

ผลของวัตถุเจือปนประเภทคาร์โบไฮเดรตต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าว



นายไชยพรรณ ธาราสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

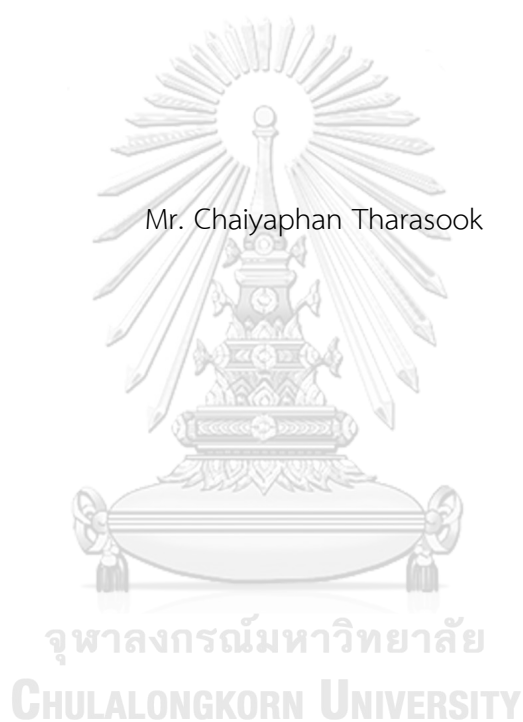
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

EFFECTS OF CARBOHYDRATE ADDITIVES ON PROPERTIES OF RICE STARCH PASTE AND
GEL

Mr. Chaiyaphan Tharasook



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

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของวัตถุเจือปนประเภทคาร์โบไฮเดรตต่อสมบัติของ เพสต์และเจลสตาร์ชข้าว
โดย	นายไชยพรรณ ธาราสุข
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล)

..... กรรมการ
(ดร.ตรีช กวักเพ็ญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ทุลยธัญ)

ไชยพรรณธ ธาราสุข : ผลของวัตถุเจือปนประเภทคาร์โบไฮเดรตต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าว (EFFECTS OF CARBOHYDRATE ADDITIVES ON PROPERTIES OF RICE STARCH PASTE AND GEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล, หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัตถุเจือปนประเภทคาร์โบไฮเดรตต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า วัตถุเจือปนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกได้แก่ น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ (กลูโคส ฟรุคโทส และซอร์บิทอล) และกลุ่มที่สองได้แก่ ออลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติเป็นพรีไบโอติก (พอลิเดกซ์โทรส ฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ และอินูลิน) โดยเติมวัตถุเจือปนในปริมาณ 5, 10, 20, และ 30% โดยน้ำหนักของสตาร์ช จากการติดตามพฤติกรรมของการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเกิดเพสต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ความหนืดเบรกคาวนและความหนืดเซตแบ็กก็มีแนวโน้มลดลงด้วย ในด้านสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยกลูโคสและซอร์บิทอลทำให้อุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีนเซชันของสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้นได้สูงสุด ในแง่การเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างที่เติมกลูโคสและซอร์บิทอลมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมฟรุคโทสที่ความเข้มข้นเท่ากัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลูโคสและซอร์บิทอลมีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าฟรุคโทส นอกจากนี้จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง โดยตัวอย่างควบคุมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าเจลสตาร์ชที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 14 วันแรกของการเก็บรักษา ในแง่ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในเจลสตาร์ชพบว่ามีความหนืดลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำถูกจับไว้โดยองค์ประกอบอื่นภายในระบบ เช่น การเกิดไฮโดรเจนกับผลึกสตาร์ช โดยตัวอย่างควบคุมมีการลดลงของ $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2 สูงที่สุด สำหรับผลของการเติมพรีไบโอติกพบว่าการเติมพรีไบโอติกมีผลสำคัญต่อพฤติกรรมของการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าว โดยเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิการเกิดเพสต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นเท่ากัน ความหนืดสูงสุดของตัวอย่างที่เติมอินูลินมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เติม พอลิเดกซ์โทรสหรือฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ เมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้นพบว่าความหนืดเบรกคาวนและความหนืดเซตแบ็กมีแนวโน้มลดลง สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลลาทีนเซชันเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของพรีไบโอติกที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เอนทัลปีในการเกิดเจลลาทีนเซชันลดลงเล็กน้อย การเติมพรีไบโอติกสามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าว โดยตัวอย่างที่เติมอินูลินมีเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมพอลิเดกซ์โทรสและฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง ที่พบว่าเจลสตาร์ชที่เติมพรีไบโอติกมีการเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแข็งในอัตราที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ในด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ การเติมพรีไบโอติกทำให้ $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2 ลดลงในอัตราที่ช้ากว่าตัวอย่างควบคุม โดยสรุปพบว่าวัตถุเจือปนคาร์โบไฮเดรตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำให้สตาร์ชเกิดเจลลาทีนเซชันได้ยากขึ้น ในขณะเดียวกันก็ทำให้สตาร์ชแกรนูลทันทานต่อความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น รวมทั้งช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5871941323 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS: GELATINIZATION / PASTING BEHAVIOR / RETROGRADATION / RICE STARCH / CARBOHYDRATE ADDITIVE

CHAIYAPHAN THARASOOK: EFFECTS OF CARBOHYDRATE ADDITIVES ON PROPERTIES OF RICE STARCH PASTE AND GEL. ADVISOR: ASST. PROF. THANACHAN MAHAWANICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. JIRARAT ANUNTAGOOL, Ph.D., pp.

Starch is a major component of human food. Apart from its nutritional role, starch also contributes various functional properties to food such as thickening effect and pasting or gelling property. This study aimed to investigate the effects of carbohydrate additives on properties of rice starch (RS) paste and gel. The sugar and sugar alcohol used in this study were fructose, glucose and sorbitol, The prebiotics used in this study were polydextrose, fructo-oligosaccharide (FOS) and inulin. The additives were added at 5, 10, 20 and 30% by weight of starch. Regarding to pasting behavior, addition of sugar and sugar alcohol caused an increase in pasting temperature, with a decrease in peak viscosity, breakdown viscosity and setback viscosity, of rice starch paste ($p \leq 0.05$). Sugar and sugar-alcohol addition was found to increase gelatinization temperature and gelatinization enthalpy of rice starch with increasing sugar and sugar-alcohol concentration, glucose and sorbitol posed the most effect on gelatinization temperature and gelatinization enthalpy of rice starch. Sugar and sugar-alcohol addition also posed a retarding effect on rice starch retrogradation, with glucose and sorbitol being more efficient in lowering starch retrogradation as compared to fructose at the same concentration. The content of solid-like fraction was increase while water mobility of the rice starch gel became decreasing with increasing sugar and sugar-alcohol concentration. ($p \leq 0.05$). The prebiotics was found that incorporation of prebiotics posed a striking effect on pasting behavior of rice starch. Pasting temperature was found to increase while peak viscosity became decreasing with increasing prebiotic concentration. At the same concentration, the polysaccharide inulin posed a greater effect on pasting temperature than the oligosaccharides, polydextrose and fructo-oligosaccharide, did. With increasing prebiotic concentration, breakdown and setback of the starch paste were found to decrease. In addition, gelatinization temperature exhibited an increasing trend upon adding prebiotics. Prebiotic addition also posed a retarding effect on rice starch retrogradation, with inulin being more efficient in lowering starch retrogradation as compared to polydextrose and fructo-oligosaccharide at the same concentration. The content of solid-like fraction was increase while water mobility of the rice starch gel became decreasing with increasing the prebiotics concentration. ($p \leq 0.05$).

Department: Food Technology

Student's Signature

Field of Study: Food Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. จิรรัตน์ อนันตกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น รวมถึงตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.วรรณาคูลยธัญ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์ และอาจารย์ ดร.ตรีช กวักเพฑูรย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ตั้งแต่การพัฒนาโครงร่างวิทยานิพนธ์ แนะนำเทคนิคในการวิเคราะห์ สนับสนุนวัสดุในการวิจัย จนกระทั่งแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภาค สอนไว และภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่าง และขอขอบพระคุณ คุณขวัญชัย คงวัฒนานนท์ จากบริษัท บรูเกอร์ ไบโอสปิน จำกัด สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์

ขอขอบพระคุณ คุณกาญจนา ลาภานิกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ ฟรุโกโทออลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิเดกซ์ทรอส รวมทั้งบริษัท เจ็บเซ่น แอนด์ เจ็สเซ่น อินกรีเดียนส์ (ที) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบอินูลินสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำตลอดจนเป็นกำลังใจ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ	1
บทที่ 1	1
บทที่ 2	3
2.1 สตาร์ช	3
2.1.1 โมเลกุลสตาร์ช	3
2.1.2 โครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล.....	5
2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น	5
2.2 น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ในแง่การเป็นวัตถุเจือปนในอาหารจากสตาร์ช	8
2.2.1 สมบัติของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์	8
2.2.2 ผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ.....	8
2.3 พรีไบโอติกในแง่การเป็นวัตถุเจือปนในอาหารจากสตาร์ช.....	10
2.3.1 สมบัติของพรีไบโอติก	10
2.3.2 ผลของพรีไบโอติกต่อระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ.....	12
2.4 การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance, NMR, spectroscopy) เพื่อศึกษาระบบของสตาร์ช	13
2.4.1 การใช้ NMR เพื่อศึกษาส่วนเสมือนของแข็ง.....	14
2.4.2 การใช้ NMR เพื่อศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ	14
บทที่ 3	16

3.1	วัตถุดิบและสารเคมี.....	16
3.2	อุปกรณ์.....	16
3.3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	17
3.3.1	การเตรียมสตาร์ชข้าวเจ้า.....	17
3.3.2	การศึกษาผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า.....	18
3.3.2.1	พฤติกรรมการเกิดเพสต์.....	18
3.3.2.2	สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน.....	19
3.3.2.3	สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน).....	20
3.3.2.4	ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง (solid-like fraction).....	20
3.3.2.5	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ (water mobility).....	22
3.3.3	การศึกษาผลของพีวีไอตีกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า.....	23
3.3.3.1	พฤติกรรมการเกิดเพสต์.....	23
3.3.3.2	สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน.....	24
3.3.3.3	สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน).....	25
3.3.3.4	ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง.....	25
3.3.3.5	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ.....	26
3.3.4	การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	26
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	27
4.1	องค์ประกอบหลักของสตาร์ชข้าวเจ้า.....	27
4.2	ผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า.....	27
4.2.1	พฤติกรรมการเกิดเพสต์.....	27

4.2.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดเจลาทีโนเซชัน	29
4.2.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึก แอมิโลเพกทิน)	31
4.2.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง	34
4.2.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ	35
4.3 ผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า	38
4.3.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์	38
4.3.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดเจลาทีโนเซชัน	40
4.3.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึก แอมิโลเพกทิน)	42
4.3.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง	42
4.3.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	46
.....	48
รายการอ้างอิง	48
.....	60
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	61
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูล	64
ภาคผนวก ค กราฟข้อมูล	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	83

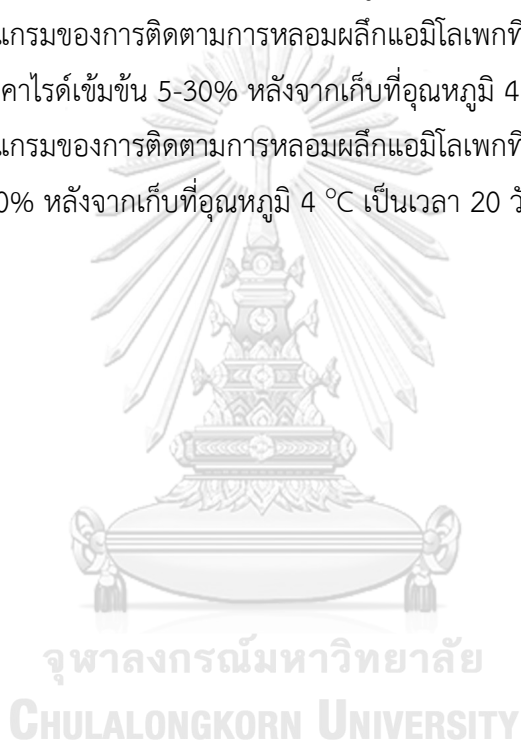
สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์.....	28
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิ เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน และเอนทาลปีของการหลอมผลึกเอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์	33
ตารางที่ 4.3 ^1H NMR T_1 และ T_2 ของน้ำในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส	37
ตารางที่ 4.4 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก.....	39
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิ เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน และเอนทาลปีของการหลอมผลึกเอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก	41
ตารางที่ 4.6 ^1H NMR T_1 และ T_2 ของน้ำในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส	45
ตารางที่ ข. 1 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส.....	65
ตารางที่ ข. 2 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส.....	66

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของแอมิโลส.....	4
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแอมิโลแพกติน.....	4
ภาพที่ 2.3 แบบจำลองแสดงโครงสร้างแบบผลึกและแบบอสัณฐานของสตาร์ชแกรนูล.....	5
ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน.....	7
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น (A) สตาร์ชธรรมชาติ (native starch) (B) สตาร์ชที่เกิดเจลลาที่ไนเซชัน และ (C) สตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรดชัน.....	7
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเด็คซ์โทรส.....	11
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของของฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์และอินูลิน ($n > 30$).....	12
ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณทาง NMR ที่เกี่ยวข้องกัเป็นส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว.....	22
ภาพที่ 4.1 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม (ก) ฟรักโทส (ข) กลูโคส และ (ค) ซอร์บิทอล และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน....	36
ภาพที่ 4.2 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม (ก) พอลิเด็คซ์โทรส (ข) ฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และ (ค) อินูลิน และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน.....	44
ภาพที่ ค.1 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มเข้มข้น 5-30%	68
ภาพที่ ค.2 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มกลูโคสเข้มข้น 5-30%.....	68
ภาพที่ ค.3 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30%.....	69
ภาพที่ ค.4 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มพอลิเด็คซ์โทรสเข้มข้น 5-30%	69
ภาพที่ ค.5 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 30%.....	70
ภาพที่ ค.6 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เต็มอินูลินเข้มข้น 5-30%.....	70
ภาพที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาที่ไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม ฟรักโทสเข้มข้น 5-30%.....	71
ภาพที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาที่ไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม กลูโคสเข้มข้น 5-30%	71

ภาพที่ ค. 25 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมฟรักโทสเข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน.....	80
ภาพที่ ค. 26 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมกลูโคสเข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน	80
ภาพที่ ค. 27 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมซอลบิทอลเข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน	81
ภาพที่ ค. 28 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมพอลิเดกซ์ทรอสเข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน	81
ภาพที่ ค. 29 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน	82
ภาพที่ ค. 30 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่ เติมอินูลินเข้มข้น 5-30% หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 วัน	82



บทที่ 1

บทนำ

สตาร์ชนอกจากจะมีบทบาทในการเป็นแหล่งพลังงานหลักของมนุษย์แล้ว ยังมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลายในอาหาร เช่น ทำให้เกิดเพสต์และเจล ทำให้เกิดฟิล์ม ควบคุมความคงตัว ให้ความชื้นหนืด ปรับปรุงสมบัติด้านการไหล และเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์ต่อการแช่เยือกแข็ง-การคลายสภาพเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) (Satin, 2012) ซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็นในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา

ระบบอาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่หลากหลาย เป็นระบบที่มีความซับซ้อนซึ่งอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบด้วยกันเองและส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านต่างๆ ของอาหารให้แตกต่างไปจากระบบที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า (Gaonkar, & McPherson, 2016) งานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาในระบบไบนารี (binary system) ที่มีองค์ประกอบเพียงสตาร์ชกับน้ำ ในขณะที่อาหารจากสตาร์ช (starch-based food) ส่วนใหญ่มักมีการเติมวัตถุดิบอาหารอื่นซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ช

วัตถุดิบอาหารประเภทน้ำตาลและน้ำตาลแอกฮอลล์เป็นสารกลุ่มหนึ่งที่ใช้กันมากในอาหารจากสตาร์ช โดยทั้งสตาร์ชและวัตถุดิบอาหารประเภทน้ำตาลและน้ำตาลแอกฮอลล์ต่างก็เป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซีหลายหมู่ (polyhydroxy substance) ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากันได้ ส่วนพรีไบโอติกเป็นสารอีกกลุ่มหนึ่งที่ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในอาหารเพิ่มมากขึ้น โดยพรีไบโอติกเป็นองค์ประกอบในอาหารที่ไม่ถูกย่อยในทางเดินอาหารส่วนบนของมนุษย์ เนื่องจากร่างกายมนุษย์ไม่ได้สร้างเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย (degrading enzyme) สำหรับโมเลกุลเหล่านี้ สารที่เป็นพรีไบโอติกส่วนใหญ่ได้แก่คาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางจนถึงสูง เช่น พอลิเด็คซิโทรส ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และอินูลิน คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้จะผ่านทางเดินอาหารส่วนบนไปยังลำไส้ใหญ่ และ

ถูกหมักได้โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ทั้งที่เป็นโพรไบโอติกและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ ซึ่งจะย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันสายโซ่สั้น (short-chain fatty acid) ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์ชั้นผิวของลำไส้ใหญ่และมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogenic microorganism) (Gibson, & Roberfroid, 1995) จากการที่พรีไบโอติกเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซีหลายหมู่จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ชและอาจส่งผลต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัตถุดิบอาหารประเภทน้ำตาล น้ำตาลแอกทอสอล และพรีไบโอติก ต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์ การเกิดเจลลาทีโนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้า



บทที่ 2

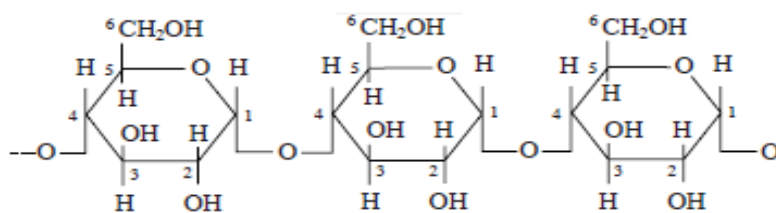
วารสารปริทัศน์

2.1 สตาร์ช

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตซึ่งได้จากการสังเคราะห์แสง โดยพืชเก็บสะสมไว้เป็นแหล่งพลังงาน สตาร์ชสามารถสกัดได้จากแหล่งต่างๆ ได้แก่ เมล็ด หัวและรากสะสมอาหาร สตาร์ชที่สกัดจากพืชต่างชนิดกันมีสมบัติที่แตกต่างกัน ในกรณีของข้าว ส่วนที่มีปริมาณสตาร์ชสูงสุดได้แก่ส่วน เอนโดสเปิร์มของเมล็ด ซึ่งเป็นสตาร์ชอาหารที่สำคัญอย่างหนึ่งของมนุษย์

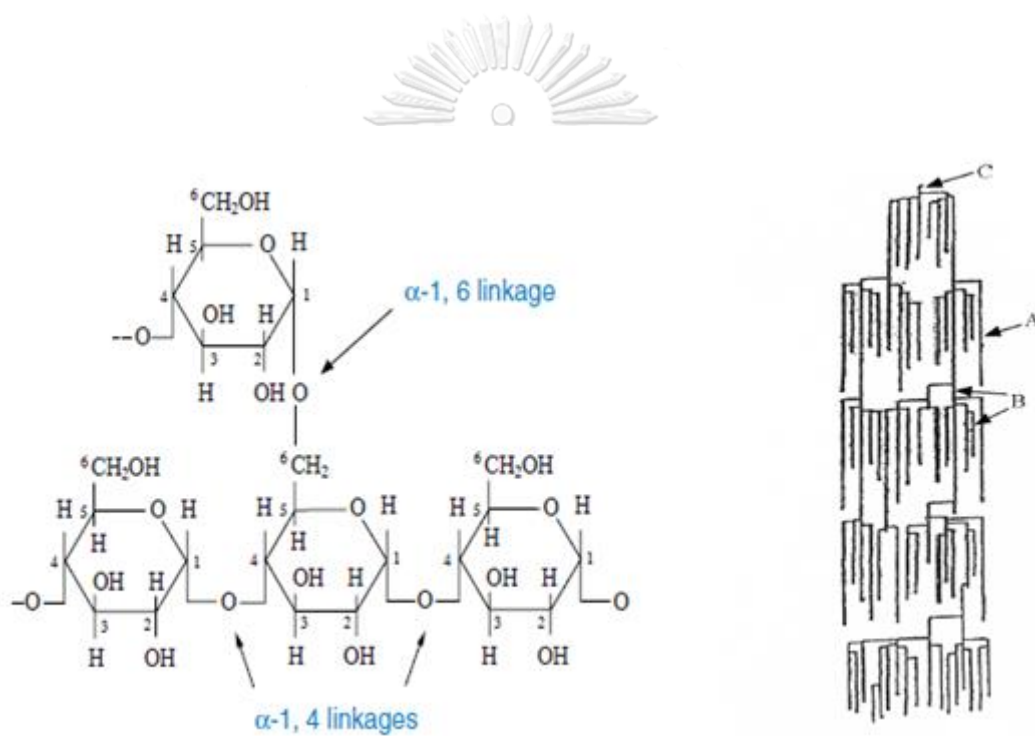
2.1.1 โมเลกุลสตาร์ช

โมเลกุลสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน แอมิโลส (ภาพที่ 2.1) มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยย่อยมอนอเมอร์ที่เป็น α -D-glucose ประมาณ 800-3000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,4 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^6 ดาลตัน โดยอาจพบโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านในโมเลกุลของแอมิโลสได้เล็กน้อย สำหรับแอมิโลเพกทิน (ภาพที่ 2.2) มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยมอนอเมอร์ที่เป็น α -D-glucose เช่นเดียวกัน ส่วนของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,4 ส่วนหน่วยย่อยกลูโคส ณ จุดแตกกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,6 แอมิโลเพกทินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าแอมิโลสมาก โดยประกอบด้วยหน่วยย่อยประมาณ 2×10^6 หน่วย และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน โครงสร้างกิ่งก้านของแอมิโลเพกทินแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ สายโซ่เอ (A-chain) เป็นโครงสร้างที่ไม่มีกิ่งก้านและเชื่อมต่อกับสายโซ่อื่นเพียงตำแหน่งเดียว สายโซ่บี (B-chain) เป็นโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านเชื่อมต่อกับสายโซ่อื่น 2 ตำแหน่งหรือมากกว่า โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ได้แก่ บี1 บี2 บี3 และ บี4 โดยสายโซ่ บี1 บี2 บี3 และ บี4 ประกอบด้วย 1, 2, 3 และ ≥ 4 กลุ่มของสายโซ่ (cluster) ตามลำดับ ส่วนสายโซ่ซี (C-chain) ประกอบด้วยปลายรีดิวซิงที่มีเพียงปลายเดียวของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน ดังนั้นแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะมีสายโซ่ซีเพียง 1 สายเท่านั้น (Bao, & Bergman, 2004; Hizukuri, 1986)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: ดัดแปลงจาก Cura, Jansson, & Krisman (1995)

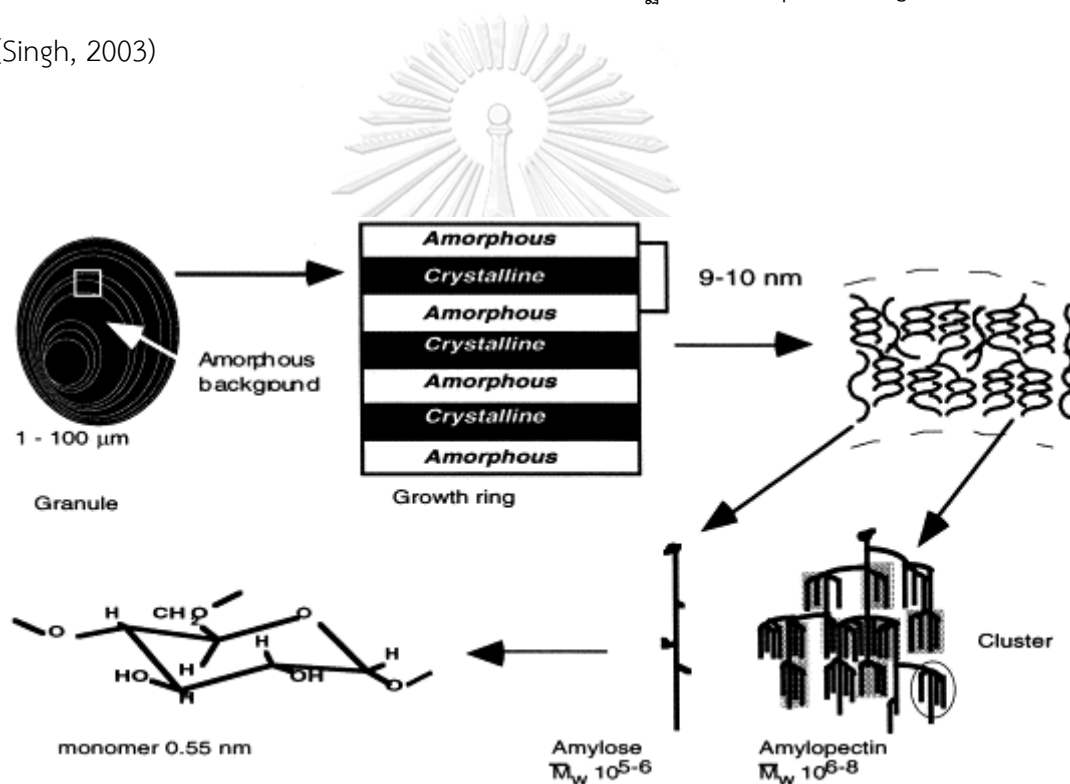


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Bao, & Bergman (2004)

