



ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังและการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมชั้น



โดย
นางสาวจาริณี พยัคฆชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังและการนำไปใช้ใน
ผลิตภัณฑ์ขนมชั้น



โดย
นางสาวจาริณี พยัคฆชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF DIETARY FIBERS ON PROPERTIES OF RICE AND TAPIOCA
STARCHES AND THEIR APPLICATION IN A THAI STEAMED DESSERT (KANOM
CHAN)



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2017
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังและการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมชั้น
โดย	จาริณี พยัคฆชาติ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ธีรธรรมถาวร)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาณี ด่านวิริยะกุล)

58403211 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : สตาร์ช, ข้าวเจ้า, มันสำปะหลัง, โยอาหาร, อินนูลิน, ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์, รีซิสแทนต์สตาร์ช, รีซิสแทนต์มอลโตเด็คซ์ตริน

นางสาว จาริณี พัทธ์คณาติ: ผลของโยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังและการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมชั้น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอาหารอย่างแพร่หลาย แต่สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานสูง ประกอบกับในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาใส่ใจดูแลสุขภาพของตนเองกันมากขึ้น ดังนั้นการเติมสารอาหารที่มีประโยชน์ทางโภชนาการลงในผลิตภัณฑ์สตาร์ชจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มคุณค่าให้แก่สตาร์ชและผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ช และการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเลือกโยอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ อินนูลิน (inulin, IN) ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligo saccharide, FOS), รีซิสแทนต์สตาร์ช (resistant starch, RS) และรีซิสแทนต์มอลโตเด็คซ์ตริน (resistant maltodextrin, RM) มาเติมลงในสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโยอาหารและสตาร์ชวัตถุดิบ และศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่เติมโยอาหาร 30% ของสตาร์ช (โดยน้ำหนักแห้ง) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโยอาหารมีสมบัติเฉพาะของตัวเองที่ส่งผลให้สตาร์ชมีสมบัติเปลี่ยนไป โดยเฉพาะด้านการละลายน้ำ พฤติกรรมด้านความหนืด และลักษณะเนื้อสัมผัส โดยพบว่าโยอาหารทั้ง 4 ชนิดทำให้สมบัติการอุ้มน้ำและการพองตัวของลดลง ทำให้เจลสตาร์ชเกิด syneresis สูงขึ้น ทำให้สตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนเซชันสูงขึ้นแต่ใช้พลังงานในการเกิดเจลาทีนเซชันลดลง FOS, IN และ RM ทำให้การละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้น FOS, RS และ RM ส่งผลให้สตาร์ชมีพฤติกรรมการให้ความหนืดสูงขึ้น IN ทำให้ค่าความหนืดและเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าลดลง ขณะที่ RS ทำให้ค่าความหนืดและเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังสูงขึ้น แต่ทำให้สตาร์ชสูญเสียความใสร้อยละ 5 และสีของเจลสตาร์ชขาวขึ้น FOS และ RS ส่งผลให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีพลังงานในการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง เมื่อนำโยอาหารมาประยุกต์ในการทำขนมชั้น พบว่าขนมชั้นที่เติม RS มีความแข็งกว่าโยอาหารชนิดอื่น เมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าขนมชั้นจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม IN ได้คะแนนการยอมรับสูงสุด จะเห็นได้ว่าโยอาหารแต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติของสตาร์ชแตกต่างกันไป ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่เสริมโยอาหารเพื่อสุขภาพให้มีลักษณะคุณภาพตามความต้องการได้ โดยการเลือกใช้ชนิดของโยอาหารให้เหมาะสม

58403211 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : starch, rice, tapioca, inulin, fructo-oligosaccharide, resistant starch, resistant maltodextrin, dietary fiber

MISS JARINEE PAYAKKACHAT : EFFECT OF DIETARY FIBERS ON PROPERTIES OF RICE AND TAPIOCA STARCHES AND THEIR APPLICATION IN A THAI STEAMED DESSERT (KANOM CHAN) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. EAKAPHAN KEOWMANEECHAI

Rice and tapioca starches are raw materials widely used in foods. However, they are high-calories carbohydrates. In addition, the consumers are currently taking care of their own health even more. Thus, adding nutrients that have nutritional benefits into starch products is an option to increase the value of the starches and their products. This research aimed to study the effect of dietary fibers on properties of starches and its application in a food product. Four dietary fibers were selected including inulin (IN), fructo-oligosaccharide (FOS), resistant starch (RS) and resistant maltodextrin (RM). They were added into rice and tapioca starches. Chemical compositions of the fibers and starches were analyzed. Physicochemical properties of the starches mixed with the fibers at 30% by starch weight (dry basis) were studied. The results showed that the dietary fibers having their own unique characteristics altered properties of the starches, especially, solubility, viscosity behavior and texture. The fibers decreased water absorption and swelling power but increased gel syneresis of the starches. They also increased gelatinization temperatures but decreased gelatinization enthalpies of the starches. FOS, IN and RM increased the starch solubility while FOS, RS and RM increased the starch viscosities. IN decreased the viscosities and gel hardness of rice starch. On the other hand, RS increased the viscosities, gel hardness and brightness but decreased paste clarity of both starches. FOS and RS caused retrogradation enthalpies of tapioca starch to decrease. When applied into a Thai steamed dessert (Kanom Chan), it was found that the dessert made with RS showed higher hardness than the other fibers. Sensory testing revealed that the dessert made with tapioca starch and IN had the highest hedonic scores. It can be seen that each dietary fiber affected the properties of the starches differently. The results from this study could be applied to development of healthy food products fortified with dietary. The products having required quality characteristics would be achieved by selecting an appropriate type of dietary fiber.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวคิดในการทำงานวิจัยนี้ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ อันส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

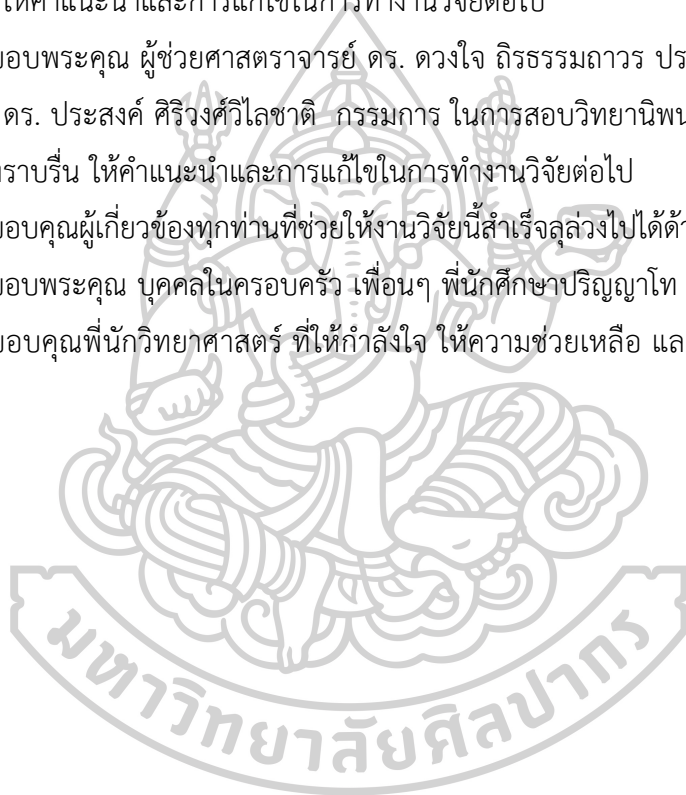
ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาณี ด้านวิริยะกุล ผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและการแก้ไขในการทำงานวิจัยต่อไป

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ถิรธรรมถาวร ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์โลชาติ กรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยดำเนินการสอบจบให้เป็นอย่างราบรื่น ให้คำแนะนำและการแก้ไขในการทำงานวิจัยต่อไป

ขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บุคคลในครอบครัว เพื่อนๆ พี่นักศึกษาปริญญาโท

ขอขอบคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ ที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการทำงานของผู้วิจัยเสมอมา



จาริณี พยัคฆชาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	3
2.1 สตาร์ช.....	3
2.1.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง.....	4
2.1.2 สตาร์ชข้าวเจ้า.....	4
2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช.....	6
2.2.1 อะไมโลส (amylose).....	6
2.2.2 อะไมโลเพคติน (amylopectin).....	7
2.3 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช.....	8
2.4 คุณสมบัติของสตาร์ช.....	9

2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	9
2.4.2 ความหนืด.....	10
2.4.3 การเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization)	12
2.4.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)	13
2.4.5 ความใสของสตาร์ชสูง	15
2.5 โยอาหาร (dietary fiber).....	15
2.5.1 ประเภทของโยอาหาร.....	16
2.5.1.1 โยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber).....	16
2.5.1.2 โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber).....	19
2.6 อินนูลิน (inulin, IN).....	19
2.7 ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharide, FOS).....	21
2.8 รีซิสแทนต์สตาร์ช (resistant starch, RS).....	22
2.9 รีซิสแทนต์มอลโตเด็คซ์ตริน (resistant maltodextrin, RM).....	25
2.10 โยอาหารอื่นๆ.....	27
2.11 ผลของโยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช.....	28
2.11.1 ผลของอินนูลิน (IN) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช.....	28
2.11.2 ผลของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (FOS) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช.....	29
2.11.3 ผลของรีซิสแทนต์สตาร์ช (RS) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช.....	30
2.11.4 ผลของรีซิสแทนต์มอลโตเด็คซ์ตริน (RM) ต่อสมบัติของอาหาร.....	31
2.11.5 ผลของโยอาหารชนิดอื่นๆ ต่อสมบัติของสตาร์ช.....	32
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	33
3.1 วัตถุประสงค์.....	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	33
3.2.1 เครื่องมือ	33

3.2.2	อุปกรณ์	34
3.2.3	สารเคมี.....	34
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.3.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	35
3.3.2	การวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคของวัตถุดิบ.....	35
3.3.3	การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของวัตถุดิบ.....	35
3.3.4	ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง.....	35
3.3.5	ผลของใยอาหารต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์สตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง.....	40
3.3.6	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	42
บทที่ 4	ผลและอภิปรายผลการทดลอง	43
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร.....	43
4.2	ลักษณะทางจุลภาคของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร	46
4.3	ค่าความเป็นกรด-ด่างของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร	50
4.4	ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง.....	50
4.4.1	ดัชนีการอุ้มน้ำ (water absorption index, WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI).....	50
4.4.2	กำลังการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility).....	52
4.4.3	สมบัติการให้ความหนืด (pasting properties)	55
4.4.4	สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization).....	57
4.4.5	สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation).....	60
4.4.6	ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture properties) ของเจลสตาร์ช.....	63
4.4.7	ค่าสีของเจลสตาร์ช	64
4.4.8	ความใส (clarity) ของสตาร์ชสุก	66
4.4.9	ความคงตัวต่อการแช่แข็งละลาย (freeze-thaw stability) ของเจลสตาร์ช.....	68

4.5 ผลของใยอาหารต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง	70
4.5.1 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น	70
4.5.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น	73
สรุป.....	76
ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	118



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช	3
ตารางที่ 2 โครงสร้างและสมบัติของอะโลโลสและอะไมโลเพกติน	6
ตารางที่ 3 กำลังการพองและการละลายของสตาร์ชที่ 95°C.....	10
ตารางที่ 4 ข้อมูลจำเพาะของรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทริน (Fibersol-2)	26
ตารางที่ 5 โยอาหารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นๆ	28
ตารางที่ 6 การใช้เส้นโยอาหารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นๆ ในการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ช	32
ตารางที่ 7 สูตรพื้นฐานของขนมชั้น	41
ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมี (% wet basis) ของสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และโย อาหาร.....	44
ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมี (% dry basis) ของสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และโย อาหาร.....	45
ตารางที่ 10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสงแบบ ธรรมดา.....	47
ตารางที่ 11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสง โพลาไรซ์ (polarized light).....	48
ตารางที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสง ธรรมดาและการย้อมไอโอดีน	49
ตารางที่ 13 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสตาร์ชและโยอาหาร	50
ตารางที่ 14 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมัน สำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	59
ตารางที่ 15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมัน สำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	62

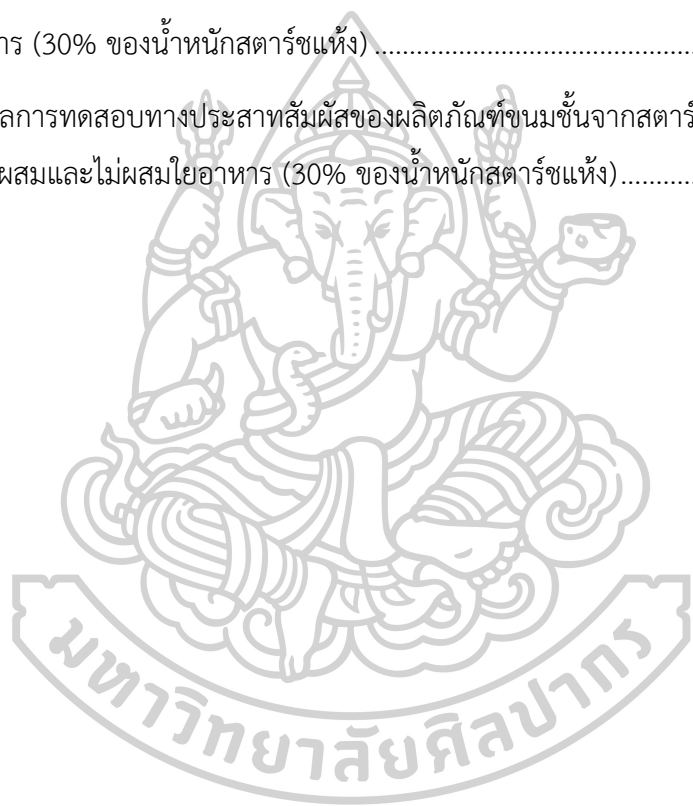
ตารางที่ 16 ค่าทางเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)..... 64

ตารางที่ 17 ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)..... 65

ตารางที่ 18 การเกิด syneresis จากการแช่แข็งละลายของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (15%) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (20%) เมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)..... 69

ตารางที่ 19 ค่าทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง) 72

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)..... 75



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างอะไมโลส.....	7
ภาพที่ 2 โครงสร้างอะไมโลเพกติน.....	8
ภาพที่ 3 โครงสร้างแบบกึ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช (semi-crystalline).....	9
ภาพที่ 4 ตัวอย่างกราฟ RVA.....	11
ภาพที่ 5 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชต่างๆ.....	12
ภาพที่ 6 การเกิดเจลของสตาร์ช.....	13
ภาพที่ 7 การเกิดเจลที่ไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเม็ดสตาร์ช.....	14
ภาพที่ 8 ประเภทของใยอาหารโดยการแบ่งตามการละลายน้ำและแอลกอฮอล์.....	16
ภาพที่ 9 โครงสร้างอินนูลิน.....	20
ภาพที่ 10 โครงสร้างของรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทริน (Fibersol-2).....	25
ภาพที่ 11 แบบจำลองการแข่งแย่งละลายสตาร์ช.....	40
ภาพที่ 12 ดัชนีการอุ้มน้ำ (WAI) และการละลาย (WSI) ที่อุณหภูมิ 30 °C ของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	51
ภาพที่ 13 การพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	53
ภาพที่ 14 การละลายของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	54
ภาพที่ 15 พฤติกรรมการให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	56
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลที่ไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	58

ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมัน สำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	61
ภาพที่ 18 ความใสของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)	67
ภาพที่ 19 คุณภาพทางเนื้อสัมผัสของขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้า (บน), ขนมชั้นจากสตาร์ชมัน สำปะหลัง (ล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง).....	71



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สตาร์ชเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญในการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ทั้งเครื่องสำอาง รวมถึงอาหารและขนมหลากหลาย เช่น ขนมหวาน ไอศกรีม ซอส ขนมอบกรอบ ฯลฯ ซึ่งสตาร์ชส่วนใหญ่เป็นสตาร์ชจากพืชหัวพืชราก โดยเฉพาะสตาร์ชมันสำปะหลังที่ช่วยเพิ่มความหนืดให้แก่อาหารเนื่องจากมีสมบัติให้ความหนืดสูง มีความใส ราคาไม่สูง และสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ได้จากข้าว ซึ่งเป็นธัญพืชที่ให้คุณประโยชน์แก่ร่างกาย และมีสมบัติที่หลากหลายประการ เช่น ไม่ทำให้เกิดการแพ้ย่อยได้ง่าย ละลายได้ดี อนุภาคขนาดเล็กมาก (3-10 μm) สีขาว ทนต่อกรด ความร้อน และความเย็น ได้ดีกว่าสตาร์ชอื่นๆ มีอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกตินสูง (Bhat and Riar, 2016) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารที่ช่วยในด้านเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ให้ความคงตัว ให้ความหนืด ให้ความยืดหยุ่นในผลิตภัณฑ์ จึงเป็นสตาร์ชจากธัญพืชที่ได้รับความนิยมมากในแถบเอเชีย (Srikaeo and Sangkhiaw, 2014)

เนื่องจากสตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และเป็นแหล่งให้พลังงานที่สำคัญสำหรับมนุษย์ นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวางและในปริมาณมาก แต่สตาร์ชเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานสูง ในขณะที่ปัจจุบันพฤติกรรมการบริโภคของมนุษย์มีการปรับเปลี่ยนไป ผู้บริโภคมีความใส่ใจดูแลสุขภาพและเลือกบริโภคอาหารมากขึ้น อาหารที่มีใยอาหารสูงซึ่งให้พลังงานน้อยลง และมีประโยชน์ในเชิงสุขภาพมีความสำคัญและเป็นที่ต้องการเพิ่มขึ้น การเพิ่มจุดเด่นหรือการขยายฐานผู้บริโภคไปยังกลุ่มคนเหล่านี้ อาจส่งผลในการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์สตาร์ชได้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเติมสารอาหารประเภทใยอาหารลงในผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบ แต่ใยอาหารเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช และอาจจะทำให้คุณภาพและสมบัติของสตาร์ชในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เช่น สมบัติการละลายและการพองตัว พฤติกรรมความหนืด เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของใยอาหาร (dietary fiber, DF) 4 ชนิด ได้แก่ อินนูลิน (inulin, IN) ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligo saccharide, FOS), รีซิสแทนต์สตาร์ช (resistant starch, RS) และรีซิสแทนต์มอลโตเด็คซ์ตริน (resistant maltodextrin, RM) ต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ใยอาหารเหล่านี้ ต้องมีการควบคุมปริมาณที่ใช้ตามที่กฎหมายแต่ละประเทศเป็นผู้กำหนด เนื่องจากหากได้รับในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร และลำไส้ของผู้บริโภคได้ (de Almeida Gualtieri et al., 2011)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และโยอาหาร

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อเติมโยอาหาร

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของโยอาหารต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ชนิดของโยอาหรมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของสตาร์ช และผลิตภัณฑ์จากสตาร์ช

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลัง และโยอาหาร 4 ชนิด คือ IN, FOS, RS และ RM

1.4.2 ศึกษาผลของการเติมโยอาหาร 4 ชนิด คือ IN, FOS, RS, RM ลงในสตาร์ชข้าวและมันสำปะหลัง โดยกำหนดระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของสตาร์ชแห้ง และนำไปศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

1.4.3 ศึกษาผลของการเติมโยอาหารต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

1.5 สถานที่ทำวิจัย

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร อ. เมือง จ. นครปฐม

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 สตาร์ช

แป้ง (flour) หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนที่ยังคงสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน เถ้า และโปรตีนปริมาณสูง เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี เป็นต้น ส่วนสตาร์ช (starch) (คาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนออกให้มากที่สุด ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตมากกว่าร้อยละ 95 ความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 และองค์ประกอบอื่น ๆ รวมกันไม่เกินร้อยละ 2 (ตารางที่ 1) พืชที่นำมาทำสตาร์ชต้องเป็นพืชที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวเจ้า เป็นต้น สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ปลายของสายพอลิเมอร์เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (reducing end group) จะมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) มาเกาะอยู่ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) สตาร์ชถูกใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ทั้งเป็นส่วนผสมหลักในอาหารและใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด สารให้ความคงตัว และสารที่ช่วยในเรื่องเนื้อสัมผัส เป็นต้น (Srichuwong et al., 2012)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

Component	Tapioca starch	Rice starch
Moisture content	10.98±0.10 ^a	6.10±0.88 ^a
Protein content	0.26±0.02 ^a	0.39±0.02 ^b
Lipid content	0.21±0.10 ^a	0.02±0.01 ^a
Fiber content	0.20±0.16 ^a	}0.84±0.08 ^b
Mineral matter	0.12±0.04 ^a	
Starch content	98.72±0.02 ^a	93.06±0.18 ^c

The values are mean ± SD of three independent determinations.

The values in a given row with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

ที่มา: ดัดแปลงจาก Yadav et al. (2016)

2.1.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (tapioca หรืออีกชื่อหนึ่งเรียกว่า cassava) มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบอเมริกาใต้ ในทางพฤกษศาสตร์มันสำปะหลังเป็นพืชในวงศ์ใบเลี้ยงคู่ ตระกูล Euphobiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta*: Crantz. ปัจจุบันมีการปลูกมากกว่าหนึ่งร้อยประเทศ ส่วนใหญ่ในแถบแอฟริกา อเมริกาใต้ และบางส่วนของเอเชียโดยเฉพาะอินโดนีเซียและไทย (Charoenkul et al., 2011) เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากราก และเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานประชากรกว่า 500 ล้านคน (Zhu, 2015)

สตาร์ชมันสำปะหลัง (tapioca starch) ได้จากการนำหัวมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการย่อย (hydrolysis) และนำไปอบแห้ง โดยจะมีความชื้นต่ำประมาณ 9-11% และความหนาแน่นต่ำ มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง ผิวสัมผัสของแป้งจะเนียน ลื่นมือ เมื่อทำให้สุกจะเหลวเหนียวหนืด และใส เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียว ใส คงตัว ยืดหยุ่นสูง ไม่มีกลิ่น มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีส่วนที่อื่นๆ น้อยกว่าร้อยละ 1 สตาร์ชมันสำปะหลังนิยมใช้เป็นสารที่ช่วยให้ความหนืดหรือเป็นเจลในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ขนมปัง เค้ก ซีเรียล เครื่องดื่ม ซอส และไส้กวนในพาย (Chaisawang and Suphantharika, 2006)

2.1.2 สตาร์ชข้าวเจ้า

ข้าว เป็นธัญพืชที่สำคัญในด้านโภชนาการ และการให้พลังงานแก่มนุษย์ นิยมมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* ในประเทศไทยส่วนใหญ่ปลูกข้าวพันธุ์อินดิกา (indica) ซึ่งเป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดเรียวยาว ลำต้นสูง เป็นข้าวที่นิยมเพาะปลูกมากในทวีปเอเชียเขตรมสู่ม มีฝนชุก แสงแดดเพียงพอ ได้แก่ จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย ไปจนถึงอินเดีย ศรีลังกา และประเทศไทย ซึ่งนิยมเพาะปลูกในบริเวณที่ราบลุ่มตอนใต้ของแม่น้ำเจ้าพระยา (Amagliani et al., 2016)

ข้าวเจ้า (non-glutinous rice or non-waxy rice) มีลักษณะทางกายภาพคล้ายข้าวเหนียว แต่เมล็ดมีลักษณะใสอาจมีหรือไม่มีจุดขุนขาวของท้องไขปรากฏอยู่ เนื้อมีลักษณะแข็ง และมีปริมาณอะไมโลสภายในเมล็ดสตาร์ชมากกว่า เมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) ประมาณร้อยละ 15-30 นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น เครื่องสำอาง กระดาษ วัสดุต่างๆ (Bhat and Riar, 2016) และที่นิยมมากที่สุดคือ การนำมาประกอบอาหารทั้งเป็นเมล็ดข้าว นำมาใช้หุงเป็นอาหาร เมื่อหุงแล้วเมล็ดมีกร่วนและสวย พันธุ์ที่สร้างชื่อเสียงให้กับไทยมากที่สุด คือ ข้าวหอมมะลิ (jasmine rice) และแปรรูปนำมาเป็นส่วนประกอบอื่นๆ ในการผลิตอาหาร เช่น แป้งข้าวเจ้า สตาร์ชข้าวเจ้า แป้งตัดแปร เป็นต้น นอกจากนี้ในด้านโภชนาการ ข้าวมีความสำคัญมากเนื่องจากข้าว

ให้แคลอรีซึ่งเป็นพลังงานที่ร่างกายได้รับกว่าหนึ่งในห้าที่มนุษย์ทั่วโลกบริโภค ข้าวประกอบด้วยสตาร์ชประมาณ 80% (Kim et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ข้าวมีค่า glycemic index (GI) สูงเมื่อเทียบกับสตาร์ชตัวอื่นๆ โดยมีการรายงานที่ข้าวมีค่า GI อยู่ที่ประมาณ 54-121 ซึ่งหมายถึง มีค่า GI สูง เมื่อทานเข้าไปในร่างกาย ร่างกายจะดูดซึ่มกลูโคสไปใช้อย่างรวดเร็ว ถ้ารับประทานมากเกินไป อาจจะทำให้ร่างกายดูดซึ่มกลูโคสไปใช้เกินความจำเป็น (Srikaeo and Sangkhiaw, 2014)

สตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch) เป็นสตาร์ชที่ได้จากข้าวซึ่งเป็นธัญพืชที่ได้รับความนิยมมากที่สุดแถบเอเชีย (Srikaeo and Sangkhiaw, 2014) ส่วนใหญ่ทำมาจากข้าวหักหรือข้าวเกร็ดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง มีความยาว 5.0-6.5 ส่วน ไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) มีลักษณะเป็นผงมีสีขาวจับแล้วสากมือเล็กน้อย เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะขุ่นร่วน ถ้าทิ้งไว้ให้เย็นจะอยู่ตัวเป็นก้อน ร่วนไม่เหนียว สตาร์ชจากข้าวเจ้าประกอบด้วย อะไมโลส (amylose) ประมาณร้อยละ 9-33 และมีคุณสมบัติที่ตีหลายประการ เช่น ไม่ทำให้เกิดการแพ้ ย่อยได้ง่าย ผสมผสานได้ดีอนุภาคขนาดเล็กมาก (3-10 μm) ทนต่อกรด ความร้อน และความเย็นได้ดีกว่าสตาร์ชอื่นๆ และเป็นสตาร์ชที่มีอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกตินสูง (Bhat and Riar, 2016)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้สตาร์ชข้าวเจ้าในผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่ามีการนำสตาร์ชข้าวเจ้ามาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า อย่างไรก็ตามรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีลักษณะคล้ายเม็ดไขมัน จึงถูกนำไปใช้ในเชิงการแทนที่ของไขมันเพื่อให้มีการรับสัมผัสที่เหมือนไขมัน ในผลิตภัณฑ์ไขมันต่ำจำพวกเบเกอรี่ นม เนื่อสัตว์ น้ำสลัด ซุปและซอสต่างๆ นอกจากนี้สตาร์ชข้าวเจ้ายังไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ เนื่องจากการแพ้ส่วนใหญ่เกิดจากโปรตีน เช่น โรคแพ้อาหาร (celiac disease) ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนน้อยมาก สามารถนำไปใช้ในอาหารสำหรับทารกโดยใช้เป็นตัวช่วยในเรื่องเนื้อสัมผัสและความหนืด และสามารถนำไปแปรรูปเป็นมอลโตเด็กซ์ตริน ซึ่งช่วยเป็นสารเพิ่มปริมาณ สารให้กลิ่นรส อิมัลซิไฟเออร์ สารลดความหวาน และช่วยปรับปรุงด้านเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์ (Amagliani et al., 2016)

2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช

องค์ประกอบหลักของสตาร์ชเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน ทั้งสองโครงสร้างนี้ทำให้สมบัติและการใช้งานของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยสตาร์ชจากแหล่งต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแตกต่างกัน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 โครงสร้างและสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
โครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรงและกึ่ง
พันธะที่จับ	α -1,4 glycosidic bond	α -1,4 glycosidic bond และ α -1,6 glycosidic bond
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	>1,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อย	ละลายน้ำได้ดี
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีม่วงแดง
การเปลี่ยนแปลงหลังให้ความร้อน	ขาวขุ่น เป็นเจล	ใส และเหนียว
การเปลี่ยนแปลงหลังเย็นตัวลง	จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

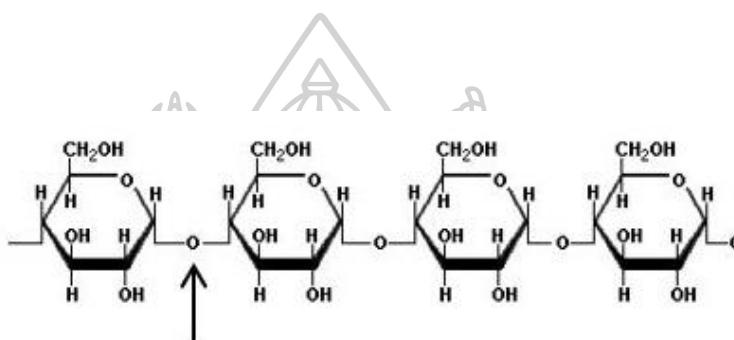
ที่มา: ดัดแปลงจาก กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.2.1 อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยแอลฟา 1,4 glycosidic bond (ภาพที่ 1) อะไมโลสในธรรมชาติจะมีกิ่งก้านอยู่เล็กน้อย ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลส มีผลมาจาก degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสที่ต่างกัน ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของพืชที่นำมาผลิตสตาร์ช ส่วนใหญ่จะกระจายทั่วไปในส่วนของอะไมโลเพกติน โครงสร้างของอะไมโลสมีหลายรูปแบบ เช่น เกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คล้ายตัว (interrupted helix) หรือม้วนแบบไม่เจาะจง (random coil)

(Chang et al., 2014) สตาร์ชที่มีสายอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ลดลง อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนโดยให้สีน้ำเงิน และสามารถรวมกับสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น กรดไขมัน ไฮโดรคาร์บอน บีวทานอล ฯลฯ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545)

นอกจากนี้อะไมโลสยังใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของสตาร์ชได้ โดยแบ่งสตาร์ชตามปริมาณอะไมโลสโดยแบ่งเป็น waxy (0-2%), อะไมโลสต่ำมาก (3-9%), อะไมโลสต่ำ (10-19%), อะไมโลสปานกลาง (20-25%), อะไมโลสสูง (>25%) (Gani et al., 2017)



α -1-4 glycosidic bond

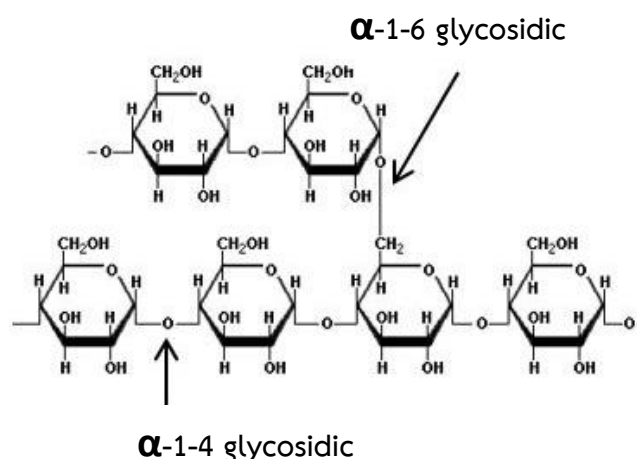
ภาพที่ 1 โครงสร้างอะไมโลส

ที่มา: Chang et al. (2014)

2.2.2 อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคติน เป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ชนิดหนึ่งอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะไมโลสเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) ที่จัดเรียงตัวเป็นสายตรงและสายแขนง ส่วนที่เป็นพันธะสายตรงเป็นพันธะชนิด α -1-4 glycosidic bond เหมือนกับอะไมโลสและส่วนที่เป็นสายแขนงจะเชื่อมต่อด้วยพันธะ α -1-6 glycosidic bond (ภาพที่ 2) ทำให้มีอัตราการคืนตัวต่ำ สายกิ่งอะไมโลเพคตินประกอบไปด้วยสาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ เป็นแกนหลัก ต่อด้วยสาย (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) และสาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ สายโซ่เหล่านี้ที่อยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) ประกอบด้วยโครงสร้างสองส่วนคือ ส่วนผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) คือ

บริเวณกิ่งเชื่อม ประกอบกันเป็นกลุ่ม และเมื่อประกอบสายได้ประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชเป็นเกลียวคู่ (double helix) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งช่วยให้เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์ นอกจากนี้ อะไมโลเพกตินยังมีความสำคัญมากทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549, Chang et al., 2014)

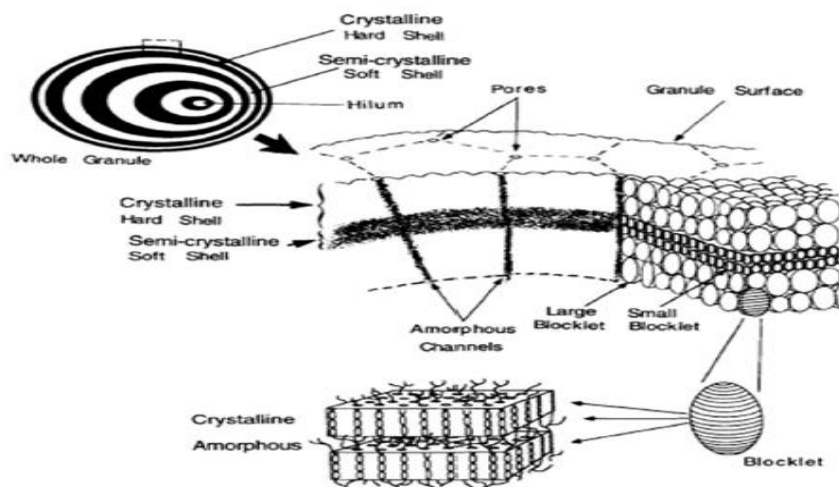


ภาพที่ 2 โครงสร้างอะไมโลเพกติน

ที่มา: Chang et al. (2014)

2.3 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบในรูปเม็ดสตาร์ช (granule) มีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ดังภาพที่ 3 โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน สายโซ่สั้นอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) บางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน โครงสร้างผลึกสตาร์ชจะมี 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดผลึกแบบ A ส่วนมากเป็นสตาร์ชจากธัญพืชต่างๆ ถ้าเรียงตัวหลวมๆจะเป็นผลึกแบบ B ได้จากพืชหัว และผลึกแบบ C ได้จากการเรียงตัวแบบผสมทั้งแบบ A และ B ซึ่งได้จากพืชตระกูลถั่ว (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549)



ภาพที่ 3 โครงสร้างแบบกึ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช (semi-crystalline)

ที่มา: Amagliani et al. (2016)

2.4 คุณสมบัติของสตาร์ช

2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในสตาร์ชและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดซับน้ำจนเกิดสมดุลความชื้น ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อนำเม็ดสตาร์ชมาเติมน้ำและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะพบรูพรุนจำนวนมาก รูพรุนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวคัตขนาดโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกเซลล์ สตาร์ชดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารละลายสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้นกว่าช่วงอุณหภูมิเจลลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น (Amagliani et al., 2016) คุณสมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดแป้งหมดไป (Kerr, 1950)

การพองตัวและการละลายขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของสตาร์ชแต่ละชนิด จะเห็นได้จากงานวิจัยของ Leach (1965) ในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเกิดการเจลลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส สตาร์ชจะมีการพองและการละลาย และอุณหภูมิที่เกิดการพองและการละลายก็แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช สิ่งเจือปนต่างๆ ในเม็ดสตาร์ช คุณสมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพอง เป็นต้น

ตารางที่ 3 กำลังการพองและการละลายของสตาร์ชที่ 95°C

ชนิดของสตาร์ช	การเกิดเจลลิตในเซชันที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส		
	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	การพองตัว*	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	56-66	1,000	82
มันสำปะหลัง	58.5-70	71	48
ข้าวโพด	62-72	24	25
ข้าวฟ่าง	68.5-75	22	22
ข้าวสาลี	52-63	21	41
ข้าวเจ้า	61-77.5	19	18
ข้าวเหนียว	63-72	64	23
ข้าวฟ่างข้าวเหนียว	67.5-74	49	19

