสมบัติการละลายน้ำและกำลังการพองตัว วิเคราะห์ในสารละลายสตาร์ชที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบการละลายน้ำและกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และเปรียบเทียบกับสตาร์ชควบคุมและสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

สมบัติการละลายน้ำและกำลังการพองตัวของสตาร์ชครอสลิงค์มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงสุด รองมาด้วยปริมาณน้ำ และปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยนี้ โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายน้ำ (WSI) ที่ 30 และ 80 องศาเซลเซียส กับปัจจัยต่างๆ ในการดัดแปร มีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.7313 และ 0.6420 ตามลำดับ ส่วนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัว (swelling power) ที่ 30 และ 80 องศาเซลเซียส กับปัจจัยต่างๆ ในการดัดแปร มีค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเท่ากับ 0.5792 และ 0.8615 ตามลำดับ (ตาราง 12) สมบัติการละลายน้ำและกำลังการพองตัวของสตาร์ชครอสลิงค์มีความสัมพันธ์กับความชื้นและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยในงานวิจัยของ Murua-Pagola, et al. (2006, pp. 380-386) และ Salay and Ciacco (1990, pp. 15-17) พบว่าในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำจะทำให้สตาร์ชฟอสเฟตมีค่าการละลายน้ำสูง (Seker and Hanna, 2005; Hagenimana, et al., 2006) ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่ได้นี้ ค่าการละลายน้ำของสตาร์ชครอสลิงค์จะลดลงตามความชื้นของสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการดัดแปร โดย Gomez and Aguilera (1984, pp. 40-43) และ Tang and Ding (1994, pp. 364-389) พบว่าสมบัติการละลายน้ำของสตาร์ชครอสลิงค์ลดลงเมื่อเพิ่มความชื้นในระหว่างการดัดแปร (ร้อยละ 35 ถึง 50) และยังมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการด้วย ซึ่งค่านี้จะลดลงเมื่อเพิ่มความชื้น (Seker and Hanna, 2005, p. 543) ค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการเอกซ์ทรูชันในการศึกษานี้ที่แสดงในตาราง 10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 ถึง 85 ค่าพลังงานจำเพาะของกระบวนการจะลดลงจาก 0.18 เป็น 0.13 kWh/kg ซึ่งความชื้นระหว่างกระบวนการดัดแปรสตาร์ชต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดแรงเฉือนสูงและโครงสร้างสตาร์ชถูกทำลายหรือเกิดการแตกตัวในเชซัน และทำให้การละลายน้ำของสตาร์ชเพิ่มขึ้น นอกจากความชื้นที่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการละลายน้ำของสตาร์ชแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นในระหว่างกระบวนการร่วมด้วย โดยการศึกษาของ Hagenimana, et al. (2006) พบว่าการละลายน้ำของสตาร์ชที่ดัดแปรโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันขึ้นอยู่กับสถานะในการดัดแปร

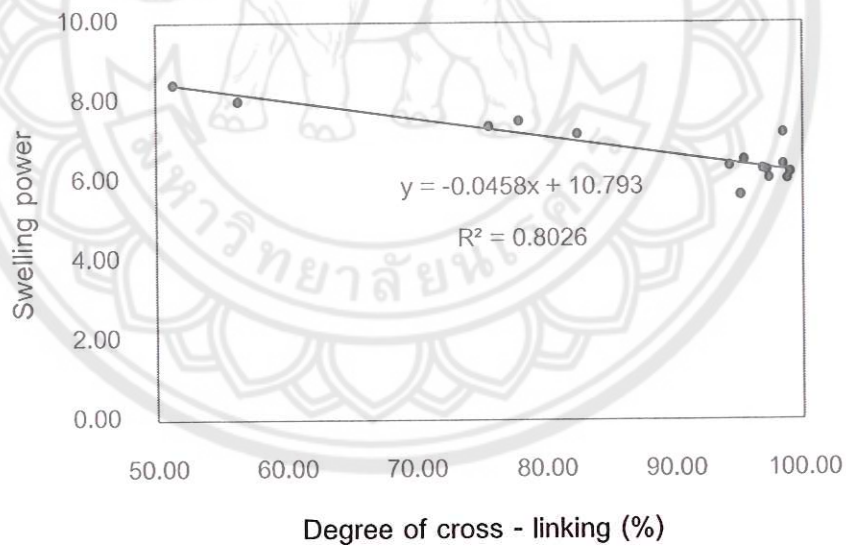
ทั้งความชื้น อุณหภูมิ และค่าพีเอช เช่นเดียวกับค่าการละลายน้ำของสตาร์ชฟอสเฟตจากสตาร์ชข้าวสาลีที่ลดลงตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น (San Martin-Martinez, et al., 2004, pp. 199-207)

ค่าการละลายน้ำของสตาร์ชดิบและสตาร์ชควบคุมจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่สตาร์ชครอสลิงค์มีค่าการละลายเพิ่มขึ้นจากที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อย เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีหลังจากเกิดการครอสลิงค์ เม็ดสตาร์ชจะเกิดการแตกออกและปล่อยส่วนประกอบที่ละลายน้ำได้ออกมาน้อย ซึ่งจากภาพ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายน้ำกับระดับการครอสลิงค์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เท่ากับ 0.749 โดยกล่าวได้ว่าการครอสลิงค์จะลดสมบัติการละลายน้ำของสตาร์ช เพราะเป็นการลดการละลายของโมเลกุล ลดการสูญเสียหรือการปลดปล่อยของแข็งจากโมเลกุลสตาร์ช (การละลาย) โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายอย่างร่วมกัน Seker and Hanna (2005) และ Jyothi, et al. (2006) สันนิษฐานว่าการละลายของสตาร์ชลดลงเพราะการครอสลิงค์เพิ่มความหนาแน่นในโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งระดับการเกิดครอสลิงค์ของสตาร์ชเป็นส่วนใหญ่ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช เช่น การละลายน้ำ การดูดซับน้ำ สมบัติทางความหนืด และสมบัติทางความร้อน (Manoi and Rizvi, 2010)

ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งตัวอย่างสตาร์ชควบคุมและสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะมีค่ากำลังการพองตัวที่สูงกว่าสตาร์ชดิบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส กำลังการพองตัวของสตาร์ชครอสลิงค์จะใกล้เคียงกับสตาร์ชดิบแต่สูงกว่าสตาร์ชควบคุม เนื่องจากสายอะไมโลเพกตินจะละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มากกว่า และกำลังการพองตัวของสตาร์ชจะลดลงเมื่อมีการครอสลิงค์เพิ่มขึ้น โดยผลการศึกษาของ Hirsch and Kokini (2001) กล่าวว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงค์มีความหนาแน่นหนาขึ้นตามระดับการครอสลิงค์ ในขณะเดียวกัน Wongsagonsup, et al. (2014) อธิบายว่าการผลึกกันระหว่างประจุลบของหมู่ฟอสเฟตของพันธะครอสลิงค์ในโมเลกุลสตาร์ชกับโมเลกุลข้างเคียงทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัวได้ดีเมื่อระดับการครอสลิงค์ต่ำๆ แต่การครอสลิงค์จะเพิ่มความแข็งแรงของพันธะในโมเลกุลสตาร์ช โดยการเชื่อมกันทั้งภายในและภายนอกของโมเลกุลสตาร์ชกับหมู่ฟอสเฟตจะทำให้เม็ดสตาร์ชทนต่อการพองตัว



ภาพ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดครอสลิงค์ต่อค่าการละลายน้ำ (WSI) ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส



ภาพ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิดครอสลิงค์ต่อกำลังการพองตัว (swelling power) ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 80 องศาเซลเซียส

4. การคัดเลือกตัวอย่างแบ่งตามกลุ่มระดับการครอสลิงค์

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการดัดแปร ได้แก่ ความชื้นของสตาร์ช ปริมาณไซโตเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และความเข้มข้นของสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้มีระดับการครอสลิงค์และระดับการแทนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลมาจากปัจจัยต่างๆ ในระหว่างการดัดแปร โดยเฉพาะความชื้นของสตาร์ชในระหว่างการดัดแปรที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อทั้งระดับการแทนที่และระดับการครอสลิงค์ ดังนั้น ในการคัดเลือกตัวอย่างจากแต่ละกลุ่มการครอสลิงค์จึงใช้ระดับความชื้นเป็นเกณฑ์หลัก (ร้อยละ 50, 67.5 และ 85) โดยคัดเลือกจากตัวอย่างที่มีระดับการแทนที่ใกล้เคียงกัน (ระดับการแทนที่ 0.0200 ถึง 0.0300) เพื่อลดอิทธิพลที่เกิดจากปริมาณไซโตเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างสตาร์ชควบคุมจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extruded starch control) ที่คัดเลือกมาใช้เปรียบเทียบนั้นดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 67.5 ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่อยู่ระดับกลางของช่วงความชื้นที่ใช้ในการทดลองค่าระดับการครอสลิงค์ ระดับการแทนที่ และการดัดแปรสตาร์ชที่คัดเลือกได้แสดงในตาราง 13

ตาราง 13 ระดับการครอสลิงค์ของสตาร์ชครอสลิงค์ที่คัดเลือกและสภาวะการผลิต

ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ)	สารละลาย ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ไซโตเดียมไตร- เมตาฟอสเฟต (ร้อยละ)	ระดับ การแทนที่	ระดับ การครอสลิงค์ (ร้อยละ)
สตาร์ชควบคุม	67.5	-	-	-	-
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับต่ำ	50.0	0.10	2.0	0.0253	56.35
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับกลาง	67.5	0.05	2.0	0.0285	77.97
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับสูง	85.0	0.10	2.0	0.0227	95.14

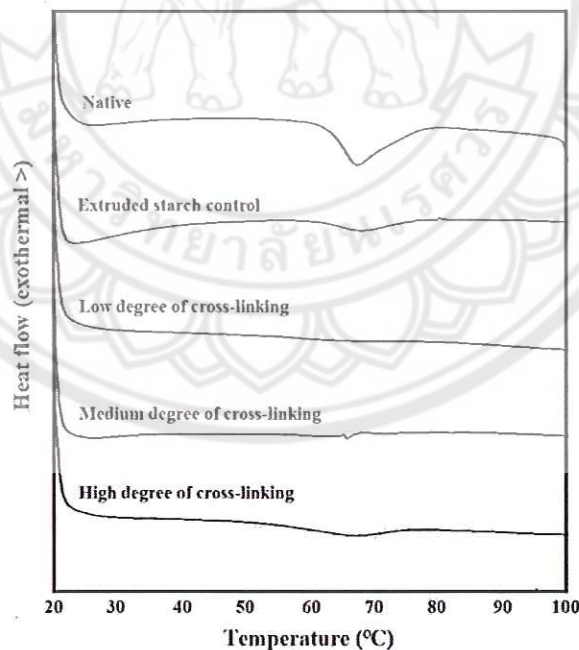
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของระดับการครอสลิงค์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน

ในส่วนของทดลองนี้วิเคราะห์สมบัติทางทางเคมีกายภาพและความคงตัวของสตาร์ชครอสลิงค์ที่คัดเลือกจากแต่ละกลุ่มระดับการครอสลิงค์ เปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบและสตาร์ชควบคุมจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน โดยการศึกษาแบ่งเป็นสมบัติทางเคมีกายภาพทั่วไป สมบัติทางรีโอโลยีและความคงตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางเคมี และลักษณะเม็ดสตาร์ช

1. สมบัติทางเคมีกายภาพ

1.1 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชแสดงถึงอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในระหว่างการเปลี่ยนลักษณะของสตาร์ช เช่น การเกิดเจลลิตีในเซชัน การรีโทรกราเดชัน เป็นต้น โดยภาพ 17 และตาราง 14 แสดงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชควบคุม



ภาพ 17 DSC curves แสดงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับครอสลิงค์ต่างๆ เปรียบเทียบกับสตาร์ชควบคุมและสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

ตาราง 14 สมบัติทางความร้อนของสตาร์มันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ช
 ครออสลิงค์