2.1.2 โครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล

สตาร์ชในพืชอยู่ในรูปแบบของสตาร์ชแกรนูล ซึ่งมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่อยู่ในสตาร์ชแกรนูลสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ได้ โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของหน่วยย่อยกลูโคส เกิดการจัดเรียงกันของสายโซ่เป็นโครงสร้างแบบผลึก (crystalline region) ส่วนบริเวณที่มีการขัดขวางเชิงโครงสร้าง (steric hindrance) ได้แก่ บริเวณจุดแตกกิ่งของแอมิโลเพกทิน สายโซ่สตาร์ชไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบได้ จึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous region) (ภาพที่ 2.3) (Singh, 2003)



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองแสดงโครงสร้างแบบผลึกและแบบอสัณฐานของสตาร์ชแกรนูล

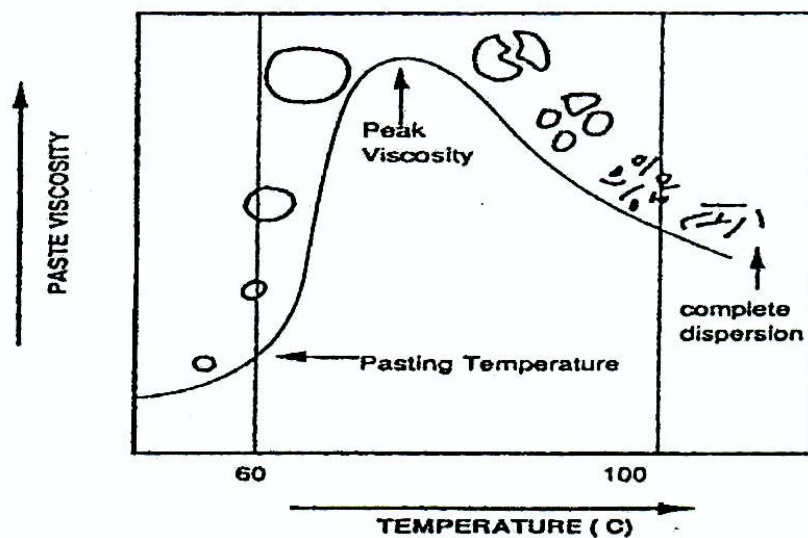
ที่มา: Buléon, Colonna, Planchot, & Ball (1998)

2.1.3 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น

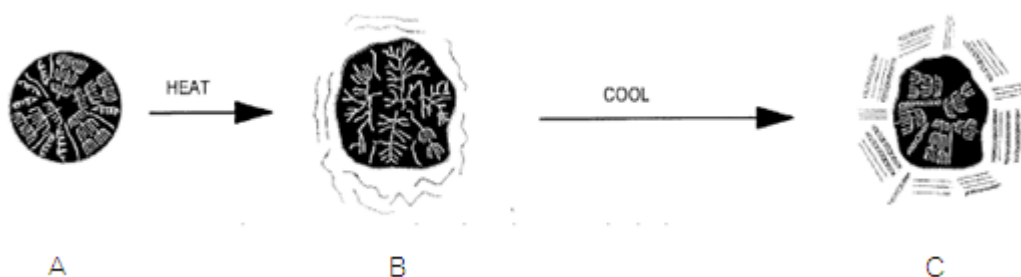
สตาร์ชธรรมชาติที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (unheated native starch) แม้จะสามารถถูกย่อยสลายได้โดยแอมิเลส แต่อัตราการย่อยมีค่าต่ำและการย่อยเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (Patindol et al., 2013) สตาร์ชที่นำมาใช้เป็นอาหารจึงมักผ่านกระบวนการให้ความร้อนและการทำให้เย็นซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้านต่างๆ ของสตาร์ช

เมื่อนำสตาร์ชมาแขวนลอยในน้ำเย็น น้ำจะสามารถผ่านเข้าไปในบริเวณส่วนออสซิลโลแกรมของสตาร์ชแกรนูลได้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่โมเลกุลของสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวกันอย่างมีหนาแน่นและไม่เป็นระเบียบ แต่น้ำจะไม่สามารถผ่านเข้าสู่บริเวณที่มีโครงสร้างแบบผลึกได้ เนื่องจากในบริเวณนี้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีความหนาแน่น เมื่อนำสารแขวนลอยสตาร์ชมาให้ความร้อน ความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในภายในโครงสร้างแบบผลึก เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลน้ำและหมู่ไฮดรอกซีของสตาร์ช สตาร์ชแกรนูลเกิดการสูญเสียโครงสร้างแบบผลึกและลักษณะไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) และเกิดการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเจลาติไนเซชัน (gelatinization) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชแกรนูลพองตัวนี้ว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) ในระหว่างการให้ความร้อน สารแขวนลอยสตาร์ชจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน (friction) ระหว่างสตาร์ชแกรนูลที่พองตัว (ภาพที่ 2.4) หากยังคงให้ความร้อนต่อไป สตาร์ชแกรนูลที่เปราะบางสามารถแตกออก ความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชจะกลับลดลงอีกครั้งหนึ่ง

เมื่อนำสารแขวนลอยสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วมาทำให้เย็นตัวลง ความหนืดของสารแขวนลอยจะกลับมาเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสตาร์ชกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของสตาร์ชและชั้นน้ำที่เกิดไฮเดรชันอยู่กับสตาร์ชออกไป สตาร์ชจะสูญเสียสมบัติการละลาย เรียกปรากฏการณ์นี้ว่ารีโทรเกรดชัน (retrogradation) (Copeland, Blazek, Salman, & Tang, 2009) แอมิโลสจะเกิดรีโทรเกรดชันได้ง่ายกว่าแอมิโลเพกทินเนื่องจากแอมิโลสมีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงจึงเกิดการจัดเรียงตัวกันและเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ได้ง่าย ในขณะที่โครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านของแอมิโลเพกทินทำให้เกิดการขัดขวางเชิงโครงสร้างในการที่โมเลกุลจะมาจัดเรียงตัวกันและเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ซึ่งอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชนั้นๆ (BeMiller, 2007; Eliasson, 2004) ภาพที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน
ที่มา: ดัดแปลงจาก BeMiller, & Whistler (1996)



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น (A) สตาร์ชธรรมชาติ (native starch) (B) สตาร์ชที่เกิดเจลลาทีโนเซชัน และ (C) สตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรดชัน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Taggart (2004)

2.2 น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ในแง่การเป็นวัตถุเจือปนในอาหารจากสตาร์ช

2.2.1 สมบัติของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์

น้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทมอนอแซ็กคาไรด์และไดแซ็กคาไรด์ เป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซีหลายหมู่ จึงมีสมบัติชอบน้ำและละลายน้ำได้ดี น้ำตาลเป็นองค์ประกอบและใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารในอาหารต่างๆ รวมถึงอาหารจากสตาร์ช โดยน้ำตาลมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลายในอาหาร ได้แก่ เป็นสารให้รสหวาน ให้เนื้อสัมผัส (texturizer) ปรับปรุงความนุ่ม (tenderizer) ให้สี (คาราเมลไลเซชันและปฏิกิริยาเมลลาร์ด) ปรับปรุงสมบัติการละลาย (solubility) ปรับเปลี่ยนจุดเยือกแข็งและจุดเดือด ยืดอายุการเก็บรักษา เป็นสารต้านออกซิเดชัน และเป็นสับสเตรทของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก

สำหรับน้ำตาลแอลกอฮอล์ เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลที่ผลิตได้จากการทำไฮโดรจีเนชันหรือรีดักชัน โดยเป็นปฏิกิริยาการเติมอะตอมไฮโดรเจนที่ตำแหน่งหมู่แอลดีไฮด์หรือหมู่คีโตของน้ำตาล ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเพียงหมู่ไฮดรอกซีเป็นหมู่หน้าที่ โดยมีหมู่ไฮดรอกซีตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป จึงมีสมบัติชอบน้ำและละลายน้ำได้ น้ำตาลแอลกอฮอล์มีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลายในอาหาร ได้แก่ เป็นสารให้รสหวานพลังงานต่ำ (reduced calorie sweetener) ควบคุมความหนืดและเนื้อสัมผัส เพิ่มเนื้ออาหาร (body) รักษาความชื้น ลดวอเตอร์แอกทิวิตี ควบคุมการตกผลึกของน้ำตาล ปรับปรุงความนุ่ม ปรับปรุงสมบัติการดูดน้ำกลับ (rehydration) และเป็นตัวทำละลายของสารให้กลิ่นรส

2.2.2 ผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

เนื่องจากน้ำตาลเป็นวัตถุเจือปนอาหารที่มีปริมาณการใช้มากที่สุด ส่วนน้ำตาลแอลกอฮอล์ก็มีปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ที่ผ่านมามีนักวิจัยสนใจศึกษาผลของวัตถุเจือปนอาหารดังกล่าวต่อสมบัติของระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

Kohyama, & Nishinari (1991) ศึกษาผลของน้ำตาลต่อการเกิดเจลลาทีนในเซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ชมันเทศ *Ipomoea batatas* ที่ติดตามโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) ในงานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยได้แปรชนิดของน้ำตาลเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส กลูโคส และฟรุคโทส และแปรความเข้มข้นของน้ำตาลในช่วง

0-50% โดยน้ำหนักทั้งหมด โดยความเข้มข้นของสตาร์ชที่ใช้เท่ากับ 33% โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของน้ำตาลเท่ากัน ตัวอย่างที่เติมซูโครสมีอุณหภูมิที่จุดพีค (peak temperature) ของการเกิดเจลาทีไนเซชันสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ กลูโคสและฟรุกโทส ตามลำดับ ผู้วิจัยอธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเจลาทีไนเซชันอาจเนื่องมาจากปัจจัย 2 ประการ ประการแรกการเติมน้ำตาลทำให้ต้องการน้ำที่เกิดไฮเดรชันกับโมเลกุลน้ำตาล จึงมีผลลดสภาพพร้อมใช้ของน้ำ (water availability) ในกระบวนการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ช ปัจจัยอีกประการหนึ่งคือโมเลกุลน้ำตาลอาจเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ของสตาร์ชและช่วยเพิ่มความเสถียรให้แก่บริเวณส่วนผลึกของสตาร์ช ในด้านการเกิดรีโทรเกรเดชัน งานวิจัยดังกล่าวรายงานว่าซูโครสมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชะลอรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันเทศ โดยอัตราส่วนรีโทรเกรเดชัน (retrogradation ratio) มีค่าลดลงต่ำที่สุดในตัวอย่างที่เติมซูโครส รองลงมาได้แก่ กลูโคสและฟรุกโทส ตามลำดับ ผู้วิจัยเสนอว่าโมเลกุลน้ำตาลสามารถเกิดอันตรกิริยาได้กับสายโซ่สตาร์ช และมีผลเพิ่มความเสถียรให้กับส่วนที่เป็นอสัณฐานและเมทริกซ์ของสายโซ่สตาร์ชที่เจลาทีไนส์

Hirashima, Takahashi, & Nishinari (2005) ศึกษาผลของความเข้มข้นของซูโครสต่อการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวโพด ซึ่งติดตามโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี(DSC) รายงานว่าการเติมซูโครสที่ความเข้มข้นสูงกว่า 20% โดยน้ำหนักทั้งหมด ทำให้การพองตัวของสตาร์ชแกรนูลลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมซูโครสทำให้อุณหภูมิเจลาทีไนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซูโครสที่เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยเสนอว่าที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากซูโครสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่สตาร์ชในบริเวณส่วนที่เป็นอสัณฐานและมีผลลดการเป็นพลาสติกไซเซชันของน้ำ (antiplasticizing effect) ทำให้เจลาทีไนเซชันของสตาร์ชเกิดได้ไม่สมบูรณ์

Gunaratne, Ranaweera, & Cork (2007) ศึกษาผลของซูโครสและกลูโคสความเข้มข้น0-40%โดยน้ำหนักต่อปริมาตรทั้งหมดต่อการเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี(DSC) ในการติดตาม พบว่าซูโครสมีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่งได้มากกว่ากลูโคส

อย่างไรก็ตามมีบางงานวิจัยที่รายงานผลในทางตรงกันข้าม โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน ส่วนผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น40% โดยน้ำหนักทั้งหมดต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชโดยใช้เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี(DSC) ตัวอย่างเช่น Babic et al. (2006) ศึกษาผลของแล็กโทสต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันสำปะหลัง ในส่วนของการเกิดเจลลาทีโนเซชันพบว่า การเติมแล็กโทสทำให้อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในแง่การเกิดรีโทรเกรเดชันพบว่า การเติมแล็กโทสส่งผลให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น

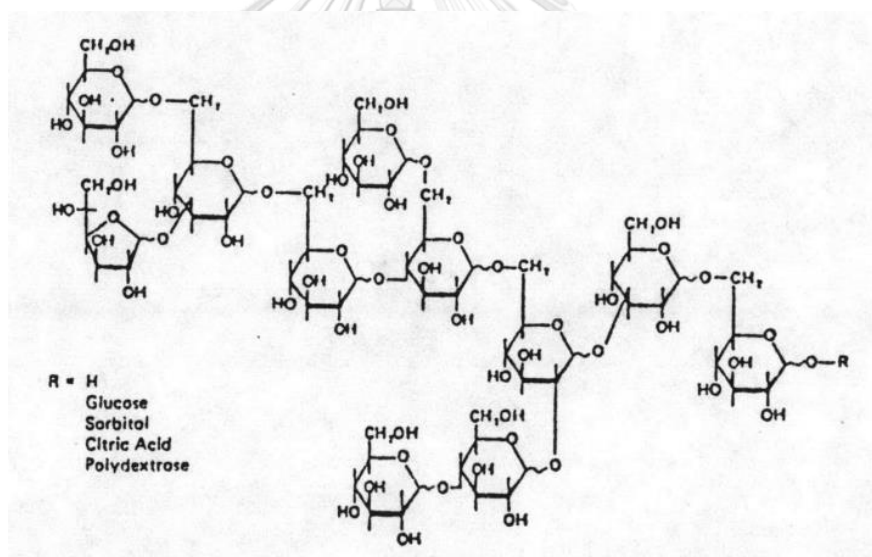
ในทำนองเดียวกัน Martinez, Pico, & Gómez (2015) ศึกษาผลของมอลทิทอล ซอร์บิทอล ไซลิตอล และแมนนิทอล ต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวสาลี ความเข้มข้น 50% ต่อน้ำหนักสตาร์ช โดยเครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) ติดตามพฤติกรรมของตัวอย่าง รายงานว่าน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้เพสต์สตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้เจลมีความแข็งแรง (gel strength) เพิ่มขึ้นด้วย

2.3 พรีไบโอติกในแง่การเป็นวัตถุดิบในอาหารจากสตาร์ช

2.3.1 สมบัติของพรีไบโอติก

พรีไบโอติกคือองค์ประกอบในอาหารที่ไม่สามารถย่อยและดูดซึมได้ในระบบทางเดินอาหารส่วนบนของมนุษย์ จึงผ่านกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก และเมื่อเคลื่อนที่ไปจนถึงลำไส้ใหญ่จะสามารถถูกหมักโดยแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่และจุลินทรีย์พรีไบโอติก ได้ผลิตกรดไขมันสายโซ่สั้น เช่น กรดแอซิติค กรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก และกรดบิวทิริก (Anadón, Martínez-Larrañaga, Ares, & Martínez, 2016; Coussement, 1999) ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการบีบตัวของลำไส้และช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในอุจจาระ ทำให้สามารถขับถ่ายได้ดีขึ้น นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสามารถผลิตวิตามินบางชนิด เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 6 วิตามินบี 12 กรดนิโคตินิก และกรดโฟลิก กรดแลคติกที่ผลิตขึ้นยังมีส่วนช่วยในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ที่ผ่านมาจึงมีการนำพรีไบโอติกมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดรวมทั้งอาหารจากสตาร์ช ในงานวิจัยนี้ใช้พรีไบโอติก 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเดกซ์โทรส ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และอินูลิน

พอลิเด็คซ์โทรสประกอบด้วยหน่วยย่อย α -D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,2, α -1,3 และมี α -1,6 เป็นส่วนใหญ่ (ภาพที่ 2.6) ส่วนที่สำคัญของโครงสร้างพอลิเด็คซ์โทรสคือพันธะ α -1,6 ซึ่งทำให้พอลิเด็คซ์โทรสไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในทางเดินอาหารส่วนบนของมนุษย์ และมีระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน(Degree of polymerization, DP) เฉลี่ยอยู่ที่ 12 DP พอลิเด็คซ์โทรสนิยมนำมาเติมในอาหารที่ต้องการลดพลังงาน โดยใช้ทดแทนน้ำตาลและไขมัน เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ช่วยเพิ่มเนื้ออาหารและปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร พอลิเด็คซ์โทรสมีพรีไบโอติกแอกทิวิตี โดยมีผลลดพีเอช เพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสายโซ่สั้น และปริมาณไบฟีโดแบคทีเรียในอุจจาระ (Birch, & Lindley, 1988; Jie et al., 2000; Probert, Apajalahti, Rautonen, Stowell, & Gibson, 2004)

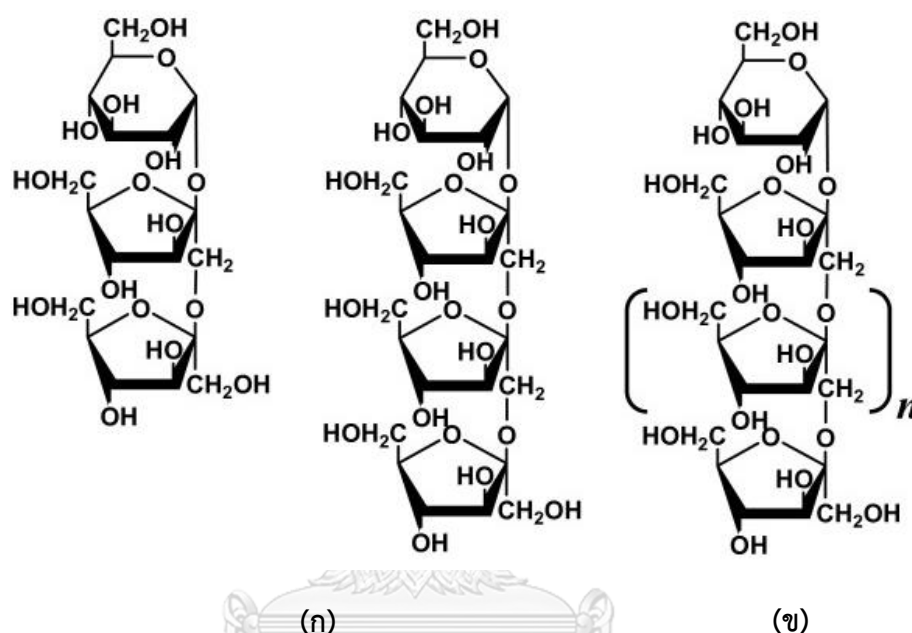


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเด็คซ์โทรส

ที่มา: Birch, & Lindley (1988)

สำหรับอินูลิน (ภาพที่ 2.7) ประกอบด้วยหน่วยย่อย β -D-fructose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด β -2,1 และมีมัลทูลูโคสเป็นหน่วยปลาย (terminal unit) ซึ่งเชื่อมต่อกับพันธะ α -2,1 เหมือนในซูโครส อินูลินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์สะสม (storage polysaccharide) ในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี กล้าย หัวหอมใหญ่ กระเทียม และรากชิคอรี่ มีระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) มากกว่า 30 (McKellar, & Modler, 1989) ส่วนที่สำคัญของโครงสร้างอินูลิน

คือพันธะ β -2,1 ซึ่งทำให้อินูลินไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในทางเดินอาหารส่วนบนของมนุษย์ ส่วนฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ภาพที่ 2.7) ผลิตได้จากการนำอินูลินมาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสบางส่วน (partial hydrolysis) มี DP อยู่ในช่วง 2-35 (McKellar, & Modler, 1989) เนื่องจากมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย β -D-fructose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด β -2,1 ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์จึงมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกเช่นเดียวกับอินูลิน (Hidaka, & Hirayama, 1991)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ก)และอินูลิน (ข) ($n > 30$)

ที่มา: Crittenden, & Payne (2008)

2.3.2 ผลของพรีไบโอติกต่อระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

จากความตระหนักในสุขภาพของผู้บริโภคในระยะที่ผ่านมาจึงมีการนำพรีไบโอติกมาใช้เป็นเป็นวัตถุดิบอาหารเพิ่มมากขึ้น จึงมีนักวิจัยสนใจศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติอาหารต่างๆ รวมถึงระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

Rodriguez-Sandoval, Landi Franco, & Manjarres-Pinzon (2014) ศึกษาผลของ ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ต่อสมบัติเชิงเคมีกายภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังหมัก (sour cassava starch) และคุณภาพการอบ (baking quality) ของขนมปังซีสปราศจากกลูเต็น (gluten-free)

cheese bread) โดยทดแทนสตาร์ชมันสำปะหลังหมักด้วยฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ระดับ 9, 17 และ 29% จากการติดตามพฤติกรรมการเกิดเพสต์ด้วยเครื่อง RVA พบว่าเพสต์สตาร์ชมันสำปะหลังหมักที่ทดแทนด้วยฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ระดับ 29% มีค่า peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity ต่ำที่สุด นอกจากนี้จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ยังพบว่าตัวอย่างที่ทดแทนสตาร์ชมันสำปะหลังหมักด้วยฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ระดับ 29% มีเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันต่ำที่สุดด้วย ในด้านคุณภาพการอบของขนมปังที่พบว่าตัวอย่างที่ทดแทนด้วยฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์มีความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปังต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีการทดแทนสตาร์ชมันสำปะหลังหมักด้วยฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์

Zeng et al. (2014) ศึกษาผลของโอลิโกแซ็กคาไรด์ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพด รายงานว่าการเติมโซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์และฟรุทโทโอลิโกแซ็กคาไรด์สามารถชะลอการเกิด รีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดได้ โดยจากการติดตามการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าตัวอย่างที่เติมโอลิโกแซ็กคาไรด์มีการเกิดเป็นผลึกใหม่ (recrystallization) ของแอมิโลเพกทินในระดับที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

Witczak, Witczak, & Ziobro (2014) ศึกษาผลของใยอาหารละลายน้ำได้ ได้แก่ เพกทินและอินูลินเข้มข้น 0-10% โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชมันฝรั่งโดยเทคนิค DSC พบว่าตัวอย่างที่เติมเพกทินและอินูลินมีเอนทาลปีเจลลาทีโนเซชันลดต่ำลง นอกจากนี้ยังมีเอนทาลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชันลดต่ำลงด้วย ผู้วิจัยเสนอว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ได้แก่ ความเข้มข้นและ DP ของแซ็กคาไรด์

2.4 การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance, NMR, spectroscopy) เพื่อศึกษาระบบของสตาร์ช

หลักการของ NMR spectroscopy คือการติดตามการดูดกลืนพลังงานของนิวเคลียสแม่เหล็ก (magnetic nucleus) เช่น โปรตอน (^1H) คาร์บอน-13 (^{13}C) และออกซิเจน-17

(^{17}O) โดยสามารถนำมาประยุกต์เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ (mobility) หรือสภาพพร้อมใช้ (availability) ของอนุภาคต่างๆ เช่น โมเลกุลน้ำ และโมเลกุลสตาร์ช

2.4.1 การใช้ NMR เพื่อศึกษาส่วนเสมือนของแข็ง

Yao and Ding (2002) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าในรูปสตาร์ชบริสุทธิ์ (purified starch) ฟลาวัวร์ และสตาร์ชในเมล็ดข้าวสาลี โดยวัดแอมพลิจูดของสัญญาณ NMR ที่สัมพันธ์กับโปรตอนทั้งหมดและโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับวัฏภาคของเหลว แล้วนำมาคำนวณปริมาณของแข็งสัมพัทธ์ (relative solid content, S') วิเคราะห์ S' ของสตาร์ชที่ระยะต่างๆ ได้แก่ ภายหลังจากเจลาทีไนเซชัน เมื่อเกิดรีโทรเกรเดชัน (ภายหลังเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 วัน) และเมื่อนำสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วมาให้ความร้อนอีกครั้ง (ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที) พบว่าสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วนำมาให้ความร้อนอีกครั้งมีค่า S' ใกล้เคียงกับสตาร์ชภายหลังจากเจลาทีไนเซชัน และ S' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษาซึ่งแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของ S' นี้สัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน

Yao et al. (2003) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผสมสตาร์ชชนิดอื่น ได้แก่ สตาร์ชข้าวโพดเหนียว สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรโดยการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรโดยการแทนที่ด้วยหมู่แอสเซทิล สตาร์ชมันฝรั่ง และ สตาร์ชมันฝรั่งดัดแปรโดยการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล รายงานว่า S' ของทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา โดยสตาร์ชข้าวโพดมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า S' ระหว่างเก็บรักษามากที่สุด แสดงว่าสตาร์ชข้าวโพดมีการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินสูงที่สุด