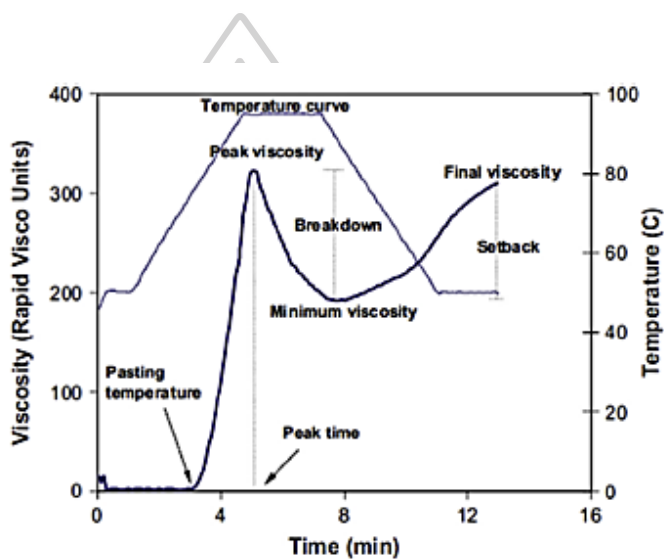
หมายเหตุ * การพองตัว มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวและตกตะกอนต่อกรัมของสตาร์ช

ที่มา: Leach (1965)

2.4.2 ความหนืด

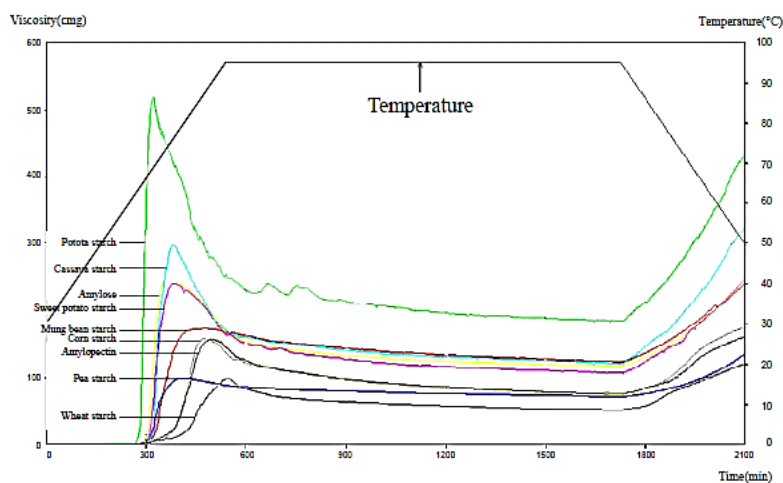
สตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดพฤติกรรมอย่างหนึ่ง เรียกว่า พฤติกรรมความหนืด ซึ่งเกิดจากโมเลกุลสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้ยาก แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชพันธะไฮโดรเจนคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะคูดน้ำแล้วพองตัว น้ำและสตาร์ชจะเกิดการผสมกันจนมีความหนืดและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลือยู่รอบๆเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ซึ่งอุณหภูมิการเกิดความหนืดของสตาร์ชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในของสตาร์ช สอดคล้องกับงานวิจัยของ Niba et al. (2006) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลัง 11 สายพันธุ์ โดยใช้ RVA รายงานว่า ค่าความหนืดและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืดของสตาร์ชมีค่าสูงกว่าในแป้ง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการรบกวนขององค์ประกอบอื่นๆ และกิจกรรมการย่อยของอะไมเลสในสตาร์ช

เมื่อพิจารณากราฟความหนืดโดย Rapis visco analyzer (RVA) อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวได้สูงที่สุด เกิดความหนืดสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ถ้ามีการกวนหรือให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้น เม็ดสตาร์ชจะชนต่อแรงเฉือนและความร้อนน้อยลง เม็ดสตาร์ชบางส่วนจะแตกออกและละลายออกมามากขึ้น ความหนืดจะเริ่มลดลง จนถึงจุดหนึ่งที่ความหนืดไม่ลดลงอีก ในกราฟจะแสดงค่าเป็นความหนืดสุดท้าย (final temperature) ดังภาพที่ 4 (Huang et al., 2017)



ภาพที่ 4 ตัวอย่างกราฟ RVA
ที่มา: Amagliani et al. (2016)

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสตาร์ชแต่ละชนิด ดังเช่นงานวิจัยของ Zhang (2014) ได้ทำการศึกษาสมบัติด้านพฤติกรรมความหนืดของสตาร์ชจากพืชชนิดต่างๆ (ภาพที่ 5) รายงานว่า ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชเดียวกัน สตาร์ชแต่ละชนิดมีพฤติกรรมด้านความหนืดที่แตกต่างกัน โดยที่จุดที่ความหนืดสูงสุดยิ่งสูง แสดงว่าสตาร์ชมีความหนืดสูง ซึ่งพฤติกรรมความหนืดขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดของเม็ดสตาร์ช และองค์ประกอบภายในของพืชนั้นๆ



ภาพที่ 5 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชต่างๆ
ที่มา: Zhang (2014)

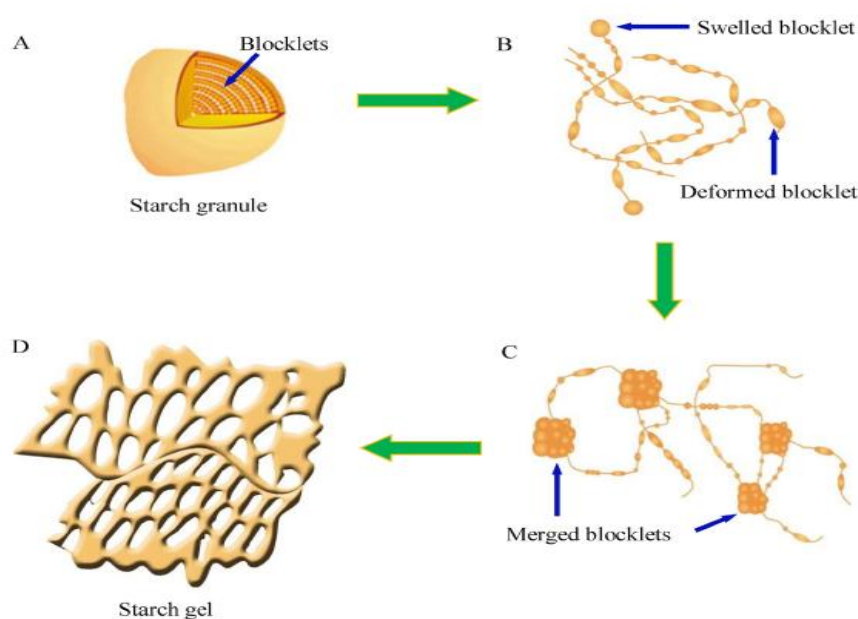
2.4.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

เมื่อให้ความร้อนสตาร์ชจะเริ่มเกิดความหนืดขึ้น ในขณะที่สตาร์ชเกิดความหนืดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของอุณหภูมิและพลังงานที่เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) คือ

1. ระยะที่สตาร์ชเริ่มเกิดความหนืด โดยวัดจากจุดที่เริ่มเกิดความหนืด (onset temperature, T_o) เป็นระยะที่เม็ดเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยืดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัด เม็ดสตาร์ชยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาริซได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดเม็ดสตาร์ช)

2. ระยะที่เม็ดสตาร์ชพองตัวสูงสุด (peak temperature, T_p) เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาริซได้ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สตาร์ชที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

3. ระยะสุดท้าย (conclude temperature, T_c) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น สตาร์ชจะทนต่อแรงเฉือนและความร้อนได้น้อยลง รูปร่างเม็ดสตาร์ชจะเริ่มไม่แน่นอน การละลายของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล (ภาพที่ 6)



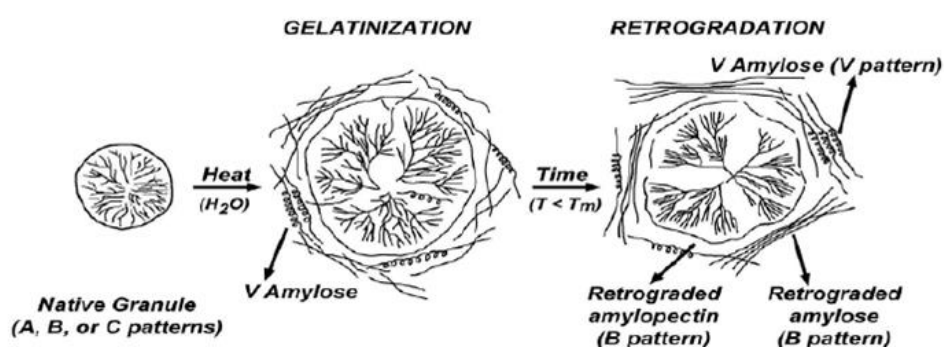
ภาพที่ 6 การเกิดเจลของสตาร์ช
ที่มา: Huang et al. (2017)

ปัจจัยที่ทำให้สมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกันมีหลายอย่าง ดังเช่น งานวิจัยของ You et al. (2015) รายงานคุณสมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าว 3 สายพันธุ์ พบว่า สตาร์ชข้าวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพลังงานสูง เห็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ชัดเจน สตาร์ชข้าวแต่ละสายพันธุ์มีสมบัติเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าสตาร์ชต่างชนิดกันจะมีลักษณะการเกิดเจลลิตีในเซชันแตกต่างกัน สตาร์ชชนิดเดียวกันจะมีลักษณะการเกิดเจลลิตีในเซชันคล้ายกันเป็นผลจากองค์ประกอบภายในเม็ดสตาร์ช เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช ฯลฯ

2.4.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชัน เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกจากเม็ดสตาร์ช ความหนืดจะลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือ

ผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิลงต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะความขรุขระและความหนืดเพิ่มขึ้น ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่า สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงอัตราการคืนตัวจะช้า (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549)



ภาพที่ 7 การเกิดเจลาทีไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเม็ดสตาร์ช

ที่มา: <http://www.authorstream.com/Presentation/Chanasut-1477779-starch-02update-2012/> (เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม 2560)

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆในสตาร์ช

2.4.5 ความใสของสตาร์ชสุก

สตาร์ชในช่วงแรกจะเป็นสารแขวนลอยที่มีลักษณะทึบแสง แต่เมื่อมีการให้ความร้อนและเกิดการเจลาติไนเซชัน สตาร์ชจะละลายและกระจายตัวในน้ำได้ดี กลายเป็นสตาร์ชสุก (paste) จะเกิดความใสจากการส่องผ่านของแสงได้มากขึ้น ความใสของสตาร์ชสุกจะขึ้นกับชนิดของสตาร์ช สตาร์ชในกลุ่มของพืชหัวและสตาร์ชข้าวเหนียว (waxy starch) จะมีความโปร่งใสมากกว่า ส่วนสตาร์ชในกลุ่มธัญพืชจะมีความทึบแสงมากกว่า โดยทั่วไปความใสของสตาร์ชสุกจะเกี่ยวข้องกับลักษณะการกระจายตัวและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ซึ่งถ้าสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันมาก จะส่งผลทำให้การส่องผ่านของแสงลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2549)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขุ่นใสของสตาร์ชสุกในระหว่างการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับความสามารถในการพองของเม็ดสตาร์ช การแพร่ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินออกมาภายนอกของเม็ดสตาร์ช (leaching) ความยาวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพกติน พันธะที่เกิดขึ้นภายในและระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช (Singh et al., 2006) และการมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ในเม็ดสตาร์ช จะส่งผลต่อลักษณะและสมบัติของสตาร์ช โดยจะลดความสามารถของการพองตัว การละลาย การจับตัวกันของสตาร์ชเมื่อเกิดฟิล์มและสตาร์ชสุก นอกจากนี้ไขมันยังรวมตัวกับอะไมโลส เกิดเป็น inert complex ทำให้เกิดลักษณะทึบแสงหรือขุ่น ส่วนการเกิดพันธะเชื่อมข้าม (cross-linking) และการเกิดหมู่แทนที่ (substitution) ในระดับต่ำ จะส่งผลให้สตาร์ชสุกมีความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับน้ำและเกิดการพองตัวได้มากขึ้น โดยยังคงสภาพความเป็นเม็ดสตาร์ชไว้ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร ส่วนการเกิดหมู่แทนที่ที่จะทำให้สตาร์ชสุกมีความใสเพิ่มขึ้น

2.5 โยอาหาร (dietary fiber)

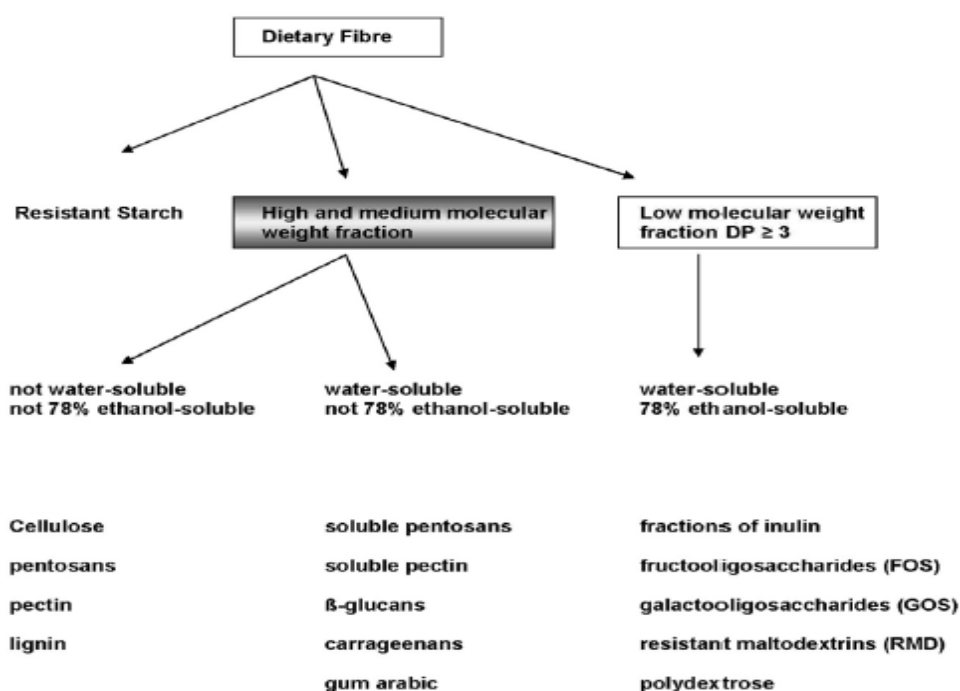
โยอาหาร คือ เส้นใยที่พบในอาหารและไม่สามารถย่อยได้ในร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโยอาหารในพืชผักเกือบทุกชนิดถูกจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch carbohydrates) เอนไซม์ในทางเดินอาหารของมนุษย์ไม่สามารถย่อยโยอาหารได้ (จึงไม่ให้พลังงาน) แต่ก็อาจจะมีแบคทีเรียบางชนิดในทางเดินอาหารส่วนล่างสามารถย่อยโยอาหารได้

2.5.1 ประเภทของใยอาหาร

ใยอาหารแบ่งออกตามสมบัติทางกายภาพเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber)
- ใยอาหารที่ละลายน้ำไม่ได้ (insoluble dietary fiber)

นอกจากนี้ยังแบ่งได้อีกหลายประเภท เช่น แบ่งตามน้ำหนักมวโมเลกุล การละลายในแอลกอฮอล์ และแหล่งกำเนิด เป็นต้น (Chawla and Patil, 2010)



ภาพที่ 8 ประเภทของใยอาหารโดยการแบ่งตามการละลายน้ำและแอลกอฮอล์
ที่มา: Hollmann et al. (2013)

2.5.1.1 ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber)

ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ คือ ใยอาหารชนิดหนึ่งที่ละลายได้ในน้ำแล้วดูดซับน้ำไว้กับตัว ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความสามารถมากน้อยแตกต่างกันในด้านการละลายน้ำ พฤติกรรมความหนืด ความสามารถในการจับน้ำ ความสามารถในการจับแร่ธาตุและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ใยอาหารที่ละลายน้ำได้บางชนิดเมื่อละลายน้ำจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นเจล สามารถจับน้ำตาลและดูดซับน้ำมันได้ ใยอาหารชนิดนี้ร่างกายของเราจะย่อยเองไม่ได้ แต่แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่จะ

สามารถย่อยได้ ช่วยในเรื่องการขับถ่ายได้ดี (Mudgil and Barak, 2013) ได้แก่ กัม ไฮโดรคอลลอยด์ เพคติน อินนูลิน ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ฯลฯ

ประโยชน์ของใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Asp, 1996); (Brownlee, 2011)

1. ช่วยควบคุมระดับน้ำตาล ช่วยลดการดูดซึมของน้ำตาล จึงมีผลดีต่อผู้ที่ เป็นเบาหวาน ผู้ป่วยเบาหวานที่รับประทานใยอาหารประมาณ 8-20 กรัมต่อ 100 กรัมของ คาร์โบไฮเดรต จะสามารถช่วยลดระดับกลูโคสและอินซูลินได้ประมาณ 20-50% และ ช่วยเพิ่ม glucose tolerance ได้
2. ช่วยลดระดับไขมันในเลือด ช่วยจับไขมันในอาหาร ป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ช่วยลดระดับโททอลและแอลดีแอลคอเลสเตอรอล (ไขมันชนิดเลว) ในเลือดได้ และการ รับประทานใยอาหารในข้าวโอ๊ตและเบต้ากลูแคนในปริมาณ 3-15 กรัมต่อวัน จะช่วยลด ระดับคอเลสเตอรอลได้ประมาณ 5-15% (จะเห็นได้ชัดในในผู้ที่มีระดับไขมันในเลือดสูง)
3. ช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกันโรคให้กับร่างกาย
4. ช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจ
5. มีประโยชน์ต่อการทำหน้าที่ของทางเดินอาหารส่วนต้น โดยการทำให้อาหารอยู่ใน กระเพาะนานขึ้น โดยการฟอร์มตัวเป็นเจลเหนียวในกระเพาะ ช่วยลดการดูดซึมของ กลูโคสผ่านเยื่อผนังของลำไส้ ช่วยลดการดูดซึมของไขมัน จึงมีประโยชน์ต่อการควบคุม ระดับไขมันในเลือดและระดับกลูโคส เส้นใยอาหารบางชนิดอาจมีผลต่อการดูดซึม โพรตีน เพคตินและโพลีแซ็กคาไรด์ของถั่วเหลืองจะจับตัวกับ cation (แคทไอออน) ทำ ให้ลดการดูดซึมของแร่ธาตุบางชนิด เช่น แคลเซียม ธาตุเหล็ก แมกนีเซียม ทองแดง และ สังกะสี
6. ผลดีจากกระบวนการหมัก (fermentation) ของใยอาหารต่อระบบของลำไส้ใหญ่ เอนไซม์ในทางเดินอาหารของมนุษย์จะไม่สามารถย่อยใยอาหารได้ แต่แบคทีเรียในลำไส้ ใหญ่และซีแกมจะสามารถทำได้ และยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการหมัก ทำให้ได้กรด ไขมันสายสั้น รวมไปถึงพลังงานและแก๊สต่าง ๆ กรดไขมันสายสั้นจะถูกดูดซึมผ่าน เยื่อผนังของลำไส้ใหญ่ เมื่อเข้าไปอยู่ในเยื่อแล้วมันจะถูกใช้เป็นพลังงาน โดย

ประโยชน์ของกรดไขมันสายสั้น คือ ช่วยลด pH ในลำไส้ ลดปริมาณยูเรียและแอมโมเนีย ช่วยควบคุมการเคลื่อนไหวของกระเพาะและลำไส้ ส่งเสริมการดูดซึมน้ำและโซเดียม ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อผู้ป่วยที่มีอาการท้องเสีย

7. ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของเยื่อบุผิวผนังส่วนไอเลียมและลำไส้ใหญ่ ให้พลังงานแก่ host (จะเป็นผลดีในกรณีที่ host มีภาวะการดูดซึมสารอาหารบกพร่อง) ช่วยทำให้เกิดความสมดุลของแบคทีเรียในลำไส้ ช่วยในขบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ของกลูโคสและไขมัน และกรดไขมันบิวไทเรทจะช่วยป้องกันการเป็นมะเร็งของลำไส้ใหญ่ ช่วยส่งเสริมการทำหน้าที่และการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดดีในลำไส้ใหญ่
8. มีผลต่อเยื่อบุผิวในลำไส้ ทำให้เยื่อบุผิวผนังของลำไส้แข็งแรง จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า โยอาหารสามารถช่วยในการเจริญเติบโตของเยื่อบุผิวในไอเลียมและลำไส้ใหญ่ได้ โดยจะทำให้ลำไส้มีน้ำมากขึ้น ยาวขึ้น และช่วยป้องกันการเหี่ยวของเยื่อบุผิวผนังของลำไส้ได้
9. ช่วยในการขับถ่ายของลำไส้ใหญ่ โดยจะช่วยเพิ่มมวลของอุจจาระได้ เนื่องจากไม่สลายตัวลำไส้ใหญ่และยังสามารถจับกับน้ำได้ด้วย จึงช่วยทำให้อุจจาระอ่อนนุ่ม และถ้าเป็นโยอาหารที่ถูกหมักได้ดีก็จะทำให้ลำไส้ใหญ่มีแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแก๊สในอุจจาระได้มาก จึงอาจเพิ่มปริมาตรและน้ำหนักของอุจจาระได้
10. ช่วยป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ และช่วยป้องกันการดูดซึมของสารก่อมะเร็ง และลดการสัมผัสต่อผนังลำไส้
11. ช่วยในการลดน้ำหนักหรือควบคุมน้ำหนักได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณของอาหารมีมากขึ้น มีการดูดน้ำเข้ามาในทางเดินอาหาร ทำให้รู้สึกอิ่มเร็ว การบริโภคอาหารก็ลดน้อยลงตามไปด้วย ความสำคัญของโยอาหารในทารกและเด็กนั้นวันยิ่งมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เพราะในน้ำนมแม่จะมีโยอาหารที่ละลายน้ำมากกว่า 150 ชนิด จึงได้มีการเติมโยอาหารบางชนิดลงในนมผงดัดแปลงสำหรับทารกเพื่อให้คล้ายนมแม่มากขึ้น

2.5.1.2 โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber)

โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจะไม่มี ความหนืด และจะไม่ถูกหมักโดยจุลินทรีย์หรือถูกหมักโดยจุลินทรีย์ได้น้อยมากในลำไส้ใหญ่ ส่วนใหญ่เป็นโยอาหารที่ได้จากพืชที่มีผนังเซลล์ เช่น ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส หรือจากการตัดแปรสตาร์ช เช่น รีซิสแทนด์สตาร์ช (Dai and Chau, 2017)

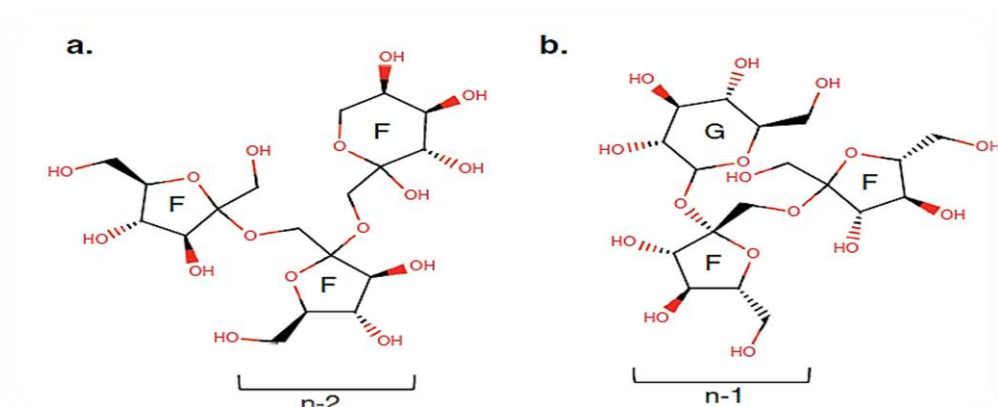
ประโยชน์ของโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Dai and Chau, 2017)

1. โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำบางชนิดมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) โดยการใช้ในกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ และนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกาย
2. ช่วยเพิ่มเนื้อของอุจจาระเนื่องจากไม่สลายตัวในลำไส้ใหญ่และยังสามารถจับกับน้ำได้ด้วย จึงทำให้อุจจาระอ่อนนุ่ม โยอาหารบางชนิดจะหยาบจะทำให้เกิดเนื้ออุจจาระมาก เช่น Wheat bran, oat bran และเซลลูโลส

2.6 อินนูลิน (inulin, IN)

IN เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในกลุ่มฟรุคแตน (fructan) มีฟรุคโตสเป็นพื้นฐาน โดยมีกลูโคสที่ปลายสายหนึ่งหน่วย มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับฟรุคโตส และกลูแคน เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีความยาวสาย (degree of polymerization, DP) ต่อกัน 10-20 หน่วย พบได้ตามธรรมชาติ เช่น กระเทียม อาติไซค์ และหัวหอม (Zhu et al., 2016)

โครงสร้างของ IN มี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ประกอบไปด้วย fructose units เชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงสร้าง 2-1- β -D-fructosyl fructose structure (a.) แบบที่ 2 ประกอบไปด้วย fructose units เชื่อมต่อกัน และมี glucose unit หนึ่งตัวมาต่อที่ปลายสายด้วยพันธะ α -D-glucopyranosyl bond กลายเป็นโครงสร้าง fructan structure (b.)



ภาพที่ 9 โครงสร้างอินนูลิน

ที่มา: Zhu et al. (2016)

IN ไม่มีรสหวาน และละลายน้ำได้น้อย การรับประทาน IN ก็มีข้อกำหนดในแต่ละประเทศแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่ประชากรอเมริกาเหนือประมาณการบริโภคเฉลี่ยอยู่ที่ 1-4 g/day ยุโรปประมาณการบริโภคอยู่ที่ 3-11 g/day (Kelly, 2009) แต่ไม่ควรบริโภคเกิน 40 g/day เพราะอาจจะเกิดอาการท้องเสียได้ (de Almeida Gualtieri et al., 2011)

งานวิจัยของ Shoab et al. (2016) แสดงศักยภาพของ IN ว่าเป็นสารธรรมชาติที่มีประโยชน์ทางโภชนาการและสุขภาพ โดยกล่าวว่า IN เป็นใยอาหารซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงสุขภาพมนุษย์ และมีในการเติมลงในอาหารเนื่องจากสนับสนุนให้เกิดประโยชน์ทางสุขภาพ โดยพื้นฐานของใยอาหาร คือไม่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารและไม่สามารถดูดซึมในลำไส้เล็ก เนื่องจากเอนไซม์ที่ใช้อย่างน้อยของมนุษย์ตั้งแต่ปากจนถึงลำไส้เล็กมีความจำเพาะต่อการย่อยของน้ำตาลที่เชื่อมกันด้วย α -glucosidic bond เท่านั้น แต่ IN เชื่อมต่อกันด้วย β (2-1) IN จึงไม่ให้พลังงานแก่ร่างกายมนุษย์ แต่จะให้ประโยชน์แก่ร่างกายมนุษย์ โดยร้อยละ 90 ของอินนูลินจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหมัก (fermentation) ของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่

นอกจากนี้ยังพบว่า IN ที่ได้จากกระบวนการหมักจะเกิดเป็นกรดแลคติกและกรดไขมันสายสั้น ช่วยให้แร่ธาตุเพิ่มการละลาย และดูดซึมแร่ธาตุโดยเฉพาะแคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก และช่วยทำให้จุลินทรีย์โพรไบโอติก (probiotic) เจริญได้ดีขึ้น ในขณะที่จุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) ไม่สามารถทนในสถานะเช่นนี้ได้ จึงช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคลงได้ และยังกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันให้ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gibson et al. (2005) ซึ่งทำการศึกษาชนิดของโพรไบโอติกต่อการติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร พบว่า IN ชนิดฟรุคแทน มีการกระตุ้นการทำงานของ

ของ bifidobacteria ให้แสดงกลไกการป้องกันโรคต่างๆ ช่วยเสริมความแข็งแรงและปรับปรุงระบบทางเดินอาหารได้ และสามารถช่วยลดภาวะท้องผูกและเพิ่มความถี่ในการอุจจาระได้ ซึ่งงานวิจัยของ Anderson et al. (2009) พบว่า IN และ FOS มีผลในการเพิ่มมวลให้แก่อุจจาระได้เช่นเดียวกับใยอาหารที่ละลายน้ำได้ เช่น เพคติน และกัวกัม โดยการเพิ่มอุจจาระเปียกได้ถึง 1.5-2 กรัม ต่อการบริโภคอินนูลิน 1 กรัม และช่วยลดปริมาณแคลอรีที่ควรได้รับในร่างกาย เนื่องจากอินนูลินมีแคลอรีต่ำประมาณ 1.5 kcal/g หรือ 6.3 kJ/g

IN ยังสามารถลดความเสี่ยงของการเพิ่มความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) งานวิจัยหลายๆ งานค้นพบว่า ประสิทธิภาพของ IN และการลดไขมันในอาหารส่งผลเชิงบวกต่อไขมันในเลือดของมนุษย์ โดยสามารถลดการสร้างไขมันในเลือดและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดได้ ดังนั้นจึงช่วยลดความเสี่ยงของภาวะการแข็งตัวของหลอดเลือด (Mudgil and Barak, 2013)

2.7 ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharide, FOS)

ปัจจุบันคาร์โบไฮเดรตประเภทโอลิโกแซคคาไรด์ เช่น lactulose, fructo-oligosaccharide, transgalacto-oligosaccharides ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้พบว่ามีประสิทธิภาพในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของ bifidobacteria และ lactobacilli ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ โอลิโกแซคคาไรด์สามารถสกัดได้จากพืชหรือการสังเคราะห์โดยเอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร มีการนำโอลิโกแซคคาไรด์ไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นสาร bifidogenic substances และใช้ในอาหารทารกเพื่อช่วยเพิ่มประโยชน์ทางสุขภาพ (Patel and Goyal, 2011)

ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharide) หรือ โอลิโกฟรุคโตส (oligofructose) เป็นสารประกอบโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง โครงสร้างโมเลกุลของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เหมือนกับอินนูลิน แต่ IN เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาวมากกว่า FOS มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ามาก ประกอบไปด้วยน้ำตาลฟรุคโตสเชื่อมต่อกันเป็นสายสั้นๆ มีจำนวนความยาวสาย (degree of polymerization, DP) ต่อกัน 2-10 หน่วย (Chawla and Patil, 2010) ได้แก่ 1-kestose (1-kestotriose; GF2), nystose (1,1-kestotetraose; GF3) และ 1F- β -fructofuranosylnystose (1,1,1-kestopentaose; GF4) โดย G คือ น้ำตาลกลูโคส และ F คือ น้ำตาลฟรุคโตส มีสมบัติเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber) และมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกเช่นเดียวกับ IN นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในทางสุขภาพอื่นๆ อีก

งานวิจัยของ Chuemongkon (2013) กล่าวว่า FOS มีสมบัติเช่นเดียวกับอินนูลิน คือ เป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ซึ่งร่างกายย่อยไม่ได้แต่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้ใหญ่โดยกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งผลผลิตสุดท้ายที่ได้คือกรดไขมันสายสั้นที่เรียกว่า short chain fatty acid (SCFA) กรดแลคติก แก๊สหลายชนิด และพลังงาน ซึ่งจะมีการดึงไปใช้ในแต่ละส่วนของร่างกาย ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากการเกิดกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้กระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในลำไส้ที่มีประโยชน์ เช่น bifidobacteria และ lactobacilli ทำให้เกิดกรดแลคติก ทำให้ลำไส้ใหญ่มีความเป็นกรดมากขึ้น จึงมีผลยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรค ได้แก่ Clostridium (เช่น *C. perfringens*, *C. difficile*), Bacteroides, Coliforms (เช่น *E. coli*) ทำให้ลำไส้ทำงานได้ดี ช่วยให้ระบบขับถ่ายเป็นปกติ สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ เกิดแก๊สในอุจจาระจากการย่อยได้มาก จึงอาจจะเพิ่มน้ำหนักและปริมาณอุจจาระได้ โดยการการศึกษา พบว่า FOS สามารถเพิ่มปริมาณมวลอุจจาระได้ 1.5-2 กรัม ต่อการบริโภค FOS 1 กรัม เช่นเดียวกับอินนูลิน และยังพบว่า FOS ยังช่วยป้องกันภาวะท้องเสียได้เนื่องจากเกิด bifidogenic effect และ SCFA ที่ได้จากการย่อยยังช่วยในการดูดซึมเกลือแร่และโซเดียมในเยื่อลำไส้กลับเข้าสู่ร่างกาย จึงช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของเยื่อลำไส้ได้

นอกจากนี้การที่ FOS มีคุณสมบัติเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ และมีความหวาน 30% ของน้ำตาลกลูโคส แต่ให้พลังงานต่ำ และไม่มีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือด ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดไม่สูงมาก จึงช่วยชะลอการดูดซึมกลูโคสเข้าสู่กระแสเลือด และมีผลต่อการทำงานของฮอร์โมนหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมกลูโคสและการหลั่งของอินซูลิน รวมทั้งมีบทบาทในการช่วยลดระดับของ LDL-cholesterol ในเลือดได้โดย propionate จาก SCFA ที่ได้จากกระบวนการย่อยของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่จะดูดซึมและนำไปใช้ในการยับยั้งการสร้าง cholesterol (Mudgil and Barak, 2013)

2.8 รีซิสแทนต์สตาร์ช (resistant starch, RS)

ปัจจุบันมีการนำสตาร์ชไปผ่านการแปรรูปเพื่อให้มีสมบัติบางประการดีขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตอาหารโดยเฉพาะ ซึ่งอาจจะทำให้สตาร์ชทนต่อสภาวะต่างๆ ที่ต้องการได้ดีขึ้น โดยใช้วิธีการทางชีวภาพ เคมี และกายภาพแตกต่างกันไป เช่น การทำให้เป็น RS หรือรีซิสแทนต์สตาร์ช หรือ สตาร์ชที่ทนการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งตามคำนิยามของ European FLAIR-concerted Action on Resistant Starch หมายถึง สตาร์ชและผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ แต่จะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ จัดเป็นอาหารเพื่อ

สุขภาพ (functional food) อย่างหนึ่ง เนื่องจากสามารถทำให้ระบบร่างกายทำงานได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มการทำงานของกลไกของระบบต่างๆในร่างกาย และช่วยป้องกันโรคได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) RS สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด (Fässler et al. (2006); Fuentes-Zaragoza et al. (2010)) ได้แก่

1. สตาร์ชทนการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่ 1 (RS1) คือ สตาร์ชที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (physically inaccessible) ทนต่อความร้อนและใช้ในส่วนผสมของอาหาร เช่น กล้วยไฟช เมล็ด ราก

2. สตาร์ชทนการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่ 2 (RS2) คือ เม็ดสตาร์ชดิบที่ทนต่อการทำงานของเอนไซม์ (raw or ungelatinized starch) พบในสตาร์ชดิบและสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง กล้วย ข้าวโพด

3. สตาร์ชทนการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่ 3 (RS3) คือ สตาร์ชคืนตัว (retrograded starch) พบในสตาร์ชที่เย็นตัวลงหลังเกิดเจลาตีไนเซชันและการคืนตัวของสตาร์ชอะไมโลสสูง สตาร์ชกลุ่มนี้มีสมบัติที่สามารถละลายได้ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) และ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide)

4. สตาร์ชทนการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่ 4 (RS4) คือสตาร์ชที่ถูกดัดแปรโดยใช้สารเคมีในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้สตาร์ชเกิดพันธะแบบใหม่ เช่น ไดสตาร์ชฟอสเฟตเอสเทอร์ (di-starch phosphate ester) เป็นต้น