ตัวอย่าง	Endotherm			
	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
สตาร์ชดิบ	62.66	67.27	75.35	4.47
สตาร์ชควบคุม	61.12	68.05	75.78	1.26
สตาร์ชครออสลิงค์ระดับต่ำ	54.97	66.2	72.84	0.31
สตาร์ชครออสลิงค์ระดับกลาง	58.06	69.54	76.75	0.87
สตาร์ชครออสลิงค์ระดับสูง	54.88	66.11	75.33	1.53

จากภาพ 17 และตาราง 14 สตาร์ชดิบจะเริ่มเกิดพีคการดูดพลังงานจากการ
 เจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ (T_o) 62.66 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงาน (ΔH) 4.47 จูลต่อกรัม
 ส่วนสตาร์ชครออสลิงค์เกิดพีคดูดพลังงานขนาดเล็กที่อุณหภูมิไม่แตกต่างจากสตาร์ชดิบ แต่ค่า
 พลังงานลดลงในทุกตัวอย่าง โดยอยู่ในช่วง 0.31 ถึง 1.53 จูลต่อกรัม การลดลงของพีคของการ
 ดูดพลังงานนี้แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน โดยในขณะที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไน-
 เซชันจะเกิดการพองตัว ผิวเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย เกิดการคลายพันธะที่หนาแน่นในโมเลกุลทำให้มี
 พื้นที่ว่างในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งทำให้น้ำฟอสเฟตสามารถแทรกเข้าไปแทนที่ในโมเลกุลได้ง่ายขึ้น
 ด้วย เนื่องจากกระบวนกาการดัดแปรโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เป็นกระบวนการที่เกิดความร้อน
 และแรงบีบอัด ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง พลังงานที่ใช้
 เพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชันอีกครั้งจึงลดลง เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Sang and Seib (2006,
 p. 174) สตาร์ชข้าวโพดดัดแปรด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร่วมกับโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต
 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 45 และอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันลดลง
 จาก 13.4 จูลต่อกรัม เป็น 5.4 จูลต่อกรัม ในขณะทำงานวิจัยของ Mirmoghtadaie, et al. (2009,
 pp. 712-713) พบว่าค่า T_c และ ΔH ของสตาร์ชข้าวโพดครออสลิงค์จะเพิ่มขึ้นตามระดับการ
 ครออสลิงค์ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะและสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรด้วย สตาร์ชครออสลิงค์ยังคง
 แสดงพีคของการเจลาติไนเซชันอยู่เล็กน้อย เนื่องจากการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชในระหว่างการ
 ดัดแปรยังไม่สมบูรณ์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและพลังงานในการทรานซิชันนี้เกี่ยวข้องกับ
 สมบัติการพองตัว และเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอะไมโลเพกติน ทั้งความ
 ยาวของสายโซ่ จำนวนกิ่งก้าน และน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการดัดแปรมีส่วนทำให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกส่วนอะไมโลเพกติน (Shanavas, 2013, p. 13) โดยการลดลงของพลังงานที่ใช้แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันอาจเหมาะสมกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้เกิดการพองตัวสูงและรวดเร็วแม้ในน้ำเย็น เนื่องจากสตาร์ชมีการดูดซับน้ำง่ายขึ้นเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์กำลังการพองตัวและค่าการละลายน้ำ

1.2 สมบัติทางความหนืด

สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชมีผลมาจากชนิด องค์ประกอบ การดัดแปรต่างๆ ซึ่งสมบัติทางความหนืดนี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ การเกิดการเจลาติไนเซชัน การเกิดเจล การรีโทรกราเดชัน การเปลี่ยนแปลงความหนืด และความแข็งแรงของโครงสร้างซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่นๆ ของสตาร์ช และมีความสำคัญต่อการใช้งานของสตาร์ช โดยสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์แสดงในตาราง 15

ตาราง 15 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์

ตัวอย่าง	Degree of Cross-linking (%)	Peak viscosity (cp)	Breakdown (cp)	Final viscosity (cp)	Setback (cp)	Pasting Temperature (°C)
สตาร์ชดิบ	-	5,032.67 ±23.97 ^a	3,075.67 ±21.03 ^a	3,213.00 ±37.00 ^a	1,256.00 ±34.60 ^a	71.02 ±0.03 ^b
สตาร์ชควบคุม	-	1,620.33 ±35.12 ^c	593.33 ±20.84 ^b	1,690.33 ±55.47 ^c	663.33 ±32.01 ^c	68.80 ±0.39 ^c
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับต่ำ	56.35 ±0.80 ^c	2,196.67 ±40.20 ^b	212.33 ±32.87 ^c	3,185.33 ±5.51 ^a	1,201.00 ±52.85 ^a	68.22 ±0.58 ^c
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับกลาง	77.97 ±0.36 ^b	1,108.67 ±18.01 ^d	33.67 ±13.65 ^e	1,930.67 ±26.31 ^b	855.67 ±21.50 ^b	65.72 ±0.41 ^d
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับสูง	95.14 ±0.12 ^a	244.33 ±6.11 ^e	86.00 ±5.20 ^d	265.00 ±5.29 ^d	106.67 ±1.53 ^d	71.92 ±0.03 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

สตาร์ชมีสมบัติทางความหนืดจากการวิเคราะห์ RVA ที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชครอสลิงค์ และสตาร์ชควบคุมจะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ลดลงจากสตาร์ชดิบ โดยเฉพาะสตาร์ชครอสลิงค์ที่มีระดับการครอสลิงค์สูง โดยปกติสตาร์ชมันสำปะหลังดิบจะเกิดการเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยจะให้ความหนืดสูงสุด และเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นเม็ดสตาร์ชจะเกิดการแตกออก ปล่อยอะไมโลสโมเลกุลเล็กๆ ออกมา ให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อลดอุณหภูมิลง อะไมโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเรียงตัวใหม่ให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เรียกว่าการรีโทรกราเดชัน ซึ่งสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรทางความร้อนจะมีสมบัติของความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่าสตาร์ชดิบ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันมาแล้วบางส่วน แต่ความหนืดสุดท้ายจะลดลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนสตาร์ชจากการครอสลิงค์จะมีความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าสตาร์ชดิบมาก (Wongsagonsup, et al., 2005, pp. 34-35) หรือเรียกได้ว่าสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่เป็นผลจากความร้อนน้อยกว่าสตาร์ชดิบและสตาร์ชควบคุม

จากผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างสตาร์ชครอสลิงค์ทุกระดับเกิดการพองตัวหรือเกิดเพสท์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าสตาร์ชดิบ เนื่องจากการดัดแปรด้วยความร้อนลดอุณหภูมิในการเกิดเพสท์ของสตาร์ช สตาร์ชครอสลิงค์ยังคงมีอุณหภูมิในการเกิดเพสท์ช่วงอุณหภูมิ 65.72 ถึง 71.92 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับสตาร์ชดิบที่เกิดที่อุณหภูมิ 67.6 องศาเซลเซียส (Breuninger, et al., 2009, p. 553) แต่เมื่อระดับการครอสลิงค์เพิ่มขึ้น ความหนืดสูงสุดและค่า breakdown ของตัวอย่างสตาร์ชครอสลิงค์จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบ เนื่องจากการครอสลิงค์จะลดการเคลื่อนไหวของสายโซ่ในส่วนอสัณฐานและเพิ่มความแข็งแรงของโมเลกุลจากการเชื่อมกันภายในโมเลกุลสตาร์ชด้วยฟอสเฟต สตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับการครอสลิงค์สูงจะมีการดูดซับน้ำและมีการพองตัวลดลง ซึ่งส่งผลให้มีความหนืดลดลงเช่นกัน โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชที่ดูดน้ำได้มากจะมีพื้นที่ระหว่างเม็ดสตาร์ชน้อย ทำให้ทนต่อการเสียหายของโครงสร้างได้ดี ซึ่งจะมีความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุดหรือค่า breakdown ต่ำ (Wongsagonsup, et al., 2005, p. 34; Singh, et al., 2007, pp. 14-16) โดยค่า breakdown นี้เป็นค่าสำคัญที่แสดงถึงความอ่อนแอของพันธะในเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความคงตัวของสตาร์ชต่อแรงเฉือนและความร้อน (Liu, et al., 2012, p. 159; Luo, et al., 2009, p. 567) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Choi and Kerr (2004, pp. 185-187) ที่พบว่าสตาร์ชข้าวครอสลิงค์จะมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง เพราะเกิดพันธะครอสลิงค์ที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับสายสตาร์ชข้าวสาส์

ค่าความหนืดสุดท้ายแสดงถึงค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ การที่ความหนืดเพิ่มขึ้นหลังจากลดอุณหภูมิเกิดเนื่องจากการเรียงตัวใหม่หรือเรียกว่า การพอลิเมอไรเซชันของสายอะไมโลสที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเจลาติไนเซชัน ซึ่งทำให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น (Liu, et al., 2012, pp. 158-159) จากผลการวิเคราะห์ เมื่อระดับการครอสลิงค์เพิ่มขึ้น ค่าความหนืดสุดท้ายจะลดลง แต่ในสตาร์ชที่มีระดับการครอสลิงค์ต่ำจะมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสตาร์ชดิบ ($P > 0.05$) ส่วนค่าผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback) ของสตาร์ชครอสลิงค์ต่ำกว่าสตาร์ชดิบ เนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างที่ทำให้เม็ดสตาร์ชที่พองตัวมีความคงทนต่ออุณหภูมิ จึงเกิดความเสียหายได้ยากกว่า เม็ดสตาร์ชจะเกิดการแตกตัวน้อย ความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการเรียงตัวใหม่ของสายอะไมโลสที่ถูกปล่อยออกมาจากโมเลกุลในระหว่างเม็ดสตาร์ชแตกออกจึงลดลง ส่งผลให้ค่า setback ต่ำ (Wongsagonsup, et al., 2005, pp. 660-661)

1.3 การละลายน้ำและกำลังการพองตัว

การละลายน้ำของสตาร์ชเกิดจากการที่เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันและเกิดการแตกตัวทำให้ปล่อยส่วนประกอบโมเลกุลเล็กๆ ออกมาในน้ำ โดยการละลายน้ำของสตาร์ชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของสตาร์ช องค์ประกอบ อุณหภูมิของน้ำ การตัดแปร เป็นต้น (กัลฉัตรศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546, หน้า 41-51) สตาร์ชดิบโดยทั่วไปจะเกิดการละลายในน้ำได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิการเกิดเพสท์ และจะละลายได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการละลายน้ำ (WSI) และกำลังการพองตัว (swelling power) ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สตาร์ชคววม และสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับการครอสลิงค์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 และ 80 องศาเซลเซียส แสดงในตาราง 16

ตาราง 16 ค่าการละลายน้ำ และกำลังการพองตัว ของสตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่างๆ
สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชดิบที่อุณหภูมิ 30 และ 80 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ค่าการละลายน้ำ (ร้อยละ)		กำลังการพองตัว	
	30°C	80°C	30°C	80°C
สตาร์ชดิบ	0.25±0.06 ^e	40.19±0.85 ^a	1.86±0.03 ^d	6.84±0.10 ^d
สตาร์ชควบคุม	10.34±0.63 ^a	37.31±0.60 ^b	3.99±0.14 ^c	4.86±0.16 ^f
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำ	3.43±0.05 ^b	5.95±0.11 ^c	4.43±0.06 ^b	8.03±0.04 ^a
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลาง	2.67±0.10 ^c	4.26±0.04 ^d	6.07±0.02 ^a	7.52±0.06 ^c
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูง	1.36±0.04 ^d	1.76±0.05 ^e	3.92±0.07 ^c	5.65±0.09 ^e