2.4.2 การใช้ NMR เพื่อศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ

Lu et al. (2011) ศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบเจลสตาร์ชข้าวจำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ อินดิกา (TNuS19) จาปอนนิกา (TNuS67) และข้าวเหนียว (TCW70) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน โดยมีปริมาณเท่ากับ 25.6, 14.8 และ 1.0% ตามลำดับ นำตัวอย่างสตาร์ชมาเตรียมเป็นเจลเข้มข้น 10, 20 และ 30% แล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 3, 6, 12, 24 และ 30 วัน ติดตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำโดยใช้ ^1H NMR พบว่าเวลาในการผ่อนคลาย

คลายตามขวางหรือการผ่อนคลายแบบสปิน-สปิน (transverse relaxation time or spin-spin relaxation time, T_2) ของน้ำในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ค่า T_2 มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างเจลสตาร์ชนานขึ้นมีผลทำให้ค่า T_2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

Baranowska (2012) ศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในเจลสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชข้าวโอ๊ต ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง โดยใช้เทคนิค ^1H NMR ติดตามเวลาในการผ่อนคลายตามยาวหรือการผ่อนคลายแบบสปิน-แลตทิซ (longitudinal relaxation time or spin-lattice relaxation time, T_1) และ T_2 ของน้ำ และรายงานว่าการเคลื่อนที่ของน้ำที่อุณหภูมิห้องมีอัตราการลดลงของ T_1 และ T_2 ต่ำกว่าตัวอย่างที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าเจลสตาร์ชมันฝรั่งและเจลสตาร์ชมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงของ T_1 และ T_2 มากที่สุด

Ozel, Dag, Kilercioglu, Sumnu, & Oztop (2017) ติดตามการเกิดอันตรกิริยาของน้ำกับสตาร์ชชนิดต่างๆ ได้แก่ สตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชข้าวสาลี ที่เจลาทีไนซ์ด้วยไมโครเวฟ โดยแปรอัตราส่วนของสตาร์ชต่อน้ำเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1:1, 1:1.5 และ 1:2 พบว่าหลังจากเจลาทีไนซ์แล้วเจลสตาร์ชมีค่า T_1 และ T_2 ลดลงตามอัตราส่วนของน้ำที่ลดลง โดยสตาร์ชข้าวเจ้ามีการเปลี่ยนแปลงของค่า T_1 และ T_2 น้อยที่สุด

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ข้าวสาร พันธุ์ชัยนาท 1 ปลุกและเก็บเกี่ยวในปีเพาะปลูก 2558 (เจียมเจริญค้าข้าว, ปทุมธานี)

Fructo-oligosaccharide, food-grade (Orafti®P95, Beneo, Tienen, Belgium), DP 2-10

D-fructose, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

D-glucose, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

Inulin, food-grade (Jebsen & Jessen Ingredients (T), Bangkok, Thailand), DP 2-60

Polydextrose, food-grade (Litesse®, Danisco, Surrey, UK), DP 12

Sodium hydroxide, anhydrous, AR grade (QRĒC™, Quality Reagent Chemical, New Zealand)

D-sorbitol, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

3.2 อุปกรณ์

Differential scanning calorimeter (DSC), Diamond DSC® (Perkin Elmer, Waltham, MA)

Laboratory blender, model 8010BU (Waring, Torrington, CT)

Laboratory centrifuge, model 5200 (Kubota, Fujioka, Japan)

Laboratory hot air oven, model 600 (Mettler, Schwabach, Germany)

Nuclear magnetic resonance (NMR) spectrometer, model Minispec mq20 (Bruker, Rheinstetten, Germany)

Rapid visco analyzer (RVA), model RVA-4 (Newport Scientific, Warriewood, Australia)

Shaking water bath, model SW23 (Julabolabortechnik, Seelbach, Germany)

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมสตาร์ชข้าวเจ้า

การเตรียมสตาร์ชจากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ทำโดยนำข้าวสารมาล้างและกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า นำข้าวสารมาแช่ในน้ำกลั่นโดยใช้อัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นสะเด็ดน้ำออกแล้วนำข้าวสารที่ผ่านการแช่มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% ในอัตราส่วนข้าวสารต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก นำของผสมที่ได้ไปปั่นผสมเป็นเวลา 2 นาที โดยใช้เครื่องปั่นผสม (Waring, Torrington, CT) นำสเลอรี่ที่ได้มากรองผ่านผ้าขาวบาง นำส่วนที่ผ่านผ้าขาวบางมากรองต่อโดยใช้เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก (Kubota, Fujioka, Japan) โดยใช้แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ (relative centrifugal force, RCF) เท่ากับ $4,640 \times g$ เป็นระยะเวลา 10 นาที แยกส่วนใสและส่วนสีเหลืองที่จับเป็นผิวอยู่ด้านบนออก นำส่วนตะกอนที่ได้มาแขวนลอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% ในอัตราส่วนตะกอนต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก แล้วกวนต่อโดยใช้เครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก (Kubota, Fujioka, Japan) โดยใช้ RCF เท่ากับ $4,640 \times g$ เป็นระยะเวลา 10 นาที แยกส่วนใสและส่วนสีเหลืองที่จับเป็นผิวอยู่ด้านบนออก ทำซ้ำเช่นนี้ 3 ครั้ง โดยในครั้งสุดท้ายจะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนสีเหลืองที่จับเป็นผิวอยู่ด้านบนได้หมดไปแล้ว

นำส่วนตะกอนที่ได้มาล้างโดยผสมตะกอนกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก นำไปเหวี่ยงแยกโดยใช้ RCF เท่ากับ $4,640 \times g$ เป็นระยะเวลา 10 นาที ล้างตะกอนเช่นนี้ซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำส่วนตะกอนที่ได้มาผสมกับน้ำกลั่นโดยใช้อัตราส่วนของตะกอนต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ปรับ พีเอชของสารแขวนลอยให้เท่ากับ 7 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ แล้วนำไปเหวี่ยงแยกโดยใช้ RCF เท่ากับ $4,640 \times g$ เป็นระยะเวลา 10 นาที แยกส่วนใสทิ้ง นำสตาร์ชที่ได้มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงบดลดขนาดโดยใช้เครื่องปั่นผสม (Waring, Torrington, CT) เป็นเวลา 2 นาที ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 ยูเอส เมช สตาร์ชที่ได้มีปริมาณความชื้นและโปรตีนเท่ากับ 9.14 และ 0.79% (ฐานเปียก) ตามลำดับ บรรจุลงในถุงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene, LDPE) ปิดผนึกด้วยความร้อน เก็บสตาร์ชที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปทดลองต่อไป วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสตามวิธีในภาคผนวก ก.1 และวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธี Kjeldahl (ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด) (AOAC, 2000)

3.3.2 การศึกษาผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ กลูโคส ฟรุคโทส และซอร์บิทอล แปรความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เป็น 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 20 และ 30% ตัวอย่างควบคุมได้แก่สตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ ติดตามการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

3.3.2.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

ติดตามพฤติกรรมการเกิดเพสต์โดยใช้เครื่อง RVA (Newport Scientific, Warriewood, Australia) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Bao (2008) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งน้ำกลั่น 25.05 กรัม ลงในถ้วยตัวอย่าง (canister) ของเครื่อง RVA ชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 2.95 กรัม เติมน้ำกลั่น ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาอย่างแรง เพื่อให้สตาร์ชไม่จับตัวกันเป็นก้อนที่ผิวสารละลายหรือติดที่ใบพัด จากนั้นนำถ้วยตัวอย่างพร้อมใบพัดติดตั้งลงบนเครื่อง RVA ให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่ม

อุณหภูมิจาก 50 จนถึง 95 องศาเซลเซียสในเวลา 3.45 นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส ในเวลา 4.90 นาที และคงอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.24 นาที ใช้ความเร็วของใบพัด 230 รอบ/นาที บันทึกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ pasting temperature, peak viscosity, final viscosity, breakdown viscosity (ผลต่างระหว่าง peak viscosity และ trough viscosity) และ setback viscosity (ผลต่างระหว่าง final viscosity และ trough viscosity)

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ใช้สตาร์ชข้าวเจ้าปริมาณ 2.95 กรัม และน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ปริมาณ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักสตาร์ช ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ทำโดยชั่งน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นพร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารละลายบรรจุลงในถ้วยตัวอย่างของเครื่อง RVA สตาร์ชข้าวเจ้า 2.95 กรัม เติมน้ำตาลลงในสารละลาย ใส่ใบพัดลงในถ้วยตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาอย่างแรง เพื่อให้สตาร์ชไม่จับตัวกันเป็นก้อนที่ผิวสารละลายหรือติดที่ใบพัด จากนั้นนำถ้วยตัวอย่างพร้อมใบพัดติดตั้งลงบนเครื่อง RVA และใช้รูปแบบการให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

3.3.2.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ติดตามอุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ โดยใช้เครื่อง DSC (Perkin Elmer, Waltham, MA) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 ไมโครกรัม และน้ำกลั่น 16 ไมโครกรัม ลงในถาด DSC ชนิด stainless steel (Perkin Elmer, Waltham, MA) ปิดผนึกถาด DSC ให้สนิท เก็บรักษาถาด DSC ที่บรรจุตัวอย่างแล้วที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 จนถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด

(peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (gelatinization enthalpy, ΔH_G)

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ทำโดยชั่งน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ในปริมาณที่ต้องการ เติมน้ำลงอย่างช้าๆ ลงในปิกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 ไมโครกรัม และสารละลาย 16 ไมโครกรัม ลงในถาด DSC ชนิด stainless steel (Perkin Elmer, Waltham, MA) ปิดผนึกถาด DSC ให้สนิท เก็บรักษาถาด DSC ที่บรรจุตัวอย่างแล้วที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยใช้รูปแบบการให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

3.3.2.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน)

นำถาดตัวอย่างจากข้อ 3.3.2.2 มาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 วัน โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินโดยใช้ DSC (Perkin Elmer, Waltham, MA) ณ วันที่ 14, 17 และ 20 ของการเก็บรักษา โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 จนถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึก T_o , T_p , T_c และเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (melting enthalpy of amylopectin, ΔH_R)

3.3.2.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง (solid-like fraction)

ติดตามปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์โดยใช้ NMR spectrometer (Bruker, Rheinstetten, Germany) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 กรัม เติมน้ำลงในปิกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 16 กรัม นำ

สารแขวนลอยมาบรรจุลงในหลอด NMR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยบรรจุให้ได้ความสูงประมาณ 50 มิลลิเมตร แล้วนำไปผสมให้เข้ากันโดยใช้ vortex mixer นำหลอดตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Julabolabortechnik, Seelbach, Germany) ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยเขย่าตัวอย่างตลอดเวลาในระหว่างให้ความร้อนเพื่อป้องกันการแยกชั้น นำตัวอย่างออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ได้เกิดเป็นเจล

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ทำโดยชั่งน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ในปริมาณที่ต้องการ เติมน้ำลงอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 กรัม เติมน้ำลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย 16 กรัม นำสารแขวนลอยมาบรรจุลงในหลอด NMR และให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

วิเคราะห์ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในเจล ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน โดยใช้ ^1H NMR ที่ความถี่ 20 เมกะเฮิร์ตซ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

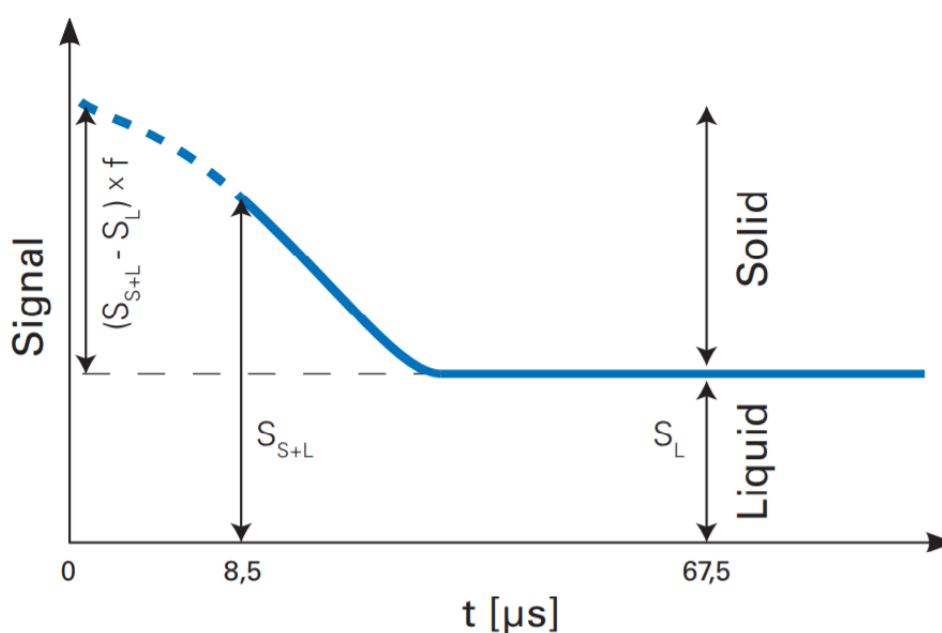
การวิเคราะห์ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งอาศัยหลักการพื้นฐานที่สัญญาณทาง NMR ของส่วนที่เป็นของแข็งหายไป (decay) ในอัตราที่เร็วกว่า ในขณะที่สัญญาณทาง NMR ของส่วนที่เป็นของเหลวหายไปในอัตราที่ช้ากว่า (ภาพที่ 2.8) ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งคำนวณได้จากอัตราของสัญญาณทาง NMR จากส่วนที่เป็นของแข็งต่อสัญญาณทาง NMR โดยรวมตามสมการที่ (1) (Bruker Biospin, 2016)

$$\text{Solid-like fraction (\%)} = \frac{(S_{S+L} - S_L) \times f}{(S_{S+L} - S_L) \times f + S_L} \times 100 \quad \dots(1)$$

เมื่อ S_S คือ สัญญาณทาง NMR จากส่วนที่เป็นของแข็ง

S_L คือ สัญญาณทาง NMR จากส่วนที่เป็นของเหลว

f คือ แฟกเตอร์การปรับแก้ (correction factor) สำหรับ receiver dead time



ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณทาง NMR ที่เกี่ยวข้องกับส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว

ที่มา : Bruker Biospin (2016)

3.3.2.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ (water mobility)

เตรียมตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์เช่นเดียวกับข้อ 3.3.2.4 ติดตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในตัวอย่างเจลสตาร์ช ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังจากเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน โดยวัดเวลาในการผ่อนคลาย (relaxation time) ของ ^1H ด้วย NMR spectrometer (Bruker, Rheinstetten, Germany)

สำหรับเวลาในการผ่อนคลายตามยาวหรือการผ่อนคลายแบบสปิน-แลตทิซ (longitudinal relaxation time or spin-lattice relaxation time, T_1) วัดโดยวิธี inversion recovery ($5T_1-180^\circ-\tau-90^\circ$) (Vold, Waugh, Klein, & Phelps, 1968) โดย 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที และ τ คือ delay interval ระหว่าง excitation pulse

สำหรับเวลาในการผ่อนคลายตามขวางหรือการผ่อนคลายแบบสปิน-สปิน (transverse relaxation time or spin-spin relaxation time, T_2) วัดโดย Carr-Purcell-Meiboom-Gill ($90^\circ-(\tau-180^\circ-2\tau-180^\circ-\tau)_n$) โดย 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที และ τ คือ delay interval ระหว่าง excitation pulse

3.3.3 การศึกษาผลของฟรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

ฟรีไบโอติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พอลิเด็คซ์โทรส ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และอิโนูลิน แปรความเข้มข้นของฟรีไบโอติกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักสตาร์ช ตัวอย่างควบคุมได้แก่สตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่เติมฟรีไบโอติก ติดตามการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

3.3.3.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

ติดตามพฤติกรรมการเกิดเพสต์โดยใช้เครื่อง RVA (Newport Scientific, Warriewood, Australia) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Bao (2008) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งน้ำกลั่น 25.05 กรัม ลงในถ้วยตัวอย่างของเครื่อง RVA ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้า 2.95 กรัม เติมลงในน้ำกลั่น ใส่ใบพัดลงในถ้วยตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาอย่างแรง เพื่อให้สตาร์ชไม่จับตัวกันเป็นก้อนที่ผิวสารละลายหรือติดที่ใบพัด จากนั้นนำถ้วยตัวอย่างพร้อมใบพัดติดตั้งลงบนเครื่อง RVA ให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 จนถึง 95 องศาเซลเซียสในเวลา 3.45 นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส ในเวลา 4.90 นาที และคงอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.24 นาที ใช้ความเร็วของใบพัด 230 รอบ/นาที บันทึกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ pasting temperature, peak viscosity, final viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก ใช้สตาร์ชข้าวเจ้าปริมาณ 2.95 กรัม และ พรีไบโอติกปริมาณ 5, 10, 20 และ 30% โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของพรีไบโอติก ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารละลายบรรจุลงในถ้วยตัวอย่างของเครื่อง RVA ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้า 2.95 กรัม เติมลงในสารละลาย ใส่ใบพัดลงในถ้วยตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมาอย่างแรง เพื่อให้สตาร์ชไม่จับตัวกันเป็นก้อนที่ผิวสารละลายหรือติดที่ใบพัด จากนั้นนำถ้วยตัวอย่างพร้อมใบพัดติดตั้งลงบนเครื่อง RVA โดยใช้รูปแบบการให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

3.3.3.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ติดตามอุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกโดยใช้เครื่อง DSC (Perkin Elmer, Waltham, MA) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 ไมโครกรัม และน้ำกลั่น 16 ไมโครกรัม ลงในถาด DSC ชนิด stainless steel (Perkin Elmer, Waltham, MA) ปิดผนึกถาด DSC ให้สนิท เก็บรักษาถาด DSC ที่บรรจุตัวอย่างแล้วที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 จนถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึก T_o , T_p , T_c และ ΔH_G

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของพรีไบโอติก ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการ เติมลงอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 ไมโครกรัม และสารละลาย 16 ไมโครกรัม ลงในถาด DSC ชนิด stainless steel (Perkin Elmer, Waltham, MA) ปิดผนึกถาด DSC ให้สนิท เก็บรักษาถาด DSC ที่บรรจุตัวอย่างแล้วที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่

ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยใช้รูปแบบการให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

3.3.3.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน)

นำถาดตัวอย่างจากข้อ 3.3.3.2 มาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 วัน โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินโดยใช้ DSC (Perkin Elmer, Waltham, MA) ณ วันที่ 14, 17 และ 20 ของการเก็บรักษา โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 จนถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึก T_o , T_p , T_c และ ΔH_R

3.3.3.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง

ติดตามปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกโดยใช้ NMR spectrometer (Bruker, Rheinstetten, Germany) สำหรับตัวอย่างควบคุมเตรียมโดยชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 กรัม เติมลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 16 กรัม นำสารแขวนลอยมาบรรจุลงในหลอด NMR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยบรรจุให้ได้ความสูงประมาณ 50 มิลลิเมตร แล้วนำไปผสมให้เข้ากันโดยใช้ vortex mixer นำหลอดตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Julabolabortechnik, Seelbach, Germany) ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยเขย่าตัวอย่างตลอดเวลาในระหว่างให้ความร้อนเพื่อป้องกันการแยกชั้น นำตัวอย่างออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดเป็นเจล

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมสารละลายของพรีไบโอติก ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการ เติมลงอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชั่งสตาร์ชข้าวเจ้า 4 กรัม เติมลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย 16 กรัม นำสารแขวนลอยมาบรรจุลงในหลอด NMR และให้ความร้อนเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม

วิเคราะห์ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในเจล ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน โดยใช้ ^1H NMR ที่ความถี่ 20 เมกะเฮิร์ตซ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที คำนวณปริมาณส่วนเสมือนของแข็งโดยใช้สมการที่ (1) เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4

3.3.3.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ

เตรียมตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก เช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.4 ติดตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในตัวอย่างเจลสตาร์ช ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังจากเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน โดยวัดเวลาในการผ่อนคลายของ ^1H ด้วย NMR spectrometer (Bruker, Rheinstetten, Germany)

สำหรับ T_1 วัดโดยวิธี inversion recovery ($5T_1-180^\circ-\tau-90^\circ$) (Vold et al., 1968) โดย 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที และ τ คือ delay interval ระหว่าง excitation pulse

สำหรับ T_2 วัดโดยวิธี Carr-Purcell-Meiboom-Gill ($90^\circ-(\tau-180^\circ-2\tau-180^\circ-\tau)_n$) โดย 90° excitation pulse width เท่ากับ 2.84 ไมโครวินาที และ τ คือ delay interval ระหว่าง excitation pulse

3.3.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบหลักของสตาร์ชข้าวเจ้า

สตาร์ชข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสตาร์ชที่เตรียมในห้องปฏิบัติการจากข้าวสารเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1 จากการวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณความชื้น $9.14 \pm 0.10\%$ (ฐานเปียก) โปรตีนคงเหลือ (residual protein) $0.79 \pm 0.16\%$ (ฐานเปียก) และแอมิโลส $25.07 \pm 0.55\%$ โดยน้ำหนักของสตาร์ช ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลที่สำคัญวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว (2556) รายงานไว้ว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 จัดเป็นข้าวประเภทแอมิโลสสูงซึ่งมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 25-33%

4.2 ผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

4.2.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เป็นผลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ติดตามโดย RVA แสดงดังตารางที่ 4.1 (เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์แสดงดังภาพที่ ค.1-ค.3 ในภาคผนวก ค.) พบว่าน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ pasting temperature, peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity โดยพบว่าตัวอย่างที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์มี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างควบคุม และเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น pasting temperature มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ จึงทำให้สภาพพร้อมใช้ของน้ำลดลง ส่งผลให้น้ำที่จะร่วมในการเกิดเจลาทีโนเซชันมีปริมาณลดลง เจลาทีโนเซชันจึงเกิดได้ยากขึ้น นอกจากนี้การลดลงของสภาพพร้อมใช้น้ำยังส่งผลให้สตาร์ชแกรนูลพองตัวได้อย่างจำกัด จึงทำให้ peak viscosity ของตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์มีค่าลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4. 1 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์

Sample	Concentration (%)	Pasting property				
		Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)
Control		78.42±0.06 ^f	1726.67±4.16 ^a	338.00±6.03 ^a	2515.33±1.53 ^a	1126.00±6.93 ^a
+Fructose	5	78.92±0.45 ^{ef}	1463.67±24.01 ^b	240.00±10.12 ^b	2094.33±16.17 ^{bc}	871.00±21.63 ^b
	10	80.17±0.29 ^{bcd}	1210.00±21.66 ^d	163.33±9.61 ^d	1686.00±48.54 ^e	639.33±37.63 ^d
	20	80.77±0.08 ^{bc}	764.67±18.77 ^e	77.33±1.53 ^e	1070.33±20.79 ^f	383.00±5.57 ^e
	30	81.67±0.83 ^a	431.33±7.51 ^f	28.00±6.00 ^f	558.67±20.03 ^g	155.33±18.56 ^f
+Glucose	5	79.48±0.49 ^{de}	1476.67±5.13 ^b	231.67±9.45 ^{bc}	2113.33±24.42 ^b	868.33±28.75 ^b
	10	80.05±0.01 ^{cd}	1226.33±9.61 ^d	174.33±12.42 ^d	1729.00±26.00 ^d	677.00±29.87 ^c
	20	80.83±0.03 ^b	769.33±20.43 ^e	74.33±4.04 ^e	1058.33±19.43 ^f	363.33±4.93 ^e
	30	81.68±0.06 ^a	407.67±4.04 ^f	19.67±2.52 ^f	529.00±6.56 ^g	141.00±5.29 ^f
+Sorbitol	5	80.32±0.32 ^{bc}	1438.67±1.15 ^c	220.33±13.80 ^c	2064.33±28.58 ^c	845.67±43.15 ^b
	10	80.33±0.29 ^{bc}	1221.67±26.69 ^d	174.67±2.08 ^d	1738.67±21.22 ^d	691.67±7.64 ^c
	20	80.80±0.05 ^b	753.33±2.31 ^e	69.33±4.16 ^e	1043.00±11.00 ^f	359.00±17.00 ^e
	30	81.70±0.05 ^a	433.33±4.16 ^f	24.00±4.36 ^f	568.00±3.61 ^g	158.67±8.08 ^f

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับค่า breakdown viscosity แสดงถึงความทนทานต่อแรงเฉือนขณะที่สตาร์ชเพสต์ได้รับความร้อน (Lee, Baek, Cha, Park, & Lim, 2002) ถ้า breakdown viscosity มีค่าต่ำ แสดงว่าสตาร์ชแกรนูลทนต่ออุณหภูมิและแรงเฉือนจึงทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกได้ยาก (Funami et al., 2005) จากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้พบว่า การเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้ breakdown viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากทั้งน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำในระบบ ทำให้น้ำในสภาพพร้อมใช้ที่จะมีส่วนร่วมในการเกิดเจลที่ในเซชันของสตาร์ชที่มีปริมาณลดลง สตาร์ชแกรนูลจึงพองตัวได้อย่างจำกัด ทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงเฉือนและความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Sun et al. (2014) ซึ่งพบว่าสตาร์ชข้าวสาลีที่เติมน้ำตาลแอลกอฮอล์ได้แก่ ไซลิทอล มอลติทอล และอีริทริทอล ที่อัตราส่วนน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.1:1, 0.2:1, 0.5:1, 1:1 และ 2:1 มีค่า breakdown viscosity ลดลงเมื่ออัตราส่วนของน้ำตาลแอลกอฮอล์เพิ่มสูงขึ้น ($p \leq 0.05$)