RS ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้วิธีการทางเคมีและกายภาพร่วมกัน เพื่อให้สตาร์ชทนต่อการย่อยของเอนไซม์ในร่างกายมนุษย์มากขึ้น ทำให้ระบบการย่อยในร่างกายเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้ร่างกายได้รับพลังงานในระดับที่ต่ำกว่าปกติ และไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็ก จากนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าไปในลำไส้ใหญ่และกลายเป็นอาหารให้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายใช้ในการหมัก ได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันสายสั้นและก๊าซ ช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของลำไส้ใหญ่และลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในลำไส้ สามารถเทียบได้กับใยอาหารที่ละลายน้ำได้และเป็นพรีไบโอติกชนิดหนึ่ง ซึ่งหากบริโภคเป็นประจำจะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน หรือโรคเกี่ยวกับน้ำหนัก จากสมบัติข้างต้นทำให้ RS มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่พิเศษกว่าสตาร์ชปกติ มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่หลากหลายที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบ เช่น อาหารเข้าซีเรียล ขนมขบเคี้ยว เส้นก๋วยเตี๋ยว คูกี้ เค้ก เป็นต้น (Fuentes-Zaragoza et al., 2010)

RS ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งประโยชน์ทางด้านสุขภาพและองค์ประกอบของ RS ที่เป็นหนึ่งในใยอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ โดยอาจจะมีผลสำคัญเท่ากับ พอลิแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชในการส่งเสริมสุขภาพของลำไส้ใหญ่และป้องกันโรคลำไส้อักเสบและ มะเร็งลำไส้ แต่มีผลกระทบต่อการเผาผลาญไขมันและน้ำตาล งานวิจัยของ Fuentes-Zaragoza et al. (2010) กล่าวถึง RS ว่ามีสมบัติที่ดีหลายประการ โดยเฉพาะการมีสมบัติเป็นพรีไบโอติก เนื่องจาก RS ที่ถูกหมักในลำไส้ใหญ่จะสร้างกรดบิวไทริก (butyric acid) สูง ซึ่งกรดบิวไทริกเป็นหนึ่งในสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการสร้างพลังงาน และการเจริญเติบโตของเยื่อบุผิวของลำไส้ใหญ่ และยับยั้งการเปลี่ยนแปลงเซลล์ของเนื้อเยื่อที่ไม่ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wandee et al. (2015) ที่ได้เปรียบเทียบการเติมสตาร์ชตัดแปรจากพุทธรักษา 2 ประเภท คือ สตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้าม (cross-linked) และสตาร์ชที่ผ่านการตัดสายกิ่งและเกิดรีโทรเกรดชัน (retrograded debranched) ลงในเส้นก๋วยเตี๋ยวจากข้าวแล้วตรวจสอบคุณภาพ พบว่า สตาร์ชจากการเชื่อมข้ามของพุทธรักษา สามารถเพิ่ม tensile strength และ elongation ของเส้นก๋วยเตี๋ยวจากข้าวได้ ในขณะที่สตาร์ชตัดแปรแบบ ตัดสายกิ่งและเกิดรีโทรเกรดชันสามารถเพิ่มปริมาณใยอาหารทั้งหมด (total dietary fibers) ของเส้นก๋วยเตี๋ยวจากข้าวและช่วยเพิ่มประโยชน์ทางโภชนาการโดยการเพิ่มการผลิต กรดบิวไทริกที่ใช้ในกระบวนการหมักในลำไส้ใหญ่ แสดงถึงอัตราการย่อยของระบบร่างกายที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีหลักฐานว่า butyrate อาจจะช่วยลดความเสี่ยงของการเปลี่ยนแปลงเซลล์ที่ไม่ดีในการศึกษาประชากรของหนูจำนวนหนึ่ง ผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณอุจจาระ และ pH ของอุจจาระลดลง ขณะที่ SCFA ทำงานได้ดีขึ้น มีส่วนเกี่ยวข้องกับมะเร็งลำไส้ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ ใยอาหารที่ละลายน้ำได้

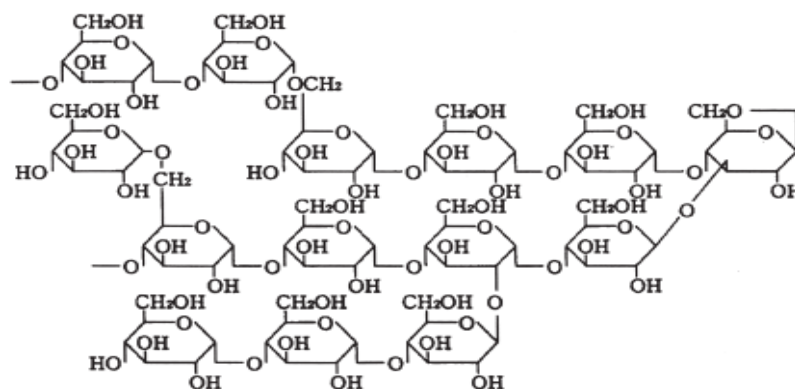
นอกจากนี้ RS ยังสามารถช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดและยับยั้งการสะสมของไขมัน งานวิจัยหลายงาน พบว่า RS สามารถปรับปรุงออกซิเดชันของไขมันได้ (Higgins et al., 2004) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ RS ของอาหารและออกซิเดชันของไขมันหลังทานอาหาร พบว่า การแทนที่ด้วย RS 5.4% มีออกซิเดชันของไขมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอาจจะลดการ สะสมของไขมันได้ในระยะยาว RS ช่วยลดการเกิดนิ่วในถุงน้ำดี และช่วยเพิ่มการดูดซึมเกลือแร่

งานวิจัยของ Srikaeo et al. (2011) ได้ศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของ RS และอัตราการย่อยโดยเอนไซม์ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวจากกล้วยห่าม พุทธรักษา เผือก และข้าว พบว่า พุทธรักษา มีปริมาณ RS 18% ซึ่งมากกว่ากล้วยห่าม และเผือกที่มีปริมาณ RS เพียง 12% และ สตาร์ชตัดแปรจากพืชทั้งสามชนิดมีศักยภาพทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวมีการลดลงของค่า glycemic index

(GI; เป็นดัชนีที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตหลังกระบวนการดูดซึมของร่างกายภายหลังการบริโภคอาหารนั้น 2 ถึง 3 ชั่วโมง ในการเพิ่มหรือลดระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดได้มากหรือน้อย โดยมีค่า GI ตั้งแต่ 0 ถึง 100 ขึ้นกับชนิดของอาหาร เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส หรือขนมปังขาวซึ่งมีค่า GI เท่ากับ 100 ซึ่งมีประโยชน์ทางโภชนาการและด้านสุขภาพ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srikaeo and Sangkhiew (2014) ในการศึกษาผลของปริมาณอะไมโลสและ RS ต่อค่า GI ในกล้วยเดี่ยว พบว่าการเติมสตาร์ชตัดแปรลงในผลิตภัณฑ์กล้วยเดี่ยวส่งผลให้มีปริมาณอะไมโลสในเส้นกล้วยเดี่ยวสูงขึ้น และยังส่งผลให้ค่า GI ในเส้นกล้วยเดี่ยวต่ำลง ทำให้มีอัตราการย่อยสตาร์ชดีขึ้น

2.9 รีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ตริน (resistant maltodextrin, RM)

มอลโตเด็กซ์ตริน (maltodextrin) คือ คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภท polysaccharide ที่ได้จากการย่อยโมเลกุลของสตาร์ช (starch hydrolysis) บางส่วนให้เป็นสายสั้นๆ ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) มีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ดสีขาวไม่มีรส หรือมีรสหวานเล็กน้อยสามารถละลายในน้ำได้ดี ส่วนรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ตรินหรือ RM ประกอบไปด้วยโครงสร้าง $\alpha(1-4)$, $\alpha(1-6)$ glucosidic bond และยังมีโครงสร้าง $\alpha(1-2)$ และ $\alpha(1-3)$ linkages และ levoglucosan (Ohkuma and Wakabayashi, 2008) ได้จากการย่อยมอลโตเด็กซ์ตรินผ่านกระบวนการ pyrolysis และย่อยสลายด้วยเอนไซม์ แล้วนำมาอบแห้งให้เป็นผง ละลายน้ำได้ดี ทนต่อแรงกวนและทนความร้อนสูง ไม่มีความหนืด จัดเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้



ภาพที่ 10 โครงสร้างของรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ตริน (Fibersol-2)

ที่มา: Ohkuma and Wakabayashi (2008)

ตารางที่ 4 ข้อมูลจำเพาะของรีชีสแทนต์มอลโตเด็กซ์ตริน (Fibersol-2)

Property	Specification	Test method
Appearance	White, free-flowing powder	Sensory test
Taste/odour	Slightly sweet/odourless	Sensory test
Solution	Clear	Sensory test
Moisture	5% maximum	JAS method
Total dietary fibre	85% minimum	Enzyme-HPLC method
Dextrose equivalent	8.0–12.0	WS method
pH	4–6 in 10% solution	pH meter
Ash	0.2% maximum	Japanese Standards for Food Additives
Arsenic	1 p.p.m. maximum	
Heavy metals	5 p.p.m. maximum	
<i>Microbiological</i>		
Standard plate count	300/gram, maximum	Japanese Food Sanitation Law
Yeast and mould	100/gram, maximum	
<i>Salmonella</i>	Negative/25 g	
Coliforms	Negative/g	

ที่มา: Ohkuma and Wakabayashi (2008)

RM มีคุณสมบัติเด่นมากในเรื่องการรักษาสมดุลของระบบขับถ่าย โดยเพิ่มความถี่ในการขับถ่ายเพิ่มมวลของอุจจาระ และช่วยให้อุจจาระนิ่ม จึงง่ายต่อการขับถ่าย RM ยังเป็นอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ เช่น bifidobacterium เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barczynska et al. (2010) พบว่า RM สนับสนุนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งที่มีประโยชน์และไม่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่บางชนิด จึงกล่าวได้ว่า RM มีคุณสมบัติด้านการเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) นอกจากนี้ RM ยังช่วยลดปริมาณ LDL-cholesterol โดยอ้อม เนื่องจากกรดไขมันสายสั้นซึ่งสร้างโดยจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ เช่น acetate, propionate ช่วยลด LDL-cholesterol ได้และยังช่วยรักษาระดับน้ำตาลในเลือดไว้ได้นานขึ้น จึงลดความเสี่ยงของการเกิดโรคเบาหวาน Type II หรือเบาหวานชนิดไม่พึ่งอินซูลิน ซึ่งมักเกิดในคนที่มีรูปร่างอ้วน นอกจากนี้ยังพบว่าการบริโภครม อย่างต่อเนื่องสามารถลดปริมาณไขมันที่สะสมในร่างกายได้ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้ RM เป็นสารอาหารควบคุมน้ำหนักได้อีกด้วย

ในปัจจุบัน RM มีการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้น ส่วนใหญ่ใช้ในเครื่องดื่มเกือบทุกประเภท ขนมหวาน ขนมอบกรอบ ผลิตภัณฑ์จากนม ฯลฯ

งานวิจัยของ Barczynska et al. (2017) ได้ศึกษาผลของ RM จากมันฝรั่งต่อการทำงานของลำไส้ โดยทดลองกับหนูที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันโดยการให้อาหารที่มีส่วนผสมของ RM 5%

เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐานที่เติมเซลลูโลส 5% จากการทดลองพบว่า กลุ่มที่เติม RM สามารถกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์จำพวก Bacteroidetes และ Actinobacteria และยังทำให้หนูในกลุ่มนี้มีการผลิตกรดไขมันสายสั้นในลำไส้เล็กได้มากขึ้น ทำให้ร่างกายสมดุลและนำไปใช้ในกระบวนการหมักได้มากขึ้น ซึ่งมีผลในการป้องกันน้ำหนักเกินมาตรฐานและโรคเบาหวานได้

2.10 โยอาหารอื่นๆ

โยอาหารที่มีประโยชน์ในเชิงสุขภาพยังมีอีกหลายชนิด ตัวอย่างดังตารางที่ 4 บางชนิดดูดซับน้ำไว้กับตัว ทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ได้แก่ gum เช่น guar gum, xanthan gum, gum arabic และ heteropolysaccharide เช่น pectin, glucomannan ซึ่งโยอาหารเหล่านี้จะมีโครงสร้างแหล่งกำเนิด และลักษณะพิเศษเฉพาะตัวแตกต่างกันไป จึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลากหลาย (Mudgil and Barak, 2013)



ตารางที่ 5 โยอาหารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นๆ

Name	Composition	Occurrence and production	Human physiological effects
Xanthan gum	β -1,4-D-glucose backbone, β -D-glucuronic acid, β -D mannose	Produced by fermentation using <i>Xanthomonas campestris</i>	Adds viscosity, fermented to short-chain fatty acids in human gut.
Carrageenan	Mixture of sulfated polysaccharides made up of α -D-galactose and 3,6-anhydro-D-galactose	Extracted from red algae (Rhodophyceae)	Adds viscosity, decrease gastric emptying and small intestine transit time. Fermented in large intestine to short-chain fatty acids.
Agar	β -1,3-D-galactose and 3,6-anhydro- β -L-galactose	Extracted from red algae (Rhodophyceae; <i>Celidium</i> spp. and <i>Gracilaria</i> spp.)	Adds viscosity, fermented to short-chain fatty acids in human gut.
Cellan gum	β -1,4-D-mannose backbone, β -D glucuronic acid, D-rhamnose	Produced by fermentation using <i>Pseudomonas elodea</i>	Adds viscosity, fermented to short-chain fatty acids in human gut.
Guar gum	Galactomannan residue	Produced by partial hydrolysis of guar gum	Fermented by colon microbiota, lipid lowering, lowering of plasma glucose.
Gum karaya	Acetylated galacturonic acid+ rhamnose+galactose	Dried exudates of the Indian tree <i>Sterculia urens</i>	Adds viscosity, fermented in human gut.
Gum tragacanth	Complex mixture of polymers of D-galacturonic acid, galactose, arabinose, xylose and cellulose	Dried exudates of Asiatic sp. of <i>Astragalus gummifer</i>	Adds viscosity, fermented in human gut.
Gum arabic	β -D-galactose backbone, L-arabinose, L-rhamnose, D-glucuronic acid	Dried exudates from stems and branches of African bush <i>Acacia senegal</i>	Fermented in human gut, prebiotic.
Alginate	β -1,4-D-mannuronic acid and α -1,4-L-guluronic acid	Extracted from brown algae (Phaeophyceae)	Adds viscosity, fermented in human gut.
Curdian	β -1,3-D-glucose	Produced by fermentation using <i>Alcaligenes faecalis</i> var. <i>myxogenes</i>	Increased water-holding capacity.
Pectin	α -1,4-L-galacturonic acid backbone/ neutral sugar side chains, some ester groups	Fruits and vegetables (apple, citrus, sugar beet)	Decreases gastric emptying and small intestine transit time. Fermented in large intestine. No effects on stool weight, decrease in serum cholesterol.
Chitosan	2-amino-2-deoxy- β -D-glucose	By alkaline deacetylation of crustacean chitins	Increases fecal excretion of neutral steroids, intestinal absorption of cholesterol.
β -Glucan	β -1,4 D-glucose and β -1,3 D-glucose	Cereals (barley, oats)	Fermented in large intestine, strong butyrate production, lowers blood lipid.
Polydextrose	Mixed and random glycosidic linkages (1,6-bonds)-D-glucose	By vacuum thermal polymerization of glucose, sorbitol, and citric acid	Fermented to produce microbiota, short-chain fatty acid. Stool bulking and stool softening in intestine.
Xyloglucan	β -(1,4) linked D-glucose, partially substitutes with α -D-xylopyranose.	Extracted from seeds of <i>Tamarindus indica</i>	Fermented in the human colon. Adds viscosity in the small intestine.
Psyllium seed husk	Polymer of arabinoxylans with 1,4 and 1,3 linkages	Naturally occurring as husk of the psyllium seed	Reduced risk of coronary heart disease, reduced cholesterol.

ที่มา: Chawla and Patil (2010)

2.11 ผลของโยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช

2.11.1 ผลของอินนูลิน (IN) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช

ในปัจจุบันอินนูลินถูกใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย เนื่องจากอินนูลินมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการโดยเฉพาะในแง่ของการเพิ่มไฟเบอร์และความเป็นพรีไบโอติก งานวิจัยหลายๆพบว่า มีการนำ IN และโอลิโกฟรุคโตส ซึ่งเป็นสารเสริมในอาหารและมีคุณสมบัติเป็นสารพรีไบโอติกมาเติมในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมสารเสริมอาหารเพื่อช่วยในเรื่องระบบการย่อยในลำไส้ใหญ่ให้ดีขึ้น (Shoib et al. (2016); สุพล ชัยสถาพร (2554)) นอกจากนี้ IN ยังมีคุณสมบัติในการแทนที่ไขมันและน้ำตาล โดยนิยมนำไปเติมในผลิตภัณฑ์ไขมันต่ำ และน้ำตาลน้อย ดังนั้นจึงต้องมี

การศึกษาสมบัติของ IN ทั้งทางเคมีกายภาพ และทางประสาทสัมผัสต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่นงานวิจัยของ Brennan et al. (2004) ที่ได้ศึกษาผลของลักษณะเนื้อสัมผัสและการย่อยสลายเมื่อเติม IN ลงในพาสต้าที่ระดับปริมาณ 2.5, 5.0, 7.5 และ 10 พบว่าเมื่อเติม IN ลงในพาสต้ามากขึ้น การพองตัวและการดูดซับน้ำของเส้นพาสต้าจะลดลง เนื่องจาก IN มีสมบัติชอบน้ำจึงแข่งขันกับสตาร์ชจับน้ำไว้ ในด้านเนื้อสัมผัสพาสต้าที่เติม IN เพิ่มขึ้นแสดงค่า firmness ต่ำลง เนื่องจากอินนูลินแย่งจับน้ำไว้สตาร์ชจึงพองตัวน้อยลง

งานวิจัยของ Witzak et al. (2014) ได้ศึกษาผลของ IN และเพกตินต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี และอุณหภูมิสุดท้ายในการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสตาร์ชมันฝรั่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเพกติน แต่ไม่ส่งผลต่อสตาร์ชมันฝรั่งที่เติม IN ในขณะที่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเพกตินและชนิดของ IN ที่เพิ่มขึ้น พฤติกรรมความหนืดและคาร์โบไฮเดรตลดลงเมื่อเติมเพกตินและ IN สรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ในระบบเจลลาติโนเซชันขึ้นอยู่กับชนิดและระดับของเพกตินและ IN

งานวิจัยของ Rubel et al. (2015) ได้ศึกษาผลของโดและคุณภาพของขนมปังเมื่อเติม IN พบว่าการเติม IN ลงในขนมปังส่งผลให้ความชื้น และปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลง โดยทำให้รูพรุนมีความละเอียดมากขึ้น จึงทำให้ขนมปังมีค่า hardness, springiness และ chewiness เพิ่มขึ้น

2.11.2 ผลของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (FOS) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช

Nobre et al. (2015) ได้ศึกษาเทคโนโลยีใหม่ที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม พบว่า FOS เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีการศึกษามากที่สุดและดีที่สุด มีการนำมาใช้ในตลาดยุโรปอย่างกว้างขวาง FOS ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมอาหาร ไม่เพียงแต่สำหรับเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการแต่ยังใช้ในการปรับปรุงสมบัติ เช่น สมบัติทางเคมีกายภาพ ดังงานวิจัยของ Zeng et al. (2015) ที่ได้ศึกษาผลของโอลิโกแซคคาไรด์ 5 ชนิด คือ ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (FOS) ไฮโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) ซูโครส มอลโตส และแลคโตส ต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวสาลี พบว่า โอลิโกแซคคาไรด์ทุกชนิดส่งผลให้ค่า peak viscosity และ pasting temperature เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่า setback และ breakdown ลดลง ซึ่ง FOS แสดงค่าต่ำสุด และยังพบว่า XOS และ FOS มีผลยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี นอกจากนี้ยังมีผลในการปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Volpini-Rapina et al. (2012) ที่ได้ศึกษาผลของการเติม IN และ FOS ลงในเค้กส้ม พบว่า การเติม IN และ FOS ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสในด้าน crust brownness, dough

beigeness, stickness, hardness และ crumbliness เพิ่มขึ้นจากเค้กสูตรพื้นฐาน โดยผลการยอมรับผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐาน จึงส่งผลดีในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการพัฒนาจุลินทรีย์และการเพิ่มอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ช่วยให้เส้นใยการรวมตัวกันอยู่ภายในอาหารเหลว และการควบคุมปริมาณของการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction)

FOS ยังได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น บิสกิต ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เครื่องดื่ม โยเกิร์ต ผลิตภัณฑ์นม อาหารเข้าซีเรียล อาหารสำหรับทารกและสำหรับผู้ป่วยที่มีภาวะภูมิคุ้มกันบกพร่อง (ลอร่า เอ็ม ราเบ็ท, 2553) ขนม หวานแฉ่แข็ง ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม สารทดแทนอาหาร และสารให้ความหวาน โดยทั่วไป FOS มีการเติมในอาหารที่ปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 2 – 50 การรับประทาน FOS ก็มีข้อกำหนดในแต่ละประเทศแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่ประชากรอเมริกาเหนือประมาณการบริโภคเฉลี่ยอยู่ที่ 1-4 g/day ยุโรปประมาณการบริโภคอยู่ที่ 3-11 g/day (Kelly, 2009) แต่ไม่ควรบริโภคเกิน 40 g/day เพราะอาจเกิดอาการท้องเสียได้ (de Almeida Gualtieri et al., 2011)

นอกจากนี้ FOS ยังถูกใช้เป็นสารทดแทนน้ำตาล (sugar replacer) เนื่องจากจากให้รสชาติหวานคล้ายน้ำตาลซูโครส (มีความหวานร้อยละ 30 ของน้ำตาลซูโครส) โดย FOS จะไม่ทำให้น้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่ใช้ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตและลูกกวาด หรือใช้เป็นสารทดแทนไขมัน (fat replacer) โดยไม่ทำให้เนื้อสัมผัสอาหารเปลี่ยนแปลง และทำให้ความรู้สึกในปากคล้ายไขมัน สามารถใช้ในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น สลัด ไอศกรีม โยเกิร์ต เป็นต้น (Chaito and Judprasong, 2014)

2.11.3 ผลของรีซิสแทนต์สตาร์ช (RS) ต่อสมบัติของสตาร์ชและผลิตภัณฑ์สตาร์ช

สมบัติทางกายภาพของ RS อาจแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการศึกษารูปแบบ ความแตกต่างของแหล่งที่มา ชนิดและปริมาณของ RS

จากงานวิจัยของ Sozer et al. (2007) ได้ศึกษาผลของสมบัติเชิงความร้อนและลักษณะเนื้อสัมผัสของสปาเก็ตตี้ที่เติม RS ที่ผลิตจากการตัดสายกิ่งและทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน (RS3) และรำข้าวเปรียบเทียบกับสปาเก็ตตี้สูตรพื้นฐาน พบว่า การเติม RS3 ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาคีโนเซชันต่ำลง แต่มีค่า firmness และ adhesiveness ที่ดีขึ้น และมีค่า cooking loss ต่ำกว่าในรำข้าว ส่งผลให้ผลทางประสาทสัมผัสของสปาเก็ตตี้จาก RS3 ดีกว่าสปาเก็ตตี้จากรำข้าวและดีกว่าสปาเก็ตตี้สูตรพื้นฐาน

จากงานวิจัยของ Kim et al. (2015) ได้ศึกษาการเกิดรูปร่างของเจลของสตาร์ชข้าวเมื่อโดยการเปรียบเทียบสตาร์ชตัดแปรรูป 2 ประเภท คือ สตาร์ชจากการเชื่อมข้าม (cross-linked, RS4) และสตาร์ชจากการตัดสายกิ่งและทำให้เกิดรีโทรเกรดเดชัน (retrograded debranched, RS3) กับสตาร์ชข้าวที่ไม่เติมสตาร์ชตัดแปรรูป โดยการเตรียมเจลสตาร์ชข้าวที่ความเข้มข้น 12% ผสมกับสตาร์ชตัดแปรรูป 10% พบว่า RS4 ทำให้ค่า peak viscosity, trough และ breakdown ของเจลสตาร์ชข้าวลดลงจากเดิม นอกจากนี้ RS3 และ RS4 ยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในให้มีรูพรุนขนาดเล็กลง และเพิ่มความแข็งแรงของเจลมากขึ้น ดังนั้นการตัดแปรรูปสตาร์ชทั้งสองแบบสามารถเพิ่มปริมาณใยอาหารและสามารถปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสให้ดีขึ้นได้

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Tsatsaragkou et al. (2015) ที่ศึกษาสมบัติด้านพฤติกรรมการไหล ภายภาพ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของเค้กข้าวปราศจากกลูเตนที่เติม RS ที่ระดับ 5-20% เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน พบว่า การเติม RS ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อเค้กมีรูพรุนขนาดเล็กลง ความหนาแน่นของเนื้อ, ค่า firmness, cohesiveness และ springiness ลดลง และเค้กที่เติม RS ปริมาณ 5-15% ส่งผลให้เค้กมีความยืดหยุ่นลดลง แต่เมื่อเติม RS เพิ่มเป็น 20% เค้กมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเค้กพื้นฐาน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเก็บไว้นานขึ้น เปลือกจะแข็งขึ้น และการเติม RS ปริมาณ 20% พบว่า ได้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Aigster et al. (2011) ที่ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของกราโนล่าบาร์ที่เติม RS2 ที่ระดับ 10% และ 15% พบว่า กราโนล่าบาร์ที่เติม RS2 มีค่าสีสว่างขึ้น และมีสีเหลืองมากขึ้น ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่า ได้คะแนนการยอมรับน้อยกว่าสูตรทางการค้า

2.11.4 ผลของรีซีสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทริน (RM) ต่อสมบัติของอาหาร

งานวิจัยของ Araujo-Díaz et al. (2017) ได้ศึกษาผลของ IN และ RM ในการผลิตน้ำผลไม้รสบลูเบอร์รี่ด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า IN และ RM สามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำผลไม้รสบลูเบอร์รี่ด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยในด้านสมบัติทางเคมีกายภาพได้ดี และ RM มีความสามารถในการ encapsulate และการรักษาปริมาณสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ของน้ำผลไม้รสบลูเบอร์รี่ได้ดีกว่า IN

2.11.5 ผลของใยอาหารชนิดอื่นๆ ต่อสมบัติของสตาร์ช

นอกจากนี้ยังมีใยอาหารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นที่มีผลต่อสมบัติของสตาร์ชแตกต่างกันไป เช่นเดียวกับใยอาหารที่ละลายน้ำได้ที่กล่าวข้างต้น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การใช้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นๆ ในการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ช

ชนิดสตาร์ช	ใยอาหาร	ผลการศึกษา	เอกสารอ้างอิง
สตาร์ช มันสำปะหลัง	แซนแทนกัม	การเติมแซนแทนกัมส่งผลให้ค่า pasting temperature, peak viscosity, final viscosity และค่า steady shear viscosity เพิ่มขึ้น และค่า setback และค่า freeze-thaw ลดลง เมื่อเทียบกับสตาร์ช มันสำปะหลังที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัม	(Pongsawatmanit and Srijunthongsiri, 2008)
สตาร์ช ข้าวเจ้า	HPMC, กวักกัม และแซนแทนกัม	การแทนที่ของ HPMC, กวักกัม และแซนแทนกัม ส่งผลให้สมบัติด้าน pasting และ rheology เพิ่มขึ้น และทำให้โครงสร้างเจล อ่อนนุ่มกว่า สตาร์ชที่ไม่ได้ถูกแทนที่ด้วย HPMC, กวักกัม และแซนแทนกัม	(Gularte and Rosell, 2011)
สตาร์ช มันสำปะหลัง	แซนแทนกัม	การเติมแซนแทนกัมส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเกิด เจลาทีโนเซชันสูงขึ้น และอุณหภูมิการเกิด รีโทรเกรเดชันต่ำลง เมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัม	(Pongsawatmanit et al., 2013)
สตาร์ช มันสำปะหลัง	แซนแทนกัม	การเติมกวักกัม 4%, แซนแทนกัม 3%, soluble flaxseed gum 7% และ soy soluble polysaccharide 20% มีผลทำให้ความหนืดของ สตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้เติมสารใดๆ	(Fabek and Goff, 2015)
สตาร์ช ข้าวเจ้า	CMC, กวักกัม และแซนแทนกัม	การเติม CMC, กวักกัม และแซนแทนกัม ส่งผลให้ ค่าดัชนีการอุ้มน้ำ และกำลังการพองตัวลดลง แต่ ค่าการละลายและสมบัติด้าน pasting และเนื้อสัมผัสมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้เติม CMC, กวักกัม และแซนแทนกัม	(Oh et al., 2018)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

1. สตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch) (Thai Flour Industry Co., Ltd., Thailand)
2. สตาร์ชมันสำปะหลัง (tapioca starch) (Thai Flour Industry Co., Ltd., Thailand)
3. อินนูลิน (inulin, IN) (Orafti® GR, Beneo; Germany)
4. ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharide, FOS) (Orafti® P95, Beneo, Germany)
5. รีซิสแทนต์สตาร์ช (resistant starch, RS) (Hi-Maize™ 260, National Starch, USA)
6. รีซิสแทนต์มอลโตเดกซ์ตริน (resistant maltodextrin, RM) (Fibersol-2, Matsutani Chemical Industry Co., Ltd., Japan)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือ

- เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) (Stable Microsystems™, TA-xT2i, England)
- โถดูดความชื้น (dessicator)
- เครื่องชั่งชนิดหยาบ (2 ตำแหน่ง) (Ohaus, PA 2102, USA)
- เครื่องชั่งชนิดละเอียด (4 ตำแหน่ง) (Sartorius, BP 221S, Germany)
- เครื่องชั่ง (5 ตำแหน่ง) (Denver, TB-215D, USA)
- เตาอบลมร้อน (hot air oven) (Binder, FD240, Germany)
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเบส (pH meter) (Hanna instruments, HI 2213 pH/ORP meter, USA)
- เครื่องวัดสี (colorimeter) (Color view™, Gardner laboratory, USA)
- ชุดย่อยโปรตีน แบบ semi-micro (C. Gerhardt, Kjeldatherm®, KBL 20S TZ +Turbo Sog, Germany)
- เครื่องกลั่นหาปริมาณไนโตรเจน (C. Gerhardt, Vapodest 33, Germany)
- เครื่องแยกสารแบบหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (Hettich, Universal 16, Germany)
- เครื่อง spectrophotometer (Spectronic Unicam, Genesys 10 series, USA)
- เครื่องวัดคุณสมบัติแข็ง (RVA) (newport scientific, Thermocline for windows version 1.2, Australia)
- เครื่อง DSC (differential scanning calorimeter) (Perkin elmer, DSC 8000, USA)

- ชุดสกัดไขมัน (Foss, ST243 Soxtec™, Labtec™ Line, Denmark)
- เตาให้ความร้อน (hot plate) (IKA®, C-MAG HP 7, Malaysia)
- กล้องจุลทรรศน์ ชนิด 2 กระบอกตา (Olympus, CH20, Japan)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิชนิดมีเครื่องเขย่า (Julabo, SW22, Germany)
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ (refrigerate bath) (Julabo, UM-CRB 20L, Germany)
- เตาเผา (Carbolite, S300 2RR, UK)
- เครื่องกวนผสม (stirring motor) (IKA®, RW20 digital, Malaysia)

3.2.2 อุปกรณ์

- ลังถึง
- พิมพ์ขนมชั้นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด (9x9) นิ้ว
- ผ้าขาวบาง
- ทัพพี
- ถ้วยตวง
- ช้อน
- อุปกรณ์ทดสอบทางประสาทสัมผัส
- แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส
- ไม้บรรทัด
- ถ้วยพลาสติก
- ปีกเกอร์

3.2.3 สารเคมี

- Anhydrous CuSO_4
- Anhydrous Na_2SO_4
- conc. H_2SO_4
- น้ำกลั่น
- กรดบอริก (boric acid)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)
- กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)
- ปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether)

- สารละลายไอโอดีน (iodine)
- โพแทสเซียมไอโอไดด์ (potassium iodide, KI)
- โพเทโตอะไมโลสบริสุทธ์
- เอทิลแอลกอฮอล์ 95%
- กรดซิตริก (citric acid)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ด้วยวิธี (AOAC, 2000) ในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และใยอาหารทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อินนูลิน (IN) ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (FOS) รีซิสแทนต์สตาร์ช (RS) และรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทริน (RM) ดังแสดงรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในภาคผนวก ก.1-5

วิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และ RS ด้วยวิธีของ Juliano (1971) ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.6

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคของวัตถุดิบ

วิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเตรียมตัวอย่างสตาร์ชวัตถุดิบที่ความเข้มข้น 1% (w/w) จากนั้นหยดลงบนแผ่นสไลด์ 1-2 หยด ปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ นำมาวางใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีเลนส์ตากล้องขยาย 10x เริ่มจากกล้องขยายต่ำไปสูง คือ 10x, 40x และ 100x ของเลนส์วัตถุ โดยก่อนส่องกล้องขยาย 100x ให้หยดน้ำมันลงบนแผ่นสไลด์ ตรวจสอบลักษณะปรากฏภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พร้อมบันทึกภาพ จากนั้นจึงตรวจสอบไบรีฟริงเจนส์ (birefringence) ด้วยการใช้น้ำมันโพลาไรซ์ (polarized lens) และตรวจการติดสีไอโอดีน พร้อมบันทึกภาพ

3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของวัตถุดิบ

วิเคราะห์ตามวิธี มอก. 274-2511 โดยการผสมตัวอย่างวัตถุดิบ 25 กรัม ในน้ำกลั่น 50 ml คนให้เข้ากันประมาณ 1 นาที แล้วนำไปวัดค่า pH ด้วย pH meter

3.3.4 ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง

เตรียมใยอาหาร 4 ชนิด คือ IN, FOS, RS และ RM มาเติมลงในสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังในปริมาณร้อยละ 30 ของสตาร์ช (dry basis) แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติเทียบกับตัวอย่างควบคุม (สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่เติมใยอาหาร) ดังนี้

3.3.4.1 ดัชนีการอุ้มน้ำ (water absorption index, WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI)

วิเคราะห์ตามวิธีของ Anderson et al. (1970) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1-0.2 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง (น้ำหนักที่แน่นอน) และชั่งน้ำหนักโยอาหารปริมาณร้อยละ 30 ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง นำตัวอย่างใส่ในหลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm (ซึ่งน้ำหนักหลอดเหวี่ยงให้ทราบน้ำหนักแน่นอน) เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส กวนตลอดเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาที นาน 15 นาที ดูดของเหลวใส่ตลับน้ำหนัก moisture can ที่ทราบน้ำหนัก (moisture can ต้องผ่านการอบแห้ง และทำให้เย็นใน desiccator แล้ว) และชั่งน้ำหนักหลอด นำ moisture can ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณหาดัชนีการอุ้มน้ำและการละลายดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ดัชนีการละลายน้ำ (WSI)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ (B)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (A)}}$$

$$\text{ดัชนีการอุ้มน้ำ (WAI)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนหลังการปั่นเหวี่ยง (C)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (A)}}$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักสตาร์ช + โยอาหาร (dry basis)

B คือ น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำหลังอบแห้ง

C คือ น้ำหนักตะกอนหลังการปั่นเหวี่ยง

3.3.4.2 กำลังการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)

วิเคราะห์ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Li and Yeh (2001) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1-0.2 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง (น้ำหนักที่แน่นอน) และชั่งน้ำหนักโยอาหารปริมาณร้อยละ 30 ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง นำตัวอย่างใส่ในหลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm (ซึ่งน้ำหนักหลอดเหวี่ยงให้ทราบน้ำหนักแน่นอน) เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร แช่ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 90 องศาเซลเซียส โดยทำการกวนตลอดเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาที นาน 15 นาที ดูดของเหลวใส่ตลับน้ำหนัก moisture can ที่ทราบน้ำหนัก (moisture can ต้องผ่านการอบแห้ง และทำให้เย็นใน desiccator แล้ว) และชั่งน้ำหนักหลอด นำ moisture can ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณหาค่าการละลายและกำลังการพองตัวดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ค่านวม} \quad \text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ (B)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (A)}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักที่พองตัวแล้ว (C)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (A)} \times (100 - \text{การละลาย (\%)})}$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักสตาร์ช + โยอาหาร (dry basis)