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

จากตาราง 16 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) สตาร์ชดิบจะมีการละลายน้ำต่ำกว่าสตาร์ชครอสลิงค์และสตาร์ชควบคุม เนื่องจากสตาร์ชอื่นๆ ผ่านกระบวนการดัดแปรที่ใช้ความร้อนและเกิดการเจลาติไนเซชันบางส่วนแล้วจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้เกิดการละลายและการดูดซับน้ำได้ง่ายกว่า เช่นเดียวกับคุณสมบัติของสตาร์ชที่ดัดแปรโดยการพรีเจลาติไนเซชัน (Chiu and Solarek, 2009, pp. 644-645) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 80 องศาเซลเซียส สตาร์ชดิบและสตาร์ชครอสลิงค์จะเกิดการเจลาติไนเซชัน ทำให้มีการพองตัวและการละลายน้ำมากขึ้นกว่าเดิม โดยการพองตัวและการละลายน้ำของสตาร์ชดิบจะสูงขึ้นถึง 4.10 เท่า และ 160.76 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะสตาร์ชครอสลิงค์ครอสลิงค์ระดับสูง ค่าการละลายน้ำของสตาร์ชครอสลิงค์จะลดลงเมื่อระดับการครอสลิงค์เพิ่มขึ้น สตาร์ชครอสลิงค์มีพันธะฟอสเฟตเชื่อมกับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้การแตกตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง ส่วนประกอบที่เป็นของแข็งในเม็ดสตาร์ชจึงออกมาละลายในน้ำได้น้อย ส่วนการพองตัวของสตาร์ชจะลดลงเมื่อระดับการครอสลิงค์เพิ่มขึ้นเช่นกัน และการพองตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากสายอะไมโลเพกตินสลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น การจับน้ำของโมเลกุลสตาร์ชจึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wongsagonsup, et al. (2005, pp. 32-37) ที่พบว่ากำลังการพองตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแต่จะลดลงตามการครอสลิงค์

ที่ระดับการครอสลิงค์ต่ำจะเกิดการผลัดกันของประจุลบของหมู่ฟอสเฟตในสายโซ่ของสตาร์ชจึงเพิ่มการดูดน้ำ แต่ในทางกลับกันที่ระดับการครอสลิงค์สูงการเชื่อมกันในโมเลกุลสตาร์ชทำให้โมเลกุลแน่นหนาขึ้น จึงยากต่อการพองตัวและการดูดน้ำของสตาร์ช

2. ความคงตัวและสมบัติทางรีโอโลยี

2.1 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง

ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ต้องสนองความต้องการความสะดวกสบายของผู้บริโภค โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่ดี คือ มีความคงตัวแม้จะผ่านการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งหลายครั้ง ซึ่งโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการละลายน้ำแข็งแล้วจะเกิดการเสียลักษณะเนื้อสัมผัส เนื่องจากเกิดน้ำแข็งที่เกิดจากการแช่เยือกแข็งทำลายโครงสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้เสียสมบัติการอุ้มน้ำของผลิตภัณฑ์ น้ำในผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาจากเนื้อเยื่อผลิตภัณฑ์หลังการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งปริมาณมาก เรียกว่า การชิเนอเรซิส ซึ่งมีผลทั้งการเปลี่ยนแปลงลักษณะอาหาร ความหนืด การเสียความชุ่มน้ำ การแยกเฟส รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (Mason, 2009, pp. 775-776) การเติมสตาร์ชในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการชิเนอเรซิสของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชจะช่วยให้ในเรื่องการดูดซึมน้ำ ลดการเสียหายของโครงสร้างเนื้อเยื่อจากเกิดน้ำแข็งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

การประเมินความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งนั้นจะแสดงเป็นค่าร้อยละการชิเนอเรซิส ซึ่งแสดงปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากโครงสร้างเจลหลังการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งแล้ว โดยจะบอกถึงการรีโทรกราเดชันของสตาร์ชและความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยในระหว่างการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากให้ความร้อนสตาร์ชเพสท์จะเกิดการปล่อยน้ำส่วนเกินออกจากโครงสร้าง โดยเฉพาะสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง ดังนั้น ค่าชิเนอเรซิสนี้จึงเป็นค่าที่บอกถึงการรีโทรกราเดชันของเจล (Muadklay and Charoenrein, 2008) และน้ำที่ปล่อยออกมานี้เมื่อเกิดเป็นเกิดน้ำแข็งซ้ำจะยิ่งเพิ่มการรบกวนโครงสร้างเจลซึ่งเจลที่มีความแข็งแรงจะยังสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ปริมาณสูงหลังจากการละลายน้ำแข็ง หรือมีความอุ้มน้ำดี มีค่าการชิเนอเรซิสต่ำ (Jang, et al., 2009, p. 994)

ผลการประเมินค่าร้อยละการชิเนอเรซิสของเจลสตาร์ชครอสลิงค์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 5 แสดงในตาราง 17 โดยทั่วไปสตาร์ชมันสำปะหลังดิบมีปริมาณอะไมโลสต่ำ ซึ่งจะเกิดการรีโทรกราเดชันและการชิเนอเรซิสที่ต่ำกว่าสตาร์ชอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชครอสลิงค์มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งสูงกว่าสตาร์ชดิบ

ตาราง 17 ค่าการชีโนเรซิส คิดเป็นร้อยละ ของเจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร ระหว่างการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการชีโนเรซิส					
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รวม
สตาร์ชดิบ	2.76 ± 0.27 ^{cBC}	7.03 ± 0.60 ^{bA}	3.74 ± 0.84 ^{aB}	1.94 ± 0.48 ^{bC}	3.65 ± 0.26 ^{bB}	17.79 ± 0.83 ^c
สตาร์ชควบคุม	4.32 ± 0.31 ^{cB}	19.32 ± 0.54 ^{aA}	0.36 ± 0.05 ^{cC}	0.85 ± 0.16 ^{cC}	1.06 ± 0.12 ^{dC}	24.55 ± 1.01 ^b
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับต่ำ	0.91 ± 0.22 ^{bD}	5.15 ± 0.17 ^{cA}	2.54 ± 0.56 ^{bC}	3.60 ± 0.14 ^{aB}	4.68 ± 0.57 ^{aA}	15.83 ± 1.07 ^d
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับกลาง	0.99 ± 0.09 ^{abE}	6.84 ± 0.54 ^{bA}	3.51 ± 0.25 ^{aB}	2.23 ± 0.01 ^{bD}	2.79 ± 0.07 ^{cC}	15.41 ± 0.36 ^d
สตาร์ชครอสลิงค์ ระดับสูง	35.68 ± 0.19 ^{dA}	5.54 ± 0.28 ^{cB}	0.10 ± 0.01 ^{cC}	0.11 ± 0.03 ^{dC}	0.15 ± 0.03 ^{eC}	39.46 ± 0.02 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P < 0.05$)

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน (A) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

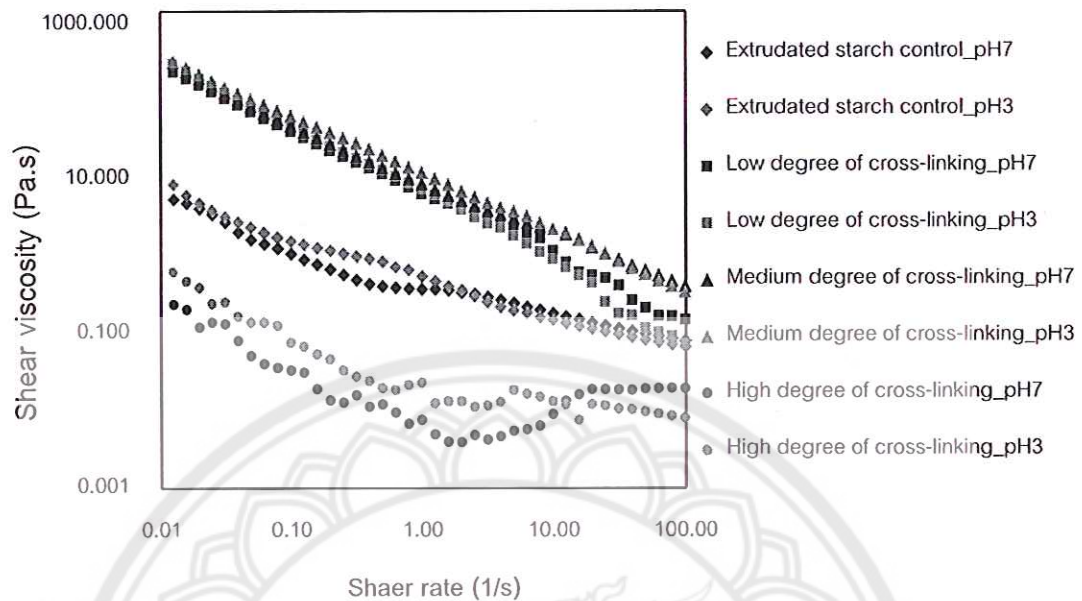
($P < 0.05$)

ในระหว่างการให้ความร้อนเม็ดสตาร์ชจะดูดซับน้ำปริมาณมากและจะเกิดการสร้างลักษณะเจลเมื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว หลังจากการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งรอบแรก สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำและระดับกลางจะมีค่าชีโนเรซิสต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.91 และ 0.99 ตามลำดับ แสดงถึงลักษณะเจลที่มีความคงตัวมากที่สุด ในขณะที่สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูงมีค่าการชีโนเรซิสร้อยละ 35.68 เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นจากสะพานเชื่อมฟอสเฟตภายในโมเลกุลดึงโมเลกุลให้ใกล้ชิดกัน ทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันและเกิดการประสานโครงสร้างได้ยาก และไม่เกิดโครงสร้างแบบเจล แต่เกิดเป็นลักษณะสารแขวนลอยของสตาร์ชที่พองตัว โดยจะมีปริมาณน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการดูดซับของสตาร์ช

ก่อนการแช่เยือกแข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ค่าชিনিเนอเรซิสที่รอบแรกของการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งจึงสูงกว่าตัวอย่างอื่น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูงจะมีค่าชিনিเนอเรซิสที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แม้ค่าการชিনিเนอเรซิสของเจลสตาร์ชส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง เนื่องจากการแช่เยือกแข็งเจลซ้ำ ผลึกน้ำแข็งที่ค่อยๆ เกิดขึ้นจะขยายตัวทำให้โครงสร้างเจลเกิดการแยกกันมากขึ้น และเมื่อมีการละลายน้ำแข็งจึงเกิดการปล่อยน้ำออกมาได้ง่ายขึ้นเรื่อยๆ เจลจึงเกิดเป็นลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Charoenrein and Preechathamwong, 2012, p. 1035) ในขณะเดียวกันการเรียงตัวของอะมิโลสหรือการรีโทรกราเดชั่น ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่หนาแน่น และขับน้ำออกมาจากโครงสร้างอีกด้วย (Lo and Ramsden, 2000, pp. 211-214) ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าการครอสลิงค์ลดความเสียหายของโครงสร้างเจลหลังการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งโดยการลดปริมาณน้ำส่วนเกินภายในเจลที่สามารถเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ดังที่แสดงในตาราง 17 สตาร์ชที่มีระดับการครอสลิงค์ต่ำและกลางจะให้เจลที่มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็งมาก โดยมีค่าร้อยละการชিনিเนอเรซิสรวมหลังการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง 5 รอบ เท่ากับ 15.83 และ 15.41 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าร้อยละการชিনিเนอเรซิสของสตาร์ชดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนสตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูงมีค่าร้อยละการชিনিเนอเรซิสรวมหลังการแช่เยือกแข็ง – ละลายน้ำแข็ง 5 รอบ เท่ากับ 39.46

2.2 ความคงตัวต่อสภาวะกรด

ในการศึกษานี้วิเคราะห์ความคงตัวต่อสภาวะกรดของสตาร์ชโดยวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีค่าพีเอช 3.0 เปรียบเทียบกับในสารละลายที่ค่าพีเอช 7.0 เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มีค่าพีเอชที่ต่ำหรือมีความเป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสตาร์ช ความหนืดจึงลดลงจากสภาวะที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้ สตาร์ชที่มีความคงตัวต่อสภาวะกรดจะมีความหนืดที่ไม่แตกต่างกันระหว่างในสารละลายที่มีค่าพีเอชเป็นกลางและที่ค่าพีเอชต่ำ โดยความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุมและสตาร์ชครอสลิงค์ในสารละลายที่ค่าพีเอช 7.0 เปรียบเทียบกับในสารละลายที่ค่าพีเอช 3.0 แสดงในภาพ 18

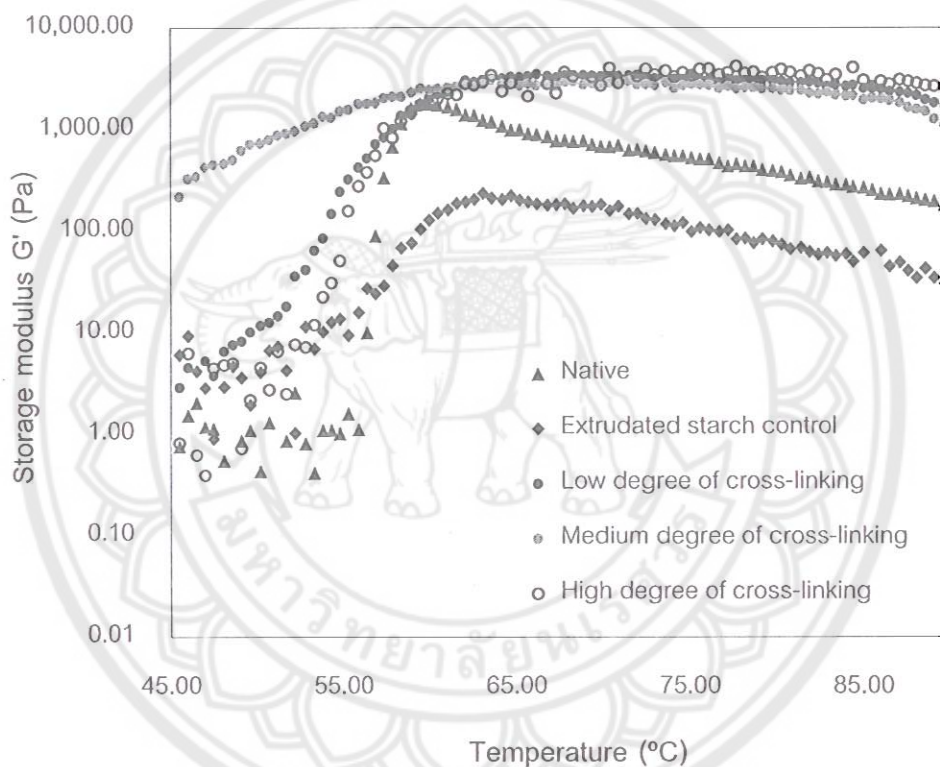


ภาพ 18 ความหนืดของสารละลายสตาร์ชครอสลิงค์ความเข้มข้น ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร ที่ค่าพีเอช 3.0 และ 7.0

สตาร์ชครอสลิงค์ทั้ง 3 ระดับการครอสลิงค์มีความคงทนต่อสภาวะกรด โดยความหนืดของสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในสารละลายที่มีค่าพีเอช 3.0 และ 7.0 ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงความคงทนต่อการย่อยสลายในสารละลายกรด เนื่องจากความแข็งแรงของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น (Wattanachant, et al., 2003, pp. 466-467) สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำและระดับกลางมีความหนืดสูงกว่าสตาร์ชควบคุม เนื่องจากสตาร์ชมีการดูดซับน้ำที่ดี ความหนืดจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อเป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดสูงได้โดยความหนืดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่เดียวกันสตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูงมีการดูดน้ำต่ำ เนื่องจากความแน่นของเม็ดสตาร์ชเอง ความหนืดจึงต่ำที่สุด นอกจากการเปลี่ยนแปลงของความหนืดที่ค่าพีเอชที่ต่างกันแล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น สารละลายสตาร์ชจะมีค่าความหนืดที่ลดลงในลักษณะแบบเชียร์ทินนิง (shear thinning) ดังภาพ 18 โดยเฉพาะสตาร์ชที่มีการดูดน้ำได้มาก เนื่องจากโครงสร้างจะเกิดการเสียรูปทรงด้วยแรงเฉือนได้ง่ายกว่าสตาร์ชที่มีการเรียงตัวอย่างแน่นหนา

2.3 สมบัติทางรีโอโลยี

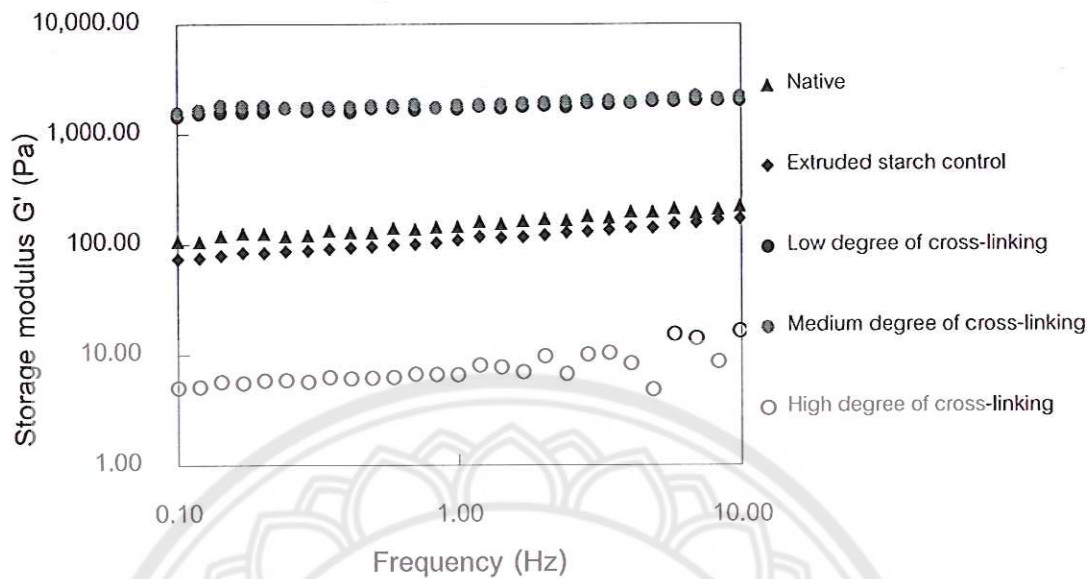
ในการทดลองนี้ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับการครอสลิงค์ต่างๆ เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชควบคุม โดยศึกษาสมบัติของสตาร์ชเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature sweep) ที่ช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (frequency sweep) ที่ช่วงความถี่ 0.1 ถึง 10 เฮิร์ต ซึ่งลักษณะทางรีโอโลยีของสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และความถี่แสดงในภาพ 19 และ 20



ภาพ 19 การเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus (G') ตามอุณหภูมิของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์ 3 ระดับ

หมายเหตุ: สารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

วิเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส ที่ 0.1% strain และความถี่ 1 เฮิร์ต



ภาพ 20 การเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus (G') ตามความถี่ของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์ 3 ระดับ

หมายเหตุ: สารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ในช่วงความถี่ 0.1 ถึง 10 เฮิร์ต ที่ 0.1% strain และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากภาพ 19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สตาร์ชจะเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด ซึ่งแสดงค่า storage modulus (G') สูงที่สุด ซึ่งค่านี้จะแสดงถึงความแข็งแรงของสตาร์ชเพสท์ สตาร์ชดิบและสตาร์ชครอสลิงค์มีค่า storage modulus สูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 55 ถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่า storage modulus ของสตาร์ชที่ไม่ผ่านการครอสลิงค์จะลดลง แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสตาร์ชครอสลิงค์ แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชครอสลิงค์มีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง Choi and Kerr (2004, p. 187) อธิบายว่าการเกิดครอสลิงค์จะเพิ่มความคงทนต่ออุณหภูมิของสตาร์ช เพราะความแข็งแรงของพันธะในโมเลกุลจากการครอสลิงค์

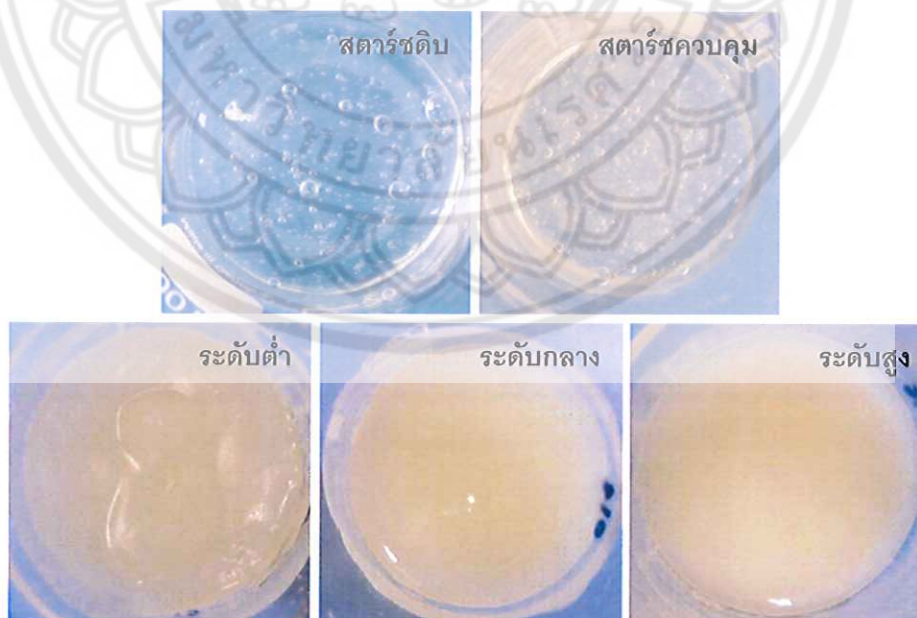
จากภาพ 20 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชครอสลิงค์ทุกระดับการครอสลิงค์มีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นสูง (elasticity) เนื่องจากพื้นที่ว่างระหว่างเม็ดสตาร์ชลดลงจากการดูดซับน้ำไว้ในโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งทำให้โครงสร้างคงทนต่อการเสียรูปร่างและการลดลงของความหนืด (breakdown) ซึ่งสตาร์ชจะดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความร้อน แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มระดับ

การครอสลิงค์ ประจุลบของหมู่ฟอสเฟตในสายโมเลกุลสตาร์ชจะผลักรันทำให้เกิดพื้นที่สำหรับดูดซับน้ำ แต่ที่ระดับการครอสลิงค์สูงนั้น พันธะภายในที่แข็งแรงทำให้การดูดซับน้ำเข้าไปในโมเลกุลลดลง (Wongsagonsup, et al., 2014, pp. 659-661)

2.4 คุณสมบัติของเจล

คุณสมบัติของเจลเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกลักษณะของสตาร์ชเพสต์ โดยแสดงเป็นความใสของสารละลาย ความเหนียว ลักษณะเนื้อสัมผัส ความสามารถในการเกิดเจล ซึ่งมีผลมาจากองค์ประกอบของสตาร์ช การดัดแปร อุณหภูมิ การเจลาตีไนเซชัน การเกิดรีโทรกราเดชัน เป็นต้น

สตาร์ชมันสำปะหลังดิบโดยทั่วไปเมื่อผ่านการให้ความร้อนจะเกิดลักษณะเหมือนกาวขึ้น ลักษณะคล้ายกาวของสตาร์ชดิบจะมีความใส ยืดเป็นสายได้ และเมื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะเกิดลักษณะเจลขึ้น เนื่องจากการเรียงตัวใหม่ของโมเลกุล เจลจะมีความขุ่นขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนสตาร์ชครอสลิงค์จะถูกจำกัดการพองตัวทำให้ดูดซับน้ำได้บางส่วน ส่วนผสมของสตาร์ชจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีลักษณะคล้ายกาวที่ยืดเป็นสายได้ และเมื่อลดอุณหภูมิจะเกิดเจลที่มีลักษณะแตกต่างจากเจลของสตาร์ชดิบ โดยจะมีความขุ่นที่มากกว่า สตาร์ชดิบ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นกว่า ดังภาพ 21



ภาพ 21 ลักษณะของสตาร์ชเพสต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อให้ความร้อน 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ค่าความใสและลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชเป็นค่าที่บอกถึงลักษณะที่สำคัญของสตาร์ช ซึ่งมีผลต่อความเหมาะสมในการใช้งานด้านต่างๆ ค่าความใสของสารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แสดงเป็นค่าร้อยละความสามารถในการส่องผ่านของแสง (%transmittance) ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับครอสลิงค์ต่างๆ ในการศึกษาี้แสดงเป็นค่าความแข็ง (hardness) และค่าการเกาะติดหรือลักษณะเหนียวคล้ายกาว (cohesiveness) ซึ่งจะแสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างเจลที่มีผลมาจากหลายปัจจัยร่วมกัน ทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างแบบเนื้อเดียวกันและส่วนที่แยกกันของสารละลายสตาร์ชหลังให้ความร้อน โดยผลการทดลองแสดงในตาราง 18

ตาราง 18 ความใสของสารละลายสตาร์ช และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจากสตาร์ชดิบ สตาร์ชควบคุมและสตาร์ชครอสลิงค์ที่ระดับต่างๆ

ตัวอย่าง	% Transmittance*	Hardness (g)**	Cohesiveness**
สตาร์ชดิบ	58.10 ± 0.26 ^a	15.75 ± 1.26 ^d	0.93 ± 0.030 ^a
สตาร์ชควบคุม	58.57 ± 0.49 ^a	20.75 ± 1.50 ^c	0.81 ± 0.030 ^b
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำ	11.17 ± 0.15 ^b	83.75 ± 4.86 ^b	0.51 ± 0.050 ^c
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลาง	9.37 ± 0.12 ^c	151.00 ± 2.10 ^a	0.42 ± 0.005 ^d
สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูง	4.20 ± 0.00 ^d	9.50 ± 1.00 ^e	0.76 ± 0.040 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

* = สารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

** = สารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

สตาร์ชมันสำปะหลังโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นสารละลายที่ใสกว่าสตาร์ชจากธัญชาติ จากตาราง 18 ค่าความใสของสารละลายสตาร์ชจะลดลงเมื่อเพิ่มระดับการครอสลิงค์ เพราะสตาร์ชมีสมบัติการละลายที่ลดลง การกระจายตัวในน้ำลดลง เม็ดสตาร์ชคงทนต่อการเจลาติไนเซชัน ซึ่งทำให้เห็นเป็นลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวกระจายอยู่ในสารละลาย สารละลายแขวนลอยของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชควบคุมมีความใสที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชครอสลิงค์ โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

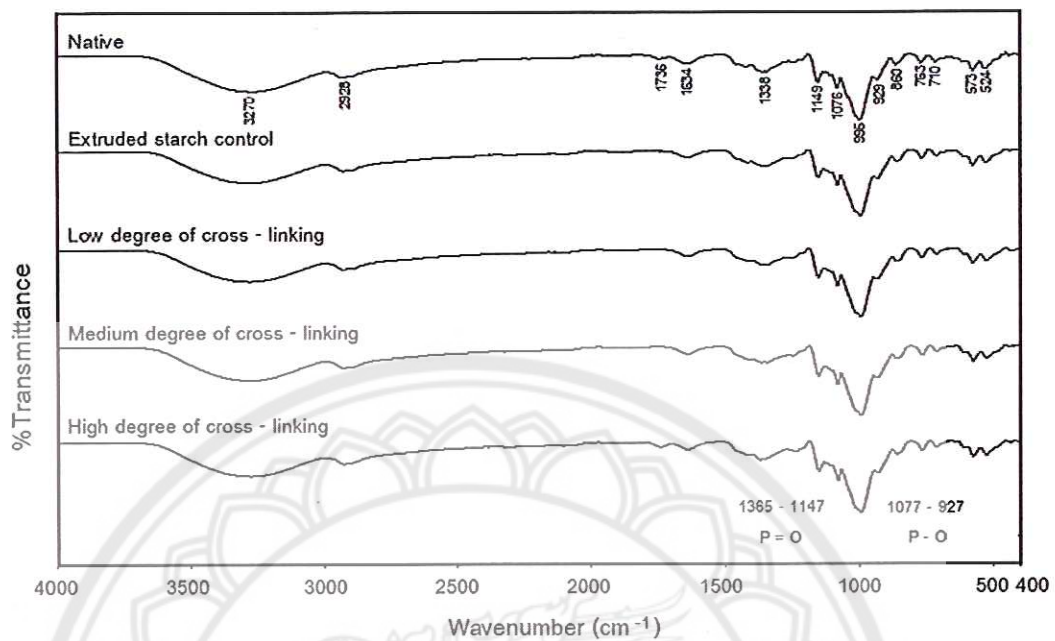
ทางสถิติ ($P < 0.05$) เท่ากับ 58.10 ± 0.26 และ 58.57 ± 0.49 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongsagonsup, et al. (2014, p. 660) ที่กล่าวว่า การครอสลิงค์จะลดการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช ซึ่งจะเกิดเป็นสารละลายขุ่นๆ ส่งผลให้แสงส่องผ่านได้น้อยลง

ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชครอสลิงค์ที่แสดงเป็นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระดับการครอสลิงค์จนถึงครอสลิงค์ระดับกลาง ค่าความแข็งของสตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลางสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งจะแสดงถึงความคงทนต่อแรงกดที่จะทำให้โครงสร้างเจลเกิดความเสียหายได้ Wongsagonsup, et al. (2014, p. 663) รายงานว่า สตาร์ชที่ระดับการครอสลิงค์ต่ำ โครงสร้างเจลจะมีพื้นที่ว่างมากจึงง่ายต่อการเสียรูปร่าง โดยในผลการทดลองนี้ โครงสร้างเจลของสตาร์ชที่ระดับการครอสลิงค์สูงจะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่สามารถเกิดเป็นลักษณะเจลได้ดังที่อธิบายในสมบัติความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง โครงสร้างจึงไม่ต่อเนื่องเหมือนตัวอย่างอื่นๆ คล้ายกับผลการศึกษาของ Chatakanonda, et al. (2000, p. 281) ที่อธิบายว่า สตาร์ชข้าวครอสลิงค์ไม่สามารถเกิดลักษณะเจลได้หลังจากการลดอุณหภูมิหลังการเจลาตีไนเซชัน เนื่องจากการครอสลิงค์ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการพองตัวและดูดซึมน้ำได้น้อยลง ส่วนค่าความเหนียวคล้ายกาวของเจลสตาร์ชจะลดลงตามระดับการครอสลิงค์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงครอสลิงค์ระดับกลาง ที่มีค่าต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าการครอสลิงค์ลดการเกิดลักษณะยึดเหนี่ยวเป็นสายของสตาร์ช

3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและการเกิดครอสลิงค์

3.1 การศึกษาโดยเทคนิค FTIR

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชด้วยเทคนิค FTIR เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับและการส่องผ่านของแสงอินฟราเรดของโมเลกุลสตาร์ชที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงแถบของการดูดซับหรือการส่องผ่านที่แตกต่างกันด้วย โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงค์เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชควบคุมในการศึกษานี้แสดงในภาพ 22



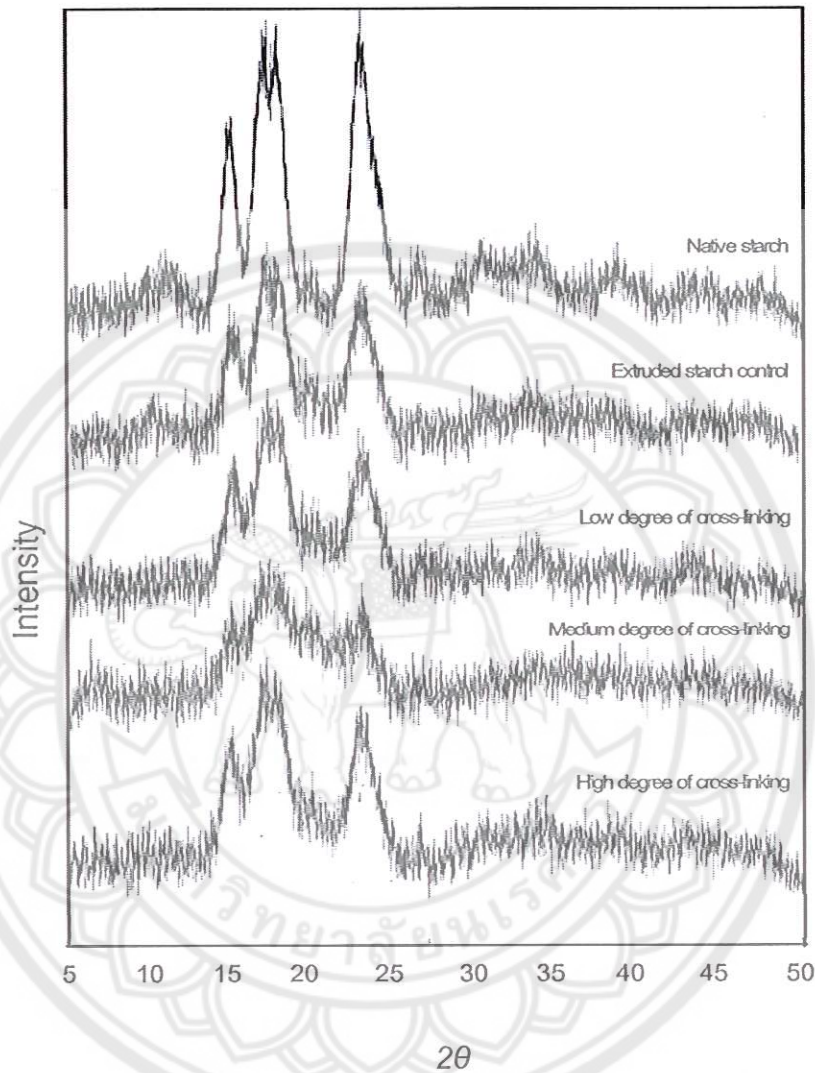
ภาพ 22 FTIR spectrum ของสตาร์ชควบคุม สตาร์ชดิบและสตาร์ชครอสลิงค์แต่ละระดับ

โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชครอสลิงค์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงความคมชัดและการเลื่อนของของแถบการส่องผ่านของแสงอินฟราเรดที่ช่วงเลขคลื่น 1147 ถึง 1365 และช่วงเลขคลื่น 927 ถึง 1077 ซึ่งอาจแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหมู่ P = O และ P - O ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Singh and Nath (2012, p. 16) ที่อธิบายว่าแถบการดูดซับของสตาร์ชครอสลิงค์ด้วย POCl_3 คมชัดขึ้นเล็กน้อยที่เลขคลื่น 1231 และ 1090 ซึ่งแสดงถึงลักษณะการเกิดพันธะ P = O และ C - O - P ตามลำดับ แต่ในการศึกษานี้ ไม่พบความแตกต่างระหว่างสตาร์ชที่ระดับการครอสลิงค์ต่างๆ และความแตกต่างจากสตาร์ชควบคุม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการครอสลิงค์นั้นเกิดการแทนที่ในโมเลกุลสตาร์ชเพียงเล็กน้อย (DS เท่ากับ 0.0100 ถึง 0.298) และไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างทางเคมีอย่างเห็นได้ชัดจนด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

3.2 การจัดเรียงโครงสร้างผลึก (X - ray diffraction : XRD)

การศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชโดย X - Ray diffraction แสดงลักษณะการสะท้อนหักเหรังสีเอกซเรย์ของผลึกในโมเลกุลสตาร์ช โดยปกติสตาร์ชมันสำปะหลังมีลักษณะผลึกแบบ A - type หรือแบบ C - type ซึ่งการเกิดพีคคู่ที่ 17.3° และ 17.9° (2θ) แสดงถึงลักษณะผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลัง (Rickard, et al., 1991) โดยภาพ 23 แสดงผลการหักเหรังสีเอกซเรย์

ของสตาร์ชครอสลิงค์แต่ละระดับการครอสลิงค์เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังดิบและสตาร์ช
ควบคุม



ภาพ 23 X – ray diffractograms ของสตาร์ชครอสลิงค์แต่ละระดับ เปรียบเทียบกับ
สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชดิบมันสำปะหลังดิบ

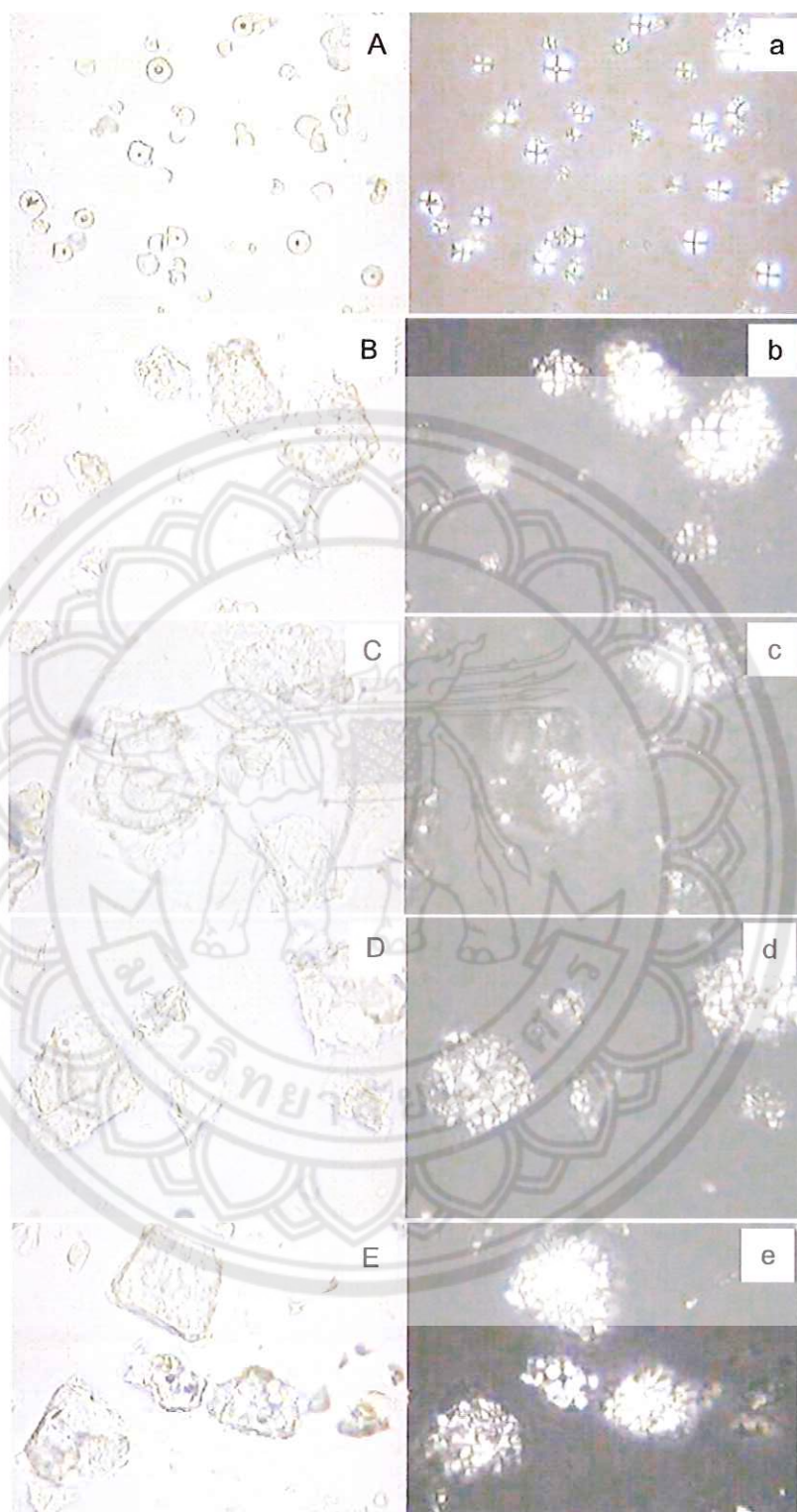
ลักษณะผลึกของสตาร์ชครอสลิงค์เป็นแบบ C – type โดยแสดงพีคชัดเจนในช่วง
15.1° และ 23.1° และการเกิดพีคที่ 17.3° และ 17.9° ด้วย สตาร์ชครอสลิงค์จะเกิดการรวมพีคคู่ที่
17.3° และ 17.9° เป็นพีคเดี่ยว โดยตำแหน่งของแต่ละพีคไม่แตกต่างจากสตาร์ชดิบ สอดคล้องกับ
การศึกษาของ Polnaya, et al. (2013) นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าความสูงของพีคลดลงใน
สตาร์ชครอสลิงค์ทุกระดับการครอสลิงค์ แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของสตาร์ช โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความร้อนจากกระบวนการดัดแปรและสภาพต่างมีผลกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกมาก ซึ่งทำให้ความเป็นผลึกของสตาร์ชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชดิบ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงนี้อาจแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสตาร์ชกับหมู่ฟอสเฟตจากโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในส่วนพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลสตาร์ชหรือการครอสลิงค์ (Gao, et al., 2014, p. 316) แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เกิดความร้อนและแรงเฉือนมากกว่าอิทธิพลจากการดัดแปรทางเคมีจากการครอสลิงค์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากการครอสลิงค์เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจไม่เปลี่ยนแปลงถึงระดับโครงสร้างผลึกของสตาร์ช

3.3 โครงสร้างเม็ดสตาร์ชภายใต้กล้องจุลทรรศน์และการบิกระนาบแสง

โพลาริไรซ์

สตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันโดยทั่วไปนั้นจะสูญเสียสมบัติการบิกระนาบแสง ลักษณะเส้นกากบาทจะหายไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานความร้อนและแรงเฉือนที่ได้รับในกระบวนการ ส่วนการครอสลิงค์โดยทั่วไปนั้นจะรักษาสมบัติการบิกระนาบแสงได้ดี (Murúa-Pagola, et al., 2009) โดยในภาพ 24 แสดงลักษณะเม็ดสตาร์ชมันดำปะหลังดิบ สตาร์ชควบคุม และสตาร์ชครอสลิงค์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์



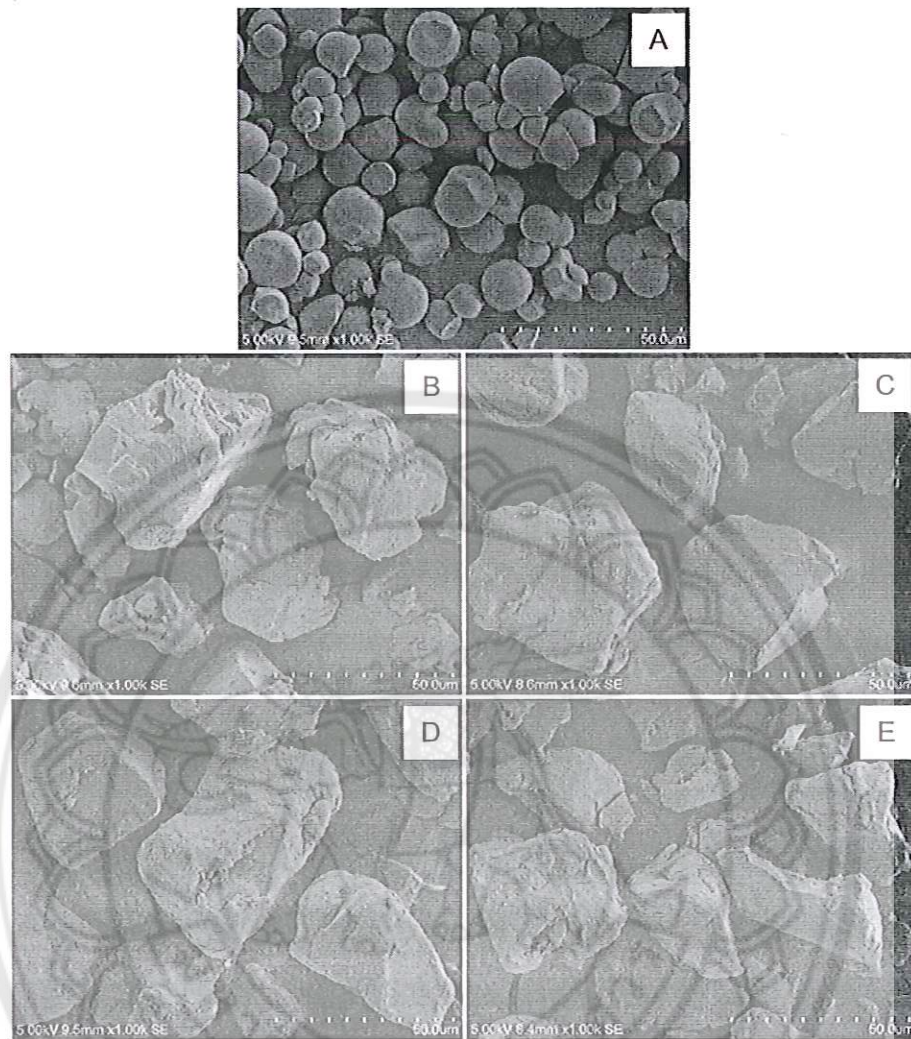
ภาพ 24 โครงสร้างเม็ดสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (A – E) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (a – e) ที่กำลังขยาย 50 เท่า

- หมายเหตุ: A, a: สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ
 B, b: สตาร์ชคววม
 C, c: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำ
 D, d: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลาง
 E, e: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูง

สตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีลักษณะเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ที่สูญเสียสมบัติการบิดระนาบแสงบางส่วนจากความร้อนและแรงเฉือนในกระบวนการตัดแปรรวมถึงการย่อยของสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะแสดงลักษณะรอยกากบาทอยู่บ้าง แสดงให้เห็นว่ายังมีเม็ดสตาร์ชดิบหลงเหลืออยู่ แต่ไม่พบความแตกต่างของรอยกากบาทระหว่างเม็ดสตาร์ชแต่ละระดับการครอสลิงค์ (ภาพ 24 b – e) ผลจากการตัดแปรรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้ทำให้ผิวเม็ดสตาร์ชดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วขึ้น การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในน้ำต่ำ จึงเห็นเป็นกลุ่มของเม็ดสตาร์ชที่รวมตัวกัน (ภาพ 24 A – E) นอกจากนี้ จากภาพแสดงให้เห็นว่าระดับการครอสลิงค์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยคงลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวไว้ โดยจะเห็นเป็นเส้นขอบของกลุ่มเม็ดสตาร์ชที่พองตัวชัดเจนขึ้นตามระดับการครอสลิงค์ที่เพิ่มขึ้น

3.4 โครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning electron microscopy: SEM)

ภาพลักษณะเม็ดสตาร์ชภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของสตาร์ชครอสลิงค์แสดงในภาพ 25 โดยเม็ดสตาร์ชดิบมีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวเรียบ ไม่มีรูที่ผิวเม็ดสตาร์ช (Osundahunsi, et al., 2011) ส่วนสตาร์ชตัดแปรรด้วยเอกซ์ทรูชันจะมีขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชดิบ มีลักษณะผิวที่ขรุขระไม่กลม เนื่องจากกระบวนการตัดแปรรทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว และผิวของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ซึ่งการตัดแปรรโดยการครอสลิงค์ด้วยไซโตเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยาที่ส่วนของผิวเม็ดสตาร์ช จึงมีส่วนทำให้ผิวเม็ดสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้สังเกตเห็นได้เพียงเล็กน้อย



ภาพ 25 ลักษณะเม็ดสตาร์ชภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

หมายเหตุ: A: สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ

B: สตาร์ชควบคุม

C: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับต่ำ

D: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลาง

E: สตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูง

4. สมบัติทางของสสารชครอสลิงค์โดยกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน เปรียบเทียบกับสสารชครอสลิงค์ทางการค้า

จากคุณสมบัติของสสารชครอสลิงค์โดยกระบวนการรีเอกทีฟเอ็กซ์ทรูชันทั้ง 3 ระดับ การครอสลิงค์ พบว่าสสารชครอสลิงค์ระดับกลาง (ร้อยละ 75.14) มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับ สสารชครอสลิงค์ทางการค้ามากที่สุด ซึ่งเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ในตาราง 19

ตาราง 19 สมบัติของสสารชครอสลิงค์ระดับกลางเปรียบเทียบกับสสารชครอสลิงค์ทาง การค้า

คุณสมบัติ	สสารชครอสลิงค์ระดับกลาง จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	สสารชครอสลิงค์ทางการค้า
สมบัติของเจล		
% T*	9.37 ± 0.12	8.03 ± 0.25
Hardness (g)	151.00 ± 2.10	163.00 ± 2.00
Cohesiveness	0.42 ± 0.05	0.47 ± 0.040
สมบัติทางความร้อน		
ΔH (จูลต่อกรัม)*	0.87	4.39
ค่าร้อยละการชโนเรซิส		
รอบที่ 1	0.99 ± 0.09	0.07 ± 0.03
รวม (หลัง 5 รอบ)*	15.41 ± 0.36	4.73 ± 0.32
ค่าการละลายน้ำ		
30 องศาเซลเซียส*	2.67 ± 0.10	0.32 ± 0.04
80 องศาเซลเซียส	4.26 ± 0.04	3.95 ± 0.26
กำลังการพองตัว		
30 องศาเซลเซียส*	6.07 ± 0.02	1.72 ± 0.01
80 องศาเซลเซียส	7.52 ± 0.06	7.80 ± 0.04

หมายเหตุ: * = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

สตาร์ชครอสลิงค์ระดับกลางจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันและสตาร์ชครอสลิงค์ทางการค้ามีหลายคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน เช่น คุณสมบัติของเจล สมบัติการละลายน้ำ และกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจากความใกล้เคียงของสมบัติต่างๆ นี้แสดงให้เห็นว่า สตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการรีแอกทีฟเอกซ์ทรูชันอาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตสตาร์ชครอสลิงค์ในระดับอุตสาหกรรมได้ และเนื่องจากสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันผ่านกระบวนการที่ใช้ความร้อนและเกิดการเจลาติไนเซชันบางส่วนแล้ว จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (ΔH) ลดลง เกิดการพองตัว และการละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำ (30 องศาเซลเซียส) ได้มากกว่าสตาร์ชครอสลิงค์ทางการค้า ซึ่งนับเป็นข้อดีสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้เกิดการพองตัวในน้ำเย็น แต่อย่างไรก็ตาม ความคงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็งของสตาร์ชทางการค้ายังคงมีค่าสูงกว่าสตาร์ชครอสลิงค์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และอาจต้องมีการปรับปรุงกระบวนการต่อไป



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังโดยเทคนิคการครอสลิงค์ร่วมกับกระบวนการรีแอกทีฟ-เอ็กซ์ทรักชันสามารถดัดแปรสตาร์ชให้มีลักษณะและสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันได้ สตาร์ชครอสลิงค์ที่ได้มีระดับการแทนที่ด้วยฟอสเฟต 0.0100 ถึง 0.0298 โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.4 ตามกำหนดของ FAO JECFA มีระดับการครอสลิงค์เท่ากับ 51.34 ถึง 99.03 สตาร์ชมีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและความชื้นที่ใช้ในระหว่าง การดัดแปร ความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายลดลงตามระดับการครอสลิงค์ที่เพิ่มขึ้น สตาร์ช ครอสลิงค์มีการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าสตาร์ชดิบ แต่ที่อุณหภูมิสูงการดูดซับและละลายน้ำ ที่น้อยกว่าสตาร์ชดิบ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชครอสลิงค์ทั้งหมดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย มีความ เป็นผลึกลดลง เม็ดสตาร์ชแข็งแรงและมีความคงตัวต่อความร้อน สภาวะกรดและแรงเฉือนมากขึ้น

สตาร์ชที่ระดับครอสลิงค์ต่างๆ มีสมบัติทางเคมีกายภาพ ลักษณะเจล ความหนืด และ ความคงตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างของสตาร์ชแต่ละระดับการครอสลิงค์นี้สามารถนำไปใช้ ในผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันได้ เช่น สตาร์ชที่ระดับการครอสลิงค์ต่ำ (ร้อยละ 50 ถึง 70) และสตาร์ช ครอสลิงค์ระดับกลาง (ร้อยละ 71 ถึง 90) มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็ง - ละลายน้ำแข็ง ได้ดี ให้ความหนืดและเกิดเจลที่มีโครงสร้างแข็งแรง เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอาหารที่ต้องการ ให้เกิดการพองตัวสูงและรวดเร็ว เช่น ใช้เพื่อเพิ่มความหนืดในอาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารที่มีความ เป็นกรด ส่วนสตาร์ชครอสลิงค์ระดับสูง (มากกว่าร้อยละ 90) มีความคงตัวต่อความร้อนได้ดี มีการพองตัวและการละลายต่ำ และไม่เกิดเจลที่ความเข้มข้นต่ำ เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการ ผลิตกระดาษ บรรจุภัณฑ์ ยา พลาสติก หรือสิ่งทอ เพื่อป้องกันและควบคุมการซึมผ่านของน้ำและ เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง เป็นต้น โดยการดัดแปรด้วยกระบวนการนี้สามารถดัดแปรสตาร์ช ให้มีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับสตาร์ชครอสลิงค์ทางการค้าได้ โดยใช้ระยะเวลาในการดัดแปร น้อยกว่า ซึ่งอาจนำไปประยุกต์ ปรับปรุงเพื่อใช้ในการดัดแปรสตาร์ชในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีแป้ง (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, วิจารย์ วิชชกิจ, ปิยะ กิตติภาดากุล, วชิร เลิศมงคล และปิยะ ดวงพัตรา. (2542). การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (ม.ป.ป.). ปฏิบัติการดัดแปรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์. ธนบุรี: คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จารุณี โลกสุวรรณ. (2549). การประยุกต์ใช้แป้งดัดแปรเป็นสารห่อหุ้ม สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- จำเริญ อัจฉราภิรักษ์. (2537). การปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการแปรรูปทางกายภาพและทางเคมีแบบเชื่อมข้ามร่วมกับวิธีอะซิทิเลชัน และฟรีเจลาติไนเซชัน. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชนิดา หันสวาสดี. (2551). เคมีของแป้งและแป้งดัดแปร. กรุงเทพฯ: โอ. เอส. พรินติ้ง เฮ้าส์.
- ประชา บุญญสิริกุล. (2537). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. อาหาร, 26, 235-248.
- ปรารธนา ปรารธนาดี, จิรัชัย พุทธกุลสมศิริ, เจริญชัย ไชยมพัตราภรณ์ และชুমพล มณฑาทิพย์กุล. (2552). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการการจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.).
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2555). ยุทธศาสตร์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมมันสำปะหลังประเทศไทย (พ.ศ. 2555-2559) และโปรแกรมวิจัยและพัฒนา มันสำปะหลังภายใต้แผนกลยุทธ์การวิจัยและพัฒนา สวทช. ระยะที่ 2 พ.ศ. 2554-2559 (Strategic Planning Alliance II : SPA II) (พิมพ์ครั้งที่ 2). ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2535). มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. มอก. 1073-2535. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

- อิสราภรณ์ เอ็มรัตน์. (2550). การดัดแปรแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวด้วยวิธีฟอสเฟต
ครอสลิงกิงค์โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อิสราภรณ์ เอ็มรัตน์, ยุกี วันดี, สันตณีย์ ปัญจอนนท์, ดุษฎี อุดภาพ, จุรีรัตน์ พุดตาลเล็ก และวิไล
รังสาดทอง. (2554). การดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีครอสลิงกิงค์โดยใช้โซเดียม
ไตรเมตาฟอสเฟต. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 34(4), 357- 368.
- Adebowale, K. O. and Lawal, O. S. (2003). Functional properties and retrogradation
behaviour of native and chemically modified starch of mucuna bean (*Mucuna
pruriens*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(15), 1541-1546.
- Agudelo, A., Varela, P., Sanz, T. and Fiszman, S. M. (2014). Native tapioca starch as a
potential thickener for fruit fillings. Evaluation of mixed models containing low-
methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids*, 35, 297-304.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis* (15th ed.). Washington D.C: The Association
of Official Analytical Chemists.
- Atichokudomchai, N. and Varavinit, S. (2003). Characterization and utilization of acid-
modified cross-linked Tapioca starch in pharmaceutical tablets. *Carbohydrate
Polymers*, 53(3), 263- 270.
- Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K. and Siroth, K. (2009). Chapter 12 - Tapioca/
Cassava Starch: Production and Use. In *Starch* (3rd ed., pp. 541-568).
San Diego: Academic Press.
- Burros, B. C., Young, L. A. and Carroad, P. A., (1987). Kinetics of corn meal
gelatinization at high temperature and low moisture. *Journal of Food Science*,
52, 1372-1380.
- Chaiyakul, S., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumnong, P. and Winger, R. (2009).
Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high
protein glutinous rice based snack. *Journal of Food Science and Technology*,
42, 781-787.

- Chang, Y. K. and El-Dash, A. A. (2003). Effects of acid concentration and extrusion variables on some physical characteristics and energy requirements of cassava starch. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 20, 129-137.
- Charoenrein, S. and Preechathamwong, N. (2012). Effect of waxy rice flour and cassava starch on freeze-thaw stability of rice starch gels. *Carbohydrate Polymers*, 90, 1032-1037.
- Chiu, C. W. and Solarek, D. (2009). Chapter 17 - Modification of Starches. In *Starch* (3rd ed., pp. 629-655). San Diego: Academic Press.
- Choi, S. G. and Kerr, W. L. (2004). Swelling characteristics of native and chemically modified wheat starches as a function of heating temperature and time. *Starch/ Stärke*, 56, 181-189.
- Deetae, P., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P., Naivikul, O. and Varavinit, S. (2008). Preparation, pasting properties and freeze-thaw stability of dual modified crosslink-phosphorylated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 73, 351-358.
- Derycke, V., Vandeputte, G. E., Vermeylen, R., De Man, W., Goderis, B., Koch, M. H. J., et al. (2005). Starch gelatinization and amylose-lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. *Journal of Cereal Science*, 42(3), 334-343.
- FAO JECFA Monographs 11. (Ed.). (2011). *Compendium of food additive specifications* Joint 74th Meeting FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Rome: FAO/WHO.
- Gamonpilas, C., Pongjaruvat, W., Methacanon, P., Seetapan, N., Fuongfuchat, A. and Klaiherd, A. (2013). Effects of cross-linked tapioca starches on batter viscosity and oil absorption in deep-fried breaded chicken strips. *Journal of Food Engineering*, 114(2), 262-268.

- Gao, F., Li, D., Bi, C. H., Mao, Z. H. and Adhikari, B. (2014). Preparation and characterization of starch crosslinked with sodium trimetaphosphate and hydrolyzed by enzymes. *Carbohydrate Polymers*, 103, 310-318.
- Graf De, R. A., Broekroelofs, G. A., Janssen, L. P. B. M. and Beenackers, A. A. C. M. (1995). The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 28, 137-144.
- Guha, M., Ali, S. Z. and Bhattacharya, S. (1998). Effect of barrel temperature and screw speed on rapid visco analyser pasting behavior of rice extrudate. *Journal of Food Science and Technology*, 33, 259-266.
- Hagenimana, A., Ding, X. and Fanf, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43, 38-46.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253-267.
- Jang, K. I., Han, J. H., Lee, K. Y., Bae, I. Y., Lee, J. Y., Kim, M. K., et al. (2009). Physicochemical properties of mung bean starch paste, a main ingredient of *Omija - eui*. *Food Science and Biotechnology*, 18(4), 991-995.
- Jonhed, A. (2006). Properties of modified starches and their use in the surface treatment of paper. Doctoral dissertation, Ph.D., Karlstad University, Sweden.
- Juliano, B. O. (1971). A simplified assay for milled rice amylose. *Cereal Science Today*, 16, 334-338.
- Jyothi, A. N., Moorthy, S. N. and Rajasekharan, V. (2006). Effects of cross linking with epichlorohydrin on the properties of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starch. *Starch/Stärke*, 58, 292-299.
- Koo, S. H., Lee, K. Y. and Lee, H. G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. *Food Hydrocolloids*, 24(6-7), 619-625.
- Landerito, N. A. and Wang, Y. J. (2005). Preparation and properties of starch phosphates using waxy, common, and high-amylose corn starches. II. Reactive extrusion method. *Cereal Chemistry*, 82, 271-276.

- Lim, S. T., Kasemsuwan, T. and Jane., J. (1994). Characterization of phosphorus in starch by ^{31}P – nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 71, 488-493.
- Lee, I., We, G. J., Kim, D. E., Cho, Y.-S., Yoon, M. R., Shin, M., et al. (2012). Classification of rice cultivars based on cluster analysis of hydration and pasting properties of their starches. *LWT - Food Science and Technology*, 48(2), 164-168.
- Lenaerts, V., Moussa, I., Dumoulin, Y., Mebsout, F., Chouinard, F., Szabo, P., et al. (1998). Cross-linked high amylose starch for controlled release of drugs: Recent advances. *Journal of Controlled Release*, 53(1-3), 225-234.
- Liu, H., Ramsden, L. and Corke, H., (1999). Physical properties and enzymatic digestibility of phosphorylated ae, wx, and normal maize starch prepared at different pH levels. *Cereal Chemistry*, 76, 938-943.
- Liu, T., Maa, Y., Xue, S. and Shi, J. (2012). Modifications of structure and physicochemical properties of maize starch by γ -irradiation treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 46, 156-163.
- Lo, C.T. and Ramsden, L. (2000). Effects of xanthan and galactomannan on the freeze/thaw properties of starch gels. *Food/Nahrung*, 44(3), 211-214.
- Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Vernon-Carter, E. J. and Alvarez-Ramirez, J. (2014). Impact of native and chemically modified starches addition as fat replacers in the viscoelasticity of reduced-fat stirred yogurt. *Journal of Food Engineering*, 131, 110-115.
- Luo, F. X., Huang, Q., Fu, X., Zhang, L. X. and Yu, S. J. (2009). Preparation and characterisation of crosslinked waxy potato starch. *Food Chemistry*, 115(2), 563-568.
- Manoi, K. and Rizvi, S. S. H. (2010). Physicochemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 687-694.
- Mason, W. R. (2009). Chapter 20 - Starch Use in Foods. In *Starch* (3rd ed., pp. 745-795). San Diego: Academic Press.

- Mbougoung, P., Tenin, D., Scher, J. and Tchiégang, C. (2012). Influence of acetylation on physicochemical, functional and thermal properties of potato and cassava starches. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 320-326.
- Mirmoghtadaie, L., Kadivar, M. and Shahedi, M. (2009). Effects of cross-linking and acetylation on oat starch properties. *Food Chemistry*, 116(3), 709-713.
- Moscicki, L., Mitrus, M., Wojtowicz, A., Oniszczuk T. and Rejak A. (2013). Extrusion-Cooking of Starch, *Advances in Agrophysical Research*. In Stanislaw Grundas (Ed.), InTech. Retrieved January, 13, 2015, from <http://www.intechopen.com/books/advances-in-agrophysical-research/extrusion-cooking-of-starch>.
- Mounsey, J. S. and O'Riordan, E. D. (2008). Characteristics of imitation cheese containing native or modified rice starches. *Food Hydrocolloids*, 22(6), 1160-1169.
- Muadklay, J. and Charoenrein, S. (2008). Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. *Food Hydrocolloids*, 22(7), 1268-1272.
- Muhammad, K., Hussin, F., Man, Y. C., Ghazali, H.M. and Kennedy, J.F. (2000). Effect of pH on phosphorylation of sago starch. *Carbohydrate Polymers*, 42, 85-90.
- Murúa-Pagola, B., Beristain-Guevara, C. I. and Martínez-Bustos, F. (2009). Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 91(3), 380-386.
- Nabeshima, E. and Grossmann, M. (2001). Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. *Carbohydrate Polymers*, 45(4), 347-353.
- O'Brien, S. and Wang, Y. J. (2009). Effects of shear and pH on starch phosphates prepared by reactive extrusion as a sustained release agent. *Carbohydrate Polymers*, 77, 464-471.

- Oşundahunsi, O. F., Titilope seidu, K. and Mueller, R. (2011). Dynamic rheological and physicochemical properties of annealed starches from two cultivars of cassava. *Carbohydrate Polymers*, 83, 1916-1921.
- Pedrosa Silva Clerici, M. T., Airoldi, C. and El-Dash, A. A. (2009). Production of acidic extruded rice flour and its influence on the qualities of gluten-free bread. *LWT - Food Science and Technology*, 42(2), 618-623.
- Pérez, S., Baldwin, P. M. and Gallant, D. J. (2009). Chapter 5 - Structural Features of Starch Granules I. In *Starch* (3rd ed., pp. 149-192). San Diego: Academic Press.
- Pérez-Sira, E. and González-Parada, Z. (1997). Functional properties of cassava (*Manihot esculenta* crantz) starch modified by physical methods. *Starch/ Stärke*, 49(2), 49-53.
- Polnaya, F. J., Haryadi, Marseno, D. W. and Cahyanto, M. N. (2013). Effects of phosphorylation and cross-linking on the pasting properties and molecular structure of sago starch. *International Food Research Journal*, 20(4), 1609-1615.
- Ratnayake, W. S. and Jackson, D. S. (2008). Phase transition of crosslinked and hydroxypropylated corn (*Zea mays* L.) starches. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 346-358.
- Redmond, G., Gormley, R., Butler, F., Dempsey, A., Oxley, E. and Gerety, A. (2004). Final report : Freeze-Chilling of Ready-to-eat Meal Components. Dublin: The National Food Centre.
- Rutenberg, M. W. and Solarek, D. (1984). Starch Derivatives : Production and Uses. In *Starch: Chemistry and Technology* (2nd ed., pp. 311-388). San Diego: Academic Press.
- Sang, Y., Seib, P. A., Herrera, A. I., Prakash, O. and Shi, Y. C. (2010). Effects of alkaline treatment on the structure of phosphorylated wheat starch and its digestibility. *Food Chemistry*, 118(2), 323-327.

- Sang, Y., and Seib, P. A. (2006). Resistant starches from amylose mutants of corn by simultaneous heat-moisture treatment and phosphorylation. *Carbohydrate Polymers*, 63, 167-175.
- Sasaki, T., Yasui, T. and Matsuki, J. (2000). Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation, and pasting properties of starches from waxy and nonwaxy wheat and their F1 seeds. *Cereal Chemistry Journal*, 77(1), 58-63.
- Seker, M. and Hanna, M. A. (2005). Cross-linking starch at various moisture contents by phosphate substitution in an extruder. *Carbohydrate Polymers*, 59(4), 541-544.
- Seker, M., Sadikoglu, H., Ozdemir, M. and Hanna, M. A. (2003). Phosphorus binding to starch during extrusion in both single- and twin-screw extruders with and without a mixing element. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 355-360.
- Shanavas, S. (2013). *Studies on modified tuber starches useful for tablets and capsules*. Kannur University: Central Tuber Crops Research Institute.
- Silva, M. C., Ibezim, E. C., Ribeiro, T. A. A., Carvalho, C. W. P. and Andrade, C. T. (2006). Reactive processing and mechanical properties of cross-linked maize starch. *Industrial Crops and Products*, 24(1), 46-51.
- Singh, A. V. and Nath, L. K. (2012). Synthesis and evaluation of physicochemical properties of cross-linked sago starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 50, 14-18.
- Singh, J., Kaur, L. and Mc Carthy, 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.
- Song, D. (2011). *Starch crosslinking for cellulose fiber modification and starch nanoparticle formation*. Doctoral dissertation, Ph.D., Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Swinkels, J. J. M. (1985). Composition and Properties of Commercial Native Starches. *Starch - Stärke*, 37(1), 1-5.

- Wang, C., He, X., Fu, X., Luo, F. and Huang, Q. (2015). High-speed shear effect on properties and octenylsuccinic anhydride modification of corn starch. *Food Hydrocolloids*, 44, 32-39.
- Wattanachant, S., Muhammad, K., Mat Hashim, D. and Rahman, R. A. (2003). Effect of crosslinking reagents and hydroxypropylation levels on dual-modified sago starch properties. *Food Chemistry*, 80(4), 463-471.
- Wongsagonsup, R., Pujchakarn, T., Jitrakbumrung, S., Chaiwat, W., Fuongfuchat, A., Varavinit, S., et al. (2014). Effect of cross-linking on physicochemical properties of tapioca starch and its application in soup product. *Carbohydrate Polymers*, 101, 656-665.
- Wongsagonsup, R., Shobsngob, S., Oonkhanond, B. and Varavinit, S. (2005). Zeta potential (ζ) and pasting properties of phosphorylated or crosslinked rice starches. *Starch/ Stärke*, 57, 32-37.
- Yook, C., Pek, U. H. and Park, K. H. (1993). Gelatinization and retrogradation characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rices. *Journal of Food Science*, 58, 405-407.



ภาคผนวก ข้อกำหนดของสตาร์ชดัดแปรฟอสเฟตตาม FAO JECFA

ตาราง 20 ข้อกำหนดของสตาร์ชดัดแปรชนิดฟอสเฟต

ชนิดของสตาร์ชดัดแปร	ปฏิกิริยา	ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์สุดท้าย
โมโนสตาร์ชฟอสเฟต (monostarch phosphate) INS No. 1410	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วย กรดออร์โทฟอสฟอริก หรือ โซเดียม หรือโพแตสเซียม ออร์โทฟอสเฟต หรือโซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต	ปริมาณฟอสเฟตโดยคำนวณ เป็นปริมาณฟอสฟอรัส (%) ไม่ เกิน 0.5% ในแป้งมันฝรั่งหรือ แป้งสาลี และ ไม่เกิน 0.4% ใน แป้งอื่นๆ
ไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate) INS No. 1412	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วย โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต หรือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์	ปริมาณฟอสเฟตโดยคำนวณ เป็นปริมาณฟอสฟอรัส (%) ไม่ เกิน 0.5% ในแป้งมันฝรั่งหรือ แป้งสาลี และ ไม่เกิน 0.4% ใน แป้งอื่นๆ
ฟอสเฟตไดสตาร์ชฟอสเฟต (Phosphated distarch phosphate) INS No. 1413	ปฏิกิริยาร่วมระหว่างโมโน- สตาร์ชฟอสเฟตและไดสตาร์ช ฟอสเฟต	ปริมาณฟอสเฟตโดยคำนวณ เป็นปริมาณฟอสฟอรัส (%) ไม่ เกิน 0.5% ในแป้งมันฝรั่งหรือ แป้งสาลี และ ไม่เกิน 0.4% ใน แป้งอื่นๆ
อะซิทิเลตไดสตาร์ช ฟอสเฟต (Acetylated distarch phosphate) INS No. 1414	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วย โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต หรือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์- ฟิเคชันด้วยอะซิติกแอนไฮ- ไดรด์ หรือไวนิลอะซิเตท	- หมู่อะซิทิลไม่เกิน 2.5% - ปริมาณฟอสเฟตโดยคำนวณ เป็นปริมาณฟอสฟอรัส (%) ไม่เกิน 0.14% ในแป้งมันฝรั่ง หรือแป้งสาลี และ ไม่เกิน 0.04% ในแป้งอื่นๆ - ไวนิลอะซิเตทไม่เกิน 0.1 mg/kg

ตาราง 20 (ต่อ)

ชนิดของสารขจัดแปร	ปฏิกิริยา	ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์สุดท้าย
ไฮดรอกซีโพรพิลไดสตาร์ช ฟอสเฟต (Hydroxypropyl distarch hosphate) INS No. 1442	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วย โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต หรือฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์- ฟิเคชันด้วยโพรพิลีนออกไซด์	- หมู่ไฮดรอกซีโพรพิลไม่เกิน 7.0% - โพรพิลีนคลอโรไฮดรินไม่เกิน 1 mg/kg - ปริมาณฟอสเฟตโดยคำนวณ เป็นปริมาณฟอสฟอรัส (%) ไม่เกิน 0.14% ในแป้งมันฝรั่ง หรือแป้งสาลี และ ไม่เกิน 0.04% ในแป้งอื่นๆ

ที่มา: FAO JECFA, 2011