สำหรับ setback viscosity แสดงถึงการคืนตัวของเพสต์สตาร์ช ขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงโมเลกุลสตาร์ชจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของสาย

โษ้สตาร์ชที่อยู่ใกล้กัน ถ้าสตาร์ชมีค่า setback viscosity ที่สูง แสดงว่าเจลสตาร์ชมีแนวโน้มที่จะแข็ง (Biliaderis, 2009; ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ธงชัย สุวรรณสิขณน์, วิชัย ททัยธนาสันต์, & กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2546) จากงานวิจัยนี้พบว่า การเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์มีผลทำให้ setback viscosity ลดลง ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์สามารถเกิดอันตรกิริยาได้กับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้มีผลขัดขวางการกลับมาเกิดอันตรกิริยาใหม่ระหว่างโมเลกุลสตาร์ชด้วยกันเอง นอกจากนี้ น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ยังทำให้ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงมีผลลดอัตราการแพร่ของโมเลกุลในระบบและชะลอการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช (Sun et al., 2014)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบ พบว่าชนิดของวัตถุดิบไม่มีผลสำคัญต่อสมบัติการเกิดเพสต์ โดยที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ระบบที่มีวัตถุดิบต่างชนิดกันมี pasting temperature, peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity ใกล้เคียงกัน

4.2.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ ซึ่งติดตามโดยใช้เทคนิค DSC แสดงเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0), อุณหภูมิสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิต่ำสุด (T_c) รวมทั้งเอนทาลปี (ΔH_c) ของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (เทอร์โมแกรมของตัวอย่างสตาร์ชแสดงดังภาพที่ ค.7-ค.9 ในภาคผนวก ค.) พบว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้อุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p < 0.05$) และค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการที่น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลที่มีสมบัติชอบน้ำ จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำและทำให้สภาพพร้อมใช้ของน้ำในระบบลดลง เจลาทีโนเซชันจึงเกิดได้ยากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างที่เติมกลูโคส ฟรุคโทส และซอร์บิทอล พบว่าที่ความเข้มข้น 5 และ 10% ตัวอย่างที่เติมวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30% พบว่าตัวอย่างที่เติม

กลูโคสและซอร์บิทอลมีอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาคีโนเซชันสูงกว่าตัวอย่างที่เติมฟรุคโทส โดยตัวอย่างที่เติมกลูโคสและตัวอย่างที่เติมซอร์บิทอลมีอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาคีโนเซชันไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลูโคสและซอร์บิทอลมีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีกว่าฟรุคโทส เนื่องจากมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ในตำแหน่งอีควาทอเรียล (equatorial hydroxy group) มากกว่าฟรุคโทส โดยหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ในตำแหน่งอีควาทอเรียลเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีกว่าหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ในตำแหน่งแอกเซียล (axial hydroxy group) (Aee, Hie, & Nishinari, 1998)

อนึ่ง เป็นที่น่าสังเกตว่าเทอร์โมแกรมของการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชที่ได้จากงานวิจัยนี้พบพิคการดูดความร้อน 2 พิค โดยที่ผ่านมามีมีบางงานวิจัยรายงานในทำนองเดียวกัน เช่น Horndok, & Noomhorm (2007) ซึ่งศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชข้าวเจ้าทางการค้า (ปริมาณแอมิโลส 27.1%) Rangelov et al. (2017) เสนอว่าลักษณะพิคการดูดความร้อนที่มี 2 พิคนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการให้ความร้อนกับสารแขวนลอยสตาร์ช มีปรากฏการณ์สองอย่างเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ได้แก่ เจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชและการหลอมละลาย (melting) ของส่วนที่มีโครงสร้างแบบผลึกของสตาร์ชแกรนูลที่ไม่เกิดเจลลาคีโนเซชัน (non-gelatinized crystalline region of starch granule) โดย Rangelov et al. (2017) รายงานว่าในระบบของสารแขวนลอยสตาร์ชที่ความเข้มข้นต่ำ (5%) พิคที่เกี่ยวข้องกับเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชและพิคที่เกี่ยวข้องกับการหลอมละลายของส่วนที่มีโครงสร้างแบบผลึกของสตาร์ชแกรนูลที่ไม่เกิดเจลลาคีโนเซชันจะซ้อนทับกันจนเห็นเป็นพิคเดียว แต่เมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชสูงขึ้น (20-30%) จะเห็นพิคที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทั้งสองแยกออกจากกันเป็น 2 พิค นอกจากสตาร์ชข้าวเจ้าแล้ว ยังมีรายงานการพบลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนดังกล่าวในสตาร์ชจากพืชอื่นด้วย ได้แก่ สตาร์ชมันสำปะหลัง (Lim et al., 2001) และสตาร์ชข้าวโพด (Lim et al., 2001; Rangelov et al., 2017)

นอกจากนี้ในเทอร์โมแกรมยังพบพิคดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการทำลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิด (amylose-lipid complex) สอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Biliaderis (1986) ที่พบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการทำลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียส

4.2.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน)

ตารางที่ 4.2 แสดงเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกที่เกิดจากการกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลเพกทิน (recrystallized amylopectin) (ΔH_p) ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งเจลาทีไนส์แล้วและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน (เทอร์โมแกรมของตัวอย่างสตาร์ชแสดงดังภาพที่ ค.13-ค.15 ในภาคผนวก ค.) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกของแอมิโลเพกทินอยู่ในช่วง 45-67 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับ Ritruengdech et al. (2012) ที่รายงานว่าฟลาวัวร์ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 มีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกของแอมิโลเพกทินในช่วง 46-65 องศาเซลเซียส

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างควบคุมที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน มีเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินเท่ากับ 5.42, 5.49 และ 5.80 จูล/กรัม ตามลำดับ โดยทั่วไปพบว่าเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าเพิ่มสูงในช่วง 17 วันแรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจึงค่อนข้างคงที่

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างควบคุมกับตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ พบว่าตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์มีเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม และค่าเอนทัลปีมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการเก็บรักษาที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เข้มข้น 30% มีเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซีจำนวนมากซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ทั้งกับน้ำและสตาร์ช การที่น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เกิดอันตรกิริยากับสตาร์ชจะมีผลขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบผลึกของโมเลกุลสตาร์ช (Babić et al., 2009; Hoover, & Senanayake, 1996) นอกจากนี้การที่น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เกิดอันตรกิริยากับน้ำยังมีผลต่อปริมาณน้ำที่จำเป็นในการหล่อเลี้ยงผลึก มีรายงานว่าส่วนผสมที่เติมในสูตรขนมปังซึ่งสามารถจับน้ำได้ดีสามารถช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Longton, & LeGrys, 1981; Roulet et al., 1988;

Vittadini, & Vodovotz, 2003; Zhou et al., 2008) Ribotta, & Le Bail (2007) อธิบายว่าในการเกิดผลึกของสตาร์ชจำเป็นต้องมีน้ำในปริมาณมากเพียงพอต่อการหล่อเลี้ยงผลึก ผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเป็นผลึกชนิดบี (B-type crystal) ซึ่งต้องการน้ำในการไฮเดรชันสูงมากถึง 36 โมเลกุลต่อหน่วยเซลล์ผลึก (เปรียบเทียบกับผลึกชนิดเอ (A-type crystal) ที่ต้องการน้ำในการไฮเดรชันเพียง 8 โมเลกุลต่อหน่วยเซลล์ผลึก)

เมื่อเปรียบระหว่างวัตถุเจือปนทั้งสามชนิด พบว่าฟรุทโทสมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดใน การชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งจะเห็นได้จากเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของ ตัวอย่างที่เติมฟรุทโทสที่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เติมกลูโคสและซอร์บิทอล ส่วนกลูโคสและซอร์บิทอลมี ประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ใกล้เคียงกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากฟรุทโทสมี ความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ต่ำกว่ากลูโคสและซอร์บิทอล เนื่องจากมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ในตำแหน่งอีควาทอเรียลน้อยกว่ากลูโคสและซอร์บิทอล

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเจลลิ่งในเซชัน (T_o , T_p และ T_c) เอนทัลปีของการเกิดเจลลิ่งในเซชัน (ΔH_G) และเอนทัลปีของการหลอมผลึกของแอมิโลเพกทิน (ΔH_R) ของสตาร์ข้าว ที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่เก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน

Sample	Concentration (%)	Gelatinization parameters			Retrogradation parameters			
		T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH_G (J/g)	$\Delta H_{R-14\text{day}}$ (J/g)	$\Delta H_{R-17\text{day}}$ (J/g)	$\Delta H_{R-20\text{day}}$ (J/g)
Control		62.83±0.32 ^g	77.14±0.26 ^l	84.87±0.20 ^l	12.39±0.70 ^f	5.42±0.04 ^a	5.49±0.01 ^a	5.80±0.02 ^a
+ Fructose	5	64.41±0.31 ^{ef}	78.58±0.17 ^h	85.55±0.25 ^l	13.82±0.30 ^e	4.05±0.02 ^b	4.35±0.02 ^b	4.50±0.44 ^b
	10	64.66±0.31 ^{ef}	79.8±0.38 ^g	87.86±0.73 ^f	14.64±0.32 ^{cd}	3.26±0.01 ^c	3.54±0.01 ^c	3.59±0.04 ^d
	20	68.55±0.14 ^d	82.97±0.09 ^e	90.43±0.07 ^e	14.95±0.05 ^{bc}	2.87±0.21 ^e	3.45±0.04 ^d	3.50±0.09 ^e
+ Glucose	30	73.47±0.29 ^b	87.49±0.09 ^c	94.75±0.18 ^c	14.89±0.37 ^{bc}	2.16±0.24 ^h	3.27±0.53 ^f	3.48±0.47 ^e
	5	64.51±0.36 ^{ef}	78.79±0.10 ^h	86.29±0.29 ^h	14.01±0.30 ^e	2.93±0.02 ^e	3.33±0.02 ^e	3.94±0.36 ^c
	10	65.00±0.35 ^e	80.19±0.18 ^f	88.37±0.51 ^f	15.68±0.06 ^{ab}	2.54±0.02 ^f	3.13±0.09 ^g	3.48±0.31 ^e
	20	69.57±0.15 ^c	84.14±0.27 ^d	92.49±0.28 ^d	15.71±0.24 ^{ab}	2.17±0.08 ^h	2.60±0.39 ^h	3.49±0.02 ^e
	30	74.16±0.71 ^b	89.19±0.35 ^b	95.94±0.49 ^b	16.12±0.12 ^a	2.04±0.24 ⁱ	2.52±0.36 ⁱ	2.63±0.04 ^f
+ Sorbitol	5	64.19±0.49 ^f	78.78±0.19 ^h	87.13±0.43 ^g	14.84±0.31 ^{cd}	3.09±0.14 ^d	3.55±0.18 ^c	3.98±0.20 ^c
	10	64.69±0.22 ^{ef}	80.34±0.02 ^f	88.28±0.46 ^f	15.36±0.78 ^{bc}	2.57±0.24 ^f	3.10±0.48 ^g	3.52±0.27 ^e
	20	69.19±0.58 ^{cd}	84.25±0.22 ^d	91.01±0.50 ^e	15.74±0.36 ^{ab}	2.25±0.36 ^g	2.59±0.06 ^h	3.51±0.15 ^e
	30	75.23±0.78 ^a	89.85±0.28 ^a	97.05±0.35 ^a	16.24±0.28 ^a	2.08±0.16 ⁱ	2.54±0.08 ⁱ	2.64±0.18 ^f

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.2.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง

ภาพที่ 4.1 แสดงปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน การวิเคราะห์ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งนี้อาศัยหลักการผ่อนคลายทาง NMR มีพื้นฐานคือหลังจากการให้ 90° pulse สัญญาณ NMR ของโปรตอนในส่วนของแข็งและของเหลวในระบบหนึ่งๆ มีการหายไป (decay) ในอัตราที่ต่างกัน (Teo, & Seow, 1992) โดยโปรตอนในภูมิภาคของแข็งจะเกิดการผ่อนคลายในอัตราที่เร็วกว่าเนื่องจากการส่งผ่านพลังงานไปยังโมเลกุลข้างเคียงเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ในขณะที่โปรตอนในภูมิภาคของเหลวเกิดการผ่อนคลายในอัตราที่ช้ากว่า จาก free-induction decay (FID) curve ของสัญญาณ NMR จะพบว่าสัญญาณ NMR มีการหายไปในอัตราที่แตกต่างกันสองช่วง โดยในช่วงแรกสัญญาณจะมีการหายไปในอัตราที่เร็วกว่า และช่วงที่สองสัญญาณจะมีการหายไปในอัตราที่ช้ากว่า (Teo, & Seow, 1992) การหายไปของสัญญาณในช่วงแรกสัมพันธ์กับการผ่อนคลายทาง NMR ของโปรตอนทั้งหมดในตัวอย่าง ส่วนการหายไปของสัญญาณในช่วงที่สองจะสัมพันธ์กับการผ่อนคลายทาง NMR ของโปรตอนในภูมิภาคของเหลว ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งจึงสามารถคำนวณได้จากสัญญาณ NMR ของโปรตอนในสองช่วงนี้ (Teo, & Seow, 1992)

จากงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่พบว่าเมื่อสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น (Teo, & Seow, 1992) โดยในทุกตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณส่วนเสมือนของแข็งที่เห็นได้ชัดในช่วง 14 วันแรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรือมีปริมาณค่อนข้างคงที่ พบว่าตัวอย่างควบคุมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ ซึ่งเห็นได้จากความชันของกราฟที่สูงกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 14 วันแรก

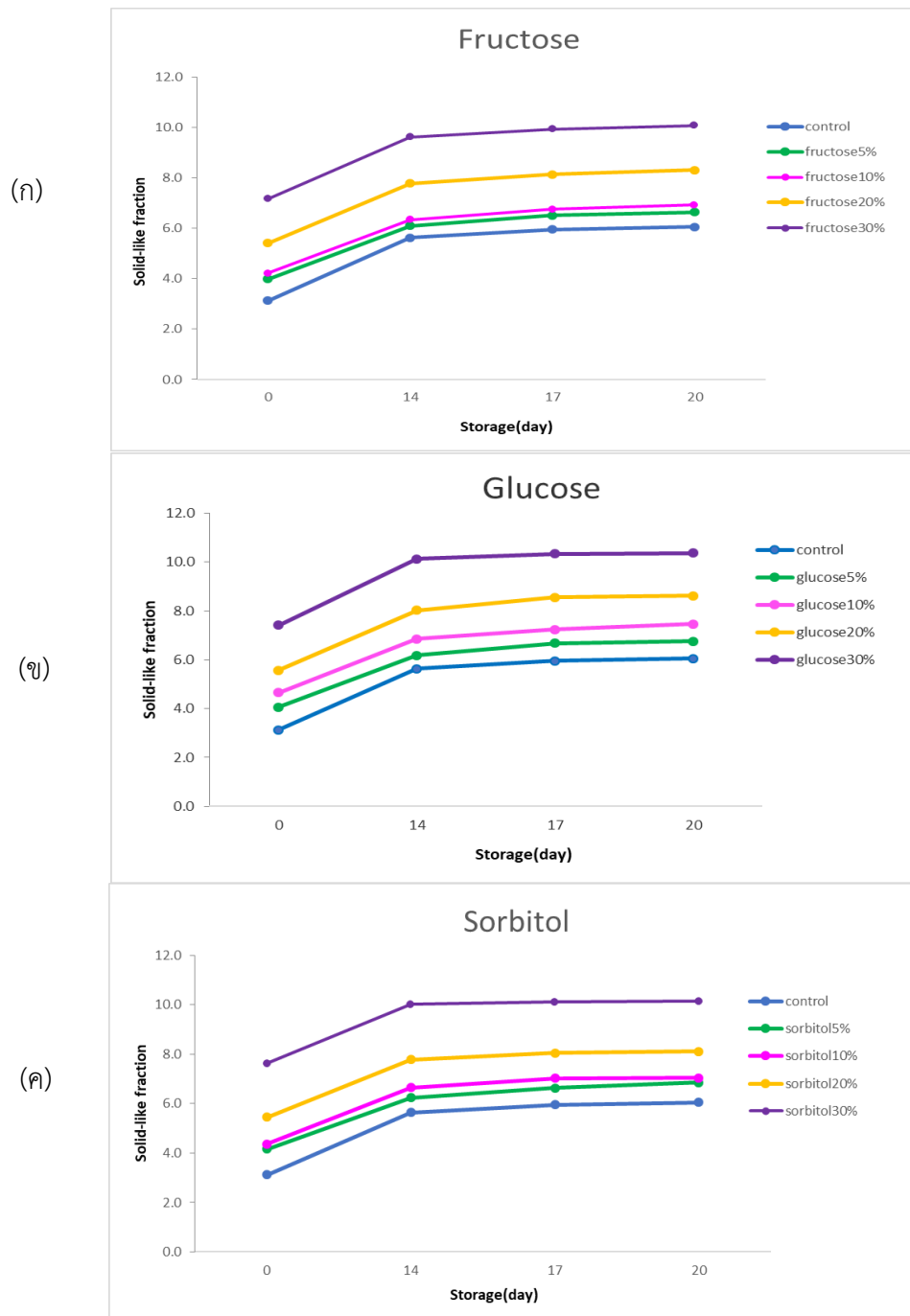
สำหรับตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์พบว่าปริมาณส่วนเสมือนของแข็งมีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงเมื่อความเข้มข้นของวัตถุเจือปนเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (หัวข้อ 4.2.3) เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของส่วน

เสมือนของแข็งของวัตถุเจือปนทั้งสามชนิด พบว่าตัวอย่างที่เติมฟรุกโทสมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าตัวอย่างที่เติมกลูโคสและซอร์บิทอล

4.2.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ

วัตถุเจือปนที่เติมลงไปในระบบของสตาบิลิซเซอร์สามารถเกิดอันตรกิริยากับองค์ประกอบต่างๆ ในระบบและอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่างๆ ทั้งในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น วัตถุเจือปนที่มีสมบัติชอบน้ำอาจเกิดอันตรกิริยากับน้ำ จึงมีผลลดสภาพพร้อมใช้ของน้ำในระบบและส่งผลต่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้

ตารางที่ 4.3 แสดง ^1H NMR T_1 และ T_2 ของน้ำในตัวอย่างเจลสตาบิลิซเซอร์ระหว่างการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 20 วัน พบว่าทุกตัวอย่างมีการลดลงของ T_1 และ T_2 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำถูกจับไว้โดยองค์ประกอบอื่นในระบบ เช่น การเกิดไฮเดรชันกับผลึกสตาบิลิซเซอร์ โดยตัวอย่างควบคุมมีการลดลงของ T_1 และ T_2 สูงที่สุด สอดคล้องกับการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินที่สูงที่สุด (หัวข้อ 4.2.3) สำหรับตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์พบว่าการเติมวัตถุเจือปนทำให้ค่า T_1 และ T_2 ของน้ำลดลงในอัตราที่ช้าลง แสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์น้ำยังคงมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่สูงกว่า ผลที่ได้นี้สะท้อนให้เห็นว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์อาจช่วยลดการเกิดเป็นผลึกใหม่ของสตาบิลิซเซอร์จึงต้องการน้ำที่เกิดไฮเดรชันกับผลึกลดลง



ภาพที่ 4.1 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เต็ม (ก) ฟรุคโทส (ข) กลูโคส และ (ค) ซอร์บิทอล และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน

ตารางที่ 4.3 $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2 ของน้ำในเจลสตาร์ข้าวเจ้าที่เติม น้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Sample	Concentration (%)	$T_{1,0 \text{ day}}$ (ms)	$T_{1,14 \text{ day}}$ (ms)	$T_{1,17 \text{ day}}$ (ms)	$T_{1,20 \text{ day}}$ (ms)	$T_{2,0 \text{ day}}$ (ms)	$T_{2,14 \text{ day}}$ (ms)	$T_{2,17 \text{ day}}$ (ms)	$T_{2,20 \text{ day}}$ (ms)
Control		575.00±7.07 ^a	490.00±7.07 ^a	477.5±3.54 ^a	477.5±3.54 ^a	79.40±0.00 ^a	54.05±0.07 ^a	51.65±0.78 ^a	51.20±0.14 ^a
+ Fructose	5	450.00±0.00 ^b	420.00±0.00 ^b	410.00±0.00 ^b	410.00±0.00 ^b	74.20±0.14 ^b	48.85±0.07 ^b	47.90±0.00 ^b	46.50±0.00 ^b
	10	360.00±0.00 ^c	355.00±14.14 ^c	340.00±0.00 ^c	340.00±0.00 ^d	65.95±0.07 ^d	45.45±0.07 ^c	44.35±0.07 ^d	41.45±0.21 ^d
	20	260.00±0.00 ^e	260.00±0.00 ^e	260.00±0.00 ^f	240.00±14.14 ^e	51.60±1.84 ^e	37.30±0.71 ^e	36.70±0.42 ^e	34.45±1.77 ^e
	30	170.00±0.00 ^f	170.00±0.00 ^f	170.00±0.00 ^f	160.00±0.00 ^f	38.15±0.07 ^f	29.55±0.21 ^g	25.80±0.42 ^f	25.50±0.00 ^h
+ Glucose	5	430.00±0.00 ^c	400.00±0.00 ^c	380.00±0.00 ^d	380.00±0.00 ^c	73.65±0.07 ^{bc}	47.35±0.07 ^b	43.80±0.00 ^d	43.65±0.07 ^c
	10	360.00±0.00 ^e	340.00±0.00 ^e	340.00±0.00 ^e	340.00±0.00 ^d	63.70±0.00 ^e	45.50±0.00 ^c	43.05±0.07 ^e	41.55±0.07 ^d
	20	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^e	50.70±0.14 ^{gh}	36.90±0.00 ^e	36.60±0.42 ^e	35.25±0.07 ^e
	30	160.00±0.00 ⁱ	160.00±0.00 ⁱ	160.00±0.00 ⁱ	160.00±0.00 ^f	37.10±0.00 ⁱ	30.30±0.14 ^g	30.05±0.07 ^f	29.95±0.07 ^g
+ Sorbitol	5	410.00±0.00 ^e	390.00±0.00 ^d	385.00±0.00 ^c	380.00±0.00 ^c	72.55±0.07 ^c	47.75±0.07 ^b	47.75±0.07 ^b	43.65±0.21 ^c
	10	350.00±0.00 ^f	340.00±0.00 ^f	340.00±0.00 ^e	340.00±0.00 ^d	62.30±0.14 ^f	47.50±2.12 ^b	46.20±0.14 ^c	41.60±0.00 ^d
	20	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^h	230.00±0.00 ^e	50.00±0.00 ^h	41.55±1.34 ^d	41.25±0.49 ^f	40.45±0.21 ^d
	30	160.00±0.00 ⁱ	160.00±0.00 ⁱ	160.00±0.00 ⁱ	155.00±0.00 ^f	37.65±0.64 ^f	34.10±0.14 ^f	34.10±0.14 ^h	31.35±0.07 ^f

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสตมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.3 ผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

4.3.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เป็นผลจากวัตถุเจือปนประเภทพรีไบโอติกที่ติดตามโดย RVA แสดงดังตารางที่ 4.4 (เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์แสดงดังภาพที่ ค.4-ค.6 ในภาคผนวก ค.) พบว่าชนิดและความเข้มข้นของพรีไบโอติกมีผลต่อสมบัติการเกิดเพสต์ ได้แก่ pasting temperature, peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity โดยเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้น pasting temperature มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกทุกระดับความเข้มข้นมี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีค่าลดลงเมื่อเติมพรีไบโอติก ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง พรีไบโอติกทั้งสามชนิด พบว่า pasting temperature ของตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกต่างชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ในด้าน peak viscosity พบว่าการเติมพอลิเดกซ์โทรสทำให้เพสต์สตาร์ชมีค่า peak viscosity ลดลงมากที่สุด รองลงมาได้แก่ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์และอินูลิน

สำหรับ breakdown viscosity จากการศึกษาพบว่า การเติมพรีไบโอติกมีผลทำให้ breakdown viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ กล่าวคือโอลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์เป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำในระบบ ทำให้น้ำที่จะมีส่วนร่วมในการเกิดเจลลาตินในเซชันของสตาร์ชมีปริมาณลดลง สตาร์ชแกรนูลจึงพองตัวได้อย่างจำกัด ทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงเฉือนและความร้อน ทั้งนี้ Singh, Singh, Kaur, Sodhi, & Gill (2003) และ Witczak, Witczak, & Ziobro (2014) รายงานว่าความทนทานของสตาร์ชแกรนูลต่อความร้อนและแรงเฉือนขึ้นกับชนิดของสตาร์ชและชนิดของแซ็กคาไรด์ที่เติม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพรีไบโอติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าการเติมอินูลินทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความทนทานต่อแรงเฉือนในขณะให้ความร้อนมากที่สุด รองลงมาได้แก่พอลิเดกซ์โทรสและ ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอินูลินมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ โดยมี DP อยู่ในช่วง 2-60 เมื่อเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ชจึงทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความ

เสถียรต่อแรงเฉือนขณะกวนผสมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเด็กซ์โทรส (DP 12) และฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ (DP 10) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า

ตารางที่ 4.4 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก

Sample	Concentration (%)	Pasting property				
		Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)
Control		78.42±0.06 ^e	1727.67 ± 4.16 ^a	338.00±6.03 ^a	2515.33±1.53 ^a	1126.00±6.93 ^a
+Polydextrose	5	79.90±0.05 ^d	1380.33 ±6.51 ^c	172.33±0.58 ^c	1926.67±10.02 ^c	718.67±13.32 ^c
	10	80.80±0.09 ^c	1120.00±10.00 ^f	83.67±5.51 ^f	1484.33±25.79 ^f	448.00±21.70 ^f
	20	80.83±0.03 ^c	679.00±7.51 ⁱ	6.67±0.58 ^{ij}	809.67±1.15 ^k	145.00±9.00 ^h
	30	81.68±0.13 ^b	375.33±9.61 ^k	0.00±0.00 ^j	421.33±5.03 ^m	46.00±4.58 ^l
+FOS	5	79.98±0.03 ^d	1418.67 ±4.16 ^b	212.00±8.00 ^b	2033.00±13.00 ^b	826.33±17.10 ^b
	10	80.85±0.05 ^c	1156.00 ±12.29 ^e	145.33±9.61 ^d	1636.00±16.09 ^e	625.33±30.89 ^d
	20	80.78±0.06 ^c	717.67±6.35 ^h	42.67±0.58 ^g	948.33±8.74 ^h	273.00±12.10 ^g
	30	81.65±0.00 ^b	378.67±10.12 ^k	7.33±0.58 ^{ij}	345.67±5.51 ⁿ	101.33±6.11 ^{hi}
+Inulin	5	80.83±0.06 ^c	1427.33±14.19 ^b	94.00±11.00 ^e	1837.00±27.40 ^d	503.67±23.63 ^e
	10	80.80±0.05 ^c	1206.00±2.65 ^d	30.33±6.66 ^h	1451.67±13.87 ^g	276.00±22.87 ^g
	20	81.63±0.03 ^b	773.00±5.57 ^g	14.00±6.24 ⁱ	877.67±12.01 ⁱ	118.67±8.50 ^h
	30	82.45±0.10 ^a	511.33±14.50 ^j	14.00±6.24 ⁱ	579.00±13.53 ⁱ	81.67±5.51 ⁱ

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับ setback viscosity พบว่าการเติมพรีไบโอติกมีผลให้ setback viscosity ลดต่ำลง ($p \leq 0.05$) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของพรีไบโอติกประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซีจำนวนมากซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาได้กับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้มีผลขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสตาร์ชด้วยกันเอง ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างที่เติมอินูลินมีผลทำให้ setback viscosity ลดลงได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่พอลิเด็กซ์โทรสและฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในแง่ผลของการเติมแซ็กคาไรด์โมเลกุลใหญ่ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช BeMiller (2011) เสนอว่ายังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน การเติมแซ็กคาไรด์เหล่านี้ อาจมีผลเพิ่มหรือลด หรือไม่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมเพสต์หรือเจลสตาร์ช ความเข้มข้นของแซ็กคาไรด์ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา และเทคนิคในการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชัน

4.3.2 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกที่ติดตามโดยใช้เทคนิค DSC (เทอร์โมแกรมของตัวอย่างสตาร์ชแสดงดังภาพที่ ค. 10-12 ในภาคผนวก ค.) พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากพรีไบโอติกประกอบด้วยหมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำจำนวนมากจึงเกิดอันตรกิริยาได้กับน้ำ ทำให้ทำให้สภาพพร้อมใช้ของน้ำในระบบลดลง เจลาทีโนเซชันจึงเกิดได้ยากขึ้น ในแง่เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าพบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้อเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเนื่องจากเจลลาทีโนเซชันที่เกิดขึ้นอย่างจำกัด เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของพรีไบโอติกที่ศึกษา พบว่าฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าเพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาได้แก่อินูลินและพอลิเด็กซ์โทรสตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุดจึงได้ให้เกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีที่สุด (Bello-Pérez, Sánchez-Rivera, Núñez-Santiago, Rodríguez-Ambríz, & Román-Gutierrez, 2010; Ronda, & Roos, 2008) อย่างไรก็ตามสำหรับเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าอินูลินทำให้อเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าเพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาได้แก่พอลิเด็กซ์โทรสและฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติเจลลาคีโนเซชัน (T_o , T_p และ T_c) เอนทาลปีของการเกิดเจลลาคีโนเซชัน (ΔH_G) และเอนทาลปีของการหลอมผลึกของแอมิโลเพกทิน (ΔH_R) ของสตาร์ชาวที่เติมโพลิแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์ที่เก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 17 และ 20 วัน

Sample	Concentration (%)	Gelatinization parameters			Retrogradation parameters			
		T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH_G (J/g)	$\Delta H_{R-14day}$ (J/g)	$\Delta H_{R-17day}$ (J/g)	$\Delta H_{R-20day}$ (J/g)
Control		62.83±0.32 ^h	77.14±0.26 ^l	84.87±0.20 ^h	12.39±0.70 ^e	5.42±0.04 ^a	5.49±0.01 ^a	5.80±0.02 ^a
+ Polydextrose	5	64.21±0.59 ^g	78.89±0.19 ⁱ	88.26±0.85 ^{ig}	15.76±0.69 ^b	5.08±0.04 ^{ab}	5.42±0.09 ^a	5.55±0.02 ^a
	10	64.63±0.22 ^{fg}	80.20±0.20 ^g	89.55±0.18 ^f	14.84±0.05 ^c	4.91±0.16 ^b	5.39±0.07 ^a	5.55±0.01 ^a
	20	68.08±0.28 ^e	84.80±0.20 ^e	90.74±0.22 ^e	11.78±0.27 ^g	3.85±0.04 ^{cd}	4.66±0.06 ^b	4.70±0.19 ^b
+ FOS	30	76.05±0.17 ^c	92.36±0.52 ^c	97.41±0.45 ^c	6.34±0.39 ^g	3.56±0.01 ^{de}	3.86±0.07 ^c	4.35±0.03 ^c
	5	64.24±0.31 ^g	79.45±0.10 ^h	88.07±0.81 ^g	15.17±0.54 ^{bc}	5.13±0.01 ^{ab}	5.55±0.01 ^a	5.71±0.14 ^a
	10	65.29±0.70 ^f	81.12±0.41 ^f	89.55±0.49 ^f	13.72±0.13 ^d	4.88±0.10 ^b	5.51±0.01 ^a	5.61±0.10 ^a
+ Inulin	20	71.19±0.84 ^d	86.78±0.35 ^d	93.18±0.58 ^d	11.08±0.09 ^f	4.18±0.29 ^c	4.60±0.13 ^b	4.77±0.23 ^b
	30	78.84±0.03 ^a	94.96±0.27 ^a	100.35±0.97 ^b	5.19±0.33 ^h	4.01±0.09 ^c	4.00±0.11 ^c	4.40±0.12 ^c
	5	63.99±0.41 ^g	78.96±0.24 ⁱ	88.09±0.65 ^g	16.82±1.66 ^a	4.19±0.24 ^c	5.36±0.12 ^a	5.65±0.07 ^a
+ Inulin	10	64.41±0.36 ^g	80.77±0.12 ^f	88.61±0.64 ^g	14.85±0.47 ^c	3.60±0.08 ^{de}	5.34±0.10 ^a	5.67±0.05 ^a
	20	68.83±0.87 ^e	86.40±0.10 ^d	93.94±0.15 ^d	13.30±0.48 ^d	3.50±0.09 ^{de}	4.62±0.13 ^b	4.76±0.26 ^b
	30	77.2±0.32 ^b	94.20±0.30 ^b	102.66±0.63 ^a	6.51±0.34 ^g	3.29±0.06 ^e	3.72±0.07 ^c	3.99±0.05 ^d

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ
ค่าเฉลี่ยในสตมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.3.3 สมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (การหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน)

ตารางที่ 4.5 แสดง ΔH_R ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่พรีไบโอติกซึ่งเจลาทีไนส์แล้ว และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน (เทอร์โมแกรมของตัวอย่างสตาร์ชแสดงดังภาพที่ ค.16-ค.18 ในภาคผนวก ค.) พบว่าเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นเดียวกับตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่เติมอินูลินเข้มข้น 30% มีเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำที่สุด ซึ่งให้เห็นว่าการเติมการินูลินเข้มข้น 30% มีผลชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพรีไบโอติกที่ใช้พบว่าการเติมอินูลินช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่พอลิเด็คซ์โทรสและ ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอินูลินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเด็คซ์โทรสและฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า จึงทำให้เกิดความเกะกะเชิงโครงสร้าง ทำให้การกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบผลึกของแอมิโลเพกทินเกิดขึ้นได้ยากขึ้น (Juszczak et al., 2012)

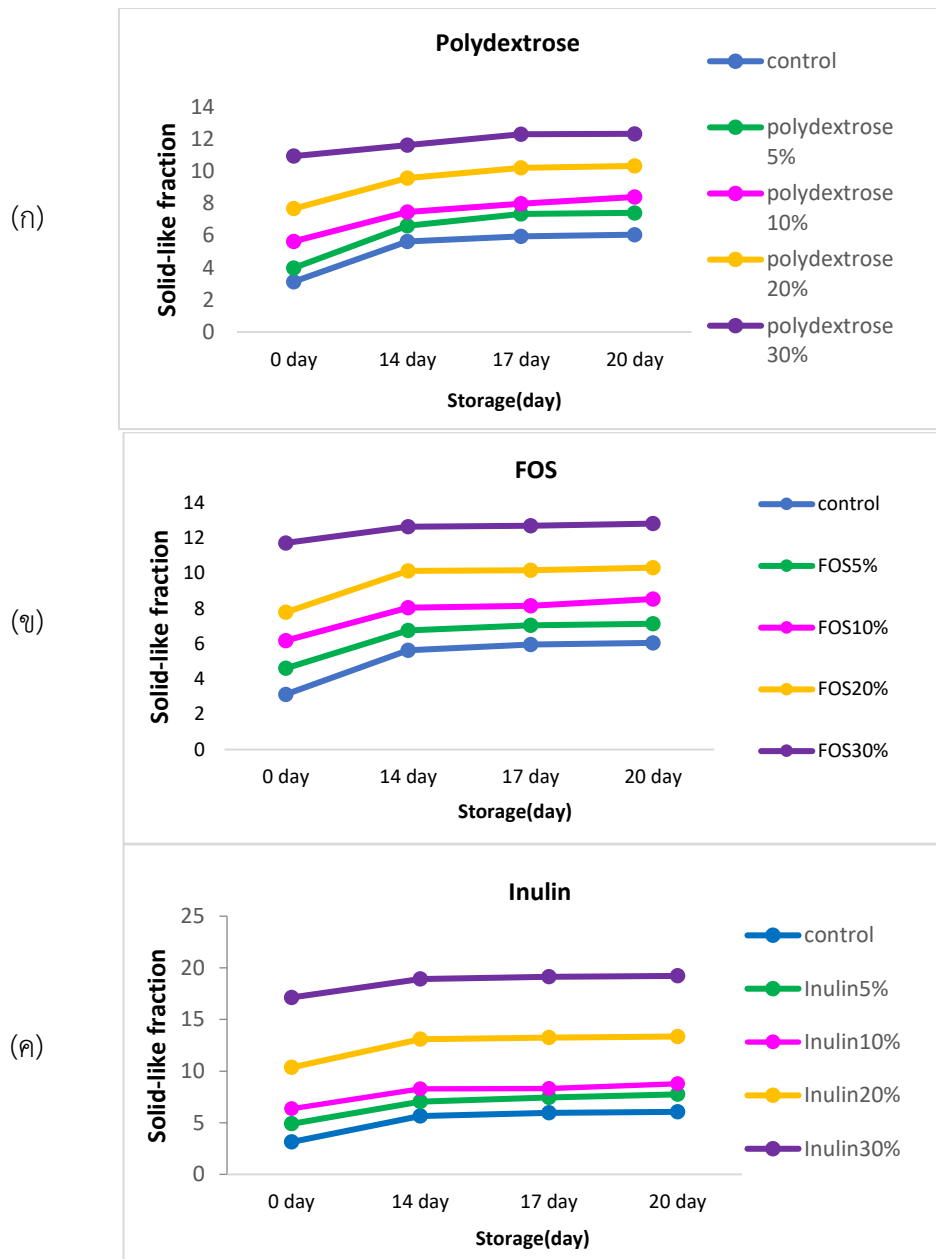
4.3.4 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง

ภาพที่ 4.2 แสดงปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลาสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน ผลที่ได้เป็นไปทำนองเดียวกันกับตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ (หัวข้อ 4.2.4) โดยพบว่าปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของตัวอย่างเจลาสตาร์ชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยทุกตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณส่วนเสมือนของแข็งที่เห็นได้ชัดในช่วง 14 วันแรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นปริมาณส่วนเสมือนของแข็งจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรือมีปริมาณค่อนข้างคงที่ ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างควบคุมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกซึ่งเห็นได้จากความชันของกราฟที่สูงกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 14 วันแรก นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติก การเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนเสมือนของแข็งในช่วง 14 วันแรกมีอัตราที่ช้าลงเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากความชันของกราฟที่ลดลง

แสดงให้เห็นว่าการเติมพรีไบโอติกสามารถชะลอการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ชได้ ผลที่ได้นี้ยังสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (หัวข้อ 4.3.3)

4.3.5 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ

ตารางที่ 4.6 แสดง $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2 ของน้ำในตัวอย่างเจลสตาร์ชระหว่างการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 20 วัน พบว่าทุกตัวอย่างมีการลดลงของ T_1 และ T_2 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำที่ลดลง โดยตัวอย่างควบคุมมีการลดลงของ T_1 และ T_2 สูงที่สุด สอดคล้องกับการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินที่สูงที่สุด (หัวข้อ 4.3.3) นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้ค่า T_1 และ T_2 ของน้ำลดลงในอัตราที่ช้าลง ผลที่ได้นี้สะท้อนให้เห็นว่าการเติมพรีไบโอติกอาจช่วยลดการเกิดเป็นผลึกใหม่ของสตาร์ชจึงต้องการน้ำที่เกิดไฮเดรชันกับผลึกลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเด็คซ์โทรส ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และอินูลิน พบว่าตัวอย่างที่เติมอินูลินมีการเปลี่ยนแปลงของค่า T_1 และ T_2 ตามระยะเวลาการเก็บรักษาต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ พอลิเด็คซ์โทรสและฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ตามลำดับ สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.3 ที่พบว่าการเติมอินูลินช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.2 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม (ก) พอลิเด็กซ์โทรส (ข) ฟรุคโทออลิโกแซ็กคาไรด์ และ (ค) อินูลิน และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14, 17 และ 20 วัน

ตารางที่ 4.6 ^1H NMR T_1 และ T_2 ของน้ำในเจลสตาร์ชาว้าที่เติมโกลีโคแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Sample	Concentration (%)	$T_{1,0\text{ day}}$ (ms)	$T_{1,17\text{ day}}$ (ms)	$T_{1,20\text{ day}}$ (ms)	$T_{2,0\text{ day}}$ (ms)	$T_{2,17\text{ day}}$ (ms)	$T_{2,20\text{ day}}$ (ms)
Control		575.00±7.07 ^a	490.00±7.07 ^a	477.5±3.54 ^a	79.40±0.00 ^a	54.05±0.07 ^c	51.20±0.14 ^{bc}
+ Polydextrose	5	420.00±0.00 ^b	380.00±0.00 ^b	380.00±0.00 ^b	78.95±0.14 ^a	62.50±0.71 ^a	54.00±0.00 ^a
	10	320.00±0.00 ^e	300.00±0.00 ^e	290.00±0.00 ^d	70.35±0.07 ^b	55.10±0.71 ^b	52.55±0.77 ^{ab}
	20	220.00±0.00 ^f	220.00±0.00 ^f	210.00±0.00 ^e	53.20±0.14 ^f	51.30±0.00 ^d	49.45±0.71 ^c
	30	140.00±7.07 ^h	140.50±0.71 ^h	140.50±0.71 ^g	38.10±0.07 ^j	33.70±0.21 ^j	33.25±0.07 ^g
+ FOS	5	390.00±0.00 ^c	350.00±0.00 ^d	350.00±0.00 ^c	66.20±0.14 ^c	46.50±0.07 ^e	43.85±0.49 ^d
	10	335.00±7.07 ^d	295.00±7.07 ^e	295.00±7.07 ^d	63.85±0.07 ^d	43.25±0.35 ^f	40.40±0.14 ^{ef}
	20	215.00±7.07 ^f	215.00±7.07 ^f	205.00±7.07 ^{ef}	38.65±0.92 ^h	35.85±0.64 ⁱ	32.05±0.07 ^{gh}
	30	140.00±7.07 ^h	140.00±0.00 ^h	140.50±0.71 ^g	35.15±0.35 ⁱ	33.80±0.14 ^j	32.00±0.14 ^{gh}
+ Inulin	5	390.00±0.00 ^c	370.00±0.00 ^c	350.00±0.00 ^c	59.40±0.42 ^e	43.65±0.64 ^f	41.80±0.21 ^{de}
	10	320.00±0.00 ^e	295.00±7.07 ^e	295.00±7.07 ^d	50.40±0.14 ^g	39.55±0.78 ^g	38.95±0.35 ^f
	20	199.50±7.07 ^g	199.00±1.41 ^g	202.00±1.41 ^e	38.10±0.14 ^h	37.30±0.28 ^h	34.30±0.28 ^g
	30	135.00±0.00 ^h	135.00±0.00 ^h	135.50±0.71 ^g	33.25±0.07 ^k	31.85±0.49 ^k	30.10±0.28 ^h

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลลัพท์ของอาหาร ได้แก่ น้ำตาล น้ำตาลแอลกอฮอล์ และฟรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้าในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา

ในส่วนของการศึกษาผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้เจลาทีนเซชันของสตาร์ชเกิดได้ยากขึ้น โดยจะเห็นได้จาก pasting temperature ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ peak viscosity มีค่าลดลง การเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ยังทำให้เพสต์สตาร์ชมีความทนทานต่อความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น โดยเห็นได้จาก breakdown viscosity ที่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำและสตาร์ชได้ ทำให้น้ำในสภาพพร้อมใช้ที่จะมีส่วนร่วมในการเกิดเจลาทีนเซชันของสตาร์ชมีปริมาณลดลง สตาร์ชแกรนูลจึงพองตัวได้อย่างจำกัด ผลที่ได้นี้ยังสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเอนทัลปีในการเกิดเจลาทีนเซชันที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมน้ำตาลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ติดตามโดยใช้เทคนิค DSC โดยพบว่าการเติมฟรุกโทสทำให้อุณหภูมิและเอนทัลปีในการเกิดเจลาทีนเซชันเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมกลูโคสและซอร์บิทอล ในส่วนของการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยติดตามเอนทัลปีในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินและอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแป้ง พบว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้อุณหภูมิในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้การเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแป้งของสตาร์ชมีอัตราที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์สามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยการเติมฟรุกโทสทำให้อุณหภูมิในการหลอมผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินลดลงได้มากที่สุด ในการติดตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ พบว่าน้ำในเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างมีความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลง (มีการลดลงของ $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าน้ำในเจลสตาร์ชถูกจับไว้โดยองค์ประกอบอื่นในระบบ เช่น การเกิดไฮเดรชันกับผลึกสตาร์ช โดยในตัวอย่างที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์มีการลดลงของค่า T_1 และ T_2 ในอัตราที่ช้ากว่าตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์อาจช่วยลดการเกิดเป็นผลึกใหม่ของสตาร์ชจึงต้องการน้ำที่เกิดไฮเดรชันกับผลึกลดลง

ในแง่ของการศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติมพอลิเด็คซิทโรส ฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ และอินูลินทำให้ pasting temperature มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ peak viscosity และ breakdown viscosity มีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับการเติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ เนื่องจากโอลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำ ทำให้น้ำในสภาพพร้อมใช้ที่จะมีส่วนร่วมในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชมีปริมาณลดลง สตาร์ชจึงเกิดเจลลาทีโนเซชันได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมพรีไบโอติกทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงเล็กน้อย การเติมพรีไบโอติกสามารถช่วยลดการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทิน ซึ่งเห็นได้จากค่าเอนทาลปีของการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินที่ลดลง โดยการเติมอินูลินสามารถชะลอการเกิดผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้มีประสิทธิภาพกว่าการเติมพอลิเด็คซิทโรสและฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณส่วนเสมียนของแข็งที่มีอัตราลดลงเมื่อเติมพรีไบโอติก ในการติดตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ พบว่าน้ำในเจลสตาร์ชที่เติมพรีไบโอติกมีการลดลงของค่า $^1\text{H NMR } T_1$ และ T_2 ในอัตราที่ช้ากว่าตัวอย่างควบคุม ทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นว่าการเติมพรีไบโอติกสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้

ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันความต้องการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพของผู้บริโภคมีจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากการใช้วัตถุดิบอาหารที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ยังมีวัตถุดิบอาหารอื่นที่มีคุณค่าทางอาหารและเป็นประโยชน์ต่อร่างกายอื่นที่สามารถนำมาใช้วัตถุดิบอาหารในระบบอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ จึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาผลของวัตถุดิบอาหารเหล่านั้นต่อสมบัติของระบบสตาร์ชเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

- Aee, L. H., Hie, K. N., & Nishinari, K. (1998). DSC and rheological studies of the effects of sucrose on the gelatinization and retrogradation of acorn starch. *Thermochimica acta*, 322, 39-46.
- Anadón, A., Martínez-Larrañaga, M. R., Ares, I., & Martínez, M. A. (2016). Probiotics: safety and toxicity considerations *Nutraceuticals* (pp. 777-798): Elsevier.
- Babić, J., Šubarić, D., Miličević, B., Aćkar, D., Kopjar, M., & Tiban, N. (2009). Influence of trehalose, glucose, fructose, and sucrose on gelatinisation and retrogradation of corn and tapioca starches. *Czech Journal of Food Sciences*, 27, 151-157.
- Bao, J., & Bergman, C. (2004). The functionality of rice starch *Starch in Food* (pp. 258-294): Elsevier.
- Bao, J. S., & Bergman, C. J. (2004). The functionality of rice starch. In A.-C. Eliasson (Ed.), *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. New York, NY.: Woodhead Publishing
- Bao, J. S. 2008. Accurate measurement of pasting temperature by the Rapid Visco Analyser: A case study using rice flour. *Rice Science*, 15, 69-72.
- Bello-Pérez, L. A., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, C., Rodríguez-Ambríz, S. L., & Román-Gutierrez, A. D. (2010). Effect of the pearled in the isolation and the morphological, physicochemical and rheological characteristics of barley starch. *Carbohydrate Polymers*, 81, 63-69.
- BeMiller, J. N. (2007). *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*: American Association of Cereal Chemists.
- Biliaderis, C. G. (2009). Structural transitions and related physical properties of starch. In J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology: Third Edition*. UK: Elsevier.

- Biliaderis, C. G., Page, C. M., Maurice, T. J., & Juliano, B. O. (1986). Thermal characterization of rice starches: a polymeric approach to phase transitions of granular starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 34, 6-14.
- Birch, G. G., & Lindley, M. (1988). *Low-Calorie Products*: Elsevier Applied Science.
- Bruker Biospin. (2016). Solid Fat Content (SFC) Analysis [Online]. Available from: https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/MagneticResonance/TD-NMR/SFC_AppNote_T151922.pdf [Retrieved on October 12, 2016]
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23, 85-112.
- Crittenden, R., & Payne, M. (2008). Nutrition News. Facts and functions of prebiotics, probiotics and synbiotics. May 2008. Department of Human Nutrition, K-State Research and Extension, Kansas State University, 535-582.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23, 1527-1534.
- Coussement, P. (1999). Inulin and oligofructose as dietary fiber: analytical, nutritional and legal aspects. *Food Science and Technology*, 203-212: Elsevier.
- Cura, J. A., Jansson, P.-E., & Krisman, C. R. (1995). Amylose is not strictly linear. *Starch/Starke*, 47, 207-209.
- Eliasson, A.-C. (2004). *Starch in Food: Structure, Function and Applications*: CRC Press.
- Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., & Nishinari, K. (2005). Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 19, 1-13.
- Gaonkar, A. G., & McPherson, A. (2016). *Ingredient Interactions: Effects on Food Quality*: CRC press.

- Gibson, G. R., & Roberfroid, M. B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *The Journal of Nutrition*, *125*, 1401.
- Gibson, T. S., Solah, V. A., & McCleary, B. V. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with concanavalin A. *Journal of Cereal Science*, *25*, 111-119.
- Hidaka, H., & Hirayama, M. (1991). *Useful Characteristics and Commercial Applications of Fructo-oligosaccharides*: Portland Press Limited.
- Hizukuri, S. (1986). Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*, *147*, 342-347.
- Hoover, R., & Senanayake, N. (1996). Effect of sugars on the thermal and retrogradation properties of oat starches. *Journal of Food Biochemistry*, *20*, 65-83.
- Jie, Z., Bang-Yao, L., Ming-Jie, X., Hai-Wei, L., Zu-Kang, Z., Ting-Song, W., & Craig, S. A. (2000). Studies on the effects of polydextrose intake on physiologic functions in Chinese people. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *72*, 1503-1509.
- Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J., Cieslik, E., & Witczak, M. (2012). Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, *90*, 353-360.
- Karim, A., Nadiha, M., Chen, F., Phuah, Y., Chui, Y., & Fazilah, A. (2008). Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch. *Food Hydrocolloids*, *22*, 1044-1053.
- Lee, M. H., Baek, M. H., Cha, D. S., Park, H. J., & Lim, S. T. (2002). Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. *Food Hydrocolloids*, *16*, 345-352.
- Longton, J., & LeGrys, G. (1981). Differential scanning calorimetry studies on the crystallinity of ageing wheat starch gels. *Starch/Stärke*, *33*, 410-414.