B คือ น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำหลังอบแห้ง

C คือ น้ำหนักตัวอย่างที่พองตัวแล้ว

3.3.4.3 สมบัติการให้ความหนืด (pasting properties)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (Newport Scientific Pty., Model 3D, Australia) ตามวิธีของ Newport Scientific (1998) โดยเตรียมตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 และสตาร์ชข้าวเจ้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 ผสมโยอาหารปริมาณร้อยละ 30 ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง ดังแสดงรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในภาคผนวก ข.1 นำตัวอย่าง 25 กรัมและใบพัดกวน (paddle) ใส่ในภาชนะอลูมิเนียม หมุนใบพัดกวนจนตัวอย่างผสมกันดี ไม่มีการเกาะเป็นก้อน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามโปรแกรม STD1 ดังนี้

เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 960 รอบต่อนาที

เวลา 10 วินาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

เวลา 1 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที และเริ่มให้

ความร้อน

เวลา 4 นาที 42 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

จนถึง เวลา 7 นาที 12 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

และเริ่มให้ความเย็น

เวลา 11 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จนถึง

เวลา 13 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที

โดยใช้เวลาทั้งหมด 13 นาที

ได้ผลค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างทำความเย็น (trough) ความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (ความหนืดลดลง หรือ breakdown)

ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้าย (การคืนตัว หรือ setback) และอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature)

3.3.4.4 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization) และรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

วิเคราะห์ด้วย Differential Scanning Calorimeter (Perkin Elmer, DSC7, USA) ดัดแปลงจากวิธีของ Li et al. (2017) โดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช 15 mg (โดยน้ำหนักแห้ง) จากนั้นชั่งโยอาหารปริมาณ 30% ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง และเติมน้ำกลั่นจนได้น้ำหนักตัวอย่างรวม 45 mg ลงใน stainless steel pan (large volume capsule, 0319-0218 REV-E, Perkin Elmer) จากนั้นปิดฝา และบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์การเกิดเจลลาทีโนเซชันในช่วงอุณหภูมิ 25-130 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/min โดยใช้ indium เป็นสารมาตรฐาน ใช้ภาชนะเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและอ่านอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีโนเซชันที่อุณหภูมิเริ่ม (T_o) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสิ้นสุด (T_c) และค่าเอนทาลปี (ΔH) ดังแสดงรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในภาคผนวก ข.2

เก็บตัวอย่างที่ผ่านการเกิดเจลลาทีโนเซชันจากการวิเคราะห์ในขั้นต้นไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 7 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25-130 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/min โดยใช้ indium เป็นสารมาตรฐาน ใช้ภาชนะเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและอ่านอุณหภูมิในการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ อุณหภูมิเริ่ม (T_o) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสิ้นสุด (T_c) และค่าเอนทาลปี (ΔH) ดังแสดงรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในภาคผนวก ข.2

3.3.4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช

วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Kong et al. (2015) โดยการเตรียมสตาร์ชข้าวเจ้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 (w/w) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 (w/w) ดัดแปลงจากวิธีการเตรียมของ Alishahi et al. (2015) ซึ่งมีโยอาหารปริมาณร้อยละ 30 ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที กวนผสมตลอดเวลาด้วยอัตราเร็ว 400 rpm จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 24 ชั่วโมง ลักษณะดังภาพในภาคผนวก ข.3 นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส โดยใช้ cylinder probe ขนาด 5 mm (P/5) ใช้วิธีการกด (compression) และกดเป็นระยะทาง 10 mm trigger force 15 กรัม กำหนดให้ค่าความเร็วในช่วงก่อนการทดสอบเท่ากับ 2 mm/sec ค่าความเร็วขณะทดสอบเท่ากับ 1 mm/sec ค่าความเร็วในช่วงหลังการทดสอบเท่ากับ 10 mm/sec คำนวณค่า hardness และ adhesiveness

3.3.4.6 ค่าสีของเจลสตาร์ช

วิเคราะห์ค่าสีของเจลสตาร์ชสุกที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 3.3.4.5 ด้วยเครื่อง Colorimeter แสดงเป็นค่า L^* , a^* และ b^* ตามวิธีของ Sukhija et al. (2016) โดยใช้แหล่งแสงระบบ CIE และใช้แผ่นสีขาวและดำมาตรฐานทำการ calibrate ด้วย white calibration และ black calibration โดยทำการตั้งค่าในการวัดดังต่อไปนี้

- แหล่งกำเนิดแสง D light (day light)
- ค่ามุม 10 องศา
- ทำการวัดแบบหาค่าเฉลี่ย (average) 3 จุด

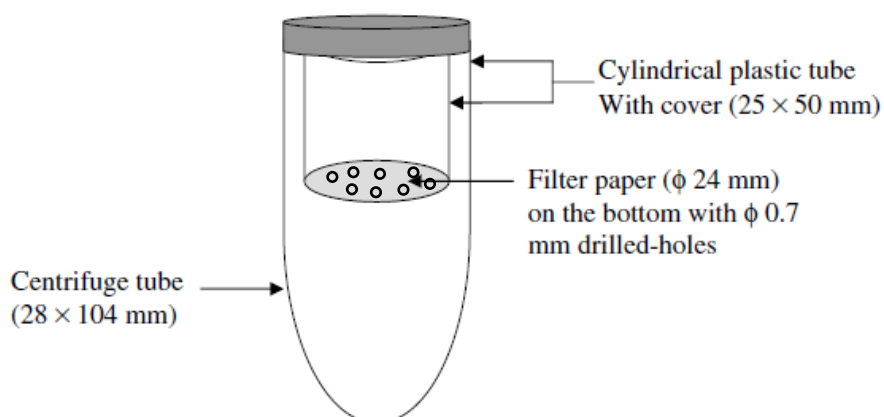
นำตัวอย่างเจลสตาร์ชสุกที่ได้จากการวัด RVA ใส่ถ้วยพลาสติกทรงกระบอกโดยใส่ตัวอย่างในถ้วยบรรจุให้แน่นที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้มีช่องว่างในตัวอย่าง นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง วางตัวอย่างเจลสตาร์ชที่อยู่ในถ้วยลงบนแท่นวัด แล้ววัดค่า 3 จุดต่อ 1 ตัวอย่าง

3.3.4.7 ความใส (clarity) ของสตาร์ชสุก

วิเคราะห์ตามวิธีของ Cui et al. (2014) โดยการเตรียมตัวอย่างสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 (w/w) และโยอาหารปริมาณ 30% ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาทีเขย่าตลอดเวลา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปวัดค่าร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) ที่ความยาวคลื่น 650 nm.

3.3.4.8 ความคงตัวต่อการแช่แข็งละลาย (freeze-thaw stability) ของเจลสตาร์ช

วิเคราะห์ตามวิธีของ Charoenrein et al. (2008) และ Sun and Yoo (2015) โดยการเตรียมเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 (w/w) และเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 (w/w) ซึ่งมีโยอาหารปริมาณ 30% ของสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที กวนผสมตลอดเวลาด้วยอัตราเร็ว 400 rpm นำใส่ภาชนะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 mm ที่เจาะรูที่ก้นภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm ปริมาณ 20 ml รองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 และหุ้มปิดด้วยฟิล์ม ดังภาพที่ 11 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเก็บที่อุณหภูมิ -40 °C เป็นเวลา 1, 2, 4 และ 7 วัน นำออกมาบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที นาน 10 นาที และวัดการเกิด syneresis



ภาพที่ 11 แบบจำลองการแช่แข็งละลายสตาร์ช

ที่มา: Charoenrein et al. (2008)

3.3.5 ผลของใยอาหารต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์สตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง

3.3.5.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

คัดเลือกสูตรพื้นฐานขนมชั้นโดยดัดแปลงจาก นลินี คูอมรพัฒนะ (2553) ดังตารางที่ 7 และปรับใช้กับตัวอย่างทั้งหมด โดยกำหนดปริมาณ dietary fiber 4 ชนิด คือ IN, FOS, RS และ RM ที่ระดับ 30% ของน้ำหนักสตาร์ชโดยการแทนที่น้ำตาลในสูตรพื้นฐาน นำส่วนผสมที่เตรียมตามสูตรไปนึ่งที่ละชั้นจนครบ 7 ชั้น (แสดงรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างในภาคผนวก ค.1) จะได้ขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังรวมทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ทำการประเมินคุณภาพลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสของขนมชั้น

ตารางที่ 7 สูตรพื้นฐานของขนมชั้น

ลำดับ	วัตถุดิบ	ปริมาณ (g)	ปริมาณ (%)
1	กะทิ	405	45.0
2	น้ำตาล*	270	30.0
3	สตาร์ช	180	20.0
4	น้ำ	44.5	4.9
5	อื่นๆ (สี, กลิ่น)	5	0.6
	รวม	899.5	100.0

*ใยอาหาร แทนที่ในส่วนน้ำตาล

3.3.5.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

ดัดแปลงจากวิธีของ Konman et al. (2013) โดยนำขนมชั้นที่เตรียมเสร็จแล้วจากข้อ 3.3.5.1 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตัดขนมให้เป็นชิ้นขนาด 3x3x2 เซนติเมตร ลักษณะดังภาพในภาคผนวก ข.3 แล้ววิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างขนมชั้นด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) แบบ TPA (texture profile analysis) โดยใช้ cylinder probe ขนาด 50 mm (P/50) กำหนดให้ค่าความเร็วในช่วงก่อนการทดสอบเท่ากับ 2 mm/sec ค่าความเร็วขณะทดสอบเท่ากับ 1 mm/sec ค่าความเร็วในช่วงหลังการทดสอบเท่ากับ 10 mm/sec และระยะทาง 50% strain คำนวณ ค่า hardness, adhesiveness, springiness, cohesiveness, gumminess และ chewiness

3.3.5.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการเตรียมผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังตามข้อ 3.3.5.1 มาทำการทดสอบแบบ 9-point hedonic scale โดยผู้ชิมทั้งหมด 50 คน แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดตัวอย่างขนมชั้นสตาร์ชข้าวเจ้าและชุดตัวอย่างขนมชั้นสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยเสิร์ฟตัวอย่างแยกชุดกัน ทำการทดสอบความชอบทั้งหมด 8 คุณลักษณะ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี การลอกชั้น ความอ่อน-แข็ง ความเหนียว กลิ่นขณะเคี้ยวรสชาติ และความชอบโดยรวม โดยตัวอย่างแบบทดสอบแสดงดังภาคผนวก ง.

3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ (analysis of variance: ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 16.0



บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง แสดงในตารางที่ 9 พบว่า สตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตสูงกว่าในสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยสตาร์ชข้าวเจ้า (น้ำหนักแห้ง) มีปริมาณความชื้น 10.75% โปรตีน 0.35% ไขมัน 0.29% เถ้า 0.29% และปริมาณอะไมโลสที่สูงถึง 40.47% ซึ่งค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Takahashi and Fujita (2017) ที่รายงานว่าองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณความชื้นประมาณ 10% โปรตีนน้อยกว่า 0.4% และไขมันน้อยกว่า 0.3% ในขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลัง (น้ำหนักแห้ง) มีปริมาณความชื้น 10.26% โปรตีน 0.08% ไขมัน 0.12% เถ้า 0.15% และอะไมโลส 31.48% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zhu (2015) ที่รายงานว่าองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังหลายสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนอยู่ที่ 0.06-0.75% ไขมัน 0.01-1.2% เถ้า 0.03-0.29% และอะไมโลสเฉลี่ยอยู่ที่ 15-30%

องค์ประกอบทางเคมีของใยอาหาร ซึ่งประกอบด้วย IN, FOS, RS, และ RM นั้น พบว่า RS และ RM มีองค์ประกอบทางเคมีมากกว่า IN และ FOS แม้ว่า RS และ RM เป็นสตาร์ชที่การกระบวนการดัดแปรให้มีสมบัติทนการย่อย แต่ยังมีองค์ประกอบคล้ายกับสตาร์ชทั่วไป โดย RS (น้ำหนักแห้ง) มีปริมาณความชื้น 11.75% โปรตีน 0.41% ไขมัน 0.10% เถ้า 0.28% อย่างไรก็ตาม RS มีอะไมโลสสูงมากถึง 94.24% ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ RS ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง (high-amylose corn starch) ขณะที่ RM มีปริมาณความชื้น 1.58% โปรตีน 0.10% ไขมัน 0.75% เถ้า 0.14% และไม่พบอะไมโลส ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ RM มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านมาก หรือมีสายโมเลกุลสั้นจนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไอโอดีนในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสได้ ส่วน FOS และ IN มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่ใช่ความชื้นอยู่ในปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ แสดงว่า FOS และ IN เป็นใยอาหารที่มีความบริสุทธิ์สูง

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมี (% wet basis) ของสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และโยอาทาร

Ingredient	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Carbohydrate (%)
Rice starch	9.71±0.20 ^b	0.27±0.01 ^b	0.26±0.02 ^b	0.26±0.00 ^a	99.24 ^a
Tapioca starch	9.30±0.15 ^c	0.17±0.01 ^c	0.11±0.02 ^b	0.14±0.01 ^c	99.58 ^a
FOS	3.31±0.04 ^e	nd*	nd*	nd*	97.00
IN	4.03±0.02 ^d	nd*	nd*	nd*	97.00
RS	10.51±0.18 ^a	0.37±0.01 ^a	0.09±0.02 ^b	0.25±0.01 ^b	99.29 ^a
RM	1.55±0.16 ^f	0.09±0.01 ^d	0.74±0.03 ^a	0.14±0.01 ^c	99.03 ^a

หมายเหตุ ^{a,b,c...} ในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

* nd คือ มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมี (% dry basis) ของสตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และโยอาทาร์

Ingredient	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Carbohydrate (%)	Amylose (%)
Rice starch	10.75±0.25 ^b	0.35±0.01 ^b	0.29±0.02 ^b	0.29±0.01 ^a	99.08±0.04 ^c	40.47±0.22 ^b
Tapioca starch	10.26±0.18 ^c	0.08±0.01 ^d	0.12±0.02 ^c	0.15±0.01 ^c	99.66±0.02 ^a	31.48±0.11 ^c
FOS	3.42±0.05 ^e	nd*	nd*	nd*	97	nd*
IN	4.20±0.02 ^d	nd*	nd*	nd*	97	nd*
RS	11.75±0.23 ^a	0.41±0.01 ^a	0.10±0.02 ^e	0.28±0.01 ^b	99.22±0.04 ^b	94.24±0.22 ^a
RM	1.58±0.16 ^f	0.10±0.01 ^c	0.75±0.03 ^a	0.14±0.01 ^c	99.01±0.03 ^d	nd*

หมายเหตุ ^{a,b,c...} ในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

* nd คือ มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

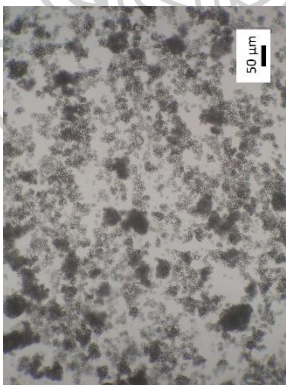
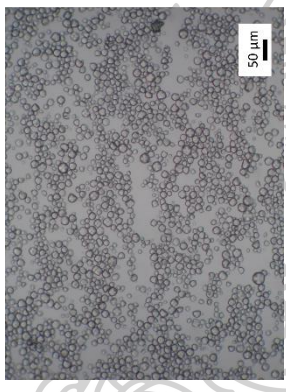

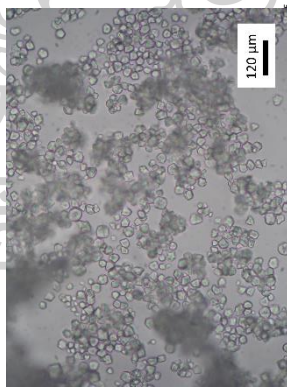
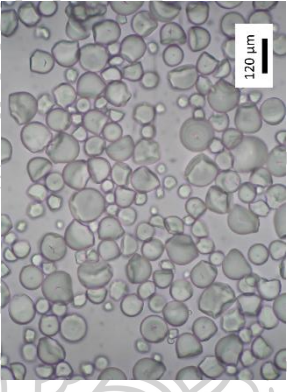
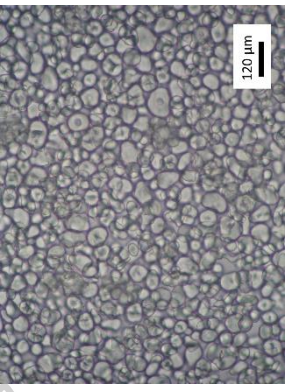
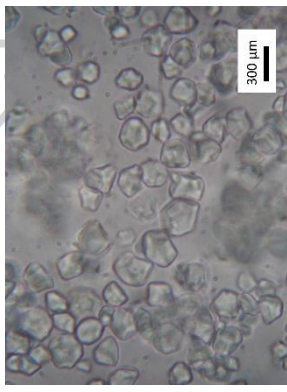
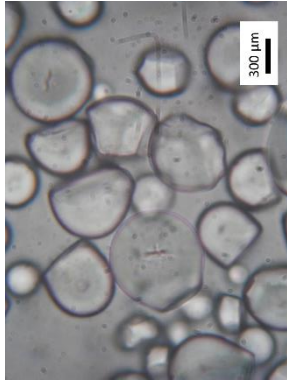
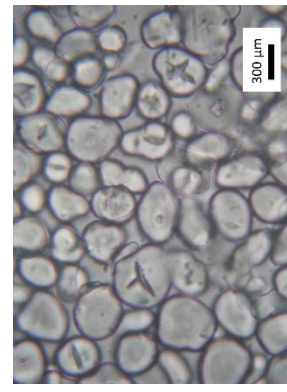
4.2 ลักษณะทางจุลภาคของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดสตาร์ชมีความแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด และชนิดของพืช เมื่อนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์แบบ light microscope จะเห็นโครงสร้างแบบ 2 มิติของเม็ดสตาร์ช (ตารางที่ 10) เมื่อปรับกำลังขยายของภาพเป็น 100x และ 400x จะเห็นโครงสร้างลักษณะของเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้น แต่ยังไม่ชัดเจน เมื่อปรับกำลังขยายของภาพเป็น 1000x จะเห็นได้ชัดเจนว่า สตาร์ชข้าวเจ้าจะมีขนาดเล็กและลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมหลายหน้า (polyhedral) ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังและ RS มีลักษณะเม็ดสตาร์ชเป็นทรงกลมหรือรีและมีขนาดใหญ่ ขณะที่ไม่พบอนุภาคของเม็ดสตาร์ชใน IN, FOS และ RM

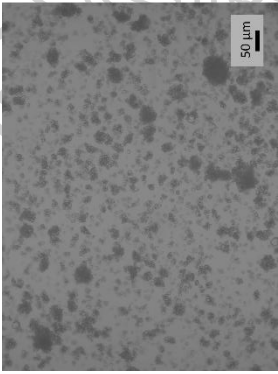



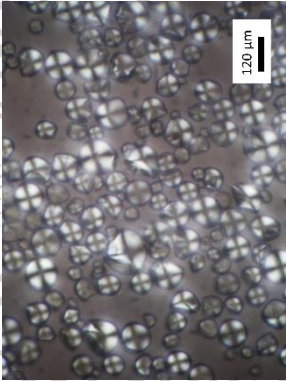
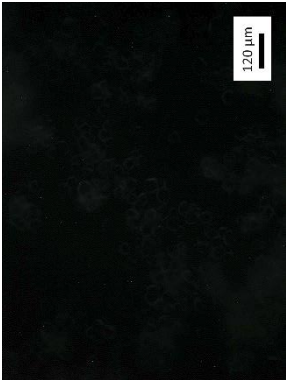

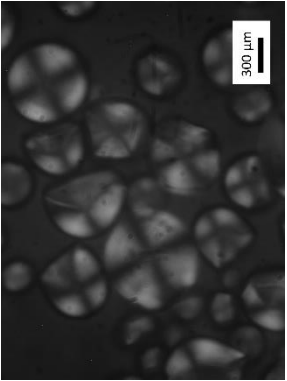
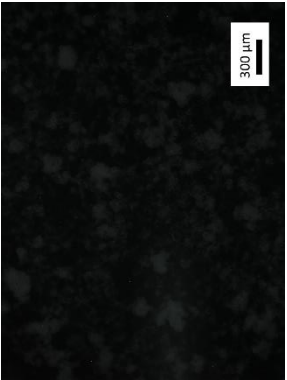
เมื่อเปลี่ยนเลนส์เป็นแบบโพลาไรส์ (polarized light) และนำมาตรวจดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (ตารางที่ 11) จะพบว่า สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังแสดงสมบัติการบิดของระนาบของแสงเกิดเป็นลักษณะคล้ายเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (birefringence) ซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบในรูปผลึกของเม็ดสตาร์ช (Kerr, 1950) แต่เนื่องจากสตาร์ชข้าวเจ้ามีขนาดเล็กมาก ทำให้เห็นลักษณะ birefringence ไม่ชัดเจน (Sittipod and Shi, 2016) และ RS ไม่ปรากฏ birefringence เนื่องจากเป็นสตาร์ชที่ทนการย่อยด้วยเอนไซม์จากสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูงอาจจะผ่านกระบวนการย่อย (hydrolysis) จนโครงสร้างเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ไม่พบลักษณะ birefringence ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ji and Yu (2018) ที่พบว่า เมื่อนำสตาร์ชข้าวโพดไปผ่านกระบวนการดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น (heat moisture treatment, HMT) ผสมกับกรด ทำให้ลักษณะ birefringence ของสตาร์ชหายไป

เมื่อทดสอบการย้อมติดสีไอโอดีนของสตาร์ช (ตารางที่ 12) พบว่า สตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชมันสำปะหลัง และ รีซิสแทนต์สตาร์ช เกิดสารสีน้ำเงิน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของอะไมโลสกับไอโอดีนและสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน โดยสีที่เกิดขึ้นอยู่กับความยาวของสายอะไมโลส ซึ่งเป็นตัวบอกปริมาณอะไมโลสได้ (Pomeranz, 1991)

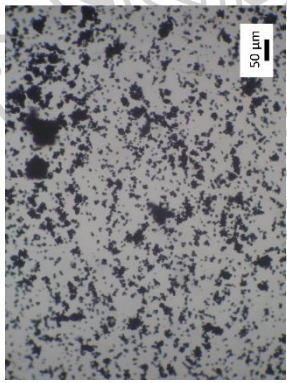
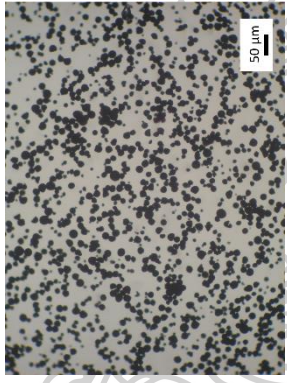
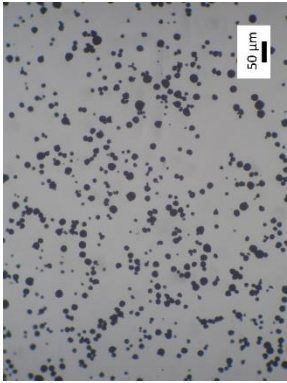
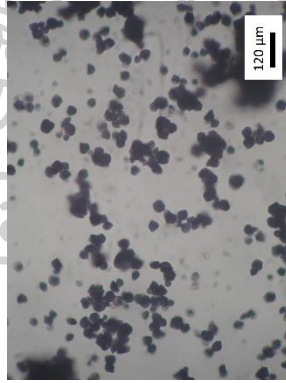
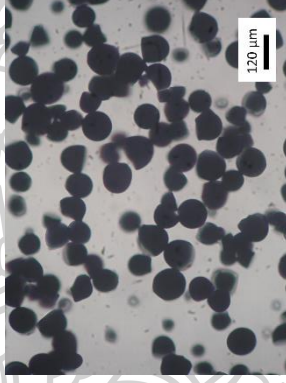
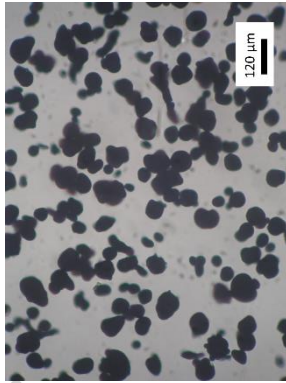
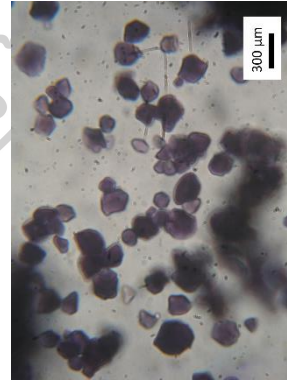
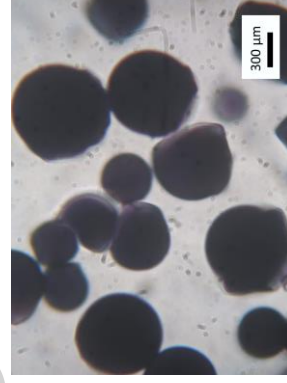
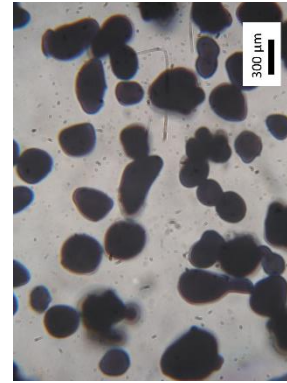
ตารางที่ 10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสงแบบธรรมดา

กำลังขยายของภาพ	Rice starch	Tapioca starch	RS
100x			
400x			
1000x			

ตารางที่ 11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสงโพลาไรซ์ (polarized light)

กำลังขยายของภาพ	Rice starch	Tapioca starch	RS
100x			
400x			
1000x			

ตารางที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ภายใต้การใช้แสงธรรมดาและการย้อมไอโอดีน

กำลังขยายของภาพ	Rice starch	Tapioca starch	RS
100x			
400x			
1000x			

4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง และใยอาหาร

จากค่าความเป็นกรด-ด่างของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมใยอาหาร (ตารางที่ 13) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสตาร์ชอยู่ในช่วง 6.0-6.5 ซึ่งเป็นช่วงค่อนข้างเป็นกลาง ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของใยอาหารที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 5.0-6.5 ซึ่งเป็นช่วงกรดสูงถึงกรดเล็กน้อย โดยที่ใยอาหารมีความเป็นกรดสูงกว่าสตาร์ชเล็กน้อย ซึ่ง RM แสดงความเป็นกรดสูงที่สุด ความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันของสตาร์ชและใยอาหารที่ละลายน้ำได้อาจจะส่งผลต่อสมบัติของสตาร์ชแตกต่างกันไป

ตารางที่ 13 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสตาร์ชและใยอาหาร

Ingredient	pH
Rice starch	6.58±0.02 ^a
Tapioca starch	6.01±0.02 ^c
FOS	5.93±0.03 ^d
IN	6.36±0.01 ^b
RS	5.38±0.01 ^e
RM	5.08±0.04 ^f

หมายเหตุ^{a,b,c,d,e,f}... ในแนวดิ่งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

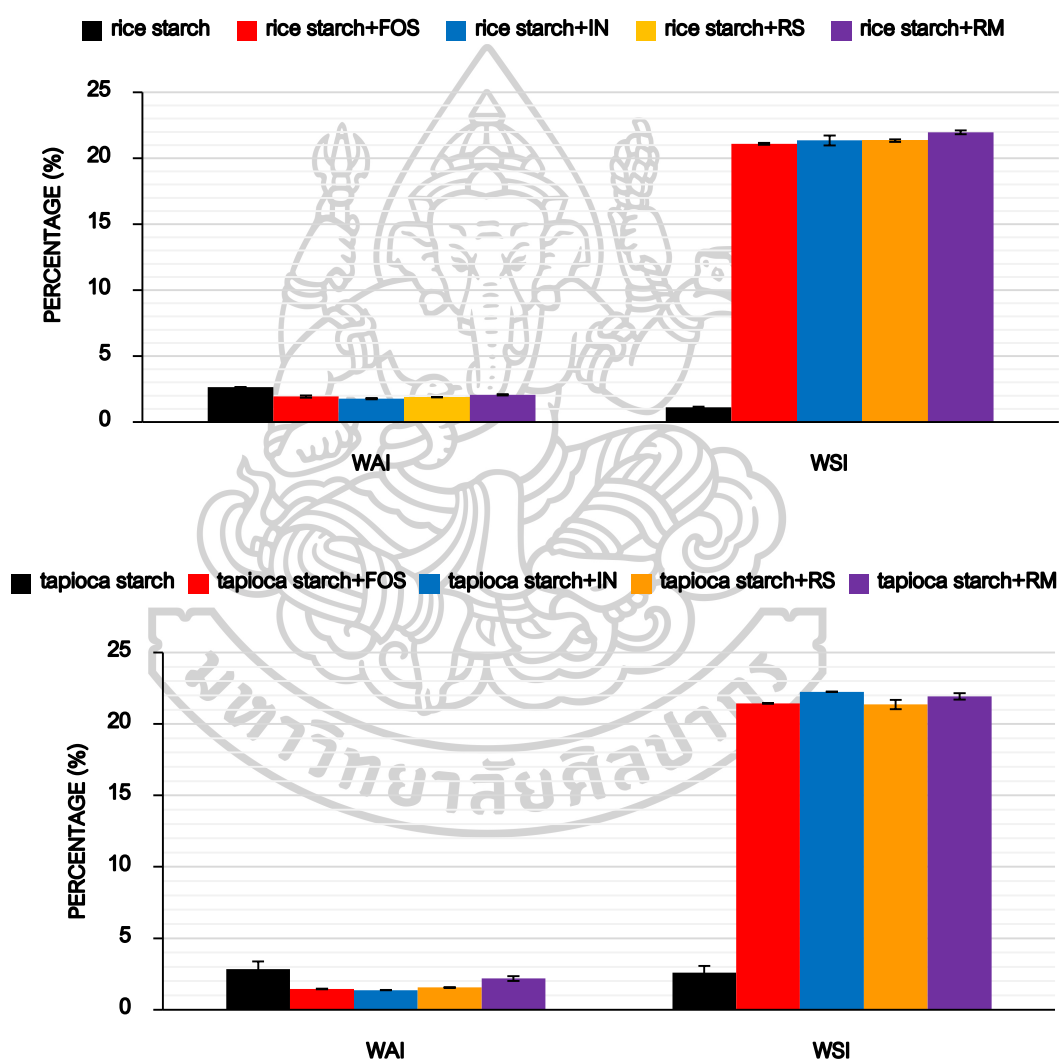
4.4 ผลของใยอาหารต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง

4.4.1 ดัชนีการอุ้มน้ำ (water absorption index, WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI)

สมบัติการอุ้มน้ำและการละลายที่อุณหภูมิ 30 °C แสดงในภาพที่ 12 พบว่า เมื่อเติมใยอาหารลงในสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังส่งผลให้สตาร์ชมีการอุ้มน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

ความสามารถในการอุ้มน้ำขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิตระหว่างน้ำและสายโซ่พอลิเมอร์ของสตาร์ช เมื่อเติมใยอาหารลงไป เส้นใยเหล่านี้มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วสูง ทำให้โมเลกุลของใยอาหารเหล่านี้เกิดปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิตกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ง่าย ซึ่งอาจจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ของสตาร์ช เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lutfi et al. (2017)

ที่พบว่า CMC, กัวกัม และ กัมอาคาเซีย เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น ทำให้สตาร์ชแท้มีการอุ้มน้ำลดลง อย่างไรก็ตาม การเติมใยอาหารลงในสตาร์ชส่งผลต่อการแสดงสมบัติการละลายที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chawla and Patil (2010) ที่รายงานว่า FOS, IN และ RM มีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ส่วน RS มีทั้งส่วนที่ละลายน้ำได้และไม่ได้ ซึ่งการละลายน้ำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร

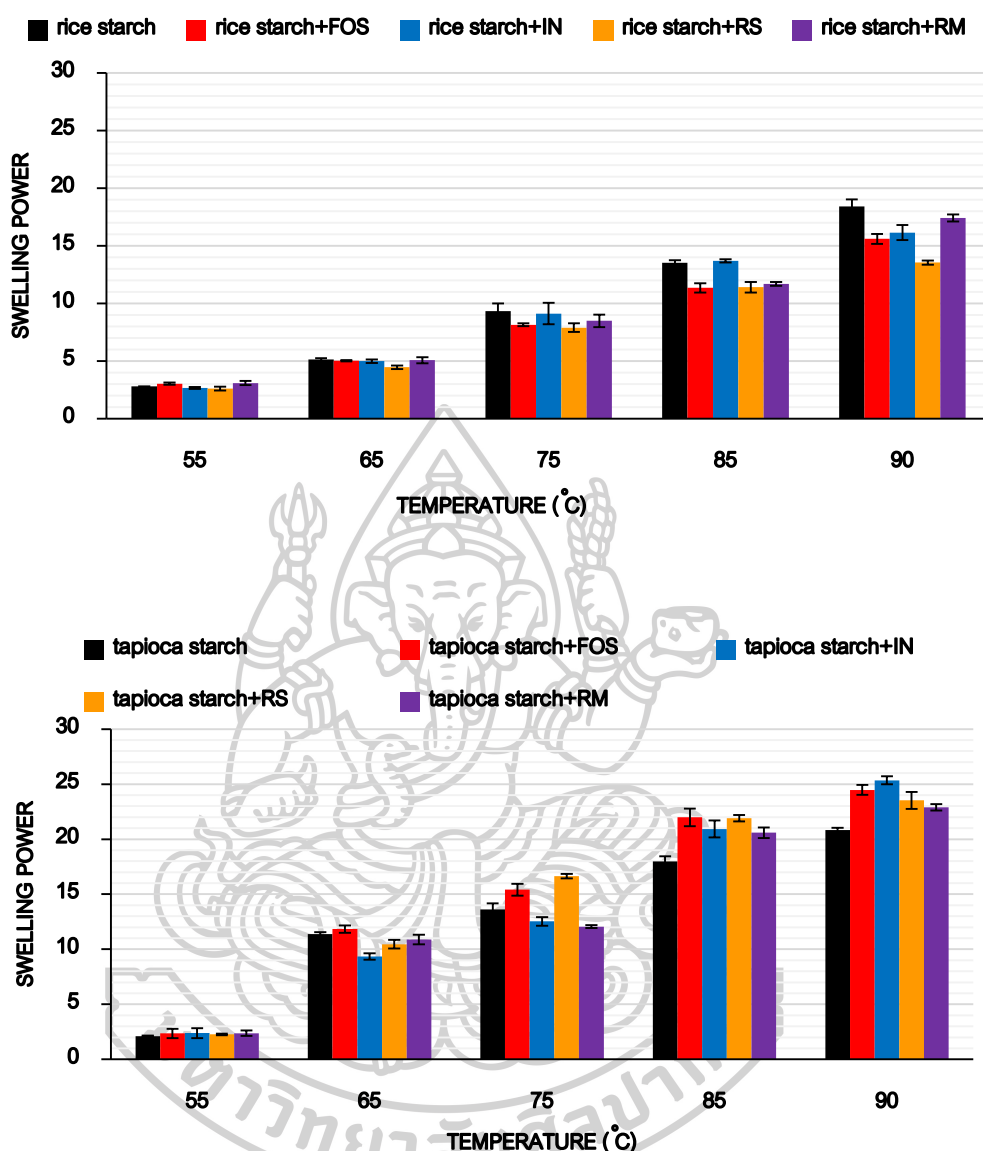


ภาพที่ 12 ดัชนีการอุ้มน้ำ (WAI) และการละลาย (WSI) ที่อุณหภูมิ 30 °C ของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

4.4.2 กำลังการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility)

กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติมใยอาหารตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 55-90 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 13 และ 14) พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมใยอาหารแสดงแนวโน้มการพองตัวของสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน จะเห็นว่าสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมใยอาหารมีการพองตัวลดลง ขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมใยอาหารมีการพองตัวสูงขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai et al. (2011) ที่กล่าวว่า การเติมใยอาหาร ทำให้การพองตัวของอะไมโลเพคตินสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และงานวิจัยของ Lutfi et al. (2017); Singh et al. (2017) ได้ศึกษาผลของการเติมกัมลงในสตาร์ช รายงานว่า เมื่อให้ความร้อน กัมจะทำหน้าที่เป็น binding agent สนับสนุนให้เกิดการแพร่ของน้ำเข้าไปภายในของเม็ดสตาร์ชและทำให้อะไมโลสถูกขับออกมาภายนอก และจับตัวกับใยอาหาร สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูงจะจับตัวกับใยอาหารอย่างหนาแน่น ทำให้จำกัดการพองตัวของอะไมโลเพคติน การพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมใยอาหารจึงถูกจำกัดการพองตัวมากกว่า สตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมใยอาหาร

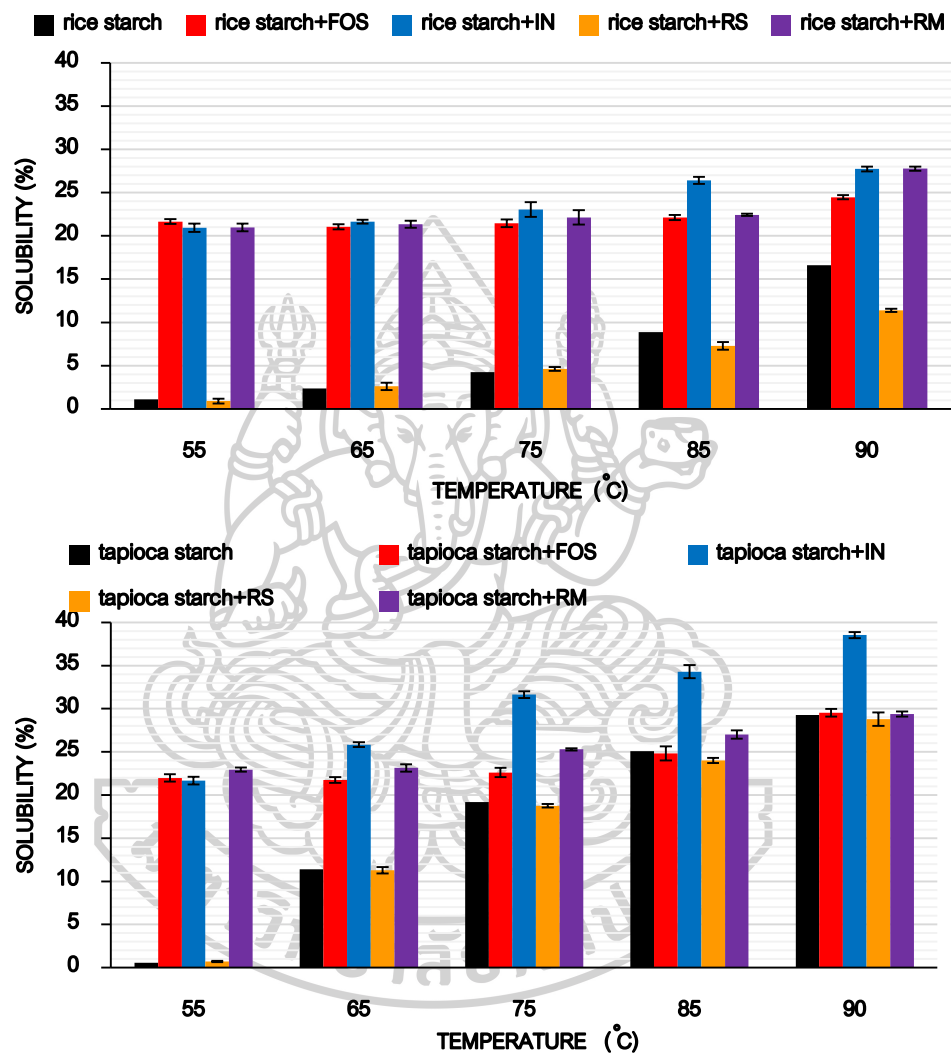
เมื่อสังเกตสตาร์ชที่เติมใยอาหารที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า สตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม RM และสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม IN มีการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชที่เติมใยอาหารชนิด เป็นผลมาจากโครงสร้างของ RM และ IN ที่มีขนาดใหญ่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ohkuma and Wakabayashi (2008) ที่รายงานว่ามีสมบัติการละลายสูงตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสขึ้นไป และ Phelps (1965) รายงานงานว่า IN มีสมบัติละลายน้ำได้ดี และจะละลายได้สูงขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากมีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีโมเลกุลที่มีขั้วสูง ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ไฟฟ้าสถิตย์กับโมเลกุลของน้ำได้ง่าย จึงส่งผลให้ RM และ IN ละลายน้ำได้สูงกว่าใยอาหารชนิดอื่น และทำให้จับกับอะไมโลสได้มากขึ้น สตาร์ชจึงพองตัวได้สูงขึ้น



ภาพที่ 13 การพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

นอกจากนี้ยังพบว่า การที่ IN, FOS และ RM ส่งผลให้ค่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังสูงขึ้น เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของไฮโดรคอลลอยด์กับอะไมโลสเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chandanasree et al. (2016) ที่พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม CMC มีค่าการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ของไฮโดรคอลลอยด์กับอะไมโลสเกิดเป็นโครงสร้างอะไมโลสขนาดใหญ่ (amylose matrix complex) ทำให้ละลายมากขึ้น ในขณะที่สตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติม

RS แสดงค่าการละลายที่ต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลจากโครงสร้างของสตาร์ชที่มีทั้งส่วนที่ละลายน้ำได้และไม่ได้ ทำให้สตาร์ชมีการละลายน้อยกว่าโยอาหารชนิดอื่นๆ



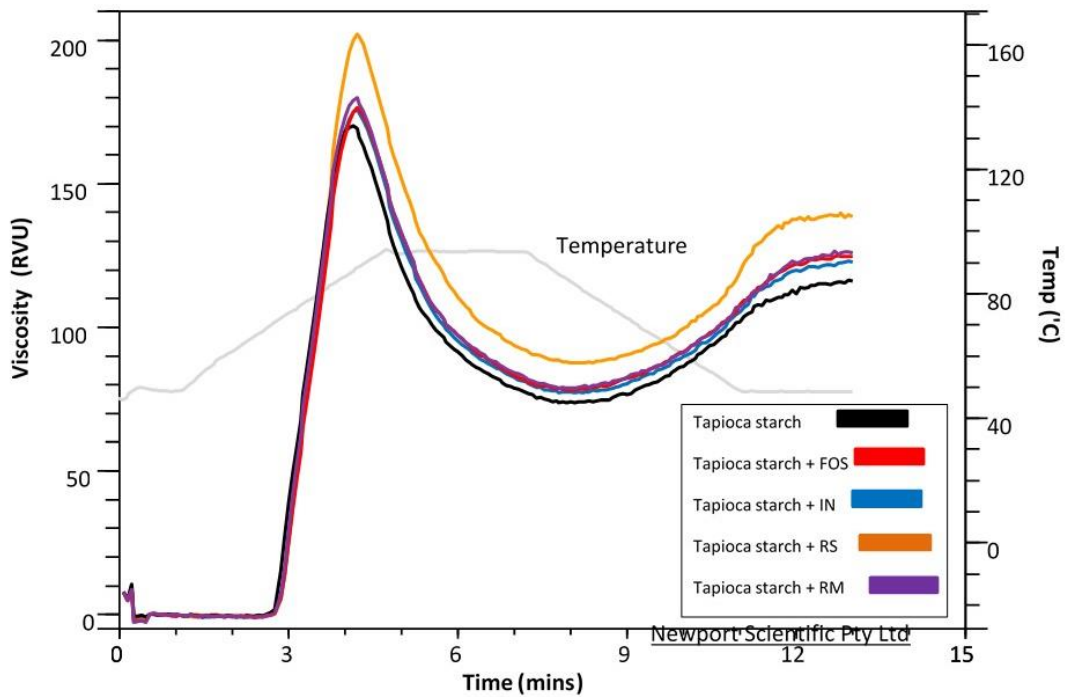
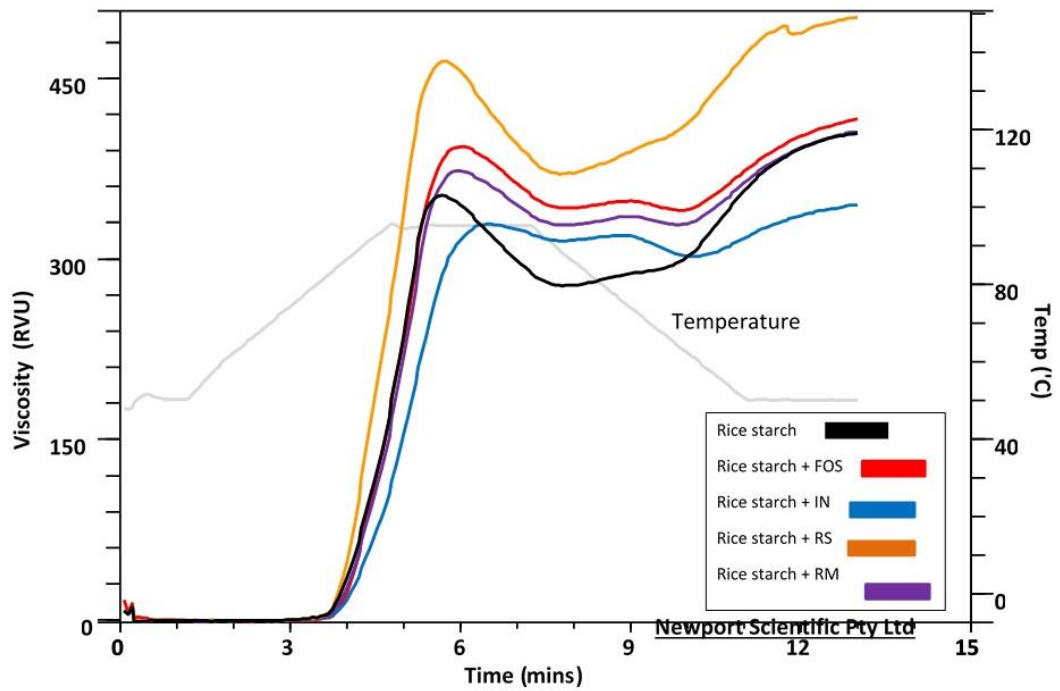
ภาพที่ 14 การละลายของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมโยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

4.4.3 สมบัติการให้ความหนืด (pasting properties)

พฤติกรรมความหนืดเกิดจากการที่สตาร์ชถูกให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว ความเป็นระเบียบภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย สตาร์ชจะเริ่มมีความหนืดขึ้น ซึ่งสตาร์ชที่พองตัวได้เร็ว และสูงกว่าจะมีความหนืดที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ชที่พองตัวได้ช้าและมีกำลังการพองตัวต่ำ (Pomeranz, 1991) การศึกษาพฤติกรรมความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมใยอาหาร แสดงดังภาพที่ 15 พบว่า FOS, RS และ RM ทำให้สมบัติการให้ความหนืดของสตาร์ช ข้าวเจ้าและมันสำปะหลังซึ่งได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ค่าความหนืดต่ำสุดในระหว่างการทำให้เย็น (trough) เพิ่มขึ้น ซึ่ง RS ทำให้สตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วน IN ส่งผลให้สมบัติการให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าลดลง

ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาตินในเซชัน (pasting temperature) ของสตาร์ชที่เติมและไม่เติมใยอาหารมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสตาร์ชที่เติม FOS และ RM แสดงค่า pasting temperature สูงกว่าสตาร์ชคอนโทรลและสตาร์ชที่เติมใยอาหารชนิดอื่น แสดงว่าถ้าต้องการเติม FOS และ RM ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงจะทำให้สตาร์ชเกิดเจลาตินในซี

ค่าความหนืดสูงสุดเมื่อได้รับความร้อน (peak viscosity) ซึ่งเป็นค่าที่บอกความสามารถของสตาร์ชในการจับตัวกับน้ำหรือแรงที่เหมาะสมในการกวนสตาร์ช ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ความสามารถในการคงทนต่ออุณหภูมิและแรงกระทำ (breakdown) เช่น การกวนสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในหลายกระบวนการผลิต และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) พบว่า การเติม FOS, RS และ RM ทำให้ค่าต่างๆ สูงขึ้น ซึ่ง RS ทำให้สตาร์ชมีสมบัติการให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมากที่สุด ซึ่งจากการนำใยอาหารทั้ง 4 ชนิด คือ FOS, IN, RS และ RM ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการให้ความหนืดโดยไม่มีสตาร์ช พบว่าใยอาหารทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวให้ความหนืดต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ (ประมาณ 0 RVU) ดังแสดงในภาคผนวก จ.1 ดังนั้นความหนืดที่เพิ่มขึ้นจึงมาจากการเติมใยอาหารลงในสตาร์ช ซึ่งเป็นไปตามการศึกษาของ Lai et al. (2011) ซึ่งพบว่า การเติมใยอาหารจะทำให้การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำในเจลสตาร์ชลดลง และทำให้ค่า peak viscosity, holding strength และ final viscosity ของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ส่วน IN ส่งผลให้สมบัติการให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าลดลง ซึ่งเป็นไปตามผลการศึกษาของ Brennan et al. (2004) และ Witczak et al. (2014) ที่รายงานว่า IN มีสมบัติในการดูดความชื้นสูง (hygroscopic) และลดปริมาณน้ำในการจับกับสตาร์ช โดยโมเลกุลของ IN อาจจะไปสร้าง junction zones และจับกับโมเลกุลของน้ำไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำจับกับโมเลกุลของสตาร์ชได้ลดลง ทำให้ค่า peak viscosity, holding strength และ final viscosity และค่า setback ลดลง



ภาพที่ 15 พฤติกรรมการให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

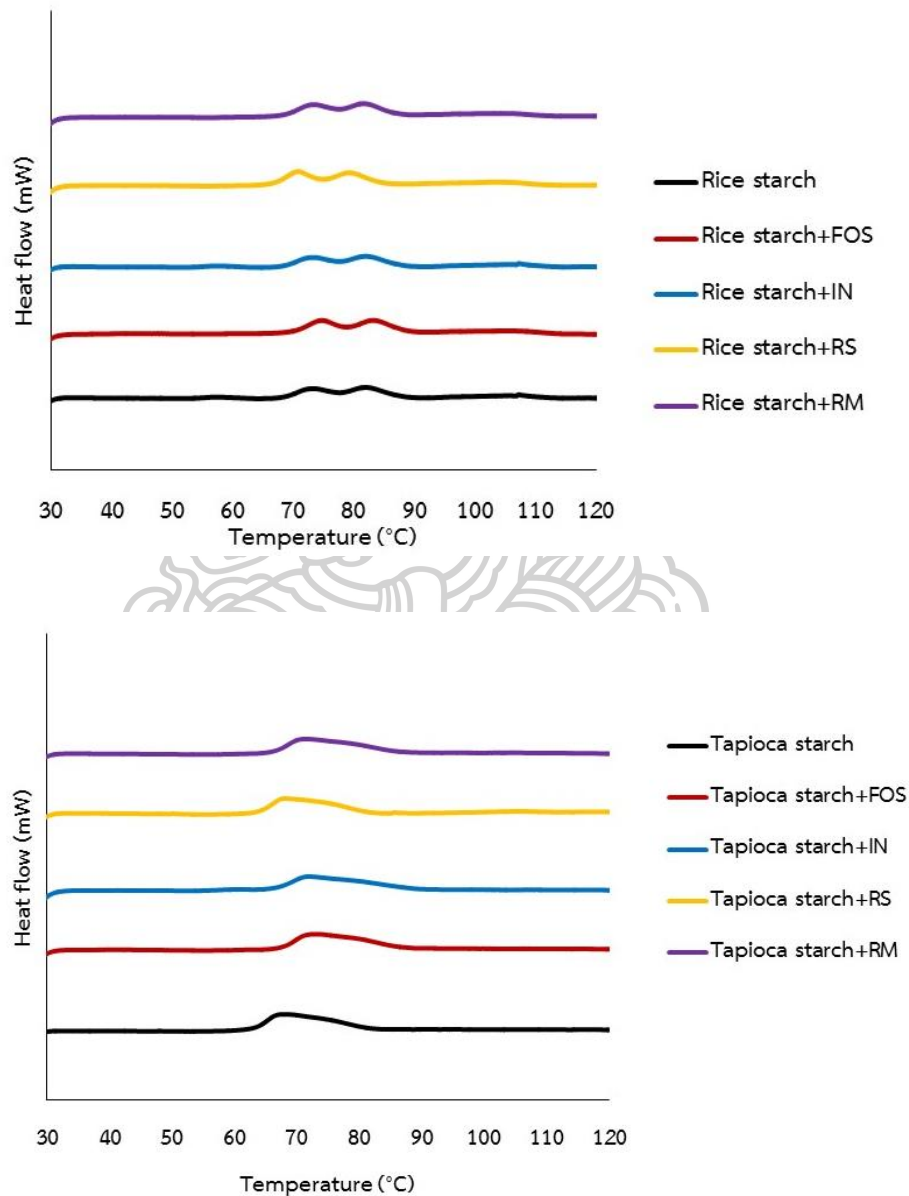
ค่าการคืนตัว (setback) แสดงถึงการคืนตัวของสตาร์ชเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งถ้ามีค่า setback สูง จะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีและมีแนวโน้มที่จะให้เจลสตาร์ชแข็งมากขึ้น (Beta and Corke, 2001) พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม IN, FOS และ RM แสดงค่า setback ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่เติม ซึ่งผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Witczak et al. (2014) ดังรายงานในขั้นต้น ในขณะที่สตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม RS แสดงค่า setback เพิ่มขึ้น

4.4.4 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (gelatinization)

จากนั้นทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง พบว่าค่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความร้อน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูงสุดเรียกว่า อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดเกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการเจลาตินในเซชัน (conclusion temperature, T_c) ผลแสดงดังตารางที่ 14 สตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติมโยอาหามีค่า T_o , T_p และ T_c ของสตาร์ชสูงกว่าสตาร์ชที่ไม่เติมโยอาหอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่สตาร์ชที่เติม FOS แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสตาร์ชสูงที่สุด ขณะที่สตาร์ชที่เติม RS ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสตาร์ช

การที่โยอาหามีผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินในเซชันสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาล สตาร์ช และน้ำ ว่าน้ำตาลและสตาร์ชจะเกิดการแข่งขันในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ โดยน้ำตาลมีสมบัติดูดความชื้นมากกว่าสตาร์ช (นิธิยา รัตนานนท์, 2545) น้ำตาลจึงสร้างพันธะกับน้ำได้ก่อนสตาร์ช ทำให้ปริมาณน้ำอิสระในระบบลดลง จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเจลาตินในเซชันสตาร์ช ยังมีรายงานของ Fabek and Goff (2015) ที่รายงานว่า การเติมไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ xanthan gum, guar gum, soluble flaxseed gum และ soy soluble polysaccharide ทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c ของการเกิดเจลลาตินในเซชันในสตาร์ชมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ไฮโดรคอลลอยด์จะตรึงโมเลกุลของน้ำไว้ไม่ให้จับกับสตาร์ช และแข่งขันกับสตาร์ชในการจับโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชจับกับน้ำได้น้อยลง และเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อน (enthalpy) ลดลง ซึ่ง FOS เป็นโพลิไกลูโคไซด์ที่มีสายโมเลกุลขนาดสั้น ในขณะที่ IN และ RM เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ FOS เข้าแทรกกระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและน้ำได้ดีกว่า (Gul et al., 2014) ขณะที่งานวิจัยของ Gelencsér et al. (2008) พบว่า RS ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน และเมื่อเติมลงในสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพดทำให้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวโพด

นอกจากนี้ความแปรปรวนของอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิที่จุดสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดทำใ้การเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและรูปร่างเม็ดสตาร์ช โดยอะไมโลสมีบทบาทสำคัญในการทำให้จุดหลอมเหลวของโครงสร้างแบบผลึกของเม็ดสตาร์ชต่ำลง และทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชลดลง (Bhat and Riar, 2016)



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

ตารางที่ 14 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลจากแป้งของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

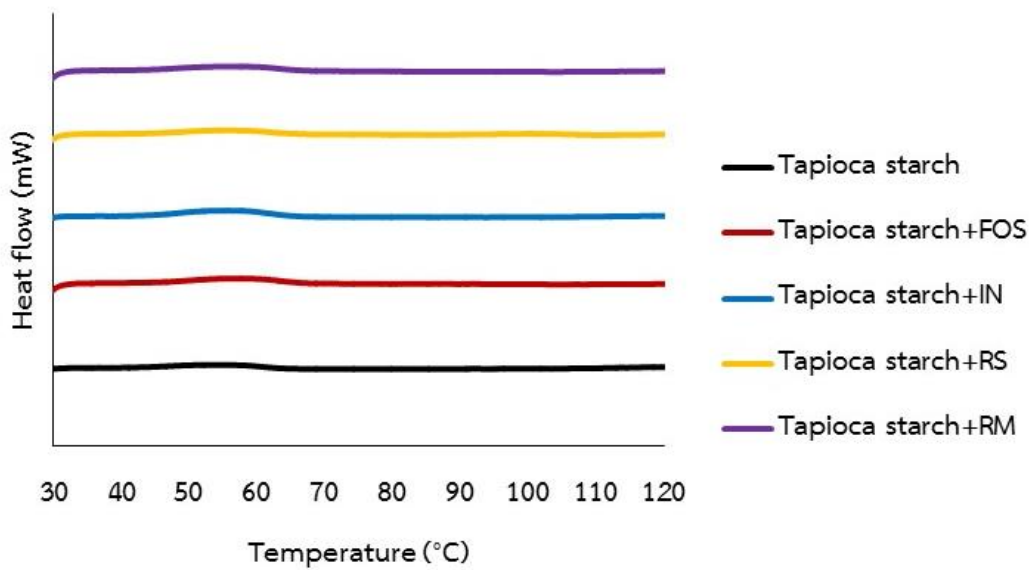
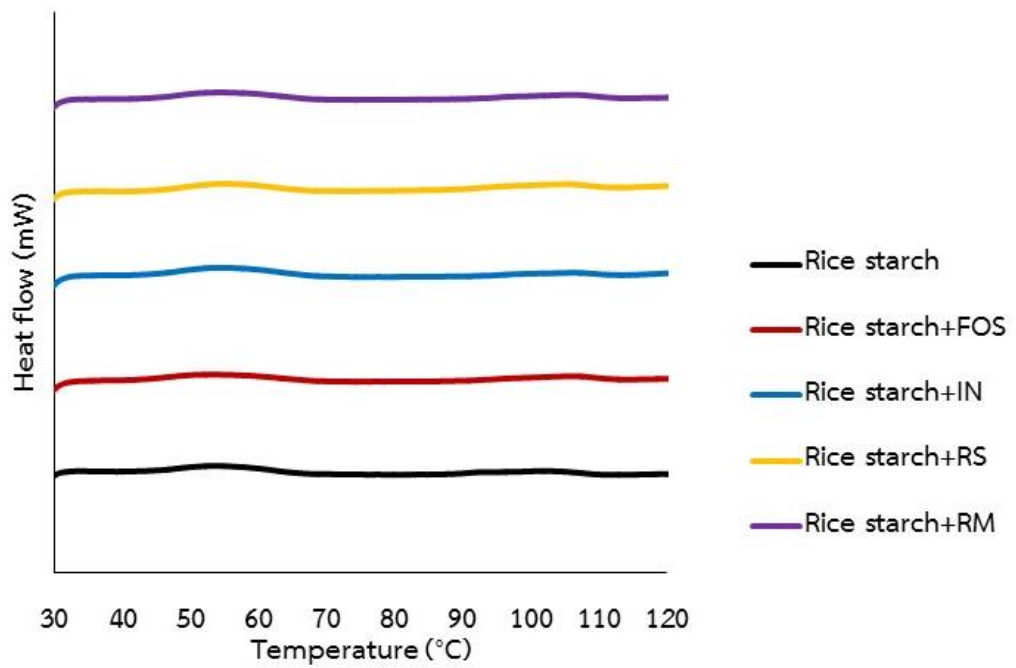
Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	T _o (°C)			T _p (°C)			T _c (°C)			Enthalpy (ΔH) (J/g)
		Control	FOS	IN	Control	FOS	IN	Control	FOS	IN	
Rice	Control (no fiber)	66.44±0.47 ^c	66.44±0.47 ^c	66.44±0.47 ^c	70.13±0.28 ^e	70.13±0.28 ^e	70.13±0.28 ^e	85.52±0.35 ^c	85.52±0.35 ^c	85.52±0.35 ^c	11.42±0.19 ^a
	FOS	77.40±0.73 ^a	77.40±0.73 ^a	77.40±0.73 ^a	82.83±0.31 ^a	82.83±0.31 ^a	82.83±0.31 ^a	89.89±0.11 ^a	89.89±0.11 ^a	89.89±0.11 ^a	9.18±0.07 ^b
	IN	68.84±0.20 ^b	68.84±0.20 ^b	68.84±0.20 ^b	81.65±0.55 ^c	81.65±0.55 ^c	81.65±0.55 ^c	89.57±0.36 ^a	89.57±0.36 ^a	89.57±0.36 ^a	8.03±0.12 ^d
	RS	67.18±0.46 ^c	67.18±0.46 ^c	67.18±0.46 ^c	70.77±0.12 ^d	70.77±0.12 ^d	70.77±0.12 ^d	87.14±0.41 ^b	87.14±0.41 ^b	87.14±0.41 ^b	8.85±0.10 ^c
Tapioca	Control (no fiber)	63.66±0.40 ^e	63.66±0.40 ^e	63.66±0.40 ^e	68.28±0.31 ^c	68.28±0.31 ^c	68.28±0.31 ^c	88.79±0.98 ^b	88.79±0.98 ^b	88.79±0.98 ^b	14.19±0.21 ^a
	FOS	68.21±0.05 ^a	68.21±0.05 ^a	68.21±0.05 ^a	72.84±0.18 ^a	72.84±0.18 ^a	72.84±0.18 ^a	90.75±0.64 ^a	90.75±0.64 ^a	90.75±0.64 ^a	10.51±0.11 ^{bc}
	IN	67.18±0.23 ^b	67.18±0.23 ^b	67.18±0.23 ^b	71.31±0.40 ^b	71.31±0.40 ^b	71.31±0.40 ^b	91.44±0.24 ^a	91.44±0.24 ^a	91.44±0.24 ^a	10.73±0.15 ^b
	RS	64.28±0.25 ^d	64.28±0.25 ^d	64.28±0.25 ^d	67.82±0.22 ^c	67.82±0.22 ^c	67.82±0.22 ^c	84.44±0.55 ^c	84.44±0.55 ^c	84.44±0.55 ^c	10.59±0.32 ^b
RM	Control (no fiber)	66.74±0.03 ^c	66.74±0.03 ^c	66.74±0.03 ^c	71.44±0.24 ^b	71.44±0.24 ^b	71.44±0.24 ^b	90.52±0.94 ^a	90.52±0.94 ^a	90.52±0.94 ^a	10.21±0.07 ^c
	RS	66.74±0.03 ^c	66.74±0.03 ^c	66.74±0.03 ^c	71.44±0.24 ^b	71.44±0.24 ^b	71.44±0.24 ^b	90.52±0.94 ^a	90.52±0.94 ^a	90.52±0.94 ^a	10.21±0.07 ^c

หมายเหตุ^{a,b,c...} ในแนวตั้งแสดงค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด (p<0.05)

4.4.5 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

ในระหว่างการเก็บรักษาความเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส อะไมโลสจะจับตัวกันใหม่แบบเกลียวม้วน (double helices) และอะไมโลเพคตินจะสร้างโครงสร้างผลึกอีกครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชที่ได้จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่สตาร์ช (Witczak et al., 2014) ผลแสดงดังตารางที่ 15 จะเห็นได้ว่า ค่า T_0 , T_p , T_c และพลังงานการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแสดงค่าลดลงจากการให้ความร้อนในการเกิดเจลลาทีนเซชัน ทำให้โครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแยกออกจากกัน โครงสร้างบางส่วนถูกทำลายไป เมื่อมาจับตัวกันใหม่ทำให้สายโซ่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจับกันได้อย่างไม่แข็งแรง เมื่อนำมาให้ความร้อนอีกครั้งจึงใช้พลังงานความร้อนและอุณหภูมิต่ำลงในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Chandanasree et al., 2016)

จากผลการทดลองในสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่า การเติม RS ทำให้ค่า T_0 และค่า T_p ของสตาร์ชสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ในสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่า การเติม FOS และ RS ทำให้ค่า T_0 และค่า T_p ของสตาร์ชสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) จะเห็นได้ว่าการเติม RS ทำให้สตาร์ชมีการเกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงขึ้นในการทำลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากการจับกันของอะไมโลสของ RS และอะไมโลสของสตาร์ชและน้ำ เนื่องจากการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชัน อะไมโลสของสตาร์ชและ RS เข้ามาจับตัวกันภายใต้ข้อจำกัดของปริมาณน้ำในระบบ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเปลี่ยนแปลงความร้อนในระบบ (Mir et al., 2013) ขณะที่ FOS อาจจะไปจับกับน้ำแข่งกับสตาร์ชในระบบ ทำให้การทำลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น (Gul et al., 2014)



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

ตารางที่ 15 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	Enthalpy (ΔH) (J/g)
Rice	Control (no fiber)	45.75±0.17 ^b	54.74±0.65 ^{ab}	68.94±0.46 ^c	5.42±0.16 ^a
	FOS	44.30±1.16 ^b	53.87±0.14 ^c	71.87±0.61 ^a	5.06±0.06 ^b
	IN	46.19±0.26 ^{ab}	54.65±0.44 ^{ab}	70.61±0.32 ^{ab}	4.98±0.13 ^b
	RS	47.27±0.32 ^a	55.35±0.20 ^a	66.46±1.36 ^d	4.51±0.17 ^c
	RM	45.28±0.27 ^{ab}	54.35±0.10 ^{bc}	70.08±1.00 ^{bc}	4.44±0.06 ^c
Tapioca	Control (no fiber)	45.44±0.53 ^c	55.65±0.81 ^b	65.30±0.18 ^b	3.59±0.10 ^b
	FOS	47.88±0.04 ^a	57.52±0.77 ^a	68.34±0.52 ^a	3.61±0.14 ^b
	IN	45.60±0.50 ^c	55.68±0.40 ^b	67.94±0.54 ^a	4.79±0.13 ^a
	RS	46.60±0.41 ^b	55.65±0.42 ^b	68.61±0.23 ^a	3.34±0.44 ^b
	RM	46.11±0.19 ^{bc}	55.34±0.20 ^b	68.28±0.41 ^a	3.38±0.19 ^b

หมายเหตุ ^{a,b,c,...} ในแนวตั้งแสดงค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด (p<0.05)

4.4.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture properties) ของเจลสตาร์ช

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็มและไม่เต็มโยอาหารที่ความเข้มข้น 15% และเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เต็มและไม่เต็มโยอาหารที่ความเข้มข้น 20% (ตารางที่ 16) แสดงค่าความแข็ง (hardness) และค่าความเกาะติดกัน (adhesiveness)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง (hardness) ของเจลสตาร์ช พบว่า โยอาหารมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช โดยทำให้เจลสตาร์ชมีความแข็งเพิ่มขึ้น ยกเว้น IN ที่ทำให้เจลสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าความแข็งลดลงจากเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่ไม่เต็มโยอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Volpini-Rapina et al. (2012) ที่พบว่าค่า hardness และค่า stickiness มีผลมาจาก IN เป็นผลมาจากสมบัติความมีขั้ว (hydrophilic) ของโยอาหารและน้ำ และความสามารถในการจับน้ำของสายโซ่สตาร์ชส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายอ่อนแอโดยปฏิสัมพันธ์ electrostatic ในขณะเดียวกันก็อาจจะยับยั้งอะไมโลสไม่ให้ไหลออกจากเม็ดสตาร์ช จึงทำให้สตาร์ชนุ่มขึ้น (Cui et al., 2014) แสดงให้เห็นว่าการใช้ IN ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าได้ สอดคล้องกับค่า final viscosity และค่า setback ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม IN เมื่อวิเคราะห์ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นของโยอาหาร RS แสดงค่าความแข็งสูงสุด เนื่องจาก RS เป็นโยอาหารที่มีอะไมโลสสูง จึงช่วยสตาร์ชในการจับน้ำที่มีอย่างจำกัดในระบบได้มากขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ RS ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจลสตาร์ชได้ สอดคล้องกับค่า final viscosity และค่า setback ของสตาร์ชที่เต็ม RS เช่นกัน

เมื่อพิจารณาค่าความเกาะติดผิววัสดุ (adhesiveness) ของเจลสตาร์ช พบว่า โยอาหารมีผลทำให้ค่าความเกาะติดผิววัสดุของเจลสตาร์ชเปลี่ยนไป โดยเจลสตาร์ชที่ IN, FOS และ RM มีค่า adhesiveness ลดลง ยกเว้น RS มีแนวโน้มทำให้ค่า adhesiveness สูงขึ้น เป็นผลจากการจับกันของอะไมโลสจากสตาร์ชและ RS ทำให้เกิดโครงสร้างอะไมโลสขนาดใหญ่ที่จับยึดกันอย่างหนาแน่น เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง (Mir et al., 2013) ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการดึงหัววัดออกมา แสดงให้เห็นว่าการใช้ RS ทำให้ต้องออกแรงกดเจลสตาร์ชมากขึ้น

ตารางที่ 16 ค่าทางเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	Hardness (g)	Adhesiveness (g.s)
Rice	Control (no fiber)	39.14±1.70 ^b	68.85±2.19 ^b
	FOS	40.12±1.68 ^b	62.76±2.85 ^c
	IN	37.45±2.30 ^c	61.85±3.64 ^c
	RS	45.28±1.98 ^a	71.16±2.85 ^a
	RM	39.05±1.59 ^b	61.09±3.56 ^c
Tapioca	Control (no fiber)	53.27±1.70 ^d	43.96±4.35 ^c
	FOS	58.71±1.41 ^b	37.11±2.77 ^e
	IN	56.25±1.96 ^c	53.57±3.64 ^a
	RS	66.56±2.49 ^a	48.37±3.44 ^b
	RM	59.59±1.87 ^b	40.37±2.80 ^d

หมายเหตุ^{a,b,c,...} ในแนวดิ่งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

4.4.7 ค่าสีของเจลสตาร์ช

การวิเคราะห์ค่าสีของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมใยอาหาร แสดงดังตารางที่ 17 พบว่า ใยอาหารที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในเจลสตาร์ช

เมื่อวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) พบว่า เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม FOS, IN และ RM ทำให้ค่าความสว่างของสตาร์ชข้าวเจ้าลดลง แต่ช่วยเพิ่มความสว่างให้สตาร์ชมันสำปะหลัง ทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีความขาวมากขึ้น ในขณะที่ RS ช่วยเพิ่มความสว่างให้ทั้งสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง ทำให้สตาร์ชมีลักษณะขาวขึ้น วิเคราะห์ค่าสีแดง (a^*) พบว่า เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมใยอาหารทำให้สตาร์ชมีค่าสีเขียว (-) เพิ่มขึ้น แต่ช่วยเพิ่มค่าสีแดง (+) ในสตาร์ชมันสำปะหลังมากขึ้น โดยเฉพาะใน RS วิเคราะห์ค่าสีเหลือง (b^*) พบว่า เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมใยอาหารทำให้สตาร์ชมีค่าสีเหลือง (+) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะใน RS

การที่ใยอาหารส่งผลให้ค่าสีในเจลสตาร์ชมีความแตกต่างกัน เนื่องจากรงควัตถุในใยอาหารแต่ละชนิดให้สีต่างกัน เมื่อเติมลงในสตาร์ชจึงให้สีตามสีของใยอาหาร (Popov-Raljić et al., 2013) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Aigster et al. (2011) ที่รายงานว่ากราโนล่าบาร์ที่เติม RS ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความขาวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะเป็นไปได้ว่าใยอาหารแต่ละชนิดมีสีแตกต่างกัน เมื่อให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชทำให้เกิดเจลาตินไนเซชันและเมื่อเย็นตัวลงเกิดรีโทรเกรเดชันแล้วมีการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลสตาร์ชเป็นร่างแหสามมิติที่มีช่องว่างหรือรูพรุนซึ่งอุ้มน้ำหรือของเหลวไว้ภายใน ซึ่งลักษณะของการจับตัวกันของโมเลกุลสตาร์ชในโครงสร้างเจลจะมีผลต่อสีเจลได้ เมื่อเติมใยอาหารลงในสตาร์ช ใยอาหารซึ่งมีรงควัตถุที่อยู่ภายในอาจจะแทรกอยู่ในโครงสร้างนี้ของโมเลกุลสตาร์ชและทำให้เจลสตาร์ชมีสีแตกต่างกันได้ (Bhat and Riar, 2016)

ตารางที่ 17 ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

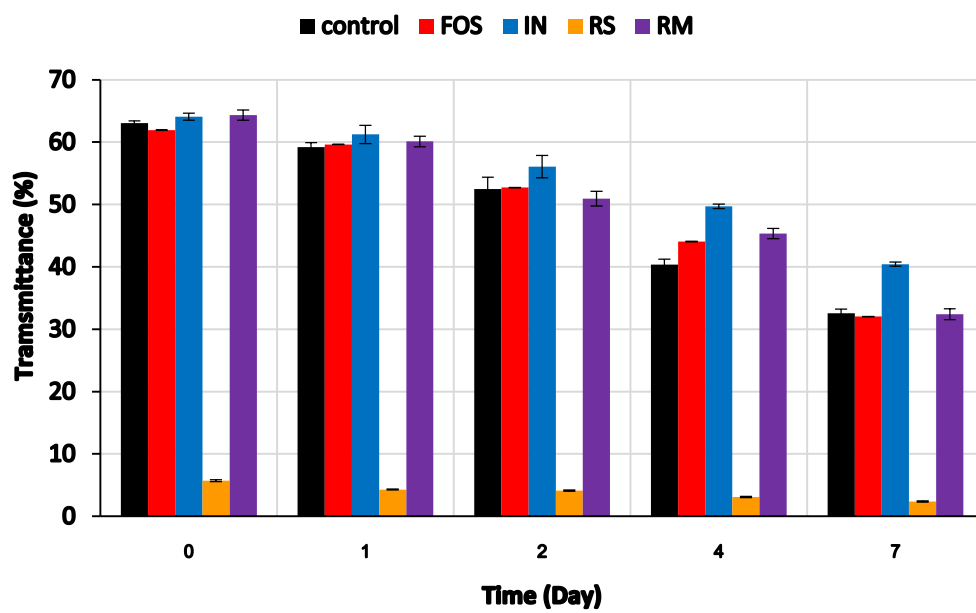
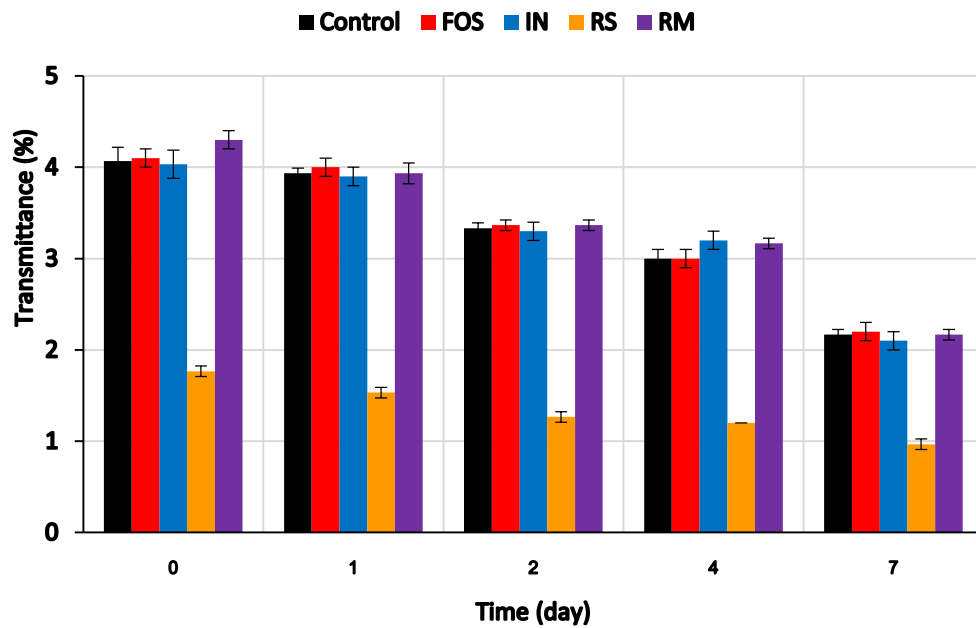
Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	Color		
		L*	a*	b*
Rice	Control (no fiber)	48.22±0.68 ^b	-1.58 ±0.01 ^b	-8.46±0.41 ^c
	FOS	46.46±0.02 ^c	-1.78±0.02 ^c	-8.14±0.03 ^c
	IN	45.84±0.60 ^c	-1.83±0.01 ^d	-9.21±0.19 ^d
	RS	66.42±0.04 ^a	-1.32±0.03 ^a	-1.39±0.05 ^a
	RM	43.43±0.27 ^d	-2.35±0.05 ^e	-7.49±0.34 ^b
Tapioca	Control (no fiber)	38.49±0.22 ^e	-1.58±0.04 ^c	-6.75±0.19 ^e
	FOS	46.33±0.28 ^c	-1.51±0.02 ^b	-5.54±0.09 ^c
	IN	45.85±0.26 ^d	-1.53±0.04 ^{bc}	-5.83±0.08 ^d
	RS	68.48±0.29 ^a	-1.22±0.01 ^a	-0.26±0.04 ^a
	RM	52.64±0.26 ^b	-1.76±0.01 ^d	-3.57±0.22 ^b

หมายเหตุ ^{a,b,c,...} ในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

4.4.8 ความใส (clarity) ของสตาร์ชสุก

ความใสของสตาร์ชสุกเกิดจากการที่เม็ดสตาร์ชเกิดเจลาทีไนเซชันและถูกแรงกระทำจากการกวนที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินกระจายตัวออกมา ผลแสดงดังภาพที่ 18 ซึ่งพบว่า เมื่อเก็บรักษาสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงในระยะเวลาที่นานขึ้น สตาร์ชมีแนวโน้มแสดงค่าการส่องผ่านของแสง (%transmittance) ต่ำลง แสดงว่าระยะเวลาที่มีผลทำให้สตาร์ชมีความใสลดลง เมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชในการเติมเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ พบว่าใยอาหารไม่มีผลต่อความใสของสตาร์ช ยกเว้นสตาร์ชที่เติม RS ที่ทำให้ค่าการส่องผ่านของแสง (%transmittance) ของสตาร์ชต่ำลง แสดงว่าสตาร์ชที่เติม RS มีความใสน้อยที่สุดเนื่องจากสตาร์ชที่เติม RS มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าใยอาหารชนิดอื่นๆ ทำให้จัดเป็นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อน อะไมโลสจะกระจายตัวออกมาและละลายน้ำ เมื่อเย็นตัวลง โมเลกุลอะไมโลสกลับมารวมกันเกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง แต่อะไมโลสบางส่วนยังละลายน้ำอยู่สตาร์ชจึงมีลักษณะขุ่นขึ้น (Gul et al., 2014, Lim et al., 2002) และเมื่อเก็บระยะเวลาที่นานขึ้น สตาร์ชทุกตัวอย่างอาจแสดงแนวโน้มความขุ่นมากขึ้น





ภาพที่ 18 ความใสของสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาพบน) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาพล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมโยเกิร์ต (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

4.4.9 ความคงตัวต่อการแช่แข็งละลาย (freeze-thaw stability) ของเจลสตาร์ช

สมบัติการแช่แข็งละลาย มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารหลายชนิด ผลแสดงดังตารางที่ 18 พบว่า .ใยอาหารมีผลทำให้สตาร์ชข้าวเจ้าเกิดการ syneresis สูงขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ Lutfi et al. (2017) ที่พบว่า การเติมกัมส่งผลทำให้การแช่แข็งละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากกัมมีสมบัติ hydrophilic ทำให้ดูดซับน้ำได้ดี เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อน อะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะเกิดการพองตัวและกระจายออกมา กัมจะแทรกระหว่างอะไมโลสและน้ำ ทำให้อะไมโลสจับกับน้ำได้น้อยลง ทำให้สตาร์ชพองตัวได้น้อยลง เมื่อนำมาเก็บที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ภายในโมเลกุล อะไมโลสจะรวมตัวกันเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงโดยมีกัมแทรกอยู่ภายใน เมื่อเก็บนานขึ้นทำให้อะไมโลสยิ่งจับกันแน่นขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในไหลออกมา (Pongsawatmanit and Srijunthongsiri, 2008) ซึ่ง IN และ RM มีโครงสร้างขนาดใหญ่และเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นขั้วสูง (hydrophilic) ทำให้มีการอุ้มน้ำได้ดี จึงทำให้สตาร์ชเกิด syneresis สูง (Ohkuma and Wakabayashi, 2008); (Phelps, 1965)



ตารางที่ 18 การเกิด syneresis จากการแช่แข็งละลายของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (15%) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (20%) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	Syneresis (%)				
		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Rice	Control (no fiber)	0.02±0.01 ^{a, C}	0.02±0.00 ^{c, C}	0.03±0.00 ^{c, C}	0.06±0.02 ^{c, B}	0.10±0.02 ^{d, A}
	FOS	0.02±0.00 ^{a, C}	0.06±0.00 ^{a, B}	0.08±0.01 ^{a, B}	0.09±0.02 ^{b, B}	0.19±0.04 ^{c, A}
	IN	0.01±0.01 ^{a, D}	0.08±0.02 ^{b, C}	0.09±0.02 ^{a, BC}	0.11±0.04 ^{b, B}	0.22±0.02 ^{b, A}
	RS	0.02±0.03 ^{a, D}	0.04±0.01 ^{b, D}	0.05±0.02 ^{a, C}	0.08±0.02 ^{a, B}	0.15±0.02 ^{c, A}
	RM	0.02±0.00 ^{a, D}	0.04±0.02 ^{b, C}	0.09±0.03 ^{b, C}	0.15±0.04 ^{b, B}	0.24±0.04 ^{a, A}
Tapioca	Control (no fiber)	0.01±0.00 ^{a, B}	0.01±0.00 ^{a, B}	0.01±0.00 ^{c, B}	0.01±0.00 ^{b, B}	0.03±0.01 ^{a, A}
	FOS	0.01±0.00 ^{a, B}	0.01±0.00 ^{a, B}	0.01±0.00 ^{a, A}	0.02±0.01 ^{a, A}	0.02±0.01 ^{a, A}
	IN	0.01±0.00 ^{a, C}	0.01±0.00 ^{a, AB}	0.02±0.00 ^{c, C}	0.02±0.01 ^{a, AB}	0.02±0.00 ^{a, A}
	RS	0.01±0.00 ^{a, C}	0.01±0.00 ^{a, C}	0.01±0.00 ^{b, BC}	0.02±0.00 ^{a, AB}	0.02±0.01 ^{a, A}
	RM	0.01±0.01 ^{a, B}	0.01±0.00 ^{a, B}	0.02±0.01 ^{c, B}	0.02±0.00 ^{a, A}	0.02±0.01 ^{a, A}

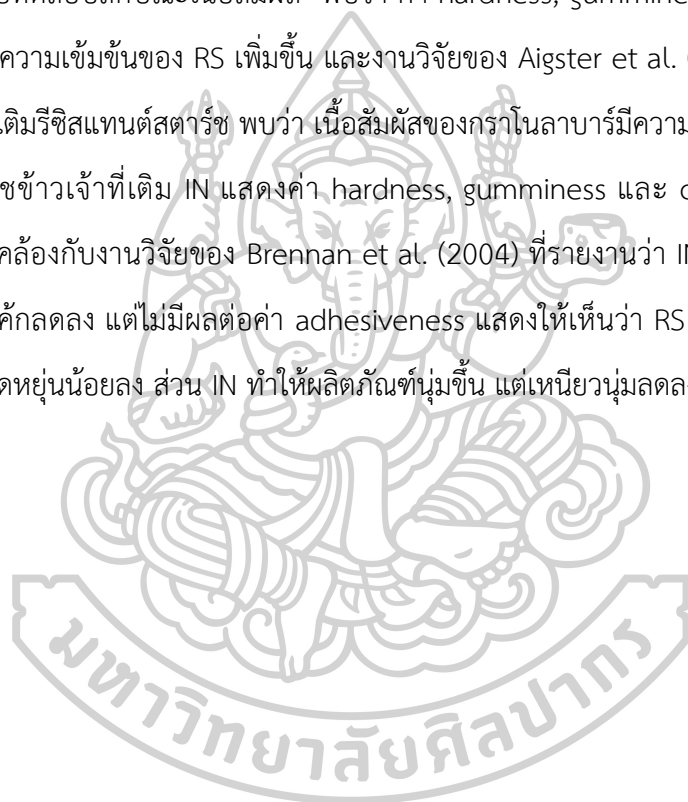
หมายเหตุ^{a, b, c, ...} แสดงความแตกต่างในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

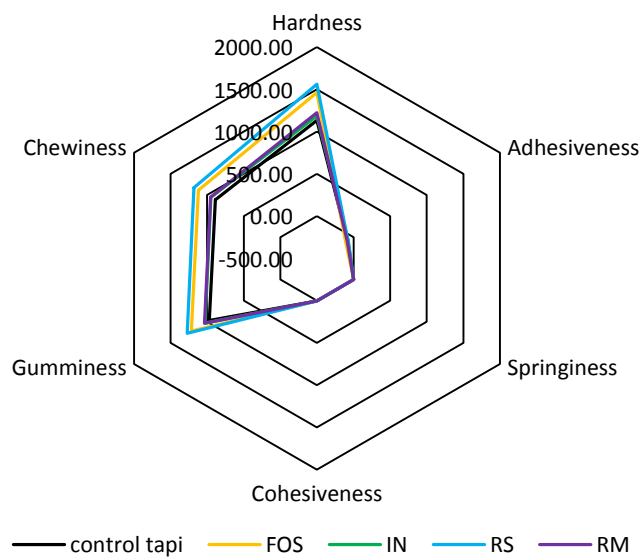
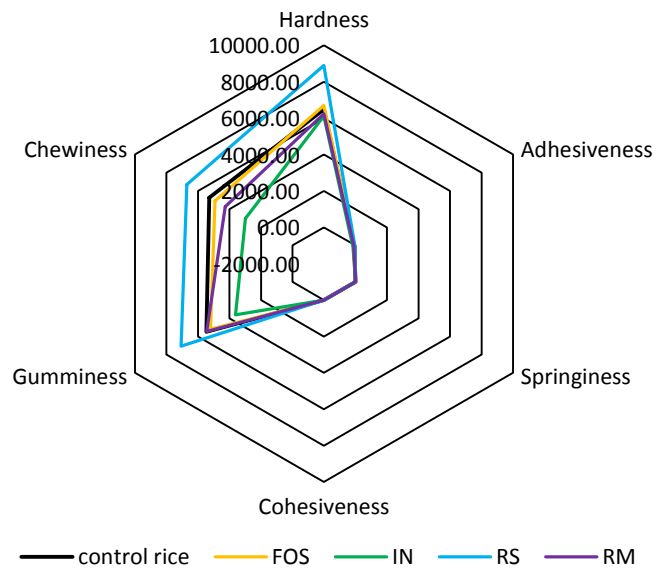
^{A, B, C, ...} แสดงความแตกต่างในแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด ($p < 0.05$)

4.5 ผลของใยอาหารต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง

4.5.1 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

ผลการทดสอบคุณภาพของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นสูตรต้นแบบและขนมชั้นสูตรที่เติมเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ แสดงดังภาพที่ 19 พบว่า ขนมชั้นที่เติม RS แสดงค่า hardness, gumminess และ chewiness สูงกว่าสูตรอื่นๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu and Shin (2015) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมรีซีสแทนต์สตาร์ชที่ความเข้มข้น 10%, 20% และ 30% เมื่อทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่า ค่า hardness, gumminess และ chewiness จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ RS เพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Aigster et al. (2011) ที่ทำการศึกษากราโนลาบาร์ที่เติมรีซีสแทนต์สตาร์ช พบว่า เนื้อสัมผัสของกราโนลาบาร์มีความแข็งเพิ่มขึ้น ขณะที่ขนมชั้นสูตรสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม IN แสดงค่า hardness, gumminess และ chewiness ต่ำกว่าสูตรต้นแบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Brennan et al. (2004) ที่รายงานว่า IN ส่งผลให้ค่า firmness ในผลิตภัณฑ์เค้กลดลง แต่ไม่มีผลต่อค่า adhesiveness แสดงให้เห็นว่า RS ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งขึ้น และยืดหยุ่นน้อยลง ส่วน IN ทำให้ผลิตภัณฑ์นุ่มขึ้น แต่เหนียวนุ่มลดลง





ภาพที่ 19 คุณภาพทางเนื้อสัมผัสของขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้า (บน), ขนมชั้นจากสตาร์ชมันสำปะหลัง (ล่าง) เมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

ตารางที่ 19 ค่าทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	Hardness (g)					Adhesiveness (g.sec)					Springiness					Cohesiveness					Gumminess (g)									
		Control (no fiber)	FOS	IN	RS	RM	Control (no fiber)	FOS	IN	RS	RM	Control (no fiber)	FOS	IN	RS	RM	Control (no fiber)	FOS	IN	RS	RM	Control (no fiber)	FOS	IN	RS	RM					
Rice	Control (no fiber)	6488.31±106.10 ^c	6703.76±86.67 ^b	6122.02±205.37 ^e	8892.48±91.24 ^a	6268.69±213.84 ^d	-64.94±9.74 ^{ab}	-59.40±7.85 ^{ab}	-172.34±14.02 ^c	-41.23±4.39 ^a	-55.24±8.58 ^a	0.96±0.01 ^a	0.95±0.02 ^a	0.82±0.04 ^b	0.95±0.03 ^a	0.78±0.22 ^b	0.84±0.01 ^b	0.77±0.05 ^c	0.59±0.02 ^d	0.80±0.01 ^c	0.88±0.05 ^a	0.86±0.01 ^b	0.83±0.01 ^d	0.87±0.01 ^a	0.82±0.01 ^e	0.85±0.01 ^c	5471.72±123.42 ^b	5194.41±328.43 ^c	3614.61±187.07 ^d	7075.58±69.75 ^a	5495.37±478.56 ^b
Tapioca	Control (no fiber)	1134.85±20.26 ^e	1462.63±89.72 ^b	1188.66±66.27 ^{cd}	1571.99±52.02 ^a	1233.43±55.72 ^c	-82.36±8.17 ^{bc}	-106.71±6.36 ^d	-71.13±3.60 ^a	-78.15±9.70 ^b	-87.57±6.45 ^c	0.92±0.01 ^c	0.92±0.00 ^c	0.92±0.01 ^{ab}	0.93±0.01 ^a	0.92±0.01 ^c	0.86±0.01 ^b	0.83±0.01 ^d	0.87±0.01 ^a	0.88±0.05 ^a	0.86±0.01 ^b	0.83±0.01 ^d	0.87±0.01 ^a	0.82±0.01 ^e	0.85±0.01 ^c	972.28±16.34 ^d	1215.69±63.17 ^b	1031.78±60.97 ^c	1279.54±43.02 ^a	1045.05±49.58 ^c	

หมายเหตุ^{a,b,c,...} ในแนวตั้งแสดงค่าเฉลี่ยทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด (p<0.05)

4.5.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น

การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-point hedonic scale ซึ่งเป็นการประเมินโดยการให้คะแนนความชอบตามคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่เติมเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ และไม่เติมเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ โดยแบ่งเป็น 2 แบบทดสอบ ตามชนิดของสตาร์ช คือ สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ช มันสำปะหลัง แต่ละแบบทดสอบมีสูตรที่ทำการทดสอบทั้งหมด 5 สูตร ได้แก่ สูตรที่มีอัตราส่วนสตาร์ชต่อเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ คือ FOS, IN, RS และ RM เป็น 1 : 0.3 และสูตรที่ไม่เติมใยอาหารที่ละลายน้ำ เป็น 1 : 0 จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 20 พบว่า คุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ การลอกชั้น ความอ่อน-แข็ง กลิ่นขณะเคี้ยวรสชาติ ของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม FOS, IN และ RM ได้คะแนนความชอบไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่เติมใยอาหารที่ละลายน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่เติม IN ให้คุณลักษณะด้านสีที่ดีกว่า และคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม FOS, IN และ RS ได้คะแนนความชอบสูงกว่าผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่เติมใยอาหารที่ละลายน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม RM ให้คุณลักษณะด้านสีที่ดีกว่า ขณะที่ผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังที่เติม RS ได้คะแนนความชอบในทุกด้านน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชที่ไม่เติมใยอาหารที่ละลายน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช เนื่องจากสตาร์ชที่เติม RS มีค่า hardness ที่สูงกว่าสตาร์ชที่เติมใยอาหารชนิดอื่นๆ ทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมชั้นมีลักษณะแข็งกว่าสูตรอื่น เป็นไปได้ว่าผู้ทดสอบอาจจะไม่ชอบขนมชั้นที่มีลักษณะแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Sanz et al. (2008) ซึ่งได้ทดสอบความชอบในผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่เติมรีซิสแทนต์สตาร์ชที่ระดับแตกต่างกัน คือ 0%, 10% และ 20% ตามลำดับ พบว่า การยอมรับผลิตภัณฑ์จะลดลง เมื่อเติมรีซิสแทนต์สตาร์ชมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม FOS และ ผลิตภัณฑ์ขนมชั้นที่ได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม IN ได้คะแนนความชอบสูงที่สุดในแต่ละการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Volpini-Rapina et al. (2012) ที่ได้ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสในขนมเค้กที่เติม IN และ IN ผสม FOS เปรียบเทียบกับสูตรต้นแบบและสูตรทางการค้า พบว่า เค้กสูตรที่เติม IN และ IN ผสม FOS ได้คะแนนในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นหอม และกลิ่นรสไม่แตกต่างจากสูตรต้นแบบและสูตรทางการค้า แต่ได้คะแนนด้าน

ลักษณะเนื้อสัมผัสน้อยกว่าสูตรต้นแบบและสูตรทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์ พบว่า ได้การยอมรับผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างจากสูตรต้นแบบและสูตรทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าการเติม IN และ FOS สามารถยอมรับผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งอาจจะส่งผลที่ดีในเชิงพาณิชย์



ตารางที่ 20 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมปังขึ้นจากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังเมื่อผสมและไม่ผสมใยอาหาร (30% ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง)

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	ลักษณะปรากฏ	สี	การลอกชั้น	ความอ่อน-แข็ง	ความเหนียว	กลิ่นขณะเคี้ยว	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
Rice	Control (no fiber)	7.06±1.36 ^a	6.96±1.44 ^a	5.94±1.48 ^a	5.48±1.84 ^a	5.48±1.57 ^a	6.36±1.56 ^a	6.36±1.40 ^a	6.52±1.37 ^a
	FOS	6.90±1.48 ^a	6.58±1.79 ^{ab}	5.48±1.57 ^{ab}	5.68±1.70 ^a	5.46±1.61 ^a	6.24±1.52 ^a	6.34±1.27 ^a	6.80±1.20 ^a
	IN	6.96±1.44 ^a	6.64±1.54 ^b	5.70±1.78 ^a	5.28±1.40 ^{ab}	5.14±1.62 ^{ab}	6.22±1.40 ^a	6.18±1.34 ^a	6.36±1.34 ^a
	RS	6.64±1.65 ^a	6.16±2.02 ^{ab}	4.96±1.68 ^b	4.70±1.78 ^b	4.62±1.64 ^b	5.30±1.88 ^b	5.30±1.72 ^b	5.32±1.63 ^b
	RM	7.20±1.40 ^a	7.08±1.71 ^a	5.52±1.63 ^{ab}	5.42±1.73 ^a	5.24±1.45 ^{ab}	5.74±1.61 ^{ab}	5.88±1.51 ^a	6.20±1.60 ^a
Tapioca	Control (no fiber)	6.34±1.41 ^b	6.46±1.51 ^{bc}	6.84±1.43 ^{ab}	7.12±1.19 ^a	6.72±1.58 ^a	6.72±1.40 ^a	6.76±1.19 ^{ab}	6.66±0.98 ^b
	FOS	6.92±1.37 ^a	6.90±1.34 ^{ab}	7.02±1.25 ^a	6.64±1.51 ^{ab}	6.46±1.43 ^a	6.24±1.48 ^{ab}	6.64±1.40 ^{ab}	6.98±1.12 ^{ab}
	IN	6.94±1.38 ^a	6.76±1.41 ^{abc}	6.34±1.49 ^b	6.52±1.54 ^b	6.44±1.67 ^a	6.60±1.65 ^a	7.16±1.43 ^a	7.38±1.54 ^a
	RS	6.10±1.53 ^a	6.20±1.50 ^c	5.64±1.66 ^c	6.38±1.28 ^b	6.64±1.37 ^a	5.64±1.48 ^b	5.84±1.61 ^c	5.92±1.45 ^c
	RM	7.06±1.32 ^a	7.12±1.15 ^a	6.38±1.82 ^{ab}	6.68±1.30 ^{ab}	6.70±1.39 ^a	6.20±1.56 ^{ab}	6.52±1.40 ^b	7.08±1.12 ^{ab}

หมายเหตุ ^{a,b,c}... ในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด (p<0.05) ; ผู้การทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์

ขนมปังจำนวน 50 คน

สรุป

สตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง และมีองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน และอื่นๆ ในปริมาณน้อย และยังพบว่าสตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลสสูงมาก ส่วนใยอาหารเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตซึ่งพบว่ามีส่วนประกอบของโปรตีน ไขมัน และอื่นๆ ในปริมาณที่ต่ำมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เมื่อเติมใยอาหารลงในสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังสามารถทำให้สตาร์ชเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพไปจากเดิม โดยใยอาหารทั้ง 4 ชนิดทำให้สมบัติการอุ้มน้ำและการพองตัวของสตาร์ชลดลง ทำให้เจลสตาร์ชเกิด syneresis สูงขึ้น และทำให้สตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันสูงขึ้นแต่ใช้พลังงานในการเกิดเจลที่ในเซชันลดลง ในขณะที่อินนูลิน ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ และรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทรินจะช่วยเพิ่มการละลายน้ำและทำให้ค่าสีของเจลสตาร์ชลดลง ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ รีซิสแทนต์สตาร์ชและรีซิสแทนต์มอลโตเด็กซ์ทรินส่งผลให้สตาร์ชมีพฤติกรรมการให้ความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้อินนูลินยังมีผลทำให้ความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าลดลงและเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้ามีความแข็งน้อยลง ในขณะที่การเติมรีซิสแทนต์สตาร์ชทำให้ความหนืดของสตาร์ชเพิ่มขึ้นและสตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงขึ้น ทำให้เจลสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น สีของเจลสตาร์ชขาวขึ้นและมีความขุ่นมากขึ้น ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ส่งผลให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีพลังงานในการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง นอกจากนี้การเติมใยอาหารยังมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมชั้น โดยเฉพาะขนมชั้นจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีการเติมอินนูลินได้คะแนนการยอมรับจากผู้ชิมมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. การนำใยอาหารไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ควรเลือกจากความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์แต่ ละชนิดที่นำไปประยุกต์ใช้
2. อาจใช้ใยอาหารหลายชนิดรวมกันในการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชหรือผลิตภัณฑ์จาก สตาร์ช ซึ่งควรจะต้องทำการวิจัยในขั้นต่อไป



ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC(2000)

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2-3 กรัม ใส่ถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ผ่านการอบแห้ง (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน)
2. นำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
3. นำถ้วยอลูมิเนียมออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังจากตัวอย่างเย็นตัวลง
5. คำนวณ % ความชื้น

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

หรือ

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

$$\% \text{ ของแข็งทั้งหมด} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน โดยวิธี Kjeldahl ตามวิธี AOAC(2000)

เตรียมตัวอย่าง (preparation)

1. ชั่งตัวอย่าง 1.0-1.5 กรัม ใส่หลอด tube (8 หลอด; 2 หลอด เป็น control, 6 หลอด ใส่ตัวอย่าง)
2. ชั่ง anhydrous CuSO_4 0.1 กรัม และ anhydrous Na_2SO_4 2.0 กรัม ใส่หลอด tube
3. เติม conc. H_2SO_4 25 มิลลิลิตร ใส่หลอด tube (ในตู้ดูดควัน)
4. เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร (เฉพาะ blank)

ขั้นตอนการย่อย (digestion)

1. ทำการย่อยโดยใช้ความร้อน (preheat) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
2. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 380 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายสีเขียวใส
3. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

ขั้นตอนการกลั่น (distillation)

1. ตั้งโปรแกรมกลั่นล่าง จากนั้นตั้งโปรแกรมสำหรับตัวอย่าง
2. ใส่กรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 30 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. หยด methyl red 2-3 หยด
4. ตั้ง tube ในที่จับยึด กดปุ่ม feed ให้ NaOH ร้อยละ 50 ไหลเข้า tube ปริมาณ 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 7 วินาที และกด run
5. ปลอ่ยให้เครื่องกลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

ขั้นตอนการไตเตรท (titration)

1. นำสารละลายไปไตเตรทกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.01 โมล จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรที่ไตเตรท
2. คำนวณ % โปรตีน

วิธีคำนวณ

$$\% N = \frac{\text{ml HCl} \times [\text{HCl}] \times 14.007 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (mg)}}$$

น้ำหนักตัวอย่าง (mg)

$$\text{ml HCl} = \text{ปริมาณ HCl ที่ไตเตรทได้} - \text{ปริมาณ blank ที่ไตเตรทได้}$$

$$\% \text{ โปรตีน} = \%N \times \text{conversion factor; (conversion factor} = 6.25)$$

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน โดยวิธี Soxhlet ตามวิธี AOAC(2000)

ไขมันจะละลายใน solvent ที่นิยม คือ petroleum ether, hexane

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2-3 กรัม (dry basis) (A) ใส่ใน thimble (ควรใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. ชั่งน้ำหนักถ้วยสกัดไขมัน และจดน้ำหนักที่แน่นอน
3. เปิดป้อนให้ได้อุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส ประกอบชุดสกัดไขมัน และใส่ thimble ให้แน่น
4. เติม solvent ลงในถ้วยสกัดไขมันประมาณ 50 มิลลิลิตร/ถ้วย
5. นำถ้วยสกัดไขมันมาใส่ในเครื่องสกัดไขมัน และตั้งโปรแกรมสกัดไขมัน ใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง ขึ้นกับปริมาณไขมันในตัวอย่าง
6. เมื่อสกัดออกหมดแล้ว นำ thimble ออก แล้วให้ความร้อนต่อไป solvent จะถูกควบแน่นเก็บใน Soxhlet ซึ่งสามารถเอา solvent ไปใช้ต่อได้
7. ภายในถ้วยสกัดไขมันจะเป็นคราบไขมันเหลืออยู่ ให้นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้นจนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอน (B)
8. คำนวณหา % ไขมัน

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ ไขมัน} = \frac{(B - A) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2000)

1. เตา crucible ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2-3 กรัม ให้ทราบน้ำหนักคงที่แน่นอนใส่ใน crucible แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. นำเข้าเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
5. ชั่งน้ำหนัก เถ้า + crucible
6. คำนวณ % เถ้า

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ เถ้า} = \frac{[(\text{น้ำหนัก เถ้า} + \text{crucible}) - \text{น้ำหนัก crucible}]}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$$

ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ตามวิธี AOAC (2000)

คำนวณจากสูตร

$$\% \text{ คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (dry basis)} = 100 - (\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เถ้า})$$

$$\% \text{ คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (wet basis)} = 100 - (\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เถ้า} + \text{ความชื้น})$$

ก.6 การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ตามวิธี Juliano (1971)

การเตรียมสาร

สารละลายไอโอดีน

ละลายไอโอดีน 0.2000 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0000 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรเป็น 100 ml เก็บในขวดสีชา

สารละลายมาตรฐานโพเทโตอะไมโลส

ชั่งโพเทโตอะไมโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม ใส่ในขวดแก้วปริมาตรขนาด 100 ml เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95% โดยปริมาตร 1 ml เขย่าเบา ๆ โดยระวังอย่าให้แบ่งเกาะตามผนังขวด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จำนวน 9 ml ตั้งทิ้งไว้ 15 - 24 ชั่วโมง แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

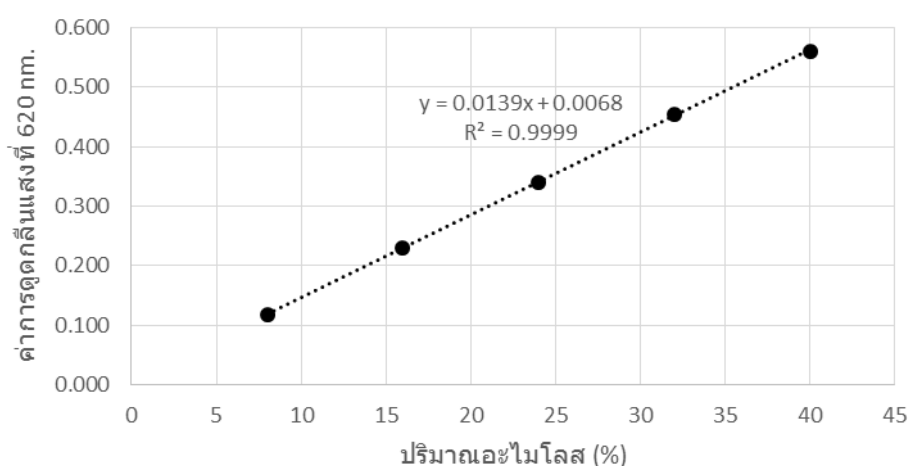
การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

ชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ใส่ในขวดแก้วปริมาตร ขนาด 100 ml เอทิลแอลกอฮอล์ 95% โดยปริมาตร 1 ml เขย่าเบา ๆ โดยระวังอย่าให้แบ่งเกาะตามผนังขวด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จำนวน 9 ml ตั้งทิ้งไว้ 15 - 24 ชั่วโมง แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. ใช้ปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอดีน ใส่ในขวดแก้วปริมาตรขนาด 100 ml 5 ใบ ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 ml สารละลายดังกล่าวจะเทียบเท่ากับโพแทสเซียมไอโอดีน 8 16 24 32 และ 40 % ของแป้ง
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 ml เติมสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ml แล้วเติมสารละลายไอโอดีน 2 ml และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
3. ใช้ปิเปตดูดสารละลายตัวอย่าง 5 ml ใส่ลงในขวดแก้วปริมาตรขนาด 100 ml เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 ml เติมสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 1 ml แล้วเติมสารละลายไอโอดีน 2 ml และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ทำ blank เช่นเดียวกัน แต่ไม่ใส่สารละลายตัวอย่าง
4. ใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน สารละลายตัวอย่างและ blank ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าของ blank เป็น 0 เขียนกราฟมาตรฐาน ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้กับปริมาณโพแทสเซียมไอโอดีน (%) นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างไปหาปริมาณโพแทสเซียมไอโอดีนจากกราฟมาตรฐาน

กราฟมาตรฐานของโพแทสเซียมไอโอดีน





สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอดีน



ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางกายภาพ

ข.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมด้านความหนืดของแป้ง

วัดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความหนืดของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA ตามวิธีการของ Rapid Viscosity Analyzer (RVA) (Newport Scientific, 1998)

Example	Moisture (%)
Tapioca starch	9.30±0.15 ^c
Rice starch	9.71±0.20 ^b
FOS	3.31±0.04 ^e
IN	4.03±0.02 ^d
RS	10.51±0.18 ^a
RM	1.55±0.16 ^f

วิธีการวิเคราะห์

- นำตัวอย่างสตาร์ชไปหาความชื้นตามวิธี AOAC (2000) ก่อนการวิเคราะห์ ดังตาราง
- เตรียมตัวอย่างตามวิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA โดยใช้ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 8% และสตาร์ชข้าวเจ้าที่ความเข้มข้น 12% และเติมใยอาหาร คือ FOS, IN, RS และ RM ที่ความเข้มข้น 30% ของสตาร์ช รวมเข้าด้วยกัน โดยเติมน้ำปริมาณ 25 ml ตามการคำนวณ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ปริมาณสตาร์ชในตัวอย่าง

สตาร์ชมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง (สตาร์ช+น้ำ) 100 กรัม จะมีสตาร์ช (น้ำหนักแห้ง) 8 กรัม

ถ้าต้องการตัวอย่าง 25 กรัม จะต้องชั่งสตาร์ช (น้ำหนักแห้ง) $(8 \times 25) \div 100 = 2.0$ กรัม

สตาร์ชข้าวเจ้า

ตัวอย่าง (สตาร์ช+น้ำ) 100 กรัม จะมีสตาร์ช (น้ำหนักแห้ง)	12	กรัม
ถ้าต้องการตัวอย่าง 25 กรัม จะต้องชั่งสตาร์ช (น้ำหนักแห้ง)	$(12 \times 25) \div 100 = 3.00$	กรัม

2. ปริมาณใยอาหารที่ความเข้มข้น 30% ของสตาร์ชสตาร์ชมันสำปะหลัง

ตัวอย่างสตาร์ช 100 กรัม จะมีปริมาณใยอาหาร	30	กรัม
ถ้าต้องการสตาร์ช 2.0 กรัม จะต้องมียาอาหาร	$(2.0 \times 30) \div 100 = 0.6$	กรัม

สตาร์ชข้าวเจ้า

ตัวอย่างสตาร์ช 100 กรัม จะมีปริมาณใยอาหาร	30	กรัม
ถ้าต้องการสตาร์ช 3.0 กรัม จะต้องมียาอาหาร	$(3.0 \times 30) \div 100 = 0.9$	กรัม

3. ต้องการหาน้ำหนักวัตถุดิบที่ต้องชั่ง

$$\text{น้ำหนักวัตถุดิบ (S)} = \text{น้ำหนักวัตถุดิบ} \times 100 / (100 - \text{ความชื้นของวัตถุดิบ})$$

4. ปริมาณน้ำที่ต้องการ

$$\text{ปริมาณน้ำ (W)} = 25 - S$$

ดังนั้นเมื่อคำนวณตามสูตรจะได้

ตัวอย่าง	วัตถุดิบ (กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)
สตาร์ชมันสำปะหลัง 100%	2.21	22.79
สตาร์ชมันสำปะหลัง 100% + FOS 30%	$2.21 + 0.62 = 2.83$	22.17
สตาร์ชมันสำปะหลัง 100% + IN 30%	$2.21 + 0.63 = 2.84$	22.16
สตาร์ชมันสำปะหลัง 100% + RS 30%	$2.21 + 0.67 = 2.88$	22.12
สตาร์ชมันสำปะหลัง 100% + RM 30%	$2.21 + 0.61 = 2.82$	22.18
สตาร์ชข้าวเจ้า 100%	3.32	21.68
สตาร์ชข้าวเจ้า 100% + FOS 30%	$3.32 + 0.93 = 4.25$	20.75
สตาร์ชข้าวเจ้า 100% + IN 30%	$3.32 + 0.94 = 4.26$	20.74
สตาร์ชข้าวเจ้า 100% + RS 30%	$3.32 + 1.01 = 4.33$	20.67
สตาร์ชข้าวเจ้า 100% + RM 30%	$3.32 + 0.91 = 4.23$	20.77

ข.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ DSC

หาความชื้นของตัวอย่างสตาร์ชและใยอาหารโดยน้ำหนักฐานแห้ง



เตรียม pan อลูมิเนียมสำหรับวิเคราะห์



คำนวณน้ำหนักของ pan สตาร์ช ใยอาหารและน้ำที่ต้องบรรจุใส่ pan

ทำการแพ็ค pan ให้แน่น



เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์

ตัวอย่างการคำนวณสตาร์ช ใยอาหารและน้ำ (ถ้าต้องการวิเคราะห์แป้ง 30%)

*ก่อนการคำนวณต้องหาความชื้นฐานแห้งมาก่อน

ตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลัง (ความชื้น 9.30%)

*สมมุติน้ำหนักสตาร์ช = 15 mg (ทราบน้ำหนัก pan ที่แน่นอน)

สตาร์ช 100 mg มีปริมาณน้ำ 9.30 mg มีปริมาณของแข็ง 90.70 mg

สตาร์ช 15 mg จะมีปริมาณน้ำ $\frac{9.30 \times 15}{100} = 1.395$ mg มีปริมาณของแข็ง $\frac{90.70 \times 15}{100} = 13.61$ mg

ต้องการความเข้มข้นของสตาร์ชอัตราส่วน 30:70

ปริมาณของแข็ง 30 mg มีปริมาณน้ำ 70 mg

ถ้าปริมาณของแข็ง 13.61 mg จะมีปริมาณน้ำ $\frac{70 \times 13.61}{30} = 31.76$ mg

ใยอาหารที่ความเข้มข้นร้อยละ 30

สตาร์ชน้ำหนัก 13.61 mg

$$\therefore \text{จะได้น้ำหนักใยอาหาร} \frac{13.61 \times 30}{100} = 4.083 \text{ mg}$$

คำนวณจากความชื้น เพื่อหาน้ำหนักใยอาหารที่ต้องชั่งจริง

*สมมติใยอาหารมีความชื้นร้อยละ 4.03

มีปริมาณของแข็ง 95.97 mg จากใยอาหาร 100 mg

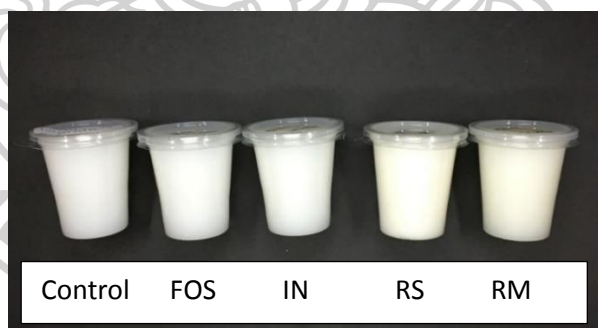
จะมีปริมาณของแข็ง 4.083 mg จากใยอาหาร $\frac{100 \times 4.083}{95.97} = 4.254 \text{ mg}$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่ต้องเติม} 31.76 - 1.395 - 0.171 = 30.194 \text{ mg}$$

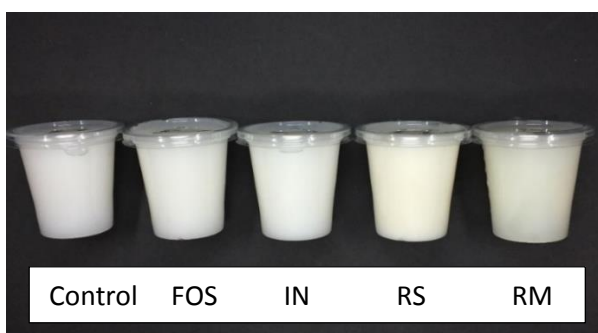
ปริมาณสตาร์ชจริง คือ 13.61 mg

ปริมาณใยอาหารที่ต้องชั่งได้ 4.254 mg

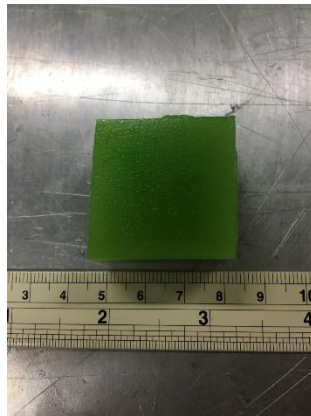
ข.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส



เจลสตาร์ชข้าวเจ้า



เจลสตาร์ชมันสำปะหลัง



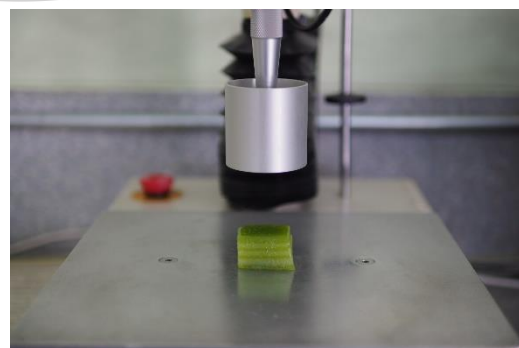
การตัดตัวอย่างขนมชั้น ให้มีขนาด 3x3x2 เซนติเมตร



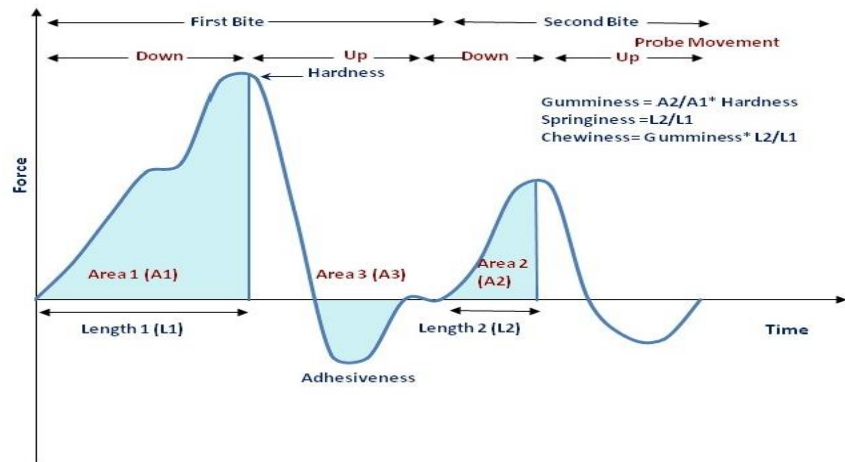
หัววัด P/50 ใช้วัดตัวอย่างตัวอย่างขนมชั้น



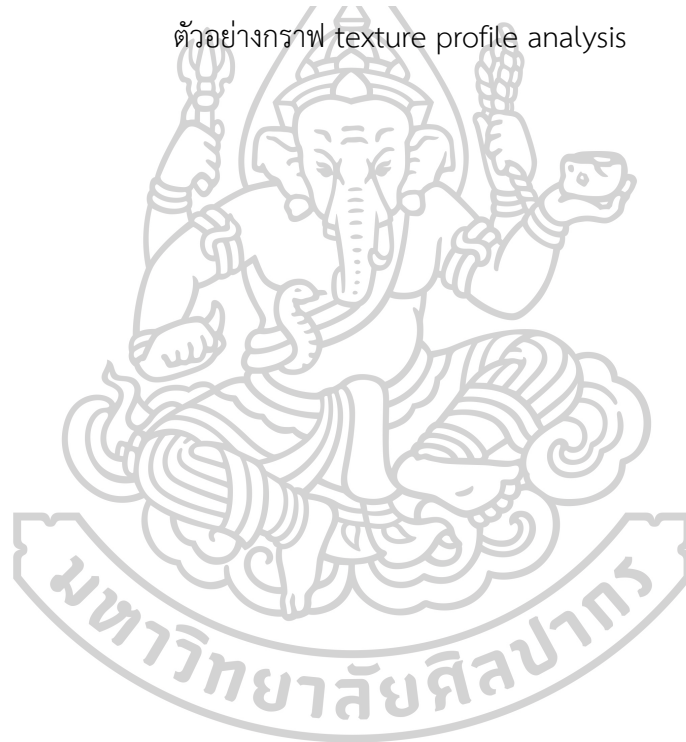
หัววัด P/5 ใช้วัดตัวอย่างเจลสตาร์ช



ลักษณะการวางตัวอย่างขนมชั้นในการวัด



ตัวอย่างกราฟ texture profile analysis



ตารางความหมายคุณลักษณะเนื้อสัมผัสต่างๆ ในเชิงคุณภาพทางกายภาพจากการทำ texture profile analysis และในเชิงคุณภาพทางประสาทสัมผัส

คุณลักษณะ	คุณภาพทางกายภาพ	คุณภาพทางประสาทสัมผัส
Hardness (ความแข็ง)	แรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป มีหน่วยเป็นหน่วยของแรง เช่น นิวตัน (N)	แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างฟันกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่าง
Cohesiveness (ความสามารถเกาะรวมกัน)	ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เป็นพลังงานยึดเกาะกันในเนื้ออาหาร หาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นค่าบวก ของการกดหรือการเคี้ยวครั้งที่ 2 (Area 2) และครั้งที่ 1 (Area1) $\text{cohesiveness} = \text{area 2}/\text{area 1}$	ความแข็งแกร่งของพันธะภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่างแล้วทำให้ตัวอย่างทนต่อแรงที่มากกระทำก่อนที่ตัวอย่างจะขาดหรือแยกออกจากกัน
Springiness (ความยืดหยุ่น)	อัตราการคืนรูปของวัสดุหลังจากการถูกกด (เดิมเรียกว่า elasticity) ค่านี้สามารถอธิบายได้หลายแบบ ที่นิยมคืออธิบายในรูปของอัตราส่วนของระยะเวลาหรือระยะทางที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างที่วัดได้จากการกดถึงแรงสูงสุดครั้งที่สองต่อค่าดังกล่าวของตัวอย่างที่วัดได้จากการกดครั้งแรกสำหรับอธิบายแบบดั้งเดิม ค่านี้จะหมายถึงระยะเวลาหรือระยะทางที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างที่วัดได้จากการกดถึงแรงสูงสุดครั้งที่สองเท่านั้น แต่การอธิบายในลักษณะนี้จะทำให้การเปรียบเทียบสามารถทำได้กับตัวอย่างที่มีความสูงเริ่มต้นเท่ากัน	ระดับความสามารถในการคืนตัวกลับมาเหมือนเดิมเมื่อมีการถอนแรงกดออกไปจากตัวอย่าง
Adhesiveness (ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ)	งานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุอื่นที่ตัวอย่างสัมผัสอยู่ ในกราฟ TPA คือพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่มีค่าเป็นลบของช่วงการกด หรือการเคี้ยวที่ 1 (Area 3) มีหน่วยเป็นแรงคูณด้วยเวลา เช่น N.s บางที่เรียก stickiness	แรงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวอย่างที่ติดอยู่ในปาก (โดยปกติคือเพดานปาก) ในระหว่างกระบวนการเคี้ยว
Gumminess (ความเหนียวเป็นยางหรือกาว)	แรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งจนกระทั่งเสียรูปโดยเป็นตัวอย่างที่มี hardness ต่ำ และ cohesiveness สูง $\text{gumminess} = \text{hardness} \times \text{cohesiveness}$	พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งในอัตราการเคี้ยวที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้

ภาคผนวก ค
การเตรียมตัวอย่าง

ค.1 กระบวนการผลิตขนมชั้นจากสตาร์ช

1. เตรียมส่วนผสมน้ำเชื่อมโดยการนำกะทิ 405 g ไปตั้งไฟที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใส่ น้ำตาลทรายลงไป 270 g (ถ้าสูตรที่มีโยเกิร์ตให้ค่อยๆเติมโยเกิร์ตปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ของสตาร์ชลงไป) ใช้พายคนจนน้ำตาลละลายจนหมด เติมน้ำเปล่าและกลิ่นมะลิลงไปประมาณ 1/2 ช้อนชา คนให้เข้ากัน ปิดไฟ ไม่ต้องรอเดือด ตั้งพักไว้
2. เตรียมส่วนผสมแห้งโดยการนำสตาร์ช 180 g มาใส่ในชามผสม นำส่วนผสมน้ำเชื่อมเทลงไปที่ละนิด คลุกเคล้าให้เข้ากันจนกว่าส่วนผสมจะเหลวทั้งหมดและไม่จับตัวกันเป็นก้อน
3. กรองด้วยกระชอนตาถี่ เพื่อเอาเศษแป้งออกไป เวลานึ่งจะได้ผิวแป้งที่เรียบเนียน
4. เอาซึ้ง (หม้อนึ่ง) ใส่น้ำประมาณ 3/4 ของหม้อ ตั้งไฟแรงต้มจนน้ำเดือด
5. นำถาด/พิมพ์อลูมิเนียมไปนึ่งในหม้อนึ่งซึ่งน้ำเดือดจัดประมาณ 5 นาที
6. แบ่งแป้งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งใส่ส่วนผสมอาหารประมาณ 3 หยด ใส่อ่อนกว่าที่ ต้องการเล็กน้อย เวลาแป้งสุกสีจะเข้มขึ้นอีกเล็กน้อย ส่วนที่สองไม่ใส่สี
7. หยอดแป้งทีละชั้น สลับสีกัน ชั้นนึ่งบางๆ ไม่หนามาก ปิดฝานึ่งแต่ละชั้นประมาณ 7 นาที เมื่อแป้งสุกจึงค่อยหยอดชั้นต่อไป
8. เมื่อขนมสุกให้รีบเปิดฝามือหนึ่งอย่าให้ไอน้ำโดนตัวขนม แล้วยกถาด/พิมพ์ ออกมาโดยเร็ว ตั้งพักทิ้งไว้บนตะแกรงจนเย็นสนิท จึงค่อยแกะขนมออกจากถาด เวลาแกะใช้มีดจุ่มน้ำร้อนและกดลงบนขนมที่เดียว เพื่อไม่ให้หน้าขนมและ



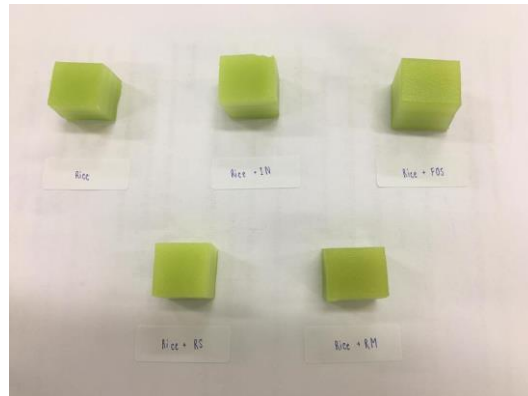
วัตถุดิบในการทำขนมชั้น



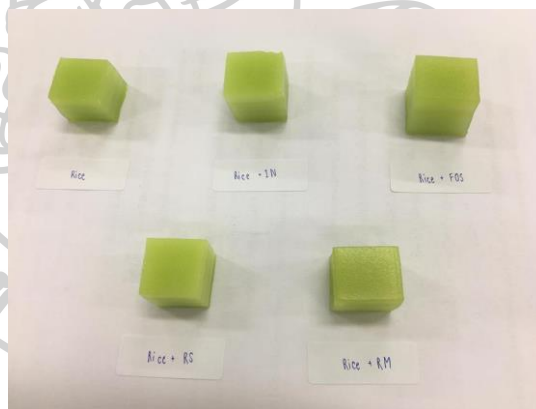
ขนมชั้นที่ทำเสร็จแล้ว

ภาคผนวก ง
วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ค.2 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ขนมชั้น



ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ข้าวเจ้า



ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมชั้นจากสตาร์ชมันสำปะหลัง

ภาคผนวก ง
วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส



ตัวอย่างการเสิร์ฟตัวอย่างในการทำแบบสอบถาม



ง.1 ตัวอย่างแบบสอบถาม

แบบสอบถามทางประสาทสัมผัส

ชื่อผู้ทดสอบ..... วันที่.....

เพศ..... อายุ.....

ผลิตภัณฑ์.....

คำสั่ง กรุณาชิมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมชิ้นต่อไปนี้ ตามลำดับจากซ้ายไปขวา แล้วให้คะแนนคุณลักษณะตามความชอบของท่าน โดยใช้เกณฑ์คะแนนดังนี้

1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย

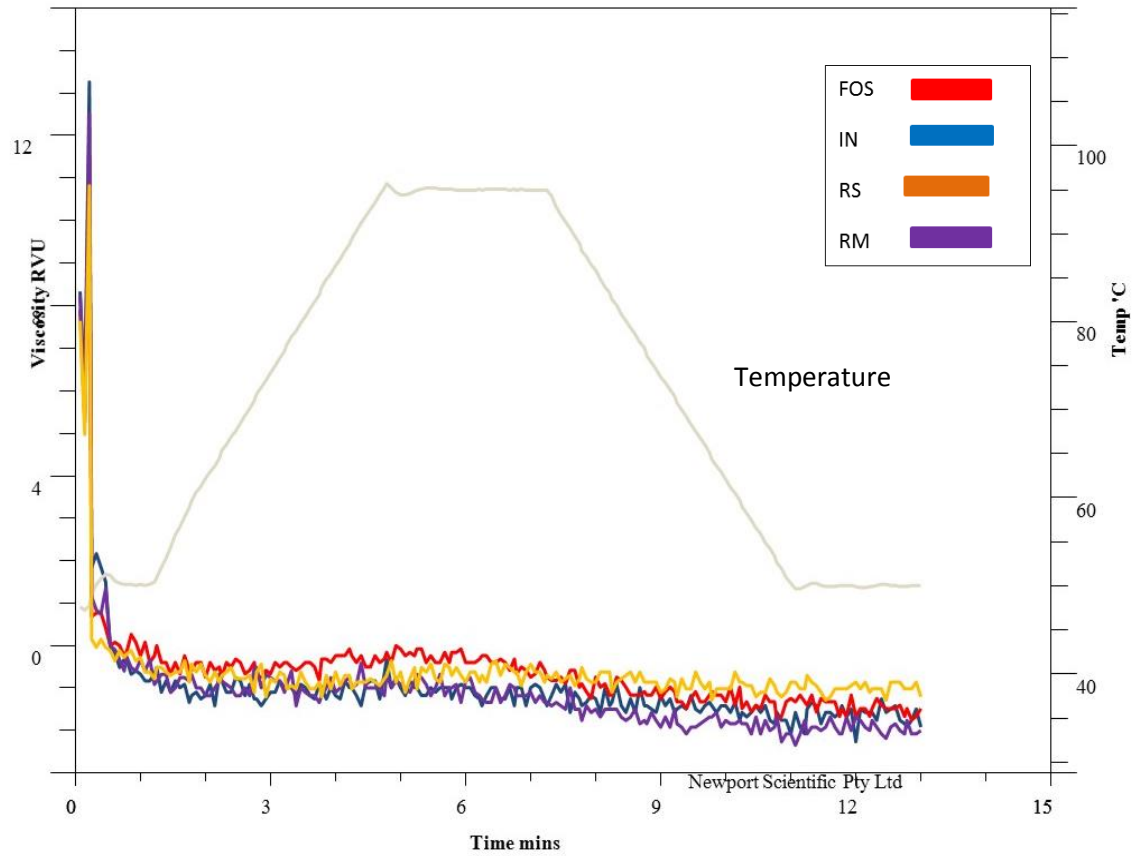
5 = เฉยๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง
1. ลักษณะปรากฏ
2. สี
3. การลอกชั้น
4. ความอ่อน - แข็ง
5. ความเหนียว
6. กลิ่นขณะเคี้ยว
7. รสชาติ
8. ความชอบโดยรวม
9 = ชอบมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ.....

ภาคผนวก จ

จ.1 พฤติกรรมการให้ความหนืดของใยอาหาร



พฤติกรรมการให้ความหนืดของใยอาหาร 4 ชนิด คือ FOS, IN, RS และ RM
เมื่อไม่มีสตาร์ชเป็นส่วนผสม

จ.2 ตารางแสดงพฤติกรรมความหนืดของสตาร์ชที่เติมและไม่เติมใยอาหาร

Starch	Dietary fiber (30% of dry weight starch)	Peak viscosity (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak Time (min)	Pasting Temp (°C)
Rice	Control	350.58±1.65 ^d	276.67±4.16 ^e	73.92±5.43 ^b	401.75±1.19 ^c	125.08±3.72 ^b	5.67±0.00 ^c	94.40±0.45 ^b
	FOS	391.92±0.92 ^b	339.54±0.29 ^b	52.38±0.63 ^c	412.00±4.00 ^b	72.46±3.71 ^c	6.03±0.03 ^b	95.43±0.23 ^a
	IN	327.38±1.63 ^e	299.88±1.71 ^d	27.50±0.08 ^d	345.08±0.25 ^d	45.21±1.96 ^d	6.50±0.03 ^a	89.55±0.00 ^c
	RS	462.67±1.67 ^a	362.79±7.46 ^a	99.88±5.79 ^a	503.13±2.71 ^a	140.33±10.17 ^a	5.67±0.07 ^c	87.15±0.05 ^d
	RM	371.29±1.63 ^c	325.29±2.71 ^c	46.00±1.08 ^c	403.50±1.83 ^c	78.21±0.88 ^c	5.97±0.03 ^b	95.75±0.00 ^a
Tapioca	Control	171.03±16.09 ^d	73.72±5.87 ^e	97.31±10.21 ^c	115.50±9.27 ^d	41.78±3.40 ^c	4.13±0.02 ^b	72.70±0.00 ^d
	FOS	175.33±0.52 ^c	76.44±0.94 ^d	98.89±0.42 ^c	122.86±1.34 ^c	46.42±1.06 ^b	4.18±0.04 ^{ab}	75.87±0.08 ^b
	IN	175.44±0.96 ^c	77.81±0.21 ^c	97.64±0.75 ^c	123.94±0.59 ^{bc}	46.14±0.38 ^b	4.22±0.04 ^a	78.20±0.05 ^a
	RS	203.19±1.79 ^a	87.81±0.27 ^a	115.39±1.69 ^a	138.81±1.62 ^a	51.00±1.54 ^a	4.18±0.04 ^{ab}	75.17±0.06 ^c
	RM	180.44±1.28 ^b	79.50±0.98 ^b	100.94±0.54 ^b	125.69±0.46 ^b	46.19±1.43 ^b	4.20±0.00 ^a	75.17±0.03 ^c

หมายเหตุ^{a,b,c,...} แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของสตาร์ชแต่ละชนิด (p<0.05)

ภาคผนวก ฉ

บัญชีหมายเลข 4

แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541

หลักเกณฑ์ในการกล่าวอ้างทางโภชนาการบนฉลากอาหาร

1. การกล่าวอ้างทางโภชนาการ (Nutrition claim) หมายถึง การแสดงข้อความหรือข้อมูลใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโภชนาการของอาหารนั้น เช่น การระบุถึงปริมาณของพลังงาน โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ตลอดจนวิตามินหรือเกลือแร่ต่าง ๆ การกล่าวอ้างทางโภชนาการแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การกล่าวอ้างปริมาณสารอาหาร (Nutrient content claim) การกล่าวอ้างปริมาณโดยเปรียบเทียบ (Comparative claim) และการกล่าวอ้างหน้าที่ของสารอาหาร (Nutrient function claim)

1.1 การกล่าวอ้างปริมาณสารอาหาร (Nutrient content claim) คือ การกล่าวอ้างถึงระดับ (level) ของสารอาหารหรือพลังงานในอาหารนั้น เช่น “เป็นแหล่งของแคลเซียม (source of calcium)” “มีปริมาณใยอาหารสูง และไขมันต่ำ (high in fiber and low in fat)” เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม่อนุญาตการกล่าวอ้าง “ปราศจาก” หรือ “ต่ำ” หากอาหารนั้นหรืออาหารชนิดนั้น โดยธรรมชาติทั่วไปเป็นไปตามเงื่อนไขอยู่แล้วโดยมิได้มีการใช้กระบวนการผลิตพิเศษ มีกระบวนการปรับโดยเฉพาะ หรือมีการปรับสูตรเพื่อให้อาหารนั้นมีปริมาณสารอาหารที่จะกล่าวอ้างลดลงจนเป็นไปตามเงื่อนไข เนื่องจากจะทำให้ผู้บริโภคเข้าใจผิดว่าอาหารจากผู้ผลิตนั้นแต่เพียงผู้เดียวที่มีคุณสมบัตินี้ ตัวอย่างเช่น ไม่อนุญาตให้นำบริโภคแสดงข้อความ “ปราศจากพลังงาน” หรือ “ไขมันต่ำ” เนื่องจากน้ำบริโภคทั่วไปจากผู้ผลิตทุกรายก็มีคุณสมบัตินี้ด้วย ในทางกลับกัน หากอาหารจากผู้ผลิตรายหนึ่งมีการปรับสูตรหรือใช้วัตถุดิบที่แตกต่างไปจากปกติทั่วไปจนสารอาหารที่จะกล่าวอ้างมีปริมาณที่เป็นไปตามเงื่อนไขแล้ว อาหารนั้นก็สามารถกล่าวอ้างว่า “ปราศจาก” หรือ “ต่ำ” ได้

1.2 การกล่าวอ้างปริมาณโดยเปรียบเทียบ (Comparative claim) เป็นการเปรียบเทียบปริมาณของสารอาหารหรือพลังงานที่มีในอาหารตั้งแต่สองอย่างขึ้นไป ตัวอย่างการกล่าวอ้าง ได้แก่ “น้อยกว่า (less than หรือ fewer)” “มากกว่า (more than)” “ลดปริมาณลง (reduced)” “พลังงานน้อย (lite, light)” “เสริม (added, fortified, enriched)” เป็นต้น ในกรณีกล่าวอ้างปริมาณโดยเปรียบเทียบเช่นนี้อาหารที่ถูกเปรียบเทียบโดยอาหารที่มีการกล่าวอ้างเรียกว่า “อาหารอ้างอิง” อาหารอ้างอิงสำหรับใช้เปรียบเทียบเพื่อแสดงข้อกล่าวอ้างโดยเปรียบเทียบ อนุญาตได้เพียงสองแบบ คือ อนุญาตให้เปรียบเทียบกับ

(1) ผลิตภัณฑ์สูตรปกติของผู้ผลิตเอง

(2) ผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันทั่ว ๆ ไปที่เป็นตัวแทนของอาหารประเภทดังกล่าวที่มีจำหน่ายในประเทศไทย

ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่เปรียบเทียบจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันหรือคล้ายคลึงกันเท่านั้น เช่น ซอสปรุงรสกับซอสปรุงรส ที่สำคัญคือ ห้ามใช้ข้อมูลอ้างปริมาณโดยเปรียบเทียบหากอาหารอ้างอิงมีสารอาหารหรือพลังงานที่จะเปรียบเทียบนั้น อยู่ในปริมาณที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ “ต่ำ” หรือ “น้อยมาก” อยู่แล้ว

การแสดงข้อมูลอ้างโดยเปรียบเทียบจะต้องระบุชื่อชนิดของอาหารอ้างอิงและแสดงการเปรียบเทียบระดับของสารอาหารหรือพลังงานนั้นที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์หรือเศษส่วนเทียบกับปริมาณที่มีอยู่ในอาหารอ้างอิง และระบุปริมาณสารอาหารนั้นต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่ระบุที่ฉลากด้วย เช่น การกล่าวอ้าง “ลดโซเดียม” จะต้องกำกับด้วยข้อความว่า “ลดปริมาณโซเดียมลง 50% เทียบกับซอสปรุงรสสูตรปกติ, ซอสปรุงรสชนิดโซเดียมน้อยมีโซเดียม 200 มก. ต่อ 30 มล. ซอสปรุงรสสูตรปกติมีโซเดียม 400 มก. ต่อ 30 มล.”

1.3 การกล่าวอ้างเกี่ยวกับหน้าที่ของสารอาหาร (Nutrient function claim) คือ การกล่าวถึงหน้าที่ของสารอาหารที่มีต่อร่างกาย มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ

(1) สารอาหารที่มีการกล่าวอ้างถึง ต้องมีอยู่ในบัญชีสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) ซึ่งเป็นบัญชีหมายเลข 3 แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับนี้

(2) ผลิตภัณฑ์ที่กล่าวอ้างต้องมีสารอาหารนั้นอยู่ในระดับที่จัดว่า “เป็นแหล่งของ” ของสารอาหารนั้นในปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงและปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลากสำหรับในกรณีที่ไม่มีการกำหนดค่าหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไว้ และอาหารนั้นไม่มีลักษณะการบริโภคใกล้เคียงกับอาหารที่มีการกำหนดค่าหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไว้ ให้คำนวณต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ 100 กรัม หรือ 100 มิลลิลิตร

(3) การกล่าวอ้างหน้าที่ของสารอาหาร ต้องเป็นการกล่าวถึงสารอาหารตามข้อ 1.3 (1) โดยไม่ใช่การกล่าวอ้างถึงตัวผลิตภัณฑ์เป็นการเฉพาะ

(4) การกล่าวอ้างดังกล่าวต้องมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่เชื่อถือได้

(5) การกล่าวอ้างจะต้องไม่มีข้อความระบุหรือมีความหมายให้เข้าใจว่าการบริโภคสารอาหารนั้นจะสามารถป้องกันหรือบำบัดรักษาโรคได้

ตัวอย่างการกล่าวอ้างเกี่ยวกับหน้าที่ของสารอาหาร

“แคลเซียมเป็นส่วนประกอบสำคัญของกระดูกและฟัน”

“แคลเซียมช่วยในกระบวนการสร้างกระดูกและฟันที่แข็งแรง”

“โฟเลตเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างเม็ดเลือดแดง”

“วิตามิน บี 1 และวิตามิน บี 12 ช่วยในการทำงานของระบบประสาท”

อนึ่ง ข้อความกล่าวอ้างเกี่ยวกับหน้าที่ของสารอาหารจะต้องได้รับความเห็นชอบจาก
สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

2. เงื่อนไขในการกล่าวอ้างทางโภชนาการ

2.1 เกณฑ์การกล่าวอ้างทางโภชนาการประเภทการกล่าวอ้างปริมาณสารอาหาร และการกล่าวอ้างปริมาณโดยเปรียบเทียบตามข้อ 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ มีการกำหนดเงื่อนไขไว้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 สำหรับอาหารที่มีการกำหนดปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไว้ตามบัญชีหมายเลข 2 แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับนี้ และอาหารที่มีลักษณะการบริโภคใกล้เคียงกับอาหารที่มีการกำหนดปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไว้แล้ว ซึ่งสามารถอนุมูลมูลค่าปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงตามบัญชีดังกล่าวได้ให้แสดงการกล่าวอ้างทางโภชนาการตามเงื่อนไขในตารางที่ 1 ของบัญชีนี้

อนึ่ง เฉพาะอาหารที่มีปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไม่เกิน 30 กรัม หรือ ไม่เกิน 2 ซ้อนโต๊ะ เงื่อนไขในการแสดงข้อกล่าวอ้างตามตารางที่ 1 นี้ ให้คำนวณต่อปริมาณอาหารนั้น 50 กรัม แทนการคำนวณต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงและต่อปริมาณอาหารหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก (กรณีที่เป็นอาหารแห้งที่โดยทั่วไปแล้วจะต้องเติมน้ำหรือของเหลวที่มีคุณค่าทางโภชนาการน้อยจนไม่มีนัยสำคัญก่อนจึงจะบริโภค น้ำหนัก 50 กรัมนี้ ให้หมายถึงน้ำหนักอาหารหลังจากที่เติมน้ำหรือของเหลวแล้ว อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดนี้ไม่ใช้บังคับกับเครื่องดื่มแข็ง หรือผลิตภัณฑ์ลักษณะเดียวกัน เช่น นมผง ซึ่งจะใช้ปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงของเครื่องดื่ม คือ 200 มิลลิลิตรของอาหารหลังเติมน้ำ)

กรณีที่ 2 สำหรับอาหารที่ไม่เป็นไปตามกรณีที่ 1 เท่านั้น ที่จะให้กล่าวอ้างทางโภชนาการ โดยคำนวณต่อปริมาณอาหาร 100 กรัม หรือ 100 มิลลิลิตร ตามเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 2 ของบัญชีนี้

2.2 อาหารที่อยู่ในเกณฑ์ที่จะแสดงการกล่าวอ้างทางโภชนาการตามตารางที่ 1 หรือ ตารางที่ 2 ของบัญชีนี้ได้ หรืออาหารที่มีการกล่าวอ้างเกี่ยวกับหน้าที่ของสารอาหารจะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขเพิ่มเติมดังนี้ด้วยคือ

สำหรับอาหารในกรณีที่ 1 ของข้อ 2.1 หากอาหารนั้นในปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงและปริมาณอาหารหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก (หรือ ในปริมาณอาหาร 50 กรัม เฉพาะอาหารที่มีปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไม่เกิน 30 กรัม หรือ ไม่เกิน 2 ซ่อนโต๊ะ) มีปริมาณ

ไขมันทั้งหมด	มากกว่า 13 กรัม	หรือ
ไขมันอิ่มตัว	มากกว่า 4 กรัม	หรือ
โคเลสเตอรอล	มากกว่า 60 มิลลิกรัม	หรือ
โซเดียม	มากกว่า 360 มิลลิกรัม	หรือ

สำหรับอาหารในกรณีที่ 2 ของข้อ 2.1 หากอาหารนั้นในปริมาณ 100 กรัม หรือ 100 มิลลิลิตร มีปริมาณ

ไขมันทั้งหมด	มากกว่า 13 กรัม	หรือ
ไขมันอิ่มตัว	มากกว่า 4 กรัม	หรือ
โคเลสเตอรอล	มากกว่า 60 มิลลิกรัม	หรือ
โซเดียม	มากกว่า 360 มิลลิกรัม	

การแสดงข้อกล่าวอ้างใดก็ตามจะต้องกำกับด้วยข้อความแสดงปริมาณไขมันทั้งหมด ไขมันอิ่มตัว โคเลสเตอรอล หรือโซเดียม ที่อยู่ในระดับเกินปริมาณดังกล่าวไว้ติดกับข้อกล่าวอ้างนั้นที่มีขนาดใหญ่ที่สุดหรือเห็นได้ชัดที่สุดบนฉลากด้วย โดยข้อความกำกับนี้จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่าครึ่งหนึ่งของข้อกล่าวอ้าง

ตัวอย่าง

“โซเดียมต่ำ

“ไขมันทั้งหมด 14 กรัมต่อ 200 มิลลิลิตร”

2.3 เงื่อนไขการแสดงข้อความที่เกี่ยวกับสุขภาพ เช่น “เพื่อสุขภาพ (healthy, healthful, healthiness, health)” หรือข้อความในลักษณะเดียวกัน มีดังต่อไปนี้คือ

(1) อาหารนั้นจะต้องเข้าข่ายเงื่อนไขการแสดงข้อความ “ไขมันต่ำ (low fat)” และ “ไขมันอิ่มตัวต่ำ (low saturated fat)” ได้ตามเกณฑ์ในตารางที่ 1 หรือตารางที่ 2 แล้วแต่กรณี และ

(2) อาหารนั้นในปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงและในปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก หรือในปริมาณ 100 กรัม (หรือ 100 มิลลิลิตร) แล้วแต่เข้าข่ายในกรณีที่ 1 หรือกรณีที่ 2 ตามข้อ 2.1 จะต้องประกอบด้วย

โซเดียม ไม่เกิน 360 มิลลิกรัม และ

โคเลสเตอรอล ไม่เกิน 60 มิลลิกรัม และ

วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 โปรตีน แคลเซียม เหล็ก และใยอาหารอย่างน้อยร้อยละ 10 ของ Thai RDI

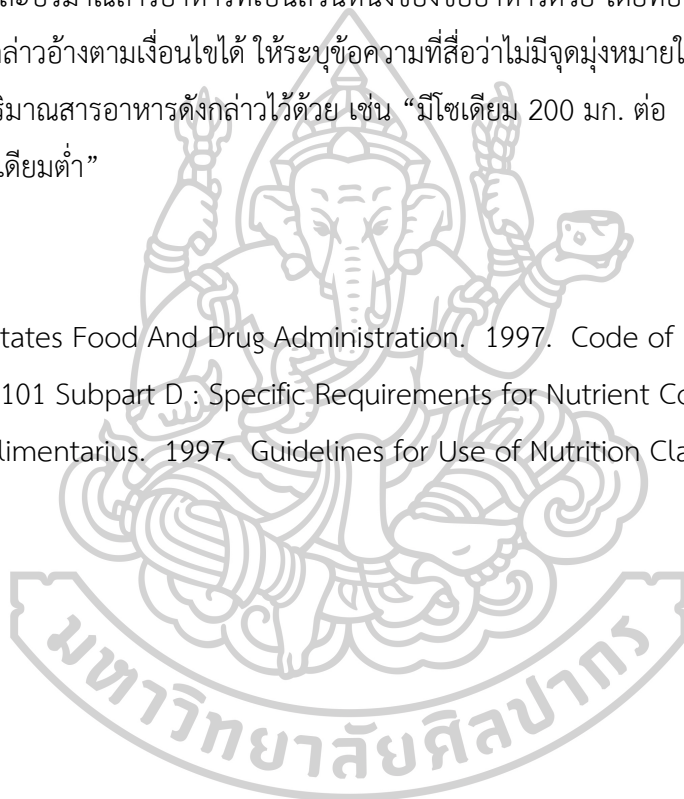
หมายเหตุ สำหรับผักสดหรือผลไม้สดให้ยกเว้นข้อกำหนดด้านปริมาณวิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 โปรรติน แคลเซียม เหล็ก และใยอาหาร

2.4 เจื่อนไขอื่น ๆ

หากมีการกล่าวถึงชนิดและปริมาณสารอาหารใดเป็นการเฉพาะบนฉลากนอกกรอบข้อมูลโภชนาการ โดยที่ไม่มุ่งหมายเพื่อเป็นการกล่าวอ้างแต่เพื่อเป็นการแจ้งปริมาณให้ผู้บริโภคทราบ ทั้งนี้ รวมถึงการกล่าวถึงชนิดและปริมาณสารอาหารที่เป็นส่วนหนึ่งของชื่ออาหารด้วย โดยที่อาหารนั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่จะแสดงชื่อกกล่าวอ้างตามเงื่อนไขได้ ให้ระบุข้อความที่สื่อว่าไม่มีจุดมุ่งหมายในการกล่าวอ้างใด ๆ กำกับข้อมูลปริมาณสารอาหารดังกล่าวไว้ด้วย เช่น “มีโซเดียม 200 มก. ต่อ 30 มิลลิลิตร – ไม่ใช่อาหารชนิดโซเดียมต่ำ”

เอกสารอ้างอิง

- 4.1 United States Food And Drug Administration. 1997. Code of Federal Regulations 21 CFR Part 101 Subpart D : Specific Requirements for Nutrient Content Claims.
- 4.2 Codex Alimentarius. 1997. Guidelines for Use of Nutrition Claims.