- McKellar, R., & Modler, H. (1989). Metabolism of fructo-oligosaccharides by *Bifidobacterium* spp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *31*, 537-541.
- Probert, H. M., Apajalahti, J. H., Rautonen, N., Stowell, J., & Gibson, G. R. (2004). Polydextrose, lactitol, and fructo-oligosaccharide fermentation by colonic bacteria in a three-stage continuous culture system. *Applied and Environmental Microbiology*, *70*, 4505-4511.
- Ribotta, P., & Le Bail, A. (2007). Thermo-physical and thermo-mechanical assessment of partially baked bread during chilling and freezing process.: Impact of selected enzymes on crumb contraction to prevent crust flaking. *Journal of Food Engineering*, *78*, 913-921.
- Rodriguez-Sandoval, E., Franco, C. M. L., & Manjarres-Pinzon, K. (2014). Effect of fructooligosaccharides on the physicochemical properties of sour cassava starch and baking quality of gluten-free cheese bread. *Starch/Stärke*, *66*, 678-684.
- Ronda, F., & Roos, Y. H. (2008). Gelatinization and freeze-concentration effects on recrystallization in corn and potato starch gels. *Carbohydrate Research*, *343*, 903-911.
- Roulet, P., MacInnes, W., Würsch, P., Sanchez, R., & Raemy, A. (1988). A comparative study of the retrogradation kinetics of gelatinized wheat starch in gel and powder form using X-rays, differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. *Food Hydrocolloids*, *2*, 381-396.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, *81*, 219-231.
- Sun, Q., Nan, C., Dai, L., Ji, N., & Xiong, L. (2014). Effect of sugar alcohol on physicochemical properties of wheat starch. *Starch/Stärke*, *66*, 788-794.

- Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: Manufacture and application. In A.-C. Eliasson (Ed.), *Starch in Food*. New York: Woodhead Publishing.
- Takeda, Y., Hizukuri, S., & Juliano, B. O. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research*, 168, 79-88.
- Teo, C., & Seow, C. (1992). A pulsed NMR method for the study of starch retrogradation. *Starch/Stärke*, 44, 288-292.
- Vittadini, E., & Vodovotz, Y. (2003). Changes in the physicochemical properties of wheat- and soy-containing breads during storage as studied by thermal analyses. *Journal of Food Science*, 68, 2022-2027.
- Vold, R., Waugh, J., Klein, M., & Phelps, D. (1968). Measurement of spin relaxation in complex systems. *Journal of Chemical Physics*, 48, 3831-3832.
- 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.
- Yao, Y., and X. Ding. 2002. Pulsed nuclear magnetic resonance (PNMR) study of rice starch retrogradation. *Cereal Chemistry* 79: 751-756.
- Yao, Y., J. Zhang, and X. Ding. 2003. Retrogradation of starch mixtures containing rice starch. *Journal of Food Science* 68: 260-265.
- Zeng, J., Gao, H., Li, G., Sun, J., & Ma, H. (2014). Comparison of effects of oligosaccharides on physicochemical properties of corn starch. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 13, 1055-1061.
- Zhou, Y., Wang, D., Zhang, L., Du, X., & Zhou, X. (2008). Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 22, 505-512.
- Ritruengdech, K., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., & Chaiyakul, S. (2012). Effects of extrusion on thermal and rheological properties of pregelatinized germinated brown rice flour. *Agricultural Science Journal*, 43, 321-324.

- Aee, L. H., Hie, K. N., & Nishinari, K. (1998). DSC and rheological studies of the effects of sucrose on the gelatinization and retrogradation of acorn starch. *Thermochimica acta*, 322, 39-46.
- Anadón, A., Martínez-Larrañaga, M. R., Ares, I., & Martínez, M. A. (2016). Probiotics: safety and toxicity considerations *Nutraceuticals* (pp. 777-798): Elsevier.
- Babić, J., Šubarić, D., Miličević, B., Aćkar, D., Kopjar, M., & Tiban, N. (2009). Influence of trehalose, glucose, fructose, and sucrose on gelatinisation and retrogradation of corn and tapioca starches. *Czech Journal of Food Sciences*, 27, 151-157.
- Bao, J., & Bergman, C. (2004). The functionality of rice starch *Starch in Food* (pp. 258-294): Elsevier.
- Bao, J. S., & Bergman, C. J. (2004). The functionality of rice starch. In A.-C. Eliasson (Ed.), *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. New York, NY.: Woodhead Publishing
- Bao, J. S. 2008. Accurate measurement of pasting temperature by the Rapid Visco Analyser: A case study using rice flour. *Rice Science*, 15, 69-72.
- Bello-Pérez, L. A., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, C., Rodríguez-Ambriz, S. L., & Román-Gutierrez, A. D. (2010). Effect of the pearled in the isolation and the morphological, physicochemical and rheological characteristics of barley starch. *Carbohydrate Polymers*, 81, 63-69.
- BeMiller, J. N. (2007). *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists: American Association of Cereal Chemists*.
- Biliaderis, C. G. (2009). Structural transitions and related physical properties of starch. In J. BeMiller & R. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology: Third Edition*. UK: Elsevier.
- Birch, G. G., & Lindley, M. (1988). *Low-Calorie Products: Elsevier Applied Science*.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23, 85-112.

- Crittenden, R., & Payne, M. (2008). Nutrition News. Facts and functions of prebiotics, probiotics and synbiotics. May 2008. Department of Human Nutrition, K-State Research and Extension, Kansas State University, 535-582.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23, 1527-1534.
- Coussement, P. (1999). Inulin and oligofructose as dietary fiber: analytical, nutritional and legal aspects. *Food Science and Technology*, 203-212: Elsevier.
- Cura, J. A., Jansson, P.-E., & Krisman, C. R. (1995). Amylose is not strictly linear. *Starch/Stärke*, 47, 207-209.
- Eliasson, A.-C. (2004). *Starch in Food: Structure, Function and Applications*: CRC Press.
- Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., & Nishinari, K. (2005). Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 19, 1-13.
- Gaonkar, A. G., & McPherson, A. (2016). *Ingredient Interactions: Effects on Food Quality*: CRC press.
- Gibson, G. R., & Roberfroid, M. B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *The Journal of Nutrition*, 125, 1401.
- Gibson, T. S., Solah, V. A., & McCleary, B. V. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with concanavalin A. *Journal of Cereal Science*, 25, 111-119.
- Hidaka, H., & Hirayama, M. (1991). *Useful Characteristics and Commercial Applications of Fructo-oligosaccharides*: Portland Press Limited.
- Hizukuri, S. (1986). Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*, 147, 342-347.
- Hoover, R., & Senanayake, N. (1996). Effect of sugars on the thermal and retrogradation properties of oat starches. *Journal of Food Biochemistry*, 20, 65-83.

- Horndok, R., & Noomhorm, A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 1723-1731.
- Jie, Z., Bang-Yao, L., Ming-Jie, X., Hai-Wei, L., Zu-Kang, Z., Ting-Song, W., & Craig, S. A. (2000). Studies on the effects of polydextrose intake on physiologic functions in Chinese people. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 72, 1503-1509.
- Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J., Cieslik, E., & Witczak, M. (2012). Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, 90, 353-360.
- Karim, A., Nadiha, M., Chen, F., Phuah, Y., Chui, Y., & Fazilah, A. (2008). Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch. *Food Hydrocolloids*, 22, 1044-1053.
- Lee, M. H., Baek, M. H., Cha, D. S., Park, H. J., & Lim, S. T. (2002). Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. *Food Hydrocolloids*, 16, 345-352.
- Lim, S. T., Chang, E. H., & Chung, H. J. (2001). Thermal transition characteristics of heat-moisture treated corn and potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 46, 107-115.
- Longton, J., & LeGrys, G. (1981). Differential scanning calorimetry studies on the crystallinity of ageing wheat starch gels. *Starch/Stärke*, 33, 410-414.
- McKellar, R., & Modler, H. (1989). Metabolism of fructo-oligosaccharides by *Bifidobacterium* spp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 31, 537-541.
- Probert, H. M., Apajalahti, J. H., Rautonen, N., Stowell, J., & Gibson, G. R. (2004). Polydextrose, lactitol, and fructo-oligosaccharide fermentation by colonic bacteria in a three-stage continuous culture system. *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 4505-4511.

- Rangelov, A., Arnaudov, L., Stoyanov, S., & Spassov, T. (2017). Gelatinization of industrial starches studied by DSC and TG. *Bulgarian Chemical Communications*, 49, 422-429.
- Ribotta, P., & Le Bail, A. (2007). Thermo-physical and thermo-mechanical assessment of partially baked bread during chilling and freezing process.: Impact of selected enzymes on crumb contraction to prevent crust flaking. *Journal of Food Engineering*, 78, 913-921.
- Ritruengdech, K., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., & Chaiyakul, S. (2012). Effects of extrusion on thermal and rheological properties of pregelatinized germinated brown rice flour. *Agricultural Science Journal*, 43, 321-324.
- Rodriguez-Sandoval, E., Franco, C. M. L., & Manjarres-Pinzon, K. (2014). Effect of fructooligosaccharides on the physicochemical properties of sour cassava starch and baking quality of gluten-free cheese bread. *Starch/Stärke*, 66, 678-684.
- Ronda, F., & Roos, Y. H. (2008). Gelatinization and freeze-concentration effects on recrystallization in corn and potato starch gels. *Carbohydrate Research*, 343, 903-911.
- Roulet, P., MacInnes, W., Würsch, P., Sanchez, R., & Raemy, A. (1988). A comparative study of the retrogradation kinetics of gelatinized wheat starch in gel and powder form using X-rays, differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. *Food Hydrocolloids*, 2, 381-396.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81, 219-231.
- Sun, Q., Nan, C., Dai, L., Ji, N., & Xiong, L. (2014). Effect of sugar alcohol on physicochemical properties of wheat starch. *Starch/Stärke*, 66, 788-794.

- Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: Manufacture and application. In A.-C. Eliasson (Ed.), *Starch in Food*. New York: Woodhead Publishing.
- Takeda, Y., Hizukuri, S., & Juliano, B. O. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research*, 168, 79-88.
- Teo, C., & Seow, C. (1992). A pulsed NMR method for the study of starch retrogradation. *Starch/Stärke*, 44, 288-292.
- Vittadini, E., & Vodovotz, Y. (2003). Changes in the physicochemical properties of wheat- and soy-containing breads during storage as studied by thermal analyses. *Journal of Food Science*, 68, 2022-2027.
- Vold, R., Waugh, J., Klein, M., & Phelps, D. (1968). Measurement of spin relaxation in complex systems. *Journal of Chemical Physics*, 48, 3831-3832.
- 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.
- Yao, Y., and X. Ding. 2002. Pulsed nuclear magnetic resonance (PNMR) study of rice starch retrogradation. *Cereal Chemistry* 79: 751-756.
- Yao, Y., J. Zhang, and X. Ding. 2003. Retrogradation of starch mixtures containing rice starch. *Journal of Food Science* 68: 260-265.
- Zeng, J., Gao, H., Li, G., Sun, J., & Ma, H. (2014). Comparison of effects of oligosaccharides on physicochemical properties of corn starch. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 13, 1055-1061.
- Zhou, Y., Wang, D., Zhang, L., Du, X., & Zhou, X. (2008). Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 22, 505-512.
- ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ชงชัย สุวรรณสีขณณ์, วิชัย หทัยธนาสันต์, and กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2546). พฤติกรรมด้านความหนืดและคุณสมบัติทางกลของแป้งท้าวยายม่อม (Tacca

Leontopetaloides Ktze). In: การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ครั้งที่
4. p 53-60.







ก.1 การสกัดไขมันจากตัวอย่างสตาร์ชและการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

สารเคมี

1. ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO)
2. เอทานอลเข้มข้น 99.9%
3. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์
4. สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์
5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์
6. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 1.67 มิลลิโมลาร์
7. แอซีโตน
8. อีเทอร์

วิธีวิเคราะห์

การสกัดไขมันจากตัวอย่างสตาร์ช (ดัดแปลงจาก Gibson, Solah, & McCleary, 1997)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 2 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน เติม DMSO ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำสตาร์ชมาเจลาทีไนซ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติม เอทานอลเข้มข้น 99.9% ปริมาตร 6 มิลลิลิตร แล้วลดอุณหภูมิลงจนถึง 4 องศาเซลเซียส นำมาแยกส่วนของไขมันออกโดยการเหวี่ยงแยกโดยใช้อัตราเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นใช้แอซีโตนล้างตะกอนเพื่อกำจัดเอทานอล และกำจัดแอซีโตนออกจากส่วนตะกอนด้วยอีเทอร์อีกครั้ง นำตะกอนที่ได้มาทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วบดลดขนาดเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (ดัดแปลงจาก Takeda, Hizukuri, & Juliano, 1987)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่สกัดไขมันออก 60 มิลลิกรัม นำมาละลายด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 80 มิลลิลิตร

สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

วิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียด้วยวิธีแอมเพอโรเมทรี โดยจุ่มหัววัดของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายตัวอย่าง ไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 1.67 มิลลิโมลาร์จนถึงจุดยุติ จากนั้นคำนวณปริมาณแอมโมเนียจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตที่ใช้ในการไทเทรตกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น





ตารางที่ ข.1 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Sample	Concentration (%)	Solid-like fraction (%)			
		Storage time			
		0 day	14 days	17 days	20 days
Control		3.13±0.04	5.64±0.01	5.96±0.01	6.06±0.06
+Fructose	5	3.99±0.12	6.11±0.01	6.52±0.03	6.65±0.01
	10	4.23±0.04	6.34±0.03	6.76±0.01	6.93±0.01
	20	5.42±0.01	7.79±0.01	8.15±0.03	8.32±0.06
	30	7.18±0.03	9.63±0.10	9.95±0.11	10.09±0.12
+Glucose	5	4.07±0.01	6.19±0.01	6.68±0.01	6.76±0.03
	10	4.65±0.01	6.87±0.31	7.24±0.05	7.46±0.33
	20	5.57±0.01	8.04±0.01	8.56±0.05	8.63±0.04
	30	7.43±0.16	9.83±0.03	9.84±0.10	9.88±0.09
+Sorbitol	5	4.16±0.02	6.24±0.03	6.63±0.07	6.86±0.04
	10	4.37±0.03	6.65±0.33	7.03±0.14	7.05±0.14
	20	5.46±0.01	7.78±0.02	8.05±0.02	8.12±0.03
	30	7.63±0.01	9.83±0.04	9.82±0.03	9.84±0.04

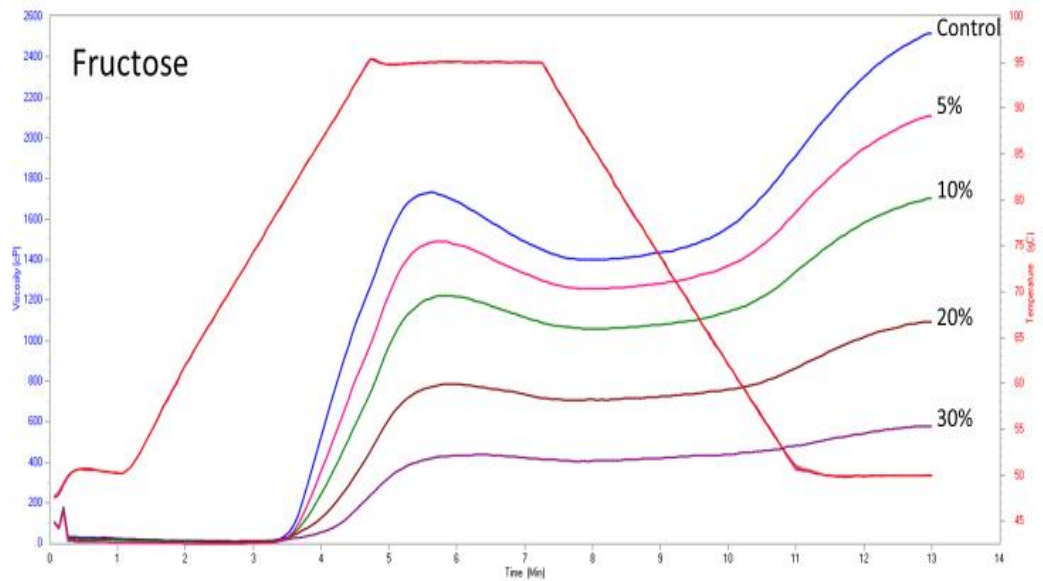
ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมของพรีไบโอติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

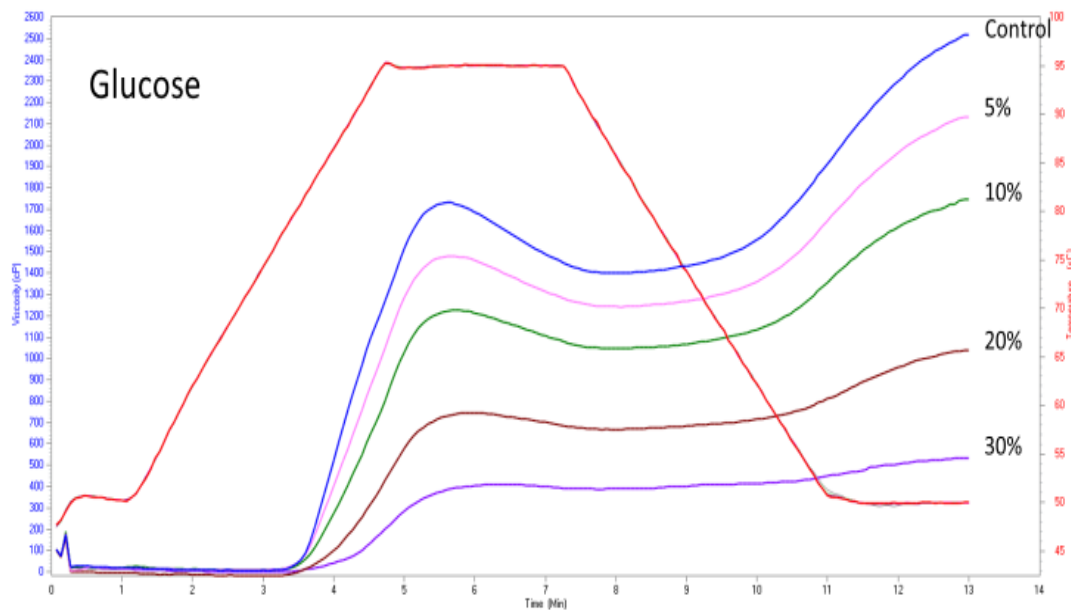
Sample	Concentration (%)	Solid-like fraction (%)			
		Storage time			
		0 day	14 days	17 days	20 days
Control		3.13±0.04	5.64±0.01	5.96±0.01	6.06±0.06
+Polydextrose	5	3.99±0.02	6.61±0.04	7.35±0.03	7.42±0.01
	10	5.64±0.07	7.48±0.04	7.99±0.01	8.40±0.01
	20	7.68±0.04	9.59±0.01	10.22±0.03	10.34±0.03
	30	10.95±0.04	11.64±0.08	12.30±0.01	12.34±0.02
+FOS	5	4.61±0.01	6.77±0.02	7.05±0.02	7.14±0.01
	10	6.19±0.02	8.06±0.01	8.17±0.02	8.55±0.01
	20	7.79±0.01	10.15±0.07	10.18±0.01	10.33±0.01
	30	11.73±0.03	12.65±0.06	12.71±0.01	12.83±0.02
+Inulin	5	4.89±0.21	7.04±0.01	7.45±0.03	7.75±0.15
	10	6.35±0.01	8.28±0.01	8.33±0.01	8.78±0.06
	20	10.35±0.08	13.10±0.01	13.24±0.02	13.35±0.01
	30	17.13±0.02	18.91±0.01	19.14±0.03	19.22±0.02

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

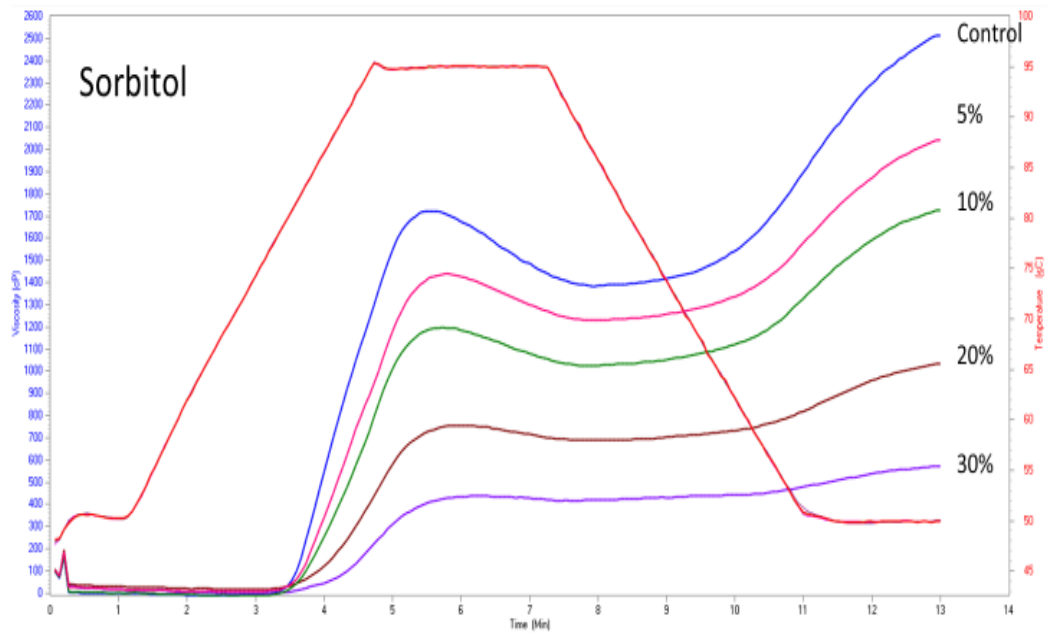




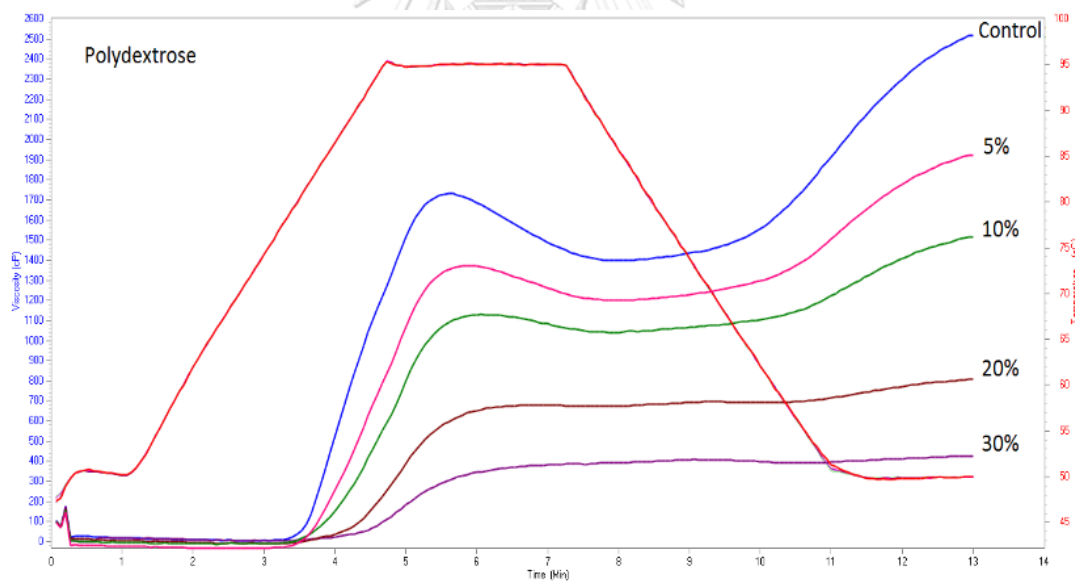
ภาพที่ ค.1 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุกโทสเข้มข้น 5-30%