ตารางที่ 1 เงื่อนไขการกล่าวอ้างทางโภชนาการโดยใช้เกณฑ์ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค
(สำหรับอาหารที่เป็นไปตามข้อ 2.1 กรณีที่ 1)

พลังงาน/ สารอาหาร	ชื่อกกล่าวอ้าง	เงื่อนไข (ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค อ้างอิงและต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก)	เงื่อนไขเพิ่มเติม
พลังงาน	ปราศจาก, ไม่มี (free, without, free of, no, zero)	มีพลังงานน้อยกว่า 5 กิโล แคลอรี	1.ห้ามใช้ชื่อกกล่าวอ้างนี้ หากอาหารนั้น โดยธรรมชาติเป็นไปตามเงื่อนไขอยู่แล้ว 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขข้อ 1.1 และ 2.2 ของบัญชีนี้ด้วย
	ต่ำ (low, few, low source of, low in)	มีพลังงานไม่เกิน 40 กิโล แคลอรี	
	ลด, น้อยกว่า (reduced, reduced in, less, fewer, lower, lower in)	ลดปริมาณพลังงานลงตั้งแต่ ร้อยละ 25 ขึ้นไป เมื่อเทียบ กับอาหารอ้างอิง	1.ห้ามใช้ชื่อกกล่าวอ้างนี้ หากอาหารอ้างอิง เป็นอาหาร “พลังงานต่ำ” อยู่แล้ว 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขข้อ 1.2 และ 2.2 ของบัญชีนี้ด้วย
	พลังงานน้อย (light, lite)	1.ลดปริมาณไขมันลงตั้งแต่ ร้อยละ 50 ขึ้นไปเทียบกับ อาหารอ้างอิง (สำหรับ ผลิตภัณฑ์นั้นมีพลังงานจาก ไขมันตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป ของพลังงานทั้งหมด) หรือ	

พลังงาน/ สารอาหาร	ข้อกล่าวอ้าง	เจือจาง (ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค อ้างอิงและต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก)	เจือจางเพิ่มเติม
		2.ลดพลังงานลงตั้งแต่ 1/3 ส่วนขึ้นไปเทียบกับอาหาร อ้างอิง (สำหรับผลิตภัณฑ์นั้น มีพลังงานจากไขมันน้อยกว่า ร้อยละ 50 ของพลังงาน ทั้งหมด)	ไขมันน้อยกว่า 3 กรัมต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคอ้างอิง ไม่ต้องแสดงร้อย ละหรือสัดส่วนของพลังงานที่ลดลง
น้ำตาล (หมายถึง mono- และ di-saccha- rides)	ปราศจาก, ไม่มี (free, without, free of, no, zero, sugarless)	มีน้ำตาลน้อยกว่า 0.5 กรัม	<ol style="list-style-type: none"> ห้ามใช้ข้อกล่าวอ้างนี้ หากอาหารนั้น โดยธรรมชาติเป็นไปตามเจือจางอยู่แล้ว ถ้าอาหารมีส่วนผสมที่เป็นน้ำตาลหรือ ส่วนผสมที่เข้าใจโดยทั่วไปว่ามีน้ำตาลเป็น ส่วนประกอบ ให้ทำเครื่องหมายกำกับชื่อ ส่วนผสมนั้นแล้วอธิบายว่า “มีผลต่อ ปริมาณน้ำตาลน้อยมาก” ถ้าอาหารเป็นไปตามเจือจาง “พลังงาน ต่ำ” หรือ “ลดพลังงาน” หรือ “พลังงาน น้อย” ให้แสดงข้อกล่าวอ้างดังกล่าวบน ฉลากด้วย ถ้าอาหารไม่เป็น “พลังงานต่ำ” หรือ “ลดพลังงาน” หรือ “พลังงานน้อย” ให้ กำกับว่า “ไม่ใช่อาหารพลังงานต่ำ” หรือ “ไม่ใช่อาหารลดพลังงาน” หรือ “ไม่ใช่ สำหรับการควบคุมน้ำหนัก” ตามลำดับ ต้องปฏิบัติตามเจือจางในข้อ 1.1 และ 2.2 ของบัญชีนี้ด้วย

พลังงาน/ สารอาหาร	ชื่อย่อภาษาอังกฤษ	เงื่อนไข (ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค อ้างอิงและต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก) *	เงื่อนไขเพิ่มเติม
น้ำตาล (หมายถึง mono- และ di- saccha- rides)	ลดปริมาณลง, น้อยกว่า (reduced, reduced in, lower, lower in, less)	ลดปริมาณน้ำตาลลงตั้งแต่ ร้อยละ 25 ขึ้นไป เมื่อเทียบกับ อาหารอ้างอิง	ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 1.2 และ 2.2 ของบัญชีนี้ด้วย
		<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่มีการเติมน้ำตาลหรือส่วนผสมที่มีน้ำตาลในระหว่างการผลิตหรือการบรรจุและ 2. ไม่มีส่วนผสมที่มีการเติมหรือเพิ่มปริมาณน้ำตาล เช่น แยม เยลลี่หรือน้ำผลไม้เข้มข้น และ 3. ต้องไม่มีน้ำตาลเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต หรือถ้ามี ต้องรวมกันแล้วได้ตามเงื่อนไข “ปราศจาก/ไม่มี” และ 4. อาหารอ้างอิงมีการเติมน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ ส่วนอาหารนี้ไม่มีการเติม 	ถ้าอาหารนั้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ “พลังงานต่ำ” หรือ “ลดพลังงาน” ต้องกำกับว่า “ไม่ใช่อาหารพลังงานต่ำ” หรือ “ไม่ใช่อาหารลดพลังงาน”
	“ไม่ปรับความหวานเพิ่ม” หรือ “ไม่เติมวัตถุให้	ใช้กับอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงอยู่แล้วโดยธรรมชาติ เช่น น้ำผลไม้	

พลังงาน/ สารอาหาร	ซ็อกกล่าวอ้าง	เงื่อนไข (ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค อ้างอิงและต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก) *	เงื่อนไขเพิ่มเติม
	ความหวาน” (unsweetened, contains No added sweeteners)	อย่างไรก็ตามห้ามใช้ข้อความ “ปราศจากน้ำตาล (sugar free)”	
โปรตีน ใยอาหาร วิตามิน เกลือแร่ (ไม่รวม โซเดียม)	สูง, อุดม (high, rich in, excellent source of)	มีสารอาหารนั้นอยู่ในปริมาณ ตั้งแต่ร้อยละ 20 ของ Thai RDI** ขึ้นไป	1. สำหรับใยอาหาร หากปริมาณไขมันทั้งหมด ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข “ต่ำ” การกล่าวอ้าง ปริมาณใยอาหารต้องกำกับด้วยปริมาณไขมัน ทั้งหมดต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดง บนฉลากด้วยอักษรที่มีขนาดไม่เล็กกว่า ครึ่งหนึ่งของซ็อกกล่าวอ้าง 2. ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 2.2 ของบัญชี นี้ด้วย
	เป็นแหล่งของ, มี (good source, contains, provides)	มีสารอาหารนั้นอยู่ในปริมาณ ร้อยละ 10-19 ของ Thai RDI**	1. สำหรับใยอาหาร หากปริมาณไขมันทั้งหมด ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข “ต่ำ” การกล่าวอ้าง ปริมาณ ใยอาหารต้องกำกับด้วยปริมาณไขมันทั้งหมด ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก ด้วยอักษรที่มีขนาดไม่เล็กกว่าครึ่งหนึ่งของซ็อก กล่าวอ้าง 2. ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 2.2 ของบัญชี นี้ด้วย
	เสริม, เพิ่ม, มากกว่า (increased,	เมื่อเทียบกับอาหารอ้างอิงแล้ว อาหารนี้มีสารอาหารที่จะ กล่าวอ้างอยู่ในปริมาณที่สูง	1. ต้องระบุอาหารอ้างอิงด้วย 2. สำหรับใยอาหาร หากปริมาณไขมันทั้งหมด ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข “ต่ำ” การกล่าวอ้าง

พลังงาน/ สารอาหาร	ชื่อกว่าอ้าง	เงื่อนไข (ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภค อ้างอิงและต่อปริมาณหนึ่ง หน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก) *	เงื่อนไขเพิ่มเติม
	more, added, fortified, enriched)	กว่าระดับที่มีอยู่ในอาหาร อ้างอิง โดยปริมาณค่าความ แตกต่างกันจะต้องไม่น้อยกว่า ปริมาณร้อยละ 10 ของ Thai RDI**	ปริมาณ ใยอาหารต้องกำกับด้วยปริมาณไขมันทั้งหมด ต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก ด้วยอักษรที่มีขนาดไม่เล็กกว่าครึ่งหนึ่งของข้อ กล่าวอ้าง 3.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 2.2 ของบัญชี นี้ด้วย

หมายเหตุ

* เฉพาะอาหารที่มีปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงไม่เกิน 30 กรัม หรือ ไม่เกิน 2 ช้อนโต๊ะ เงื่อนไขในการแสดงชื่อกว่าอ้างตามตารางที่ 1 นี้ ให้คำนวณต่อปริมาณอาหารนั้น 50 กรัม แทนการคำนวณต่อปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงและต่อปริมาณอาหารหนึ่งหน่วยบริโภคที่แสดงบนฉลาก (กรณีที่เป็นอาหารแห้งที่โดยทั่วไปแล้วจะต้องเติมน้ำหรือของเหลวที่มีคุณค่าทางโภชนาการน้อยจนไม่มีนัยสำคัญก่อนจึงจะบริโภค น้ำหนัก 50 กรัมนี้ ให้หมายถึงน้ำหนักอาหารหลังจากที่เติมน้ำหรือของเหลวแล้ว อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดนี้ไม่ใช่บังคับกับเครื่องดื่มแข็ง หรือผลิตภัณฑ์ลักษณะเดียวกัน เช่น นมผง ซึ่งจะใช้ปริมาณหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงเป็น 200 มิลลิลิตรของอาหารหลังเติมน้ำ)

** Thai RDI หมายถึง สารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai Recommended Daily Intakes)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการกล่าวอ้างทางโภชนาการโดยใช้เกณฑ์ต่อ 100 กรัม หรือ 100 มิลลิลิตร
(สำหรับอาหารที่เป็นไปตามข้อ 2.1 กรณีที่ 2)

พลังงาน/ สารอาหาร	ข้อกล่าวอ้าง	เงื่อนไข	
		ต่ออาหาร 100 กรัม (ของแข็ง)	ต่ออาหาร 100 มิลลิลิตร (ของเหลว)
พลังงาน	ปราศจาก, ไม่มี (free, without, free of, no)	-	1.ไม่เกิน 4 กิโลแคลอรี และ 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 1.1 ของบัญชีนี้ด้วย
ต่ำ (low)		1.ไม่เกิน 40 กิโลแคลอรี และ 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 1.1 ของบัญชีนี้ด้วย	1.ไม่เกิน 20 กิโลแคลอรี และ 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 1.1 ของบัญชีนี้ด้วย
ลดปริมาณ ลง, น้อยกว่า (reduced, reduced in, less, less than, fewer, lower, lower in)		1.ลดพลังงานลงเมื่อเทียบกับ ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหารชนิด เดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน โดย ลดลงตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป และ 2.ปริมาณพลังงานที่ลดลง จะต้องไม่น้อยกว่า 40 กิโล แคลอรีด้วย	1.ลดพลังงานลงเมื่อเทียบกับ ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหารชนิด เดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน โดยลดลง ตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป และ 2.ปริมาณพลังงานที่ลดลงจะต้องไม่ น้อยกว่า 20 กิโลแคลอรีด้วย

พลังงาน/ สารอาหาร	ข้อกล่าวอ้าง	เงื่อนไข	
		ต่ออาหาร 100 กรัม (ของแข็ง)	ต่ออาหาร 100 มิลลิลิตร (ของเหลว)
น้ำตาล	ปราศจาก, ไม่มี (free, without, free of, no)	1.ไม่เกิน 0.5 ก. และ 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขใน ข้อ 1.1 ของบัญชีนี้ด้วย	1.ไม่เกิน 0.5 ก. และ 2.ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในข้อ 1.1 ของบัญชีนี้ด้วย
	ลดปริมาณลง, น้อยกว่า(reduced, reduced in, less, less than, lower, lower in)	ลดน้ำตาลลงเมื่อเทียบกับ ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหาร ชนิดเดียวกันหรือคล้ายคลึง กัน โดยลดลงตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป	ลดน้ำตาลลงเมื่อเทียบกับ ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหารชนิด เดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน โดย ลดลงตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป
ใยอาหาร	เป็นแหล่งของ, มี (good source, contain, provide)	ไม่น้อยกว่า 3 ก. ต่ออาหาร 100 ก. หรือ ไม่น้อยกว่า 1.5 ก. ต่อ พลังงาน 100 กิโลแคลอรี	ไม่น้อยกว่า 1.5 ก. ต่อพลังงาน 100 กิโลแคลอรี
	สูง, อุดม (high, rich, rich in, excellent source of)	ไม่น้อยกว่า 6 ก. ต่ออาหาร 100 ก. หรือ ไม่น้อยกว่า 3 ก. ต่อ พลังงาน 100 กิโลแคลอรี	ไม่น้อยกว่า 3 ก. ต่อพลังงาน 100 กิโลแคลอรี
	เสริม, เพิ่ม, มากกว่า (increased, more than, added, enriched, fortified)	1.เพิ่มใยอาหารขึ้นเมื่อเทียบกับ กับผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็น อาหารชนิดเดียวกันหรือ คล้ายคลึงกัน โดยเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป และ 2.ปริมาณใยอาหารที่เพิ่มขึ้น จะต้องไม่น้อยกว่า 3 ก. ด้วย	1.เพิ่มใยอาหารขึ้นเมื่อเทียบกับ กับผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหาร ชนิดเดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน โดยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป และ 2.ปริมาณใยอาหารที่เพิ่มขึ้น จะต้องไม่น้อยกว่า 1.5 ก.ต่อ พลังงาน 100 กิโลแคลอรี

*Thai RDI หมายถึง สารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป
(Thai Recommended Daily Intakes)

รายการอ้างอิง

- AIGSTER, A., DUNCAN, S. E., CONFORTI, F. D. & BARBEAU, W. E. 2011. Physicochemical properties and sensory attributes of resistant starch-supplemented granola bars and cereals. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 2159-2165.
- ALISHAHI, A., FARAHNAKY, A., MAJZOobi, M. & BLANCHARD, C. L. 2015. Physicochemical and textural properties of corn starch gels: Effect of mixing speed and time. *Food Hydrocolloids*, 45, 55-62.
- AMAGLIANI, L., O'REGAN, J., KELLY, A. L. & O'MAHONY, J. A. 2016. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch. *Journal of Cereal Science*, 70, 291-300.
- ANDERSON, J. W., BAIRD, P., DAVIS, J. R. H., FERRERI, S., KNUDTSON, M., KORAYM, A., WATERS, V. & WILLIAMS, C. L. 2009. Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67, 188-205.
- ANDERSON, R. A., CONWAY, H. F. & PEPLINSKI, A. J. 1970. Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. *Starch - Stärke*, 22, 130-135.
- AOAC 2000. Official Methods of Analysis of AOAC Interational. 17th edn. AOAC Interational.
- ARAUJO-DÍAZ, S. B., LEYVA-PORRAS, C., AGUIRRE-BAÑUELOS, P., ÁLVAREZ-SALAS, C. & SAAVEDRA-LEOS, Z. 2017. Evaluation of the physical properties and conservation of the antioxidants content, employing inulin and maltodextrin in the spray drying of blueberry juice. *Carbohydrate Polymers*, 167, 317-325.
- ASP, N.-G. 1996. Dietary carbohydrates: classification by chemistry and physiology. *Food Chemistry*, 57, 9-14.
- BARCZYNSKA, R., JOCHYM, K., SLIZEWSKA, K., KAPUSNIAK, J. & LIBUDZISZ, Z. 2010. The effect of citric acid-modified enzyme-resistant dextrin on growth and metabolism of selected strains of probiotic and other intestinal bacteria. *Journal of Functional Foods*, 2, 126-133.
- BARCZYNSKA, R., JURGOŃSKI, A., SLIZEWSKA, K., JUŚKIEWICZ, J. & KAPUSNIAK, J. 2017. Effects of potato dextrin on the composition and metabolism of the gut

- microbiota in rats fed standard and high-fat diets. *Journal of Functional Foods*, 34, 398-407.
- BETA, T. & CORKE, H. 2001. Noodle Quality as Related to Sorghum Starch Properties. *Cereal Chemistry*, 78, 417-420.
- BHAT, F. M. & RIAR, C. S. 2016. Effect of amylose, particle size & morphology on the functionality of starches of traditional rice cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 637-644.
- BRENNAN, C. S., KURI, V. & TUDORICA, C. M. 2004. Inulin-enriched pasta: effects on textural properties and starch degradation. *Food Chemistry*, 86, 189-193.
- BROWNLEE, I. A. 2011. The physiological roles of dietary fibre. *Food Hydrocolloids*, 25, 238-250.
- CHAISAWANG, M. & SUPHANTHARIKA, M. 2006. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 20, 641-649.
- CHAITO, C. & JUDPRASONG, K. 2014. Fructooligosaccharide in food and commercial food products in Thailand. *Khon Kaen University Research Journal*, 19, 430-440.
- CHANDANASREE, D., GUL, K. & RIAR, C. S. 2016. Effect of hydrocolloids and dry heat modification on physicochemical, thermal, pasting and morphological characteristics of cassava (*Manihot esculenta*) starch. *Food Hydrocolloids*, 52, 175-182.
- CHANG, U. J., HONG, Y. H., JUNG, E. Y. & SUH, H. J. 2014. Chapter 27 - Rice and the Glycemic Index A2 - Watson, Ronald Ross. In: PREEDY, V. R. & ZIBADI, S. (eds.) *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health*. San Diego: Academic Press.
- CHAROENKUL, N., UTTAPAP, D., PATHIPANAWAT, W. & TAKEDA, Y. 2011. Physicochemical characteristics of starches and flours from cassava varieties having different cooked root textures. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1774-1781.
- CHAROENREIN, S., TATIRAT, O. & MUADKLAY, J. 2008. Use of centrifugation–filtration for determination of syneresis in freeze–thaw starch gels. *Carbohydrate Polymers*, 73, 143-147.
- CHAWLA, R. & PATIL, G. R. 2010. Soluble Dietary Fiber. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 178-196.

- CHUEMONGKON, W. 2013. The Use of Fructo-oligosaccharide (FOS) in Medical Foods. *Thai Pharmaceutical and Health Science Journal*, 8, 122-128.
- CUI, M., FANG, L., ZHOU, H. & YANG, H. 2014. Effects of amino acids on the physicochemical properties of potato starch. *Food Chemistry*, 151, 162-167.
- DAI, F.-J. & CHAU, C.-F. 2017. Classification and regulatory perspectives of dietary fiber. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25, 37-42.
- DE ALMEIDA GUALTIERI, K., GUEMBAROVSKI, R., MASSAYO MAEDA ODA, J., FIORI-LOPES, L., KETELUT-CARNEIRO, N., DARC DE CASTRO, V., SONI NETO, J. & WATANABE, M. 2011. *Inulin: therapeutic potential, prebiotic properties and immunological aspects*.
- FABEK, H. & GOFF, H. D. 2015. Simulated intestinal hydrolysis of native tapioca starch: Understanding the effect of soluble fibre. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 6, 83-98.
- FÄSSLER, C., ARRIGONI, E., VENEMA, K., HAFNER, V., BROUNS, F. & AMADÒ, R. 2006. Digestibility of resistant starch containing preparations using two in vitro models. *European Journal of Nutrition*, 45, 445-453.
- FUENTES-ZARAGOZA, E., RIQUELME-NAVARRETE, M. J., SÁNCHEZ-ZAPATA, E. & PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A. 2010. Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43, 931-942.
- GANI, A., ASHWAR, B. A., AKHTER, G., SHAH, A., WANI, I. A. & MASOODI, F. A. 2017. Physico-chemical, structural, pasting and thermal properties of starches of fourteen Himalayan rice cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 1101-1107.
- GELENCSEK, T., JUHÁSZ, R., HÓDSÁGI, M., GERGELY, S. & SALGÓ, A. 2008. Comparative study of native and resistant starches. 37, 255-270.
- GIBSON, G. R., MCCARTNEY, A. L. & RASTALL, R. A. 2005. Prebiotics and resistance to gastrointestinal infections. *British Journal of Nutrition*, 93, S31-S34.
- GUL, K., RIAR, C. S., BALA, A. & SIBIAN, M. S. 2014. Effect of ionic gums and dry heating on physicochemical, morphological, thermal and pasting properties of water chestnut starch. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 348-355.
- GULARTE, M. A. & ROSELL, C. M. 2011. Physicochemical properties and enzymatic

- hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids. *Carbohydrate Polymers*, 85, 237-244.
- HOLLMANN, J., THEMEIER, H., NEESE, U. & LINDHAUER, M. G. 2013. Dietary fibre fractions in cereal foods measured by a new integrated AOAC method. *Food Chem*, 140, 586-9.
- HUANG, J., WEI, M., REN, R., LI, H., LIU, S. & YANG, D. 2017. Morphological changes of blocklets during the gelatinization process of tapioca starch. *Carbohydrate Polymers*, 163, 324-329.
- JI, Y. & YU, J. 2018. In vitro digestion and physicochemical characteristics of corn starch mixed with amino acid modified by heat-moisture treatment. *Food Hydrocolloids*, 77, 720-725.
- JULIANO, B. Q. A. 1971. Simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Science Today*, 16, 334-340.
- KELLY, G. 2009. Inulin-Type Prebiotics - A Review: Part 1. 13, 315-29.
- KERR, R. W. 1950. Chemistry and industry of starch (2ndEd.). New York-Academic Press, 791.
- KIM, J., ZHANG, C. & SHIN, M. 2015. Forming rice starch gels by adding retrograded and cross-linked resistant starch prepared from rice starch. *Food Science and Biotechnology*, 24, 835-841.
- KONG, X., ZHU, P., SUI, Z. & BAO, J. 2015. Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations. *Food Chemistry*, 172, 433-440.
- KONMAN, P., SRITHOOP, V. & SUKSOMBOOM, A. 2013. Effect of Pregelatinized Rice Flour on the Properties of Kanom Chan. *Agriculture Science Journal*, 44, 425-428.
- LAI, P., LI, K. Y., LU, S. & CHEN, H. H. 2011. Physicochemical characteristics of rice starch supplemented with dietary fibre. *Food Chemistry*, 127, 153-158.
- LEACH, H. W. 1965. Gelatinization of starch. In R.L. Whistler, E.F.Paschall, J.N.BeMiller, and H.J.Roberts (eds.), *Starch: Chemical and technology* 289 – 307.
- LI, C., OH, S.-G., LEE, D.-H., BAIK, H.-W. & CHUNG, H.-J. 2017. Effect of germination on the structures and physicochemical properties of starches from brown rice, oat, sorghum, and millet. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105,

931-939.

- LI, J.-Y. & YEH, A.-I. 2001. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *Journal of Food Engineering*, 50, 141-148.
- LIM, S. T., HAN, J. A., LIM, H. S. & BEMILLER, J. N. 2002. Modification of Starch by Dry Heating with Ionic Gums. *Cereal Chemistry*, 79, 601-606.
- LUTFI, Z., NAWAB, A., ALAM, F., HASNAIN, A. & HAIDER, S. Z. 2017. Influence of xanthan, guar, CMC and gum acacia on functional properties of water chestnut (*Trapa bispinosa*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 220-225.
- MIR, J., A., SRIKAEAO, K. & GARCIA, J. 2013. Effect of amylose and resistant starch on starch digestibility of rice flours and starches. *International Food Research Journal*, 20, 1329-1335.
- MUDGIL, D. & BARAK, S. 2013. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 61, 1-6.
- NIBA, L. L., BOKANGA, M. M., JACKSON, F. L., SCHLIMME, D. S. & LI, B. W. 2006. Physicochemical Properties and Starch Granular Characteristics of Flour from Various *Manihot Esculenta* (Cassava) Genotypes. *Journal of Food Science*, 67, 1701-1705.
- NOBRE, C., TEIXEIRA, J. A. & RODRIGUES, L. R. 2015. New Trends and Technological Challenges in the Industrial Production and Purification of Fructo-oligosaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55, 1444-1455.
- OH, I. K., BAE, I. Y. & LEE, H. G. 2018. Complexation of high amylose rice starch and hydrocolloid through dry heat treatment: Physical property and in vitro starch digestibility. *Journal of Cereal Science*, 79, 341-347.
- OHKUMA, K. & WAKABAYASHI, S. 2008. Fibersol-2: A Soluble, Non-Digestible, Starch-Derived Dietary Fibre. *Advanced Dietary Fibre Technology*, 44, 509-523.
- PATEL, S. & GOYAL, A. 2011. Functional oligosaccharides: production, properties and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 1119-1128.
- PHELPS, C. F. 1965. The physical properties of inulin solutions. *Biochemical Journal*, 95, 41-47.

- POMERANZ, Y. 1991. Functional Properties of Food Components. 2nd Edition.
- PONGSAWATMANIT, R., CHANTARO, P. & NISHINARI, K. 2013. Thermal and rheological properties of tapioca starch gels with and without xanthan gum under cold storage. *Journal of Food Engineering*, 117, 333-341.
- PONGSAWATMANIT, R. & SRIJUNTHONGSIRI, S. 2008. Influence of xanthan gum on rheological properties and freeze-thaw stability of tapioca starch. *Journal of Food Engineering*, 88, 137-143.
- POPOV-RALJIC, J., MASTILOVIC, J., LALICIC-PETRONIJEVIC, J., KEVRESAN, Z. & DEMIN, M. 2013. Sensory and color properties of dietary cookies with different fiber sources during 180 days of storage. *Hemijaska industrija*, 67, 123-134.
- RUBEL, I. A., PÉREZ, E. E., MANRIQUE, G. D. & GENOVESE, D. B. 2015. Fibre enrichment of wheat bread with Jerusalem artichoke inulin: Effect on dough rheology and bread quality. *Food Structure*, 3, 21-29.
- SANZ, T., SALVADOR, A. & FISZMAN, S. M. 2008. Resistant starch (RS) in battered fried products: Functionality and high-fibre benefit. *Food Hydrocolloids*, 22, 543-549.
- SHOAB, M., SHEHZAD, A., OMAR, M., RAKHA, A., RAZA, H., SHARIF, H. R., SHAKEEL, A., ANSARI, A. & NIAZI, S. 2016. Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers*, 147, 444-454.
- SINGH, A., GEVEKE, D. J. & YADAV, M. P. 2017. Improvement of rheological, thermal and functional properties of tapioca starch by using gum arabic. *LWT*, 80, 155-162.
- SINGH, N., KAUR, L., SANDHU, K. S., KAUR, J. & NISHINARI, K. 2006. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids*, 20, 532-542.
- SITTIPOD, S. & SHI, Y.-C. 2016. Changes in physicochemical properties of rice starch during steeping in the parboiling process. *Journal of Cereal Science*, 69, 398-405.
- SOZER, N., DALGIÇ, A. C. & KAYA, A. 2007. Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81, 476-484.
- SRICHUWONG, S., ISONO, N., JIANG, H., MISHIMA, T. & HISAMATSU, M. 2012. Freeze-thaw stability of starches from different botanical sources: Correlation with structural features. *Carbohydrate Polymers*, 87, 1275-1279.
- SRIKAE0, K., MINGYAI, S. & SOPADE PETER, A. 2011. Physicochemical properties, resistant

- starch content and enzymatic digestibility of unripe banana, edible canna, taro flours and their rice noodle products. *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 2111-2117.
- SRIKAEAO, K. & SANGKHIW, J. 2014. Effects of amylose and resistant starch on glycaemic index of rice noodles. *LWT - Food Science and Technology*, 59, 1129-1135.
- SUKHIJA, S., SINGH, S. & RIAR, C. S. 2016. Effect of oxidation, cross-linking and dual modification on physicochemical, crystallinity, morphological, pasting and thermal characteristics of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch. *Food Hydrocolloids*, 55, 56-64.
- SUN, D. & YOO, B. 2015. Effect of tapioca starch addition on rheological, thermal, and gelling properties of rice starch. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 205-211.
- TAKAHASHI, T. & FUJITA, N. 2017. Thermal and rheological characteristics of mutant rice starches with widespread variation of amylose content and amylopectin structure. *Food Hydrocolloids*, 62, 83-93.
- TSATSARAGKOU, K., PAPANTONIOU, M. & MANDALA, I. 2015. Rheological, Physical, and Sensory Attributes of Gluten-Free Rice Cakes Containing Resistant Starch. *Journal of Food Science*, 80.
- VOLPINI-RAPINA, L. F., SOKEI, F. R. & CONTI-SILVA, A. C. 2012. Sensory profile and preference mapping of orange cakes with addition of prebiotics inulin and oligofructose. *LWT - Food Science and Technology*, 48, 37-42.
- WANDEE, Y., UTTAPAP, D., PUNCHA-ARNON, S., PUTTANLEK, C., RUNGSARDTHONG, V. & WETPRASIT, N. 2015. Quality assessment of noodles made from blends of rice flour and canna starch. *Food Chemistry*, 179, 85-93.
- WITCZAK, T., WITCZAK, M. & ZIOBRO, R. 2014. Effect of inulin and pectin on rheological and thermal properties of potato starch paste and gel. *Journal of Food Engineering*, 124, 72-79.
- YADAV, R. B., KUMAR, N. & YADAV, B. S. 2016. Characterization of banana, potato, and rice starch blends for their physicochemical and pasting properties. *Cogent Food & Agriculture*, 2.
- YOU, S.-Y., OH, S.-K., KIM, H.-S. & CHUNG, H.-J. 2015. Influence of molecular structure on

physicochemical properties and digestibility of normal rice starches.

International Journal of Biological Macromolecules, 77, 375-382.

YU, M. & SHIN, M. 2015. Improving gel formation of rice starch added with cross-linked resistant starch prepared from rice starch. *Starch - Stärke*, 67, 829-837.

ZENG, J., GAO, H., LI, G. L., SUN, J. & MA, H. 2015. Effect of Some Oligosaccharides on Functional Properties of Wheat Starch. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 14 (1), 7-14.

ZHANG, Y. 2014. Thermal, Pasting and Gel Textural Properties of Commercial Starches from Different Botanical Sources. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 4, 1-6.

ZHU, F. 2015. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 456-480.

ZHU, Z., HE, J., LIU, G., BARBA, F. J., KOUBAA, M., DING, L., BALS, O., GRIMI, N. & VOROBIEV, E. 2016. Recent insights for the green recovery of inulin from plant food materials using non-conventional extraction technologies: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 1-9.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ 2546. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 3.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ 2549. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นลิน คูอมรพัฒนา 2553. เส้นทางการขนมไทย. สำนักพิมพ์แสงแดด จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1, 88-89.

นิธิยา รัตนานนท์ 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1.

ลอร่า เอ็ม ราเบ็ท 2553. โอลิโกแซคคาไรด์จากนมกระตุ่นระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง. สิทธิบัตรไทยเลขที่ 105534.

สุพล ชัยสถาพร 2554. เครื่องดื่มโยเกิร์ตผสมสารเสริมอาหาร. สิทธิบัตรไทยเลขที่ 6499.

อรอนงค์ นัยวิกุล 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จาริณี พยัคฆชาติ
วัน เดือน ปี เกิด	20 ตุลาคม 2535
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) เทคโนโลยีอาหาร
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/168 ม.5 ต.ท่าवासูกรี อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
ผลงานตีพิมพ์	จาริณี พยัคฆชาติ และ เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. ผลของใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลัง. การประชุมสวนสุนันทาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับชาติ ครั้งที่ 1 “การสร้างสรรค์และนวัตกรรม ก้าวสู่ประเทศไทย 4.0”. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. น.533-544.