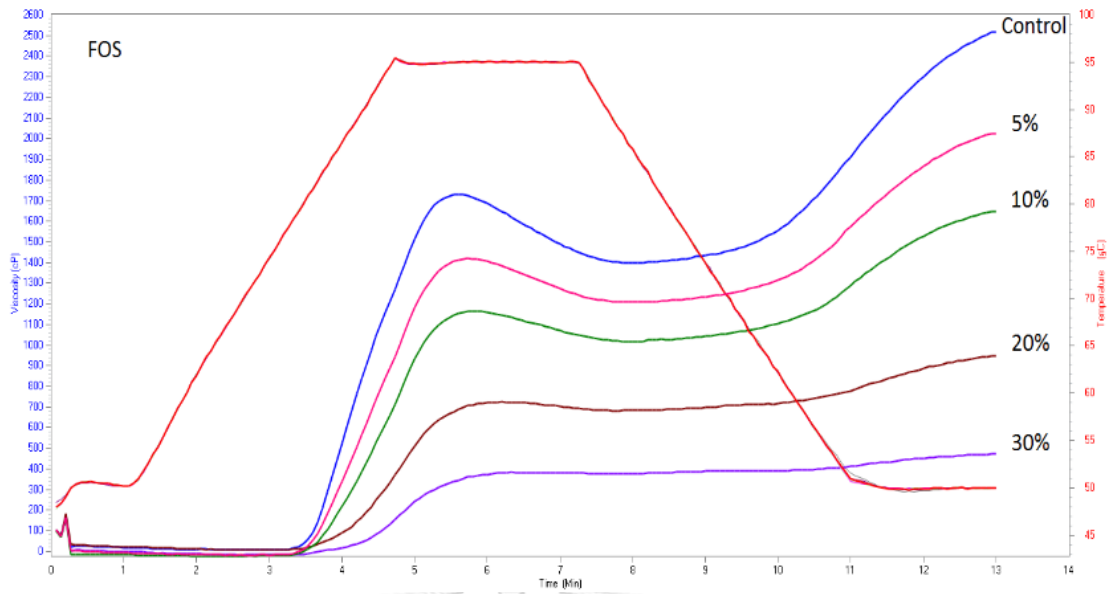
ภาพที่ ค.2 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมกลูโคสเข้มข้น 5-30%



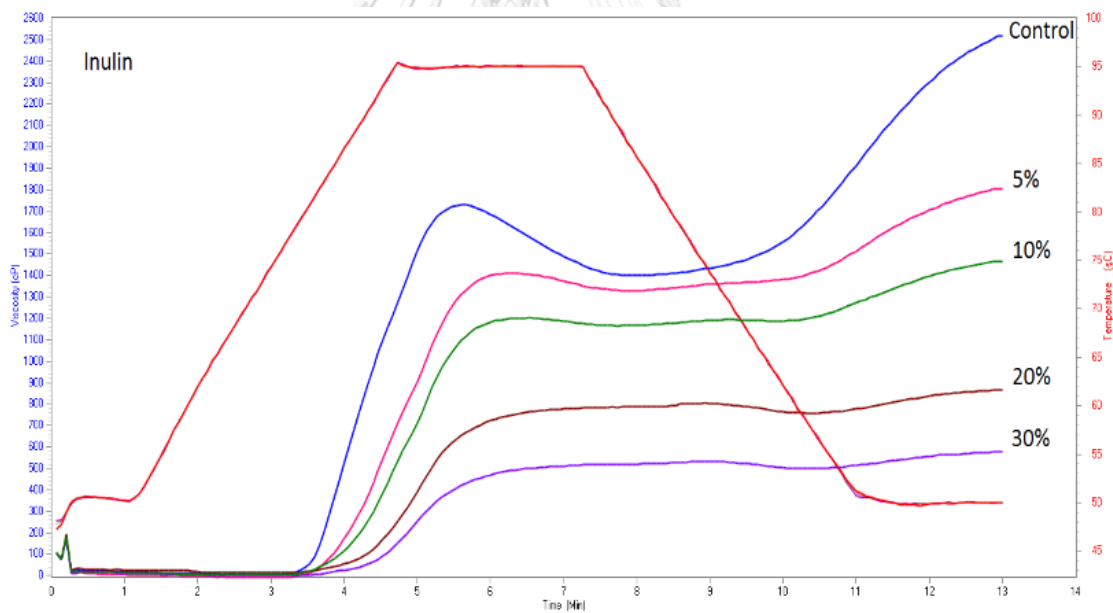
ภาพที่ ค.3 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30%



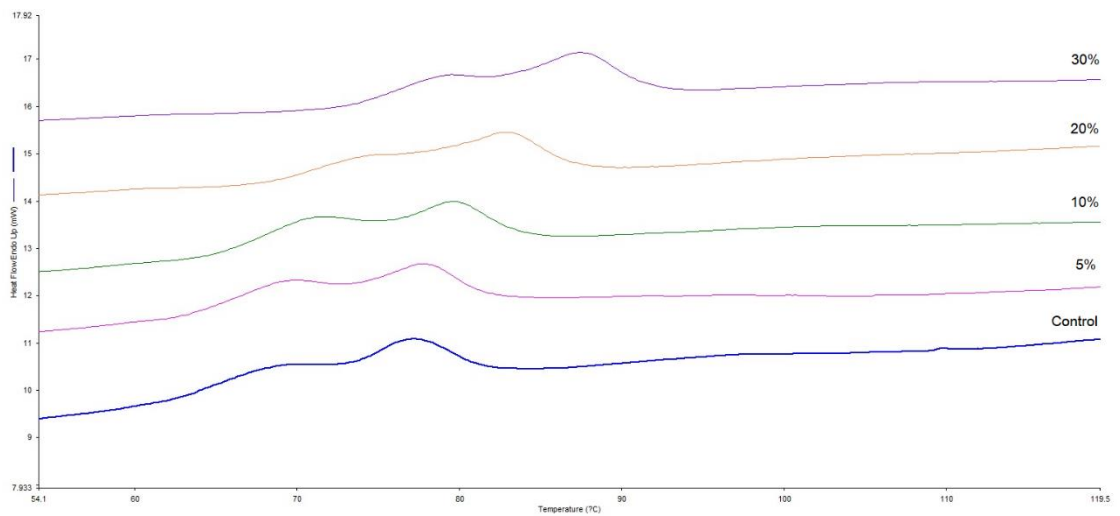
ภาพที่ ค.4 เส้นพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพอลิเด็กซ์ไทรอสเข้มข้น 5-30%



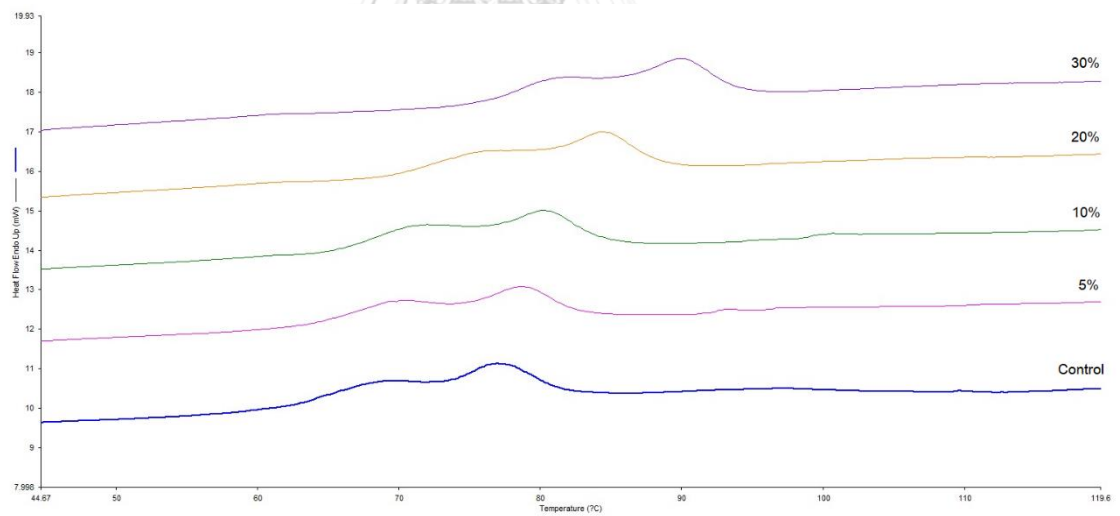
ภาพที่ ค.5 เส้นพฤติกรรมเกิดการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 5-30%



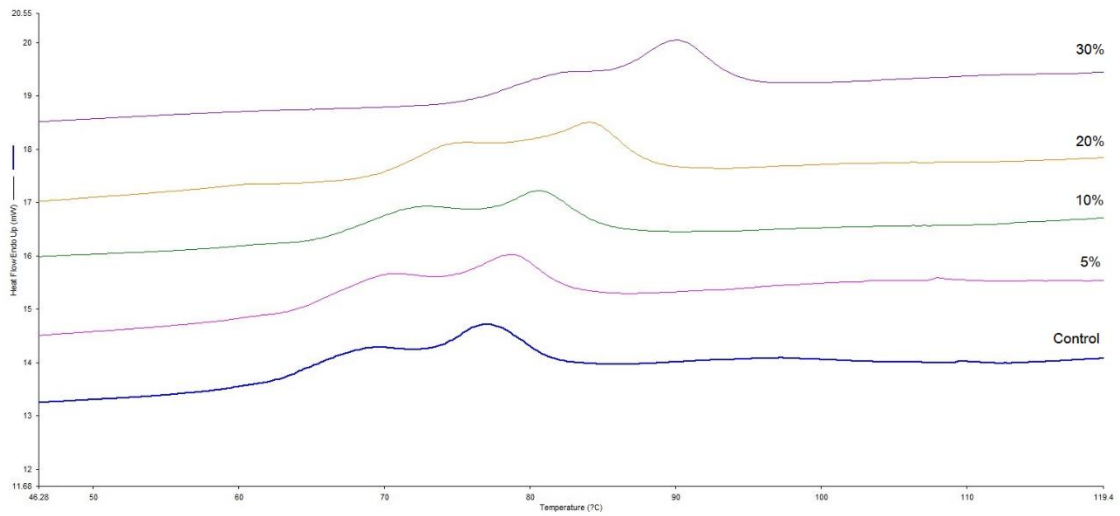
ภาพที่ ค.6 เส้นพฤติกรรมเกิดการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมอินูลินเข้มข้น 5-30%



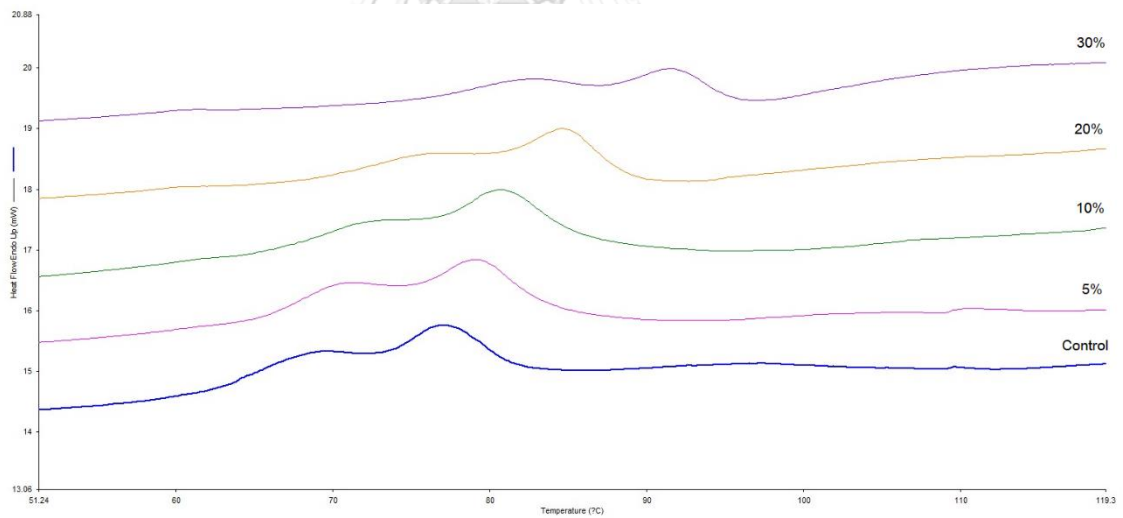
ภาพที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทส
เข้มข้น 5-30%



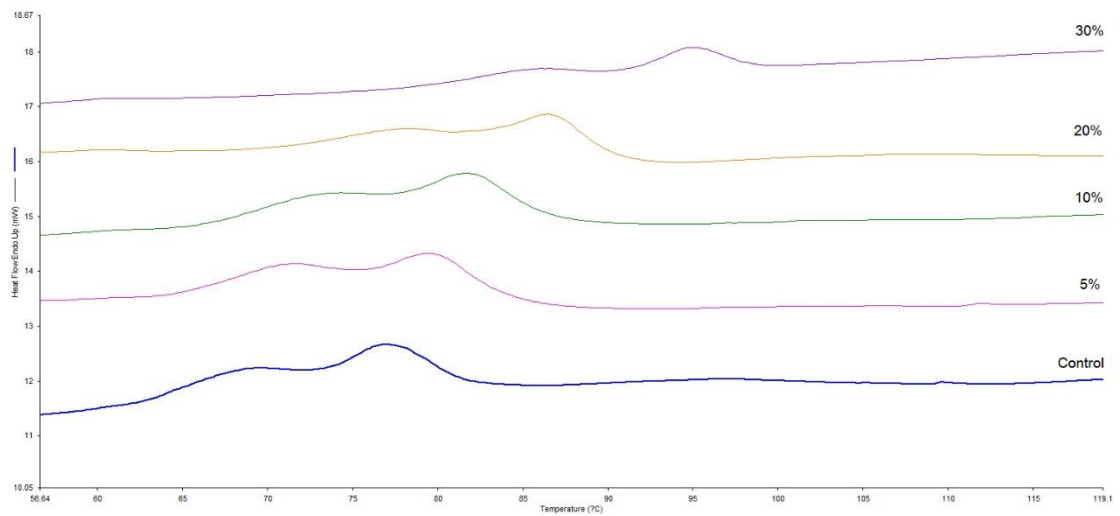
ภาพที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมกลูโคส
เข้มข้น 5-30%



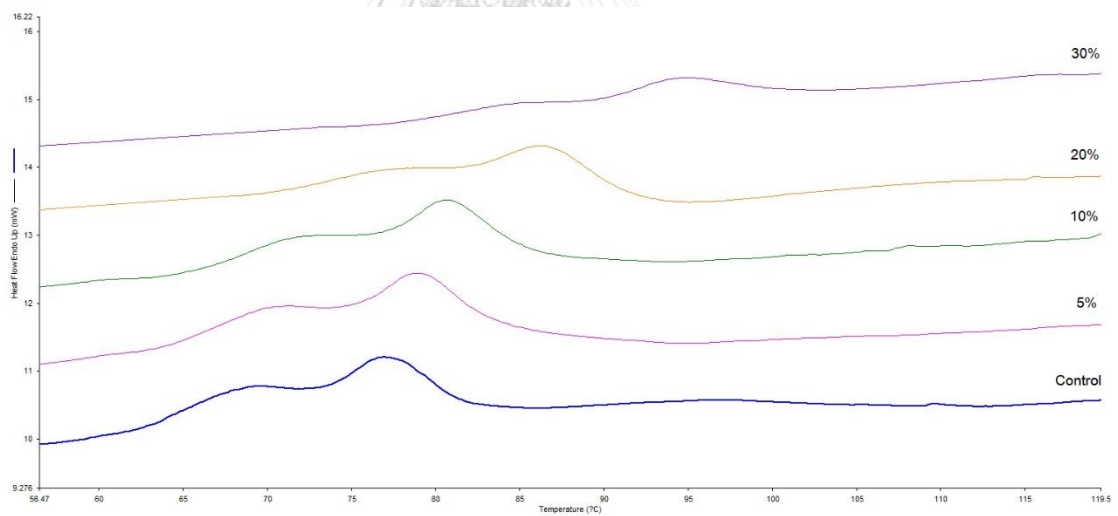
ภาพที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลที่โนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30%



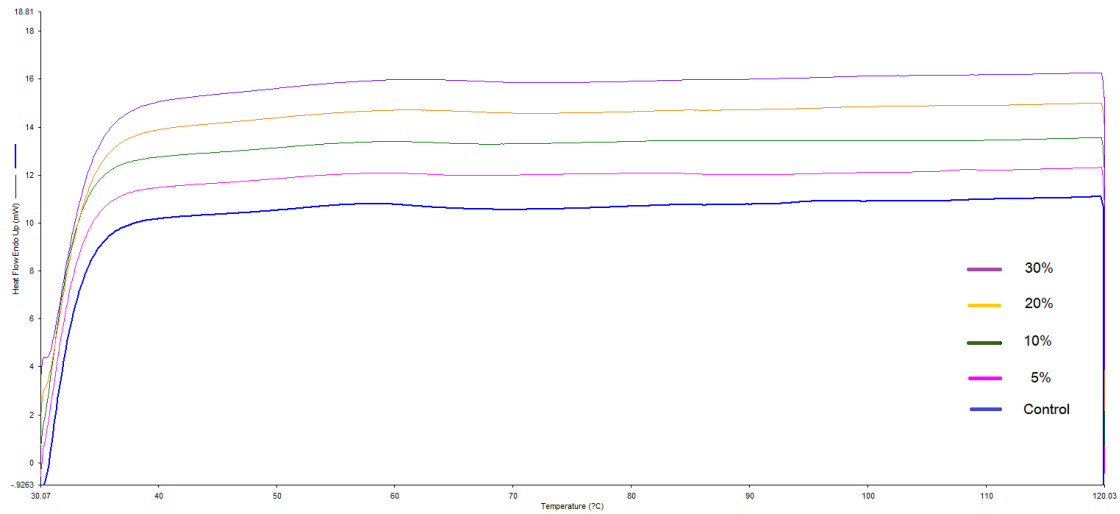
ภาพที่ ค.10 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลที่โนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพอลิเด็กซ์โทรสเข้มข้น 5-30%



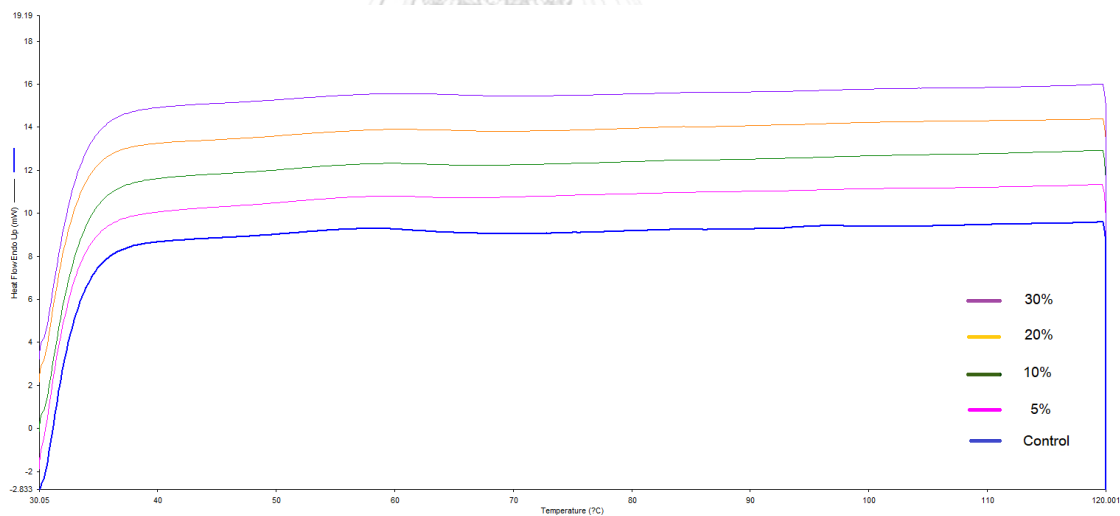
ภาพที่ ค.11 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 5-30%



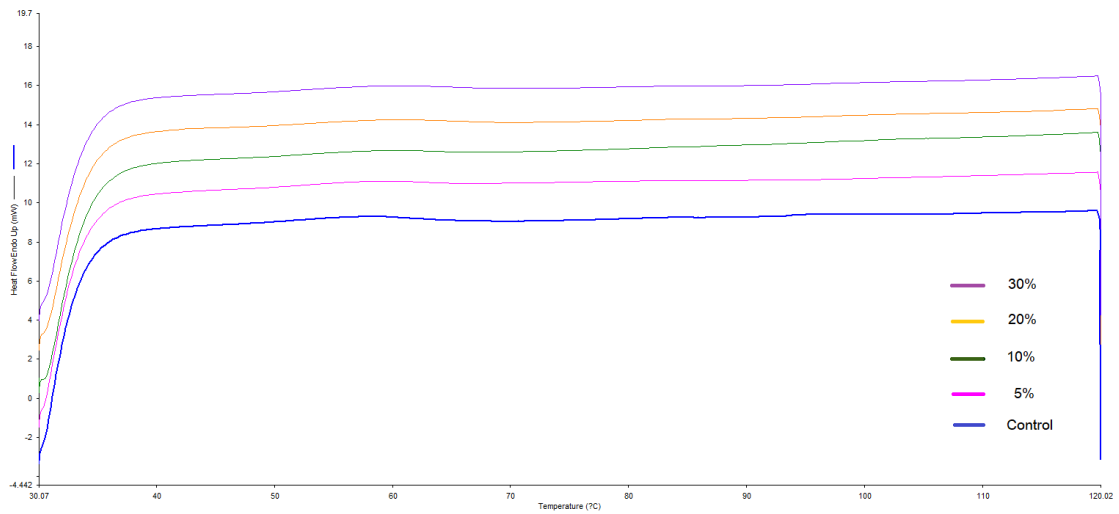
ภาพที่ ค.12 เทอร์โมแกรมของการติดตามการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมอินูลินเข้มข้น 5-30%



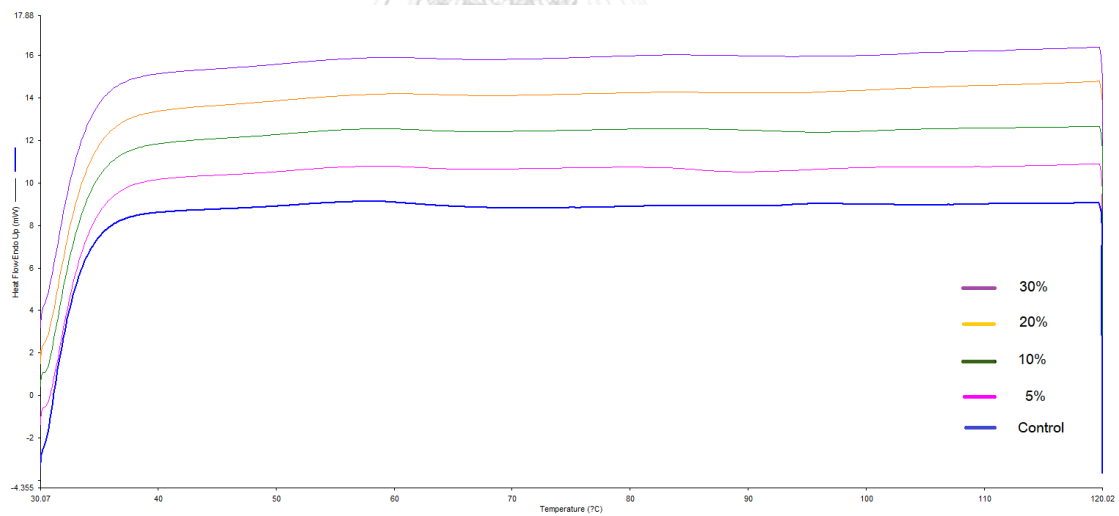
ภาพที่ ค. 13 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



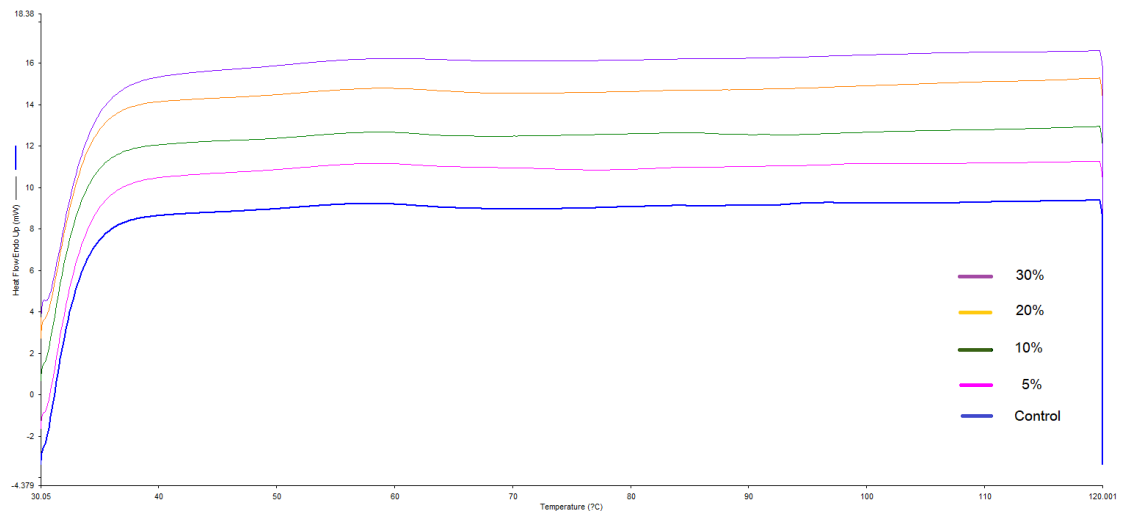
ภาพที่ ค. 14 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมกลูโคสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



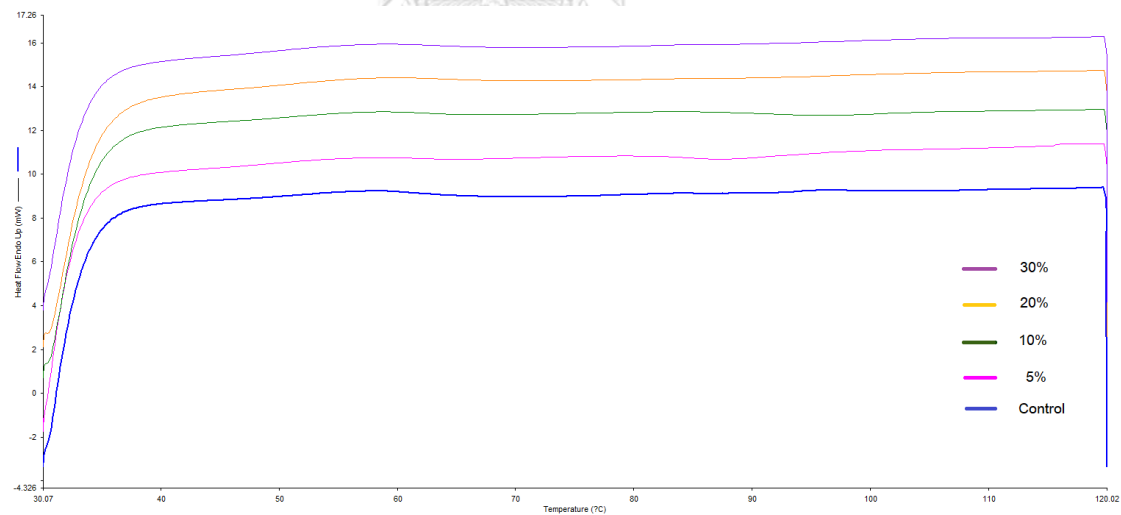
ภาพที่ ค. 15 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



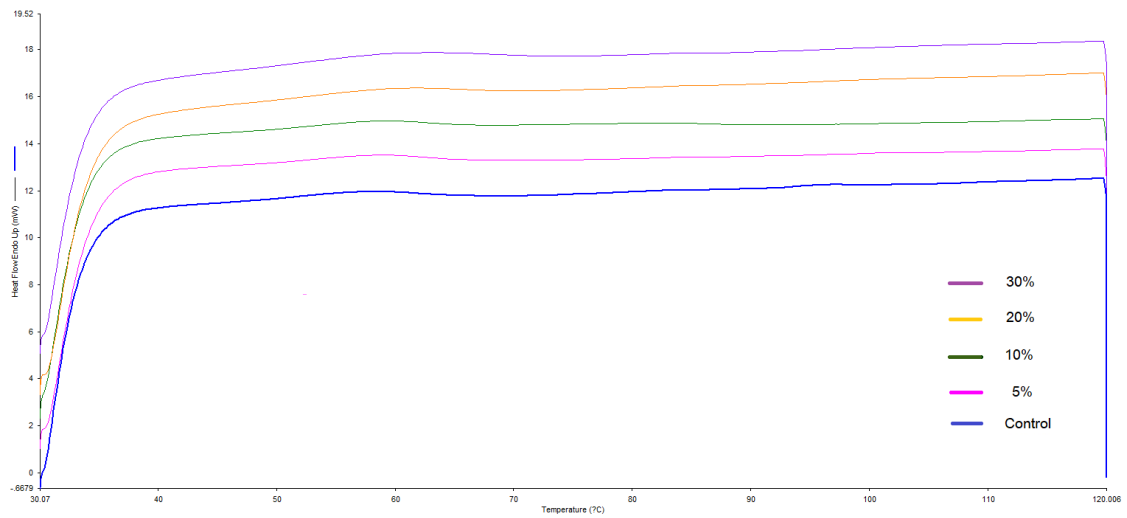
ภาพที่ ค. 16 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพอลิเดกซ์ไทรสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



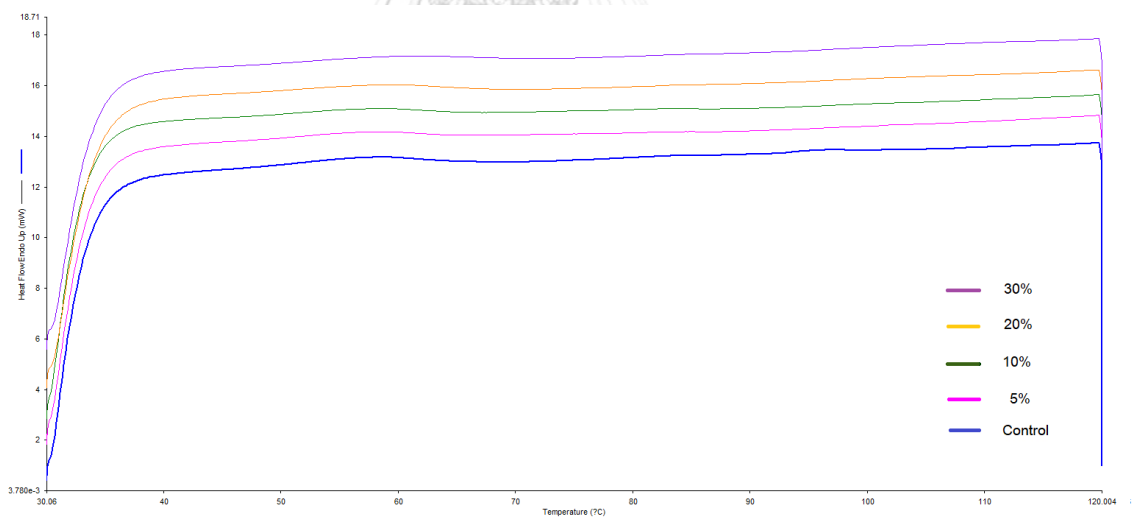
ภาพที่ ค. 17 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



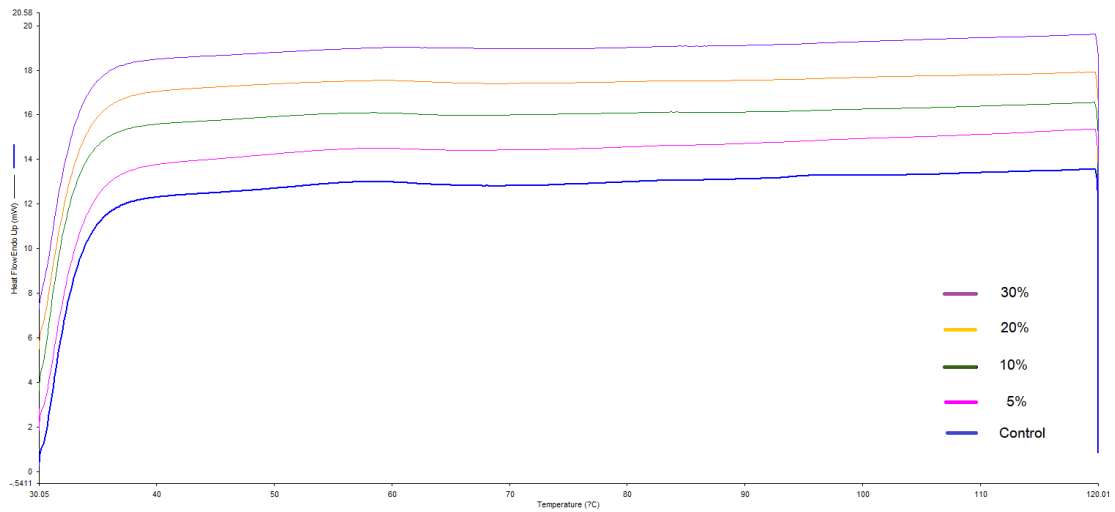
ภาพที่ ค. 18 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมอินูลินเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน



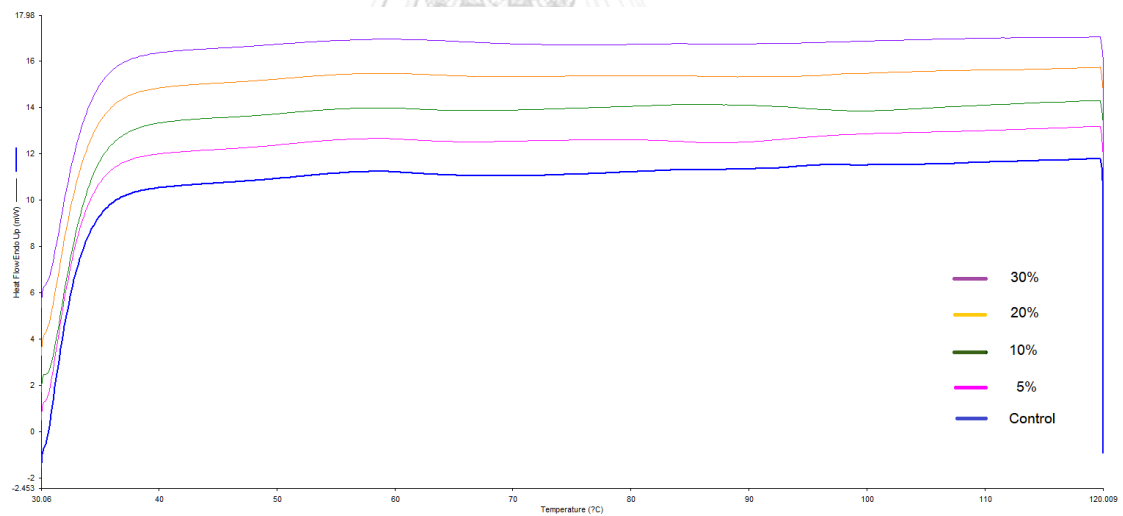
ภาพที่ ค. 19 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุทโทสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



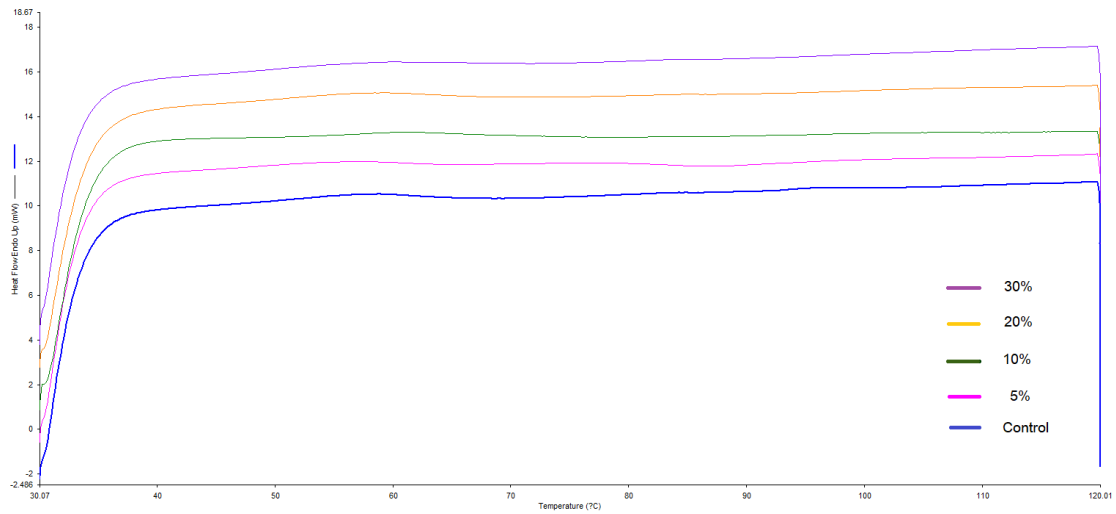
ภาพที่ ค. 20 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมกลูโคสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



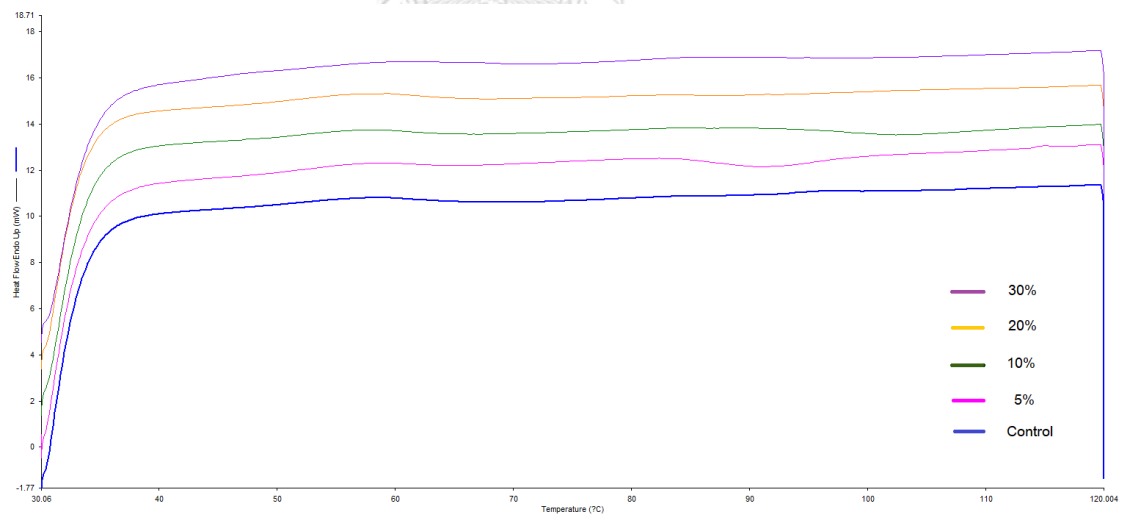
ภาพที่ ค. 21 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



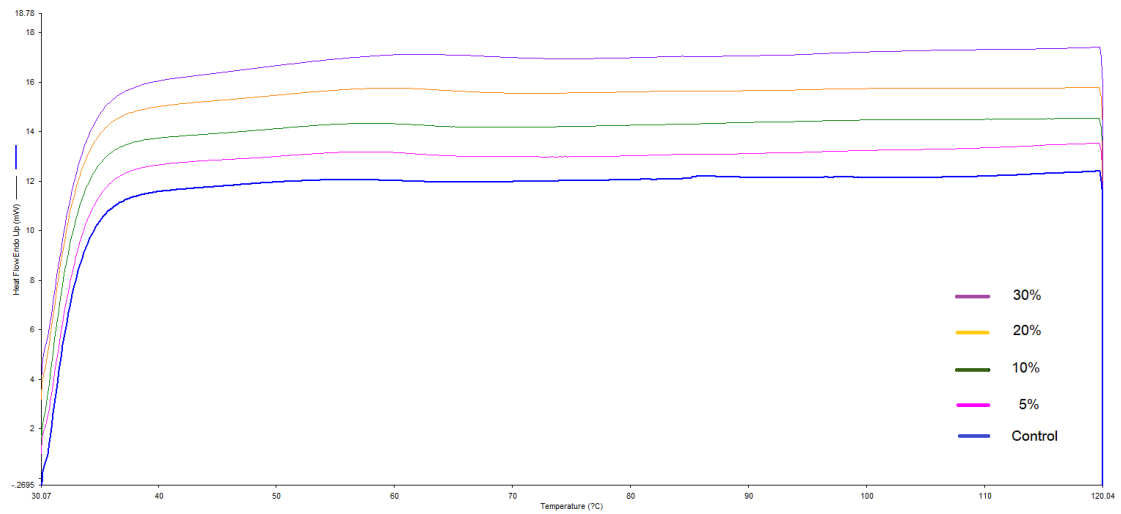
ภาพที่ ค. 22 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพอลิเด็กซ์ไทรสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



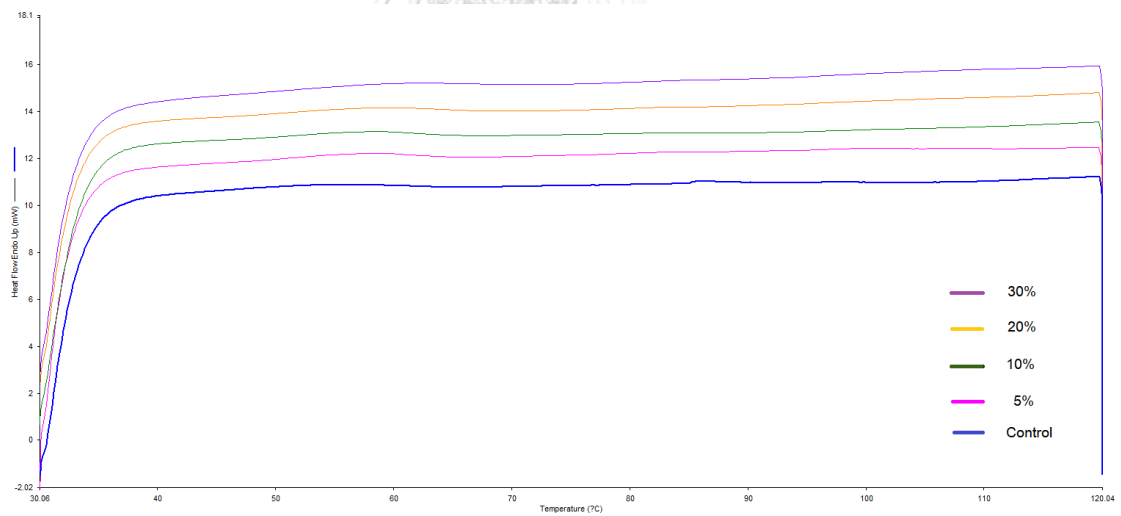
ภาพที่ ค. 23 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุกโทโอลิโกแซ็กคาไรด์เข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



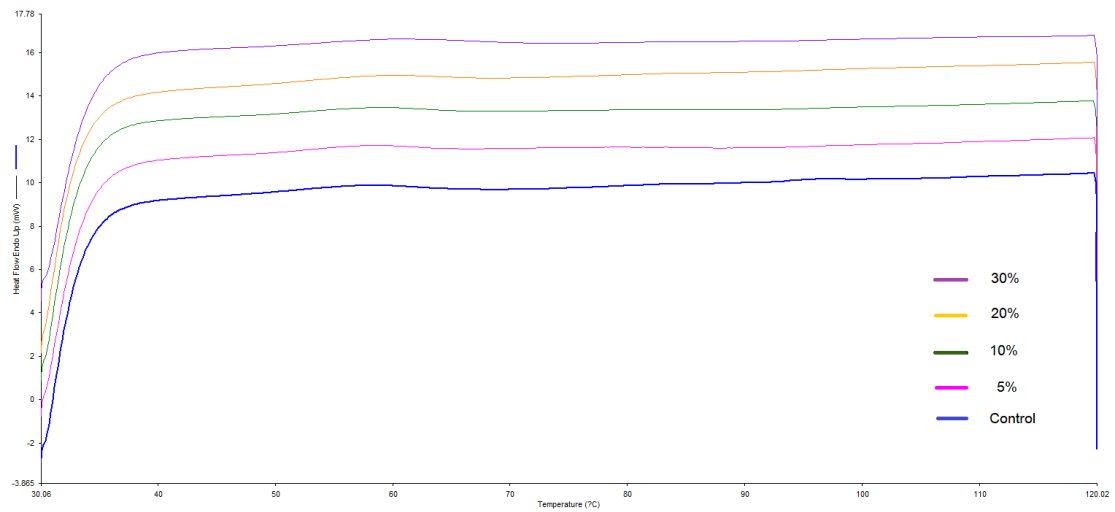
ภาพที่ ค. 24 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมอินูลินเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17 วัน



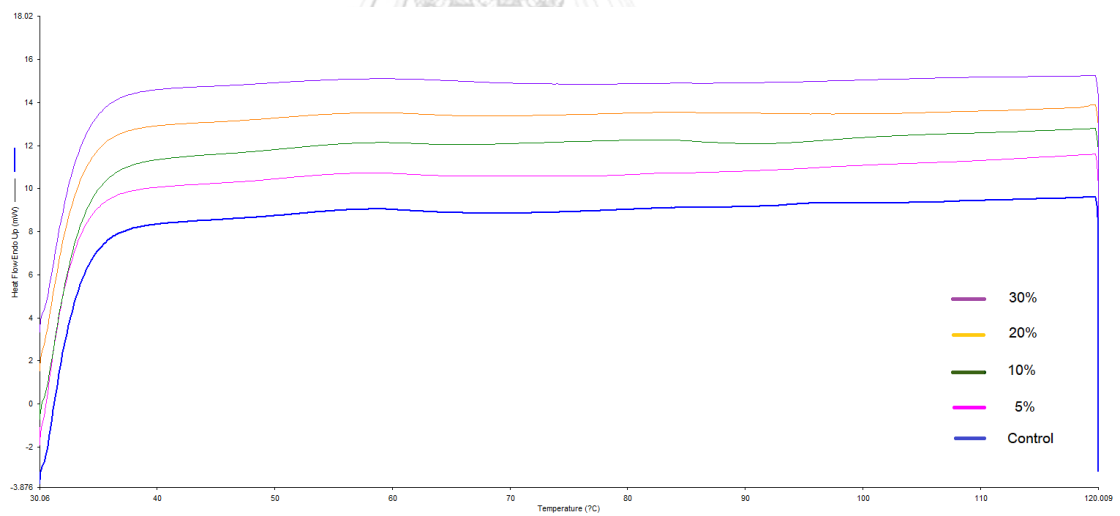
ภาพที่ ค. 25 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมฟรุคโทสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน



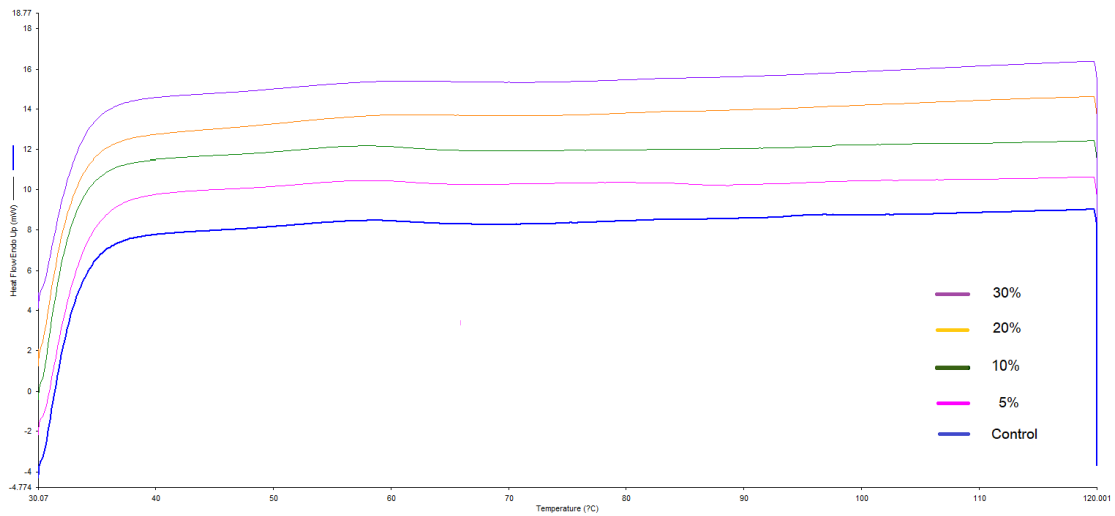
ภาพที่ ค. 26 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมกลูโคสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน



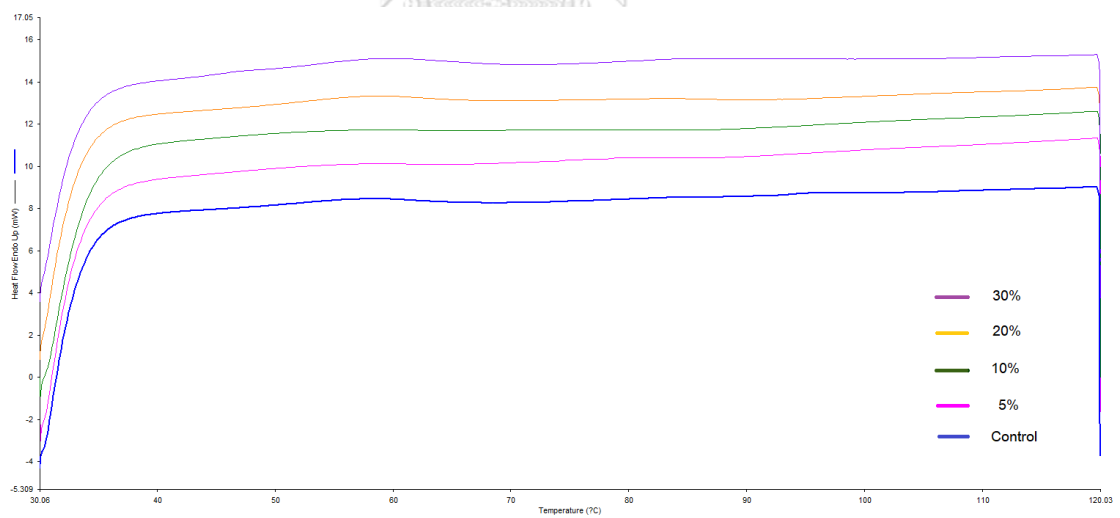
ภาพที่ ค. 27 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติม
ซอร์บิทอลเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ ค. 28 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติม
พอลิเดกซ์โทรสเข้มข้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ ค. 29 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพริกทออลิโกแซ็กคาไรด์เชื่อมชั้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ ค. 30 เทอร์โมแกรมของการติดตามการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมอินูลินเชื่อมชั้น 5-30% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไชยพรรณ ธาราสุข เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม 2532 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2558 ในระหว่างศึกษาได้รับทุนวิทยบัณฑิตระดับปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายไชยพรรณ ธาราสุข ได้นำเสนอผลงานและตีพิมพ์เรื่องเต็มในหัวข้อ Effect of prebiotics on properties of rice starch paste and gel ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบันครั้งที่ 5 (The 5th Academic Science and Technology Conference 2017) “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อขับเคลื่อนสู่ประเทศไทย 4.0” (Science and Technology as a Key Driver towards Thailand 4.0) ณ โรงแรมมิราเคิล แกรนด์คอนเวนชั่น กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2560



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY