

ผลการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟต
ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากุไทย (*Maranta arundinaceae* L.)
และสตาร์ชจากุจีน (*Canna edulis* Ker.)



นางสาวนพร แซ่เบ๊

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1052-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF MODIFICATION BY SUBSTITUTION AND CROSS-LINKING BY
PHOSPHATE GROUPS ON THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF *Maranta*
arundinaceae L. AND *Canna edulis* Ker. STARCHES



Miss Naporn Sae-Bae

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1052-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟตต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकुไทย (<i>Maranta arundinaceae</i> L.) และสตาร์ชสาकुจีน (<i>Canna edulis</i> Ker.)
โดย	นางสาวนพร แซ่เบ๊
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุพ์ ชัยวานิชศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณฯ ตูลยธัญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุพ์ ชัยวานิชศิริ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาสวดี ประทีปะเสน)

.....กรรมการ
(นายมงคล เกษประเสริฐ)

นางสาวนพร แซ่เป้ : ผลการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟตต่อสมบัติทางเคมี
 ภายภาพของสตาร์ชสาคุไทย (*Maranta arundinaceae* L.) และสตาร์ชสาคุจีน (*Canna edulis* Ker.). Effect of
 modification by substitution and cross-linking by phosphate groups on the physicochemical properties of
Maranta arundinaceae L. and *Canna edulis* Ker. starches. อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.กัลยา เลหาสงคราม,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ 203 หน้า. ISBN 974-53-1052-2.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยว และการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และ
 ปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟตต่อสมบัติทางเคมีภายภาพของสตาร์ชสาคุไทย (*Maranta arundinaceae* L.) และ
 สาคุจีน (*Canna edulis* Ker.) พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อสมบัติทางเคมีภายภาพของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน
 โดยสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์สูง (ปริมาณสตาร์ช > 95%) มีองค์ประกอบอื่นๆอยู่น้อย มี
 ปริมาณอะไมโลสประมาณ 38.45% และ 53.18% ตามลำดับ รูปร่างแกรนูลของสตาร์ชสาคุไทยค่อนข้างกลม และมีขนาด
 เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-25 μm . ส่วนสตาร์ชสาคุจีนมีลักษณะเป็นวงกลม และวงรี และมีขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลางประมาณ 20-80 μm . สตาร์ชทั้งสองชนิดมีการพองตัว และการละลายน้อย จากการศึกษาสมบัติด้านความ
 เหนียวของสารละลายสตาร์ชทั้งสองชนิดด้วย RVA พบว่าสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนมีอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ 81.6 และ
 75.7 $^{\circ}\text{C}$ มีความทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนสูง แต่มีเสถียรภาพของความหนืดลดลงที่ pH 3 และ pH 9 โดย
 เสถียรภาพของความหนืดที่ pH 9 ต่ำกว่าที่ pH 3 และสตาร์ชทั้งสองชนิดไม่มีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลาย
 น้ำแข็ง เมื่อนำสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนมาดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ โดยแปรความเข้มข้นของโซเดียมไตรโพลี
 ฟอสเฟต (STPP) ที่ 2, 4, 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 2, 3 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชสาคุไทยดัดแปร มีโครงสร้างผลึก
 แบบ A ซึ่งแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ส่วนสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร มีโครงสร้างผลึกแบบ B
 เหมือนสตาร์ชธรรมชาติ โดยสตาร์ชที่ดัดแปรที่ความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มีกำลังการพอง
 ตัว และการละลายสูงขึ้น จนถึงระดับการแทนที่หนึ่ง หลังจากนั้นสตาร์ชมีกำลังการพองตัวลดลง สตาร์ชดัดแปร มี pasting
 temperature ค่า peak viscosity ค่า setback ค่า enthalpy ที่ใช้ในการเกิดเจล และ %retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ช
 ธรรมชาติ แต่มีความทนทานต่อแรงเฉือน ความร้อน และมีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อดัดแปร
 สตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยแปรความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (STMP) ที่ 0.05, 0.10, 0.15% และ
 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 2.5, 4 ชั่วโมง พบว่าสตาร์ชสาคุไทยดัดแปร มีโครงสร้างผลึกแบบ A ส่วนสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร
 มีโครงสร้างผลึกแบบ B โดยสตาร์ชที่ดัดแปรที่ความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มีกำลังการพอง
 ตัวและการละลายต่ำลง ค่า peak viscosity ค่า setback และ %retrogradation ลดลง และมีความทนทานต่อแรงเฉือน
 ความร้อน ความเป็นกรด และต่างเพิ่มขึ้น ส่วนค่า enthalpy ที่ใช้ในการเกิดเจลของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรจะลดลง แต่
 สตาร์ชสาคุจีนดัดแปรไม่เปลี่ยนแปลง และสตาร์ชดัดแปรทั้งสองชนิดยังคงไม่มีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลาย
 น้ำแข็ง

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2547	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572330523 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: *Maranta arundinaceae* L. / *Canna edulis* Ker. / PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES / SUBSTITUTION / CROSS-LINKING

NAPORN SAE-BAE : EFFECT OF MODIFICATION BY SUBSTITUTION AND CROSS-LINKING BY PHOSPHATE GROUPS ON THE PRYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF *Maranta arundinaceae* L. AND *Canna edulis* Ker. STARCHES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM, Ph.D., AND THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. SAIWARUN CHAIWANICH SIRI, Ph.D, 203 pp. ISBN 974-53-1052-2.

This research aimed to investigate the effects of ages of *Maranta arundinaceae* L. and *Canna edulis* Ker. and modification the starches by substitution and cross linking by phosphate groups on the physicochemical properties of these starches. The result showed that age had no effect on the physicochemical properties of Maranta and Canna starches. Maranta and Canna starches were high in purity (starch content > 95%) with small portion of other constituents. The amylose contents of these starches were 38.45% and 53.18%, respectively. The granules of Maranta starch were only spherical having diameter of 10-25 micron while Canna starch granules were spherical and oval in shape having diameter of 20-80 micron. Both starches had low swelling ability and solubility. Gelatinization temperatures of Maranta and Canna starches acquired by RVA were 81.6 and 75.7 °C. Both were tolerant to high temperature and shear force. From the stability test at pH 3-9, it was found that both starches had low stability at pH 3 and pH 9 with higher sensitivity at pH 9. From the freeze-thaw stability test, it showed that both starches had low freeze-thaw stability. Modification of Maranta and Canna starches by substitution was done at the concentration of sodium tripolyphosphate (STPP) at 2, 4, 6% and reaction time at 1, 2, 3 hours. It was found that the modified Maranta starch granules had the crystalline structure of A while the native starch had the structure of C. The Canna starch granules remained the same crystalline structure of B. The modified starches had a higher swelling ability and solubility up to a certain substitution level, after that the swelling decrease. Modified starches had a lower gelatinization temperature, peak viscosity, setback, gelatinization enthalpy, %retrogradation than the native starches. However, the stability to thermal, shear force and freeze-thaw increased. Cross-linking modification of both starches with sodium trimetaphosphate (STMP) at the concentration of 0.05, 0.10, 0.15% and reaction time at 1, 2.5, 4 hours showed that the modified Maranta starch granules had the crystalline structure of A while the Canna remained the same crystalline structure of B. The modified starches showed to have a lower swelling ability, solubility, peak viscosity, setback and % retrogradation but higher stability to thermal (high temperature), shear force, and acidic-basic than the native starches. Gelatinization enthalpy of Maranta decreased while Canna remained unchange. Freeze-thaw stability of modified starches was as low as the native starches.

Department FOOD TECHNOLOGY Student's signature.....

Field of study FOOD TECHNOLOGY Advisor's signature.....

Academic year 2004 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาระดับปริญญาโทและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ โดยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เลหาสงคราม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น กำลังใจ ตลอดจนการทำงานวิจัย และกรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ศิษย์ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ตูลย์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน และ อาจารย์มิ่งคล เกษประเสริฐ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นรากฐานอย่างดีในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณการสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

งบประมาณสำหรับการวิจัย

- งบประมาณแผ่นดินชุดโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตร
 - อุตสาหกรรมอาหาร ปีงบประมาณ 2546 และ 2547
- งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2547 บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งบประมาณ ด้านครุภัณฑ์ โครงการ JBIG : Thailand – Japan Technology Transfer Project (TJTTP)

วัตถุดิบ

- กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติ และขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 สาขา.....	2
2.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของสสาร.....	4
2.3 การดัดแปรสสาร.....	22
3. วิธีการทดลอง	28
3.1 การศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยว และชนิดของสาธิตต่อ สมบัติทางเคมีกายภาพของสสาร.....	28
3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาการแทนที่สสาร..... และสาธิต.....	32
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเชื่อมขวางสสาร..... และสาธิต.....	32
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	36
4.1 การศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยว และชนิดของสาธิตต่อ สมบัติทางเคมีกายภาพของสสาร.....	36
4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาการแทนที่สสาร..... และสาธิต.....	53
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเชื่อมขวางสสาร..... และสาธิต.....	82
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	111

	หน้า
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	119
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	134
ภาคผนวก ค ตารางข้อมูลการทดลอง.....	171
ภาคผนวก ง สมการแสดงความสัมพันธ์	198
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	203



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชชนิดต่างๆ 5
2.2	ปริมาณอะไมโลส และอะไมโลเพกทินในการเกิดเจลาตินไนซ์ของสตาร์ชแต่ละชนิด..... 8
2.3	ขนาด และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ..... 10
2.4	สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชชนิดต่างๆ ที่วิเคราะห์โดย RVA..... 15
2.5	การเกิดเจลาตินไนซ์ของสตาร์ชแต่ละชนิด 16
2.6	ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ของสตาร์ชชนิดต่างๆ โดย DSC 17
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ 37
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ 39
4.3	ค่าความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ช สาकुไทย และสาकुจีน ความเข้มข้น 6% ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ 45
4.5	ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของ สตาร์ชสาकुไทย ความเข้มข้น 6% ที่ pH ต่างๆ 50
4.4	ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของ สตาร์ชสาकुจีน ความเข้มข้น 6% ที่ pH ต่างๆ 50
4.6	องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2 54
4.7	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2 55
4.8	ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิริยา 1 - 3 ชั่วโมง..... 57
4.9	ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิริยา 1 - 3 ชั่วโมง..... 58
4.10	ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ ปฏิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH7 71
4.11	ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ ปฏิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7 72

ตารางที่	หน้า
4.12 ค่า breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3-9	74
4.13 ค่า breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3-9	75
4.14 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดย DSC ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	77
4.15 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดย DSC ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	78
4.16 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	83
4.17 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	84
4.18 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	97
4.19 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	98
4.20 ค่า breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3-9	100
4.21 ค่า breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3-9	101

4.22	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดย DSC ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วย ปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	103
4.23	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดย DSC ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วย ปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 7	104
ก.1	ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A, B และ C	128
ข.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณความชื้นในหัวสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	134
ข.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีใน สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	135
ข.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	137
ข.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	138
ข.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ..	139
ข.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาकुไทย ที่ pH ต่างๆ	140
ข.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาकुจีน ที่ pH ต่างๆ	141
ข.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายน้ำแข็ง	142
ข.9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในหัวสาकुไทย และสาकुจีน ที่ฤดูกาลเพาะปลูกต่างๆ	143
ข.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่ฤดูกาลเพาะปลูกต่างๆ	144
ข.11	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณฟอสฟอรัส ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	145

ตารางที่	หน้า
ข.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคูไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	146
ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาคูไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	147
ข.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคูจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	148
ข.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาคูจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	149
ข.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง และ pH 7	150
ข.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง และ pH 7	151
ข.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาคูไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	152
ข.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาคูจีนดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	153
ข.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาคูไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	154
ข.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาคูจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	155

ตารางที่	หน้า
ข.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง.....	156
ข.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	157
ข.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณฟอสฟอรัส ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	158
ข.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	159
ข.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	160
ข.27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	161
ข.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	162
ข.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง และ pH 7	163
ข.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง และ pH 7	164
ข.31 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	165

ข.32 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	166
ข.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	167
ข.34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	168
ข.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	169
ข.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	170
ค.1 กำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 55-85 °C	171
ค.2 ร้อยละการละลายของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 55-85 °C	172
ค.3 Syneresis ของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่ผ่านการแช่แข็ง และละลายน้ำแข็ง cycle ต่างๆ	173
ค.4 ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	174
ค.5 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	175
ค.6 ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	176
ค.7 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง	177

ค.20 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 3	190
ค.21 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 5	191
ค.22 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 9	192
ค.23 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 3	193
ค.24 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 5	194
ค.25 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 9	195
ค.26 Syneresis ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	196
ค.27 Syneresis ของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง	197
ง.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และกำลังการพองตัวของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง	198
ง.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และค่าร้อยละการละลายของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง	199

ตารางที่	หน้า
ง.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และ pasting properties ของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง.....	199
ง.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และ breakdown ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ pH ต่างๆ	200
ง.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และกำลังการพองตัวของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง.....	200
ง.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และค่าร้อยละการละลายของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง.....	201
ง.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และ pasting properties ของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง.....	201
ง.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และ breakdown ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่ pH ต่างๆ	20

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลำต้น และหัวของสาकुไทย	3
2.2 ลำต้น และหัวของสาकुจีน	3
2.3 โครงสร้างของอะไมโลส	6
2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	6
2.5 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะไมโลเพคติน	7
2.6 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก และอสัณฐาน	7
2.7 บริเวณผลึก และอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช	11
2.8 X-ray diffraction ของสตาร์ชที่มีโครงร่างผลึกต่างกัน	11
2.9 กำลังการพองตัวของสตาร์ชบางชนิด	12
2.10 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชบางชนิด	13
2.11 การเกิดเจลลาติโนเซชันของเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิด	14
2.12 กลไกการเกิด syneresis และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช	18
2.13 อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2	19
2.14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งเปียก เป็นกรัมของน้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร	21
2.15 ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 35 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร	21
2.16 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืดเมื่อสิ้นสุด heating-cooling cycle ของสตาร์ชชนิดต่างๆ	22
3.1 ขั้นตอนการสกัดสตาร์ชสาकु	30
3.2 ขั้นตอนการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่	33
3.3 ขั้นตอนการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง	35
4.1 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुไทย ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	40
4.2 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	41
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	42

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ.....	43
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ (pH 7)	46
4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6, pH ต่างๆ	49
4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6, pH ต่างๆ	50
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ	52
4.9 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुไทยธรรมชาติ และ ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ (กำลังขยาย 50 เท่า)	53
4.10 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुจีนธรรมชาติ และดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ (กำลังขยาย 50 เท่า)	61
4.11 รูปร่าง พื้นผิว และขนาดของเม็ดสตาร์ชจาก SEM micrograph	62
4.12 X-ray diffraction pattern แสดงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่	63
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	65
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	66
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	67
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुจีนดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	68

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ช สาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	80
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ช สาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	81
4.19 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาคุไทยธรรมชาติ และดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (กำลังขยาย 50 เท่า).....	86
4.20 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาคุจีนธรรมชาติ และดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (กำลังขยาย 50 เท่า).....	87
4.21 รูปร่าง พื้นผิว และขนาดของเม็ดสตาร์ช จาก SEM micrograph	88
4.22 X-ray diffraction pattern แสดงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปร	89
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	91
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	92
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	93
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	94
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ช สาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	106
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ช สาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ	107
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณอะไมโลส	123

ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณฟอสฟอรัส	125
ก.3 ตัวอย่างของสสารที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสสารด้วยเครื่องRVA	131
ก.4 ลักษณะ Thermogram ที่ได้จากการศึกษาการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วยเครื่อง DSC.....	132



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมแป้งจัดว่ามีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรโลกเป็นอย่างมาก เนื่องจากแป้งเป็นแหล่งอาหารหลักของมนุษย์ ซึ่งแป้งสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร ยา กระดาษ กาว สิ่งทอ เครื่องสำอาง และอื่นๆ สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร มีการนำแป้งมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส และซूप ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง (freeze-thaw) ภาวะความเป็นกรดในอาหาร กระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน (pasteurization) สเตอริไลเซชัน (sterilization) แต่เนื่องจากแป้งธรรมชาติจะมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับบางกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ ช่วงความหนืดที่แคบ มีความคงทนต่อสภาวะของกระบวนการผลิตต่ำ เช่น ไม่มีความคงทนต่อสภาพที่มีแรงเฉือน อุณหภูมิสูง ความดันสูง ความเป็นกรด เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีการดัดแปรสมบัติของแป้งธรรมชาติ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เช่น ทำให้คงทนต่อสภาวะการผลิตได้ดีขึ้น คงตัวต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งมากขึ้น เป็นต้น โดยการดัดแปรแป้งสามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ ทั้งทางกายภาพ เคมี และการใช้เอนไซม์ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

สาकुไทย (*Maranta arundinaceae* L.) และสาकुจีน (*Canna edulis* Ker.) เป็นพืชล้มลุกที่สามารถปลูกได้ง่าย อายุการเก็บเกี่ยวสั้น ให้ผลผลิตสูง มีปริมาณสตาร์ชใกล้เคียงกับสตาร์ชมันสำปะหลัง และมันเทศ แต่จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดนี้มีการละลายน้ำที่ต่ำเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ได้จากพืชชนิดอื่น ไม่มีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง และไม่มี ความเสถียรต่อความเป็นกรด และต่าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยวต่อปริมาณสตาร์ชที่ผลิตได้ สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิด การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิบัติการแทนที่ และการเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟต เพื่อปรับปรุงสมบัติด้าน ความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง และความเสถียรต่อความเป็นกรด และต่างของสตาร์ช ซึ่งจะทำให้สามารถนำสตาร์ชที่ผลิตได้ไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้กว้างขวางขึ้น

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 สาคุ

สาคุเป็นชื่อท้องถิ่นที่ใช้เรียกพืชหลากหลายชนิดได้แก่ *Maranta arundinaceae* L., *Canna edulis* Ker., *Metroxylon sagu* และ *Tacca leontopetaloides* แต่งานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะ *Maranta arundinaceae* L. และ *Canna edulis* Ker. ซึ่ง *Maranta arundinaceae* L. มีชื่อท้องถิ่นหลายชื่อได้แก่ สาคุไทย สาคุต่าง และสาคุวิลาศ ส่วน *Canna edulis* Ker. ก็มีชื่อท้องถิ่นหลายชื่อเช่นกัน ได้แก่ สาคุจีน สาคุมอญ สาคุหัวขาด และพุทธรักษากินหัว จึงใช้ชื่อสาคุไทยแทน *Maranta arundinaceae* L. และสาคุจีนแทน *Canna edulis* Ker. ซึ่งสาคุทั้งสองชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของ arrowroot มีแหล่งกำเนิดอยู่แถบเทือกเขาในอเมริกาใต้ พบในประเทศเขตร้อนชื้น โดยประเทศไทยจะพบมากในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ สาคุทั้งสองชนิดนี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรต โดยสาคุไทยมีคาร์โบไฮเดรตประมาณ 78.25% ส่วนสาคุจีนมีประมาณ 93.79% โดยน้ำหนักแห้ง (Perez, Lares, and Gonzalez, 1997)

ลักษณะทั่วไปของสาคุไทยและสาคุจีน

สาคุไทย (รูปที่ 2.1) เป็นพืชในตระกูลคล้า มีชื่อภาษาอังกฤษว่า arrowroot ลักษณะเหง้าคล้ายหัวดอกศร เป็นพืชเนื้ออ่อน หัวเกิดจากลำต้นใต้ดิน มีขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร ยาว 20-45 เซนติเมตร ใบเป็นชนิดแลนซีโอเลต (lanceolate) ดอกสีขาว เป็นช่อแผด เมล็ดสีแดงแต่ไม่ค่อยติดเมล็ด สามารถแบ่งตามลักษณะหัวได้ 2 ชนิดได้แก่ เครโอล (creole) ซึ่งหัวจะเล็กยาว แฉกกว้างและหยั่งลงในดินลึก และบานานา (banana) ซึ่งหัวจะสั้นใหญ่ ปริมาณหัวน้อย และอยู่ตื้นกว่าเครโอล ชอบขึ้นในที่ที่มีอากาศร้อนชื้น ดินร่วน มีความเป็นกรดเล็กน้อย มีระบบการระบายน้ำดี โดยทั่วไปจะปลูกลงจากหัวโดยตัดเป็นท่อนสั้นๆ ยาว 5 เซนติเมตร โดยถ้ารวมควันท่อนหัวจะงอกเร็วขึ้น หรือปลูกลงจากหน่อ ไม่ค่อยพบปัญหาเรื่องโรคและแมลง นอกจากหนอนม้วนใบ และโรคจุดซึ่งไม่ได้สร้างความเสียหายมากนัก สตวรรษที่ผลิตได้เป็นสตวรรษที่ย่อยง่ายนิยมนำมาผลิตเป็นอาหารสำหรับทารก อาหารสำหรับผู้ป่วยโรคลำไส้ และกากที่เหลือจากการสกัดสตวรรษนำไปทำอาหารสัตว์ และปุ๋ยได้ (ไสว พงษ์เก่า และสมภณ สิ้นธุประมา, 2523)

สาकुจีน (รูปที่ 2.2) เป็นพืชในตระกูลพุทธรักษา ต้นสีม่วง ดอกมีกลีบเรียวยาวเล็กสีแดง และใบเรียวยาวขอบม่วง มีชื่อภาษาอังกฤษว่า arrowroot เช่นเดียวกับพืชตระกูลคัลล่า มีเหง้าเป็นลำต้นใต้ดิน นิยมใช้เป็นอาหารเมื่อมีอายุตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป ส่วนที่คล้ายลำต้นโผล่เหนือดินเป็นส่วนกาบใบ ชอบขึ้นในดินร่วนถึงร่วนทรายที่มีความสมบูรณ์สูง ทนต่อสภาพน้ำท่วมขัง เจริญเติบโตได้ในที่มีร่มเงา ขยายพันธุ์โดยการแบ่งหัวไปปลูก ที่อายุการเก็บเกี่ยว 6 เดือน ให้ผลผลิตของหัวประมาณ 4 ตัน/ไร่ และตลอดการเพาะปลูกไม่พบปัญหาเรื่องโรค และศัตรูพืช สตาร์ชที่ได้สามารถนำไปผลิตอาหารอ่อนสำหรับเลี้ยงทารก และอาหารสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคกระเพาะ นอกจากสตาร์ชแล้ว ลำต้น และเปลือกของเหง้าสามารถนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ได้ (ดำริ ถาวรมาศ, 2532)



รูปที่ 2.1 ลำต้น และหัวของสาकुไทย



รูปที่ 2.2 ลำต้น และหัวของสาकुจีน

2.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่สะสมในส่วนต่างๆของพืช สตาร์ชอาจแบ่งตามแหล่งที่พบเป็น 3 ประเภท คือ สตาร์ชจากธัญพืช เช่น สตาร์ชข้าวโพด ข้าวสาลี ถั่วเขียว เป็นต้น สตาร์ชจากรากหรือหัว เช่น สตาร์ชมันเทศ มันฝรั่ง มันสำปะหลัง arrowroot เป็นต้น และสตาร์ชจากลำต้น เช่น สตาร์ชสาคุ (sago starch) สตาร์ชแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกัน เช่น ปริมาณอะไมโลส ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช อุณหภูมิในการเกิดเจล การพองตัวและการละลาย ความหนืด การคั้นตัว เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้สตาร์ชแต่ละชนิดเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน (Richard, 1968)

สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น ปริมาณสตาร์ชจะสัมพันธ์กับความเหนียวนุ่ม ขนาดของเม็ดสตาร์ชสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัส ปริมาณอะไมโลสมีผลต่อรสชาติ และเนื้อสัมผัส ส่วนอะไมโลเพคตินมีผลต่อการดูดน้ำ (hydration) การพองตัวและการเกิดเจล (Madamba, Bustrillose, and San Pedro, 1975) โดยลักษณะเด่นของสตาร์ชแต่ละชนิดเป็นผลเนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนระหว่างปริมาณอะไมโลส และปริมาณอะไมโลเพคติน ความยาวของสายโมเลกุลอะไมโลส ความยาวของสายโมเลกุลสาขาของอะไมโลเพคติน (Jane and Chen, 1991; กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น ไขมัน และฟอสฟอรัสก็มีผลต่อสมบัติของสตาร์ชด้วย

2.2.1 สมบัติทางเคมี

สตาร์ชประกอบด้วยคาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% ซึ่งอยู่ในรูปพอลิเมอร์ของ α -D glucose และสารตัวกลางได้แก่ ไขมัน โปรตีน ฟอสฟอรัส และเถ้า ซึ่งมี ความสำคัญต่อสมบัติของสตาร์ช โดยไขมันจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของสตาร์ช นอกจากนี้จะส่งผลให้เกิดฟิล์มและแป้งเปียก (paste) ที่มีลักษณะที่บวมหรือขุ่น เนื่องจากไขมันจะรวมตัวกับอะไมโลสเกิดเป็น inert complex และกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช จะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ฟอสฟอรัสทำให้ผิวของเม็ดสตาร์ชมีประจุเป็นลบ จึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบทำให้เกิดการพองตัวได้ง่ายขึ้น และมีความหนืดสูงขึ้น สตาร์ชที่มีฟอสฟอรัสสูงได้แก่ สตาร์ชมันฝรั่ง ส่วนเถ้าซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ปกติจะไม่มีผลต่อสมบัติของสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

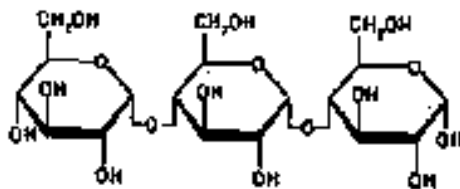
Manavedan, Raja และ Sindhu (2000) พบว่าสาकुไทยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 98.61% โปรตีน 0.06% ไขมัน 0.88% เถ้า 0.45% และความชื้น 9.82% ส่วน Thitipraphunkul และคณะ (2003) พบว่าสตาร์ชสาकुจีนมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 99.58% โปรตีน 0.08% ไขมัน 0.02% เถ้า 0.33% และความชื้น 9.39% เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีกับสตาร์ชชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 2.1) พบว่ามีโปรตีน และไขมัน ใกล้เคียงกับสตาร์ชจากพืชหัว โดยเฉพาะสตาร์ชมันฝรั่ง

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage (รูปที่ 2.3) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากจึงทำให้สามารถจับกับโมเลกุลสตาร์ชชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่นอะไมโลสจับกับอะไมโลเพคตินด้วยพันธะเกลียวคู่ (double helices) และพันธะเกลียวเดี่ยว (single helices) ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง (Bowers, 1992) นอกจากนี้อะไมโลสยังสามารถจับกับไขมันเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose-lipid complex) ที่มีความคงทน การทำลายพันธะนี้ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 100°C (Kugimiya, Donovan, and Wong, 1980)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชชนิดต่างๆ

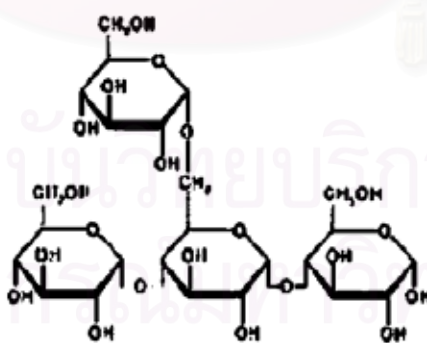
ชนิดสตาร์ช	% ความชื้น	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
สตาร์ชข้าวโพด	13	0.65	0.35	0.10	0.05
สตาร์ชมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.40	0.080
สตาร์ชข้าวสาลี	14	0.80	0.40	0.15	0.060
สตาร์ชมันสำปะหลัง	13	0.10	0.10	0.20	0.010
สตาร์ชข้าวฟ่าง	13	0.70	0.30	0.08	-
สตาร์ชข้าวเจ้า	-	0.80	0.45	0.50	0.100
สตาร์ชสาकु (sago)	-	0.10	0.10	0.20	0.020
สตาร์ชมันเทศ	13	0.40	-	0.20	0.070
สตาร์ช amylo maize	13	-	-	0.10	-
สตาร์ชข้าวโพด ข้าวเหนียว	13	0.20	0.25	0.07	0.007

ที่มา : Swinkels (1985)

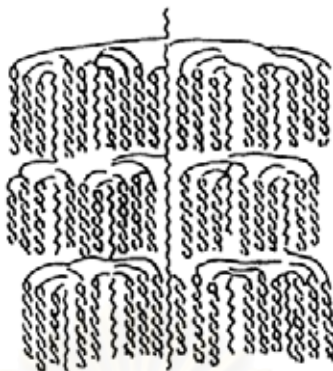


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส (Penfield and Campbell, 1990)

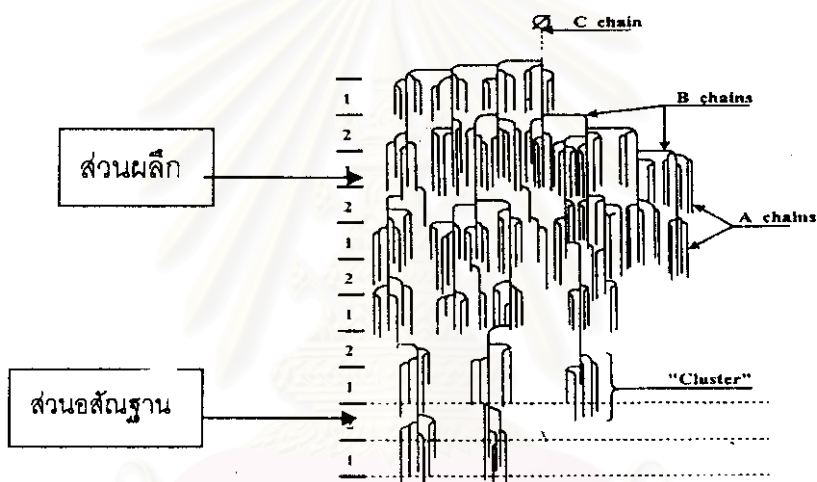
อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี degree of polymerization อยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage (รูปที่ 2.4) อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักมากกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า คือประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่กว่า และมีกิ่งสาขาทำให้มีการคั่นตัวต่ำ อะไมโลเพคตินสามารถเกิดเกลียวคู่ (รูปที่ 2.5) โดยใช้พันธะไฮโดรเจน และแรงวัลเดอรัวาลในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะไมโลเพคตินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดผลึกได้ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน (Hizukuli, 1986) โดยอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวกันได้ทำให้เกิดโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallites region) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) (รูปที่ 2.6) ซึ่งรวมตัวเป็นเม็ดสตาร์ชได้ ส่วนอะไมโลสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดส่วนที่เป็นผลึกได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน (Penfield and Campbell, 1990)



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างเกี่ยวคู้ของอะไมโลเพคติน (Hizukuli, 1986)



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก และอสัณฐาน

(Robin *et al.*, 1974)

อัตราส่วนระหว่างปริมาณอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินมีผลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ความเหนียวและความใสของแป้งเปียกที่ได้หลังการเกิดเจล ทั้งยังมีผลต่อเนื้อสัมผัสเนื่องจากสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีความแตกต่างกัน กล่าวคืออะไมโลสเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ดี เมื่อต้มในน้ำจะหนืดน้อยกว่า แต่ข้นมากกว่าอะไมโลเพคติน เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นอะไมโลสจะจับตัวเป็นเจลได้ ส่วนอะไมโลเพคตินจะไม่จับเป็นเจล เนื่องจากอะไมโลเพคตินจะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ทำให้การจัดเรียงตัวทำได้ยาก สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีอุณหภูมิในการพองตัวสูงกว่าปกติ เมื่อทำให้เกิดการพองตัวอย่างสมบูรณ์ retrogradation ของสตาร์ชที่มีอะไมโลสน้ำหนักโมเลกุลต่างกันจะ

ให้ผลต่างกัน โดยสตาร์ชที่มีโมเลกุลอะไมโลสขนาดปานกลาง (degree of polymerization 100-200) จะเกิดการคืนตัวได้ดีที่สุด (Whistler and Smart, 1953) Erdman (1986) รายงานว่าสตาร์ชสาकुไทย มีปริมาณอะไมโลส 19.4% ซึ่งมีปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่น และ Soni และคณะ (1990) รายงานว่าสตาร์ชสาकुจีนมีปริมาณอะไมโลส 38% ซึ่งมีปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ สตาร์ชชนิดอื่น (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลส และอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ของสตาร์ชแต่ละชนิด

ชนิดสตาร์ช	ปริมาณอะไมโลส	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ (°C)*
ข้าวโอต	23	60.7
ข้าวไรน์	26	61.3
ข้าวสาลี	23	63.5
ข้างฟาง	25	72.2
ข้าวเจ้า	17	70.3
ข้าวโพด	27	71.3
Waxy maize	0	72.7
สาकु (sago)	28	70.5
มันฝรั่ง	22	67.3
มันเทศ	20	70.0
มันสำปะหลัง	18	66.0

* จุดกึ่งกลางในช่วงการเกิดเจลลาติไนซ์

ที่มา : Oates (1996)

2.2.2 สมบัติทางกายภาพ

ก. ลักษณะของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชส่วนใหญ่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช (granule) แตกต่างกันไปตามชนิดของสตาร์ช (Oates, 1997) โดยเม็ดสตาร์ชของข้าวเจ้า จะมีขนาดเล็กที่สุด และมีรูปร่างหลายเหลี่ยม ส่วนเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดใหญ่ที่สุดและมีรูปร่างเป็นรูปไข่ การตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่รวดเร็ว และง่ายที่สุด สามารถตรวจสอบลักษณะต่างๆได้ เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช และตำแหน่งของ hilum รวมทั้งสามารถตรวจสอบความเสียหายและการปนเปื้อนของสตาร์ชชนิดอื่นได้อีกด้วย การตรวจสอบลักษณะเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์ สามารถทำได้ทั้งภายใต้แสงปกติ (normal light) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าผู้ใช้ไม่มีความชำนาญ ผลที่ได้อาจผิดพลาดได้ และยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถดูโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้ เนื่องจากกำลังขยายไม่เพียงพอ ดังนั้นการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) สามารถตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้อย่างละเอียด เนื่องจากมีกำลังขยายมากกว่าหลายร้อยเท่า และสามารถดูพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชซึ่งมีรอยแตกหรือรอยร้าวของเม็ดสตาร์ชได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

Erdman (1986) ได้ศึกษาขนาด และรูปร่างของสตาร์ชจากข้าว พบว่ามีลักษณะเป็นวงกลม และวงรี ขนาดอยู่ในช่วง 10-17 μm . และ Santacruz และคณะ (2002) พบว่าสตาร์ชจากข้าวมีลักษณะเป็นวงกลม และวงรี ขนาดอยู่ในช่วง 35-110 μm . ซึ่งการผลิตสตาร์ชไม่จำเป็นต้องใช้การ centrifuge ช่วยในการแยกสตาร์ชออกจากน้ำ เนื่องจากสามารถแยกน้ำออกจากสตาร์ชได้โดยใช้การตกตะกอน แสดงว่าเม็ดสตาร์ชที่เล็กที่สุดของสตาร์ชจากทั้งสองชนิดมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่น (ตารางที่ 2.3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

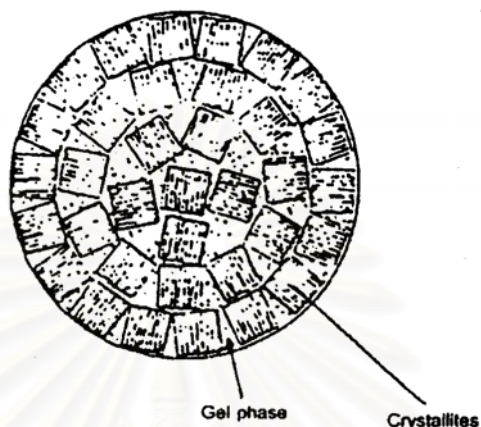
ตารางที่ 2.3 ขนาด และรูปร่างของเม็ดสตาร์ชชนิดต่างๆ

แหล่งสตาร์ช	ขนาด (μm .)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2-35	กลม ค่อนข้างรี
ข้าวโพด	5-25	กลม แบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3-5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2-35	กลม คล้ายไข่
ข้าวฟ่าง	15-35	กลม แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอต	5-8	กลม แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10-50	กลม ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8-20	กลม แบน มีหลายเหลี่ยม
Triticale	2-35	กลม ค่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	3-35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
สาคุ (sago)	15-65	รูปไข่
เท้ายายม่อม	13-70	รูปไข่ที่มีรอยตัด

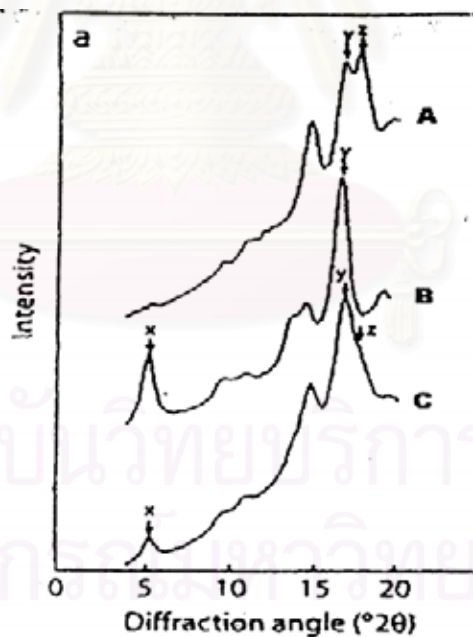
ที่มา : Magningat and Seib (1992)

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก มีโครงสร้างเป็น semi-crystalline โดยโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (รูปที่ 2.7) จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่องมือ wide angle X-ray diffraction (WAXS) (รูปที่ 2.8) พบว่าเม็ดสตาร์ชโดยทั่วไปสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้เป็น 3 แบบ คือ ผลึกแบบ A ซึ่งมีการเรียงตัวของโครงสร้างแบบหนาแน่นมาก มี peak ขึ้นที่มุมหักเห (diffraction angle) 17° และ 17.9° พบในสตาร์ชจากธัญพืช ผลึกแบบ B มีการเรียงตัวแบบหลวมๆ มี peak ขึ้นที่มุมหักเห 5.6° และ 17° พบใน สตาร์ชจากพืชหัว ผลึกแบบ C มีการเรียงตัวผสมระหว่างแบบ A และแบบ B มี peak ขึ้นที่มุมหักเห 5.6° , 17° และ 17.9° พบในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว (Hoseney, 1994) ส่วนผลึกของอะไมโลสที่เกิดร่วมกับองค์ประกอบอื่นๆ จะให้ X-ray diffraction pattern แบบ V เช่นอะไมโลสรวมตัวกับไขมันเป็น amylose-lipid complex ซึ่งจะเกิดโครงสร้างผลึกแบบอ่อนเพิ่มขึ้นมา เพื่อเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช รูปแบบผลึกสามารถพิจารณาได้จาก

ตารางมาตรฐานของ Zobel (1964) ดังตารางที่ ก.1 ภาคผนวก ก. นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการปฏิบัติต่อเม็ดสตาร์ช (treatment) เช่น การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่างๆ



รูปที่ 2.7 บริเวณผลึก และอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช (French, 1975)



รูปที่ 2.8 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน (Brogracheva *et al.*, 1998)

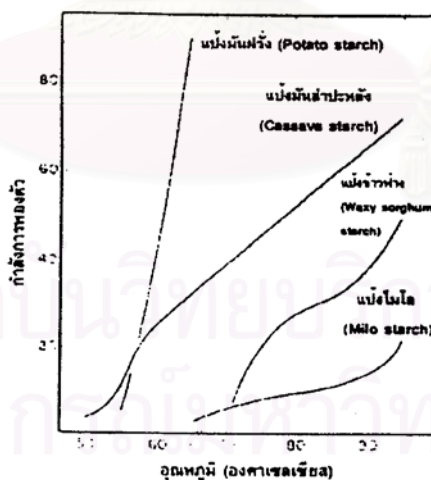
(A) สตาร์ชข้าวโพด ผลึกแบบ A

(B) สตาร์ชมันฝรั่ง ผลึกแบบ B

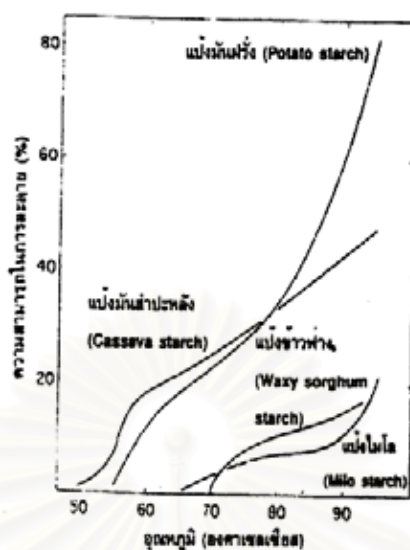
(C) สตาร์ชถั่ว ผลึกแบบ C

ข. กำลังการพองตัว และการละลาย (swelling and solubility)

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆ โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชสามารถดูดซึมน้ำในบรรยากาศได้จนเกิดความสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดสตาร์ชกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ดูดซึมน้ำจะขึ้นกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ สตาร์ชส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-17% ที่อุณหภูมิต่ำ สตาร์ชสามารถดูดน้ำได้ประมาณ 25 - 30% และมีการพองตัวน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตได้ (Kerr, 1950) การให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำตลอดเวลาที่ให้ความร้อน พองตัวเป็นหลายเท่าของขนาดเดิม และมีโมเลกุลอะมิโลสละลายออกมาในน้ำที่อยู่บริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ช (Bowers, 1992) กำลังการพองตัวของสตาร์ชแสดงเป็นปริมาตร หรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่แยกออกด้วยการปั่นเหวี่ยง กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งพบว่า การละลาย และการพองตัวมีความสัมพันธ์กัน โดยทั่วไปพบว่าเมื่อสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น จะเกิดรอยแตกบนเม็ดสตาร์ช ทำให้เกิดการไหลออกของอะมิโลส ส่งผลให้การละลายสูงขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.9 กำลังการพองตัวของสตาร์ชบางชนิด (Leach, McCowen, and Schoch, 1959)



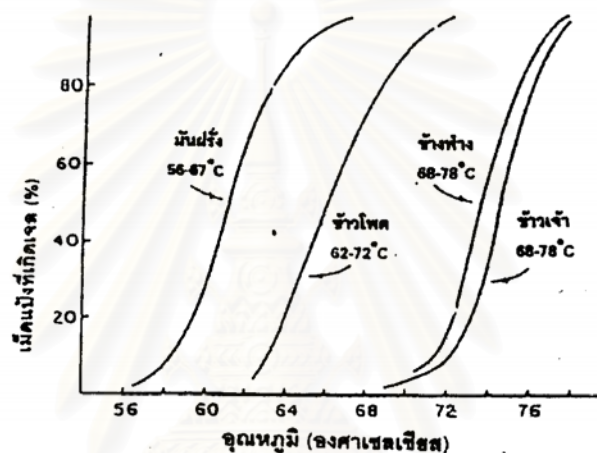
รูปที่ 2.10 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชบางชนิด (Leach *et al.*, 1959)

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ชได้แก่ แหล่งของสตาร์ช เช่น สตาร์ชจากธัญพืช สตาร์ชจากส่วนราก และสตาร์ชจากส่วนหัว ความแตกต่างของการพองตัว และความสามารถในการละลายเกิดจากจำนวนอะไมโลส และอะไมโลเพคตินในสตาร์ช ความแข็งแรง และลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช เช่น จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวสาขาของอะไมโลเพคติน สารเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัส ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว เป็นต้น (Leach *et al.*, 1959) สตาร์ชสาकुไทยมีกำลังการพองตัวสูงสุด 29% และการละลาย 45.62% ที่ 90°C (Manavedan *et al.*, 2000) ส่วนสตาร์ชสาकुจีนมีกำลังการพองตัวสูงสุด 28% และการละลาย 20% ที่ 85°C (Thitipraphunkul *et al.*, 2003)

ค. การเกิดเจลลาคีโนเซชัน

การเกิดเจลลาคีโนเซชันเป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว และการดูดซึมน้ำของเม็ดสตาร์ช ในขณะที่ได้รับความร้อน ซึ่งน้ำแบ่งจะมีความหนืดมากขึ้น และใสขึ้น การศึกษาการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชเป็นการศึกษาคุณสมบัติในการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ช ซึ่งนำไปใช้ในการกำหนดการให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่นำไปใช้ นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวด้วยเครื่องมือบางชนิด เช่น Brabender Visco Amylograph หรือ Rapid Visco Analyzer (RVA) ยังทำให้ทราบถึง heating-cooling cycle ของสตาร์ชซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ สตาร์ชแต่ละชนิดมีการเกิด

เจลาตินในเซชันที่แตกต่างกัน อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชแต่ละชนิดไม่เท่ากัน (รูป 2.11) โดยส่วนใหญ่พืชหัวจะมีการเกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิต่ำ เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง เนื่องจากสตาร์ชชนิดนี้มีฟอสฟอรัสอยู่ด้วย ทำให้เกิดประจุลบผลักเม็ดสตาร์ชออกจากกัน เม็ดสตาร์ชจึงมีการพองตัวได้เร็วขึ้น ส่งผลให้การเกิดเจลาตินในเซชันเร็วขึ้น ส่วนสตาร์ชข้าวโพด ข้าวฟ่าง และข้าวเจ้า มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันสูง เนื่องจากสตาร์ชดังกล่าวมีปริมาณไขมันสูง และมีขนาดเล็กกว่า สตาร์ชมันฝรั่ง ไขมันสามารถรวมตัวกับอะไมโลสได้ ทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น การพองตัวจึงลดลง ส่งผลให้การเกิดเจลาตินในเซชันช้าลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.11 การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิด (Sanders, 1996)

RVA เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน หลักการทำงานคล้าย Brabender Visco Amylograph แต่มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้ร้อนหรือเย็นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ และสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ทำให้การหา pasting curve ใช้เวลาน้อยลง เนื่องจากมีกลไกการให้ความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า (Thiewes and Steeneken, 1997) เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA และเครื่อง Brabender Visco Amylograph พบว่ามีค่าความสัมพันธ์กันสูง ($R^2 = 0.94$) ในทุกจุดที่เปรียบเทียบ ยกเว้นจุดที่แสดงการเกิด final viscosity จะมีความสัมพันธ์กันต่ำ ($R^2 = 0.74$) ทั้งนี้เนื่องจากการคืบตัวของสตาร์ชต้องใช้ระยะเวลา (Haasse, Mintus, and Weipert, 1995) ซึ่งการศึกษา heating-cooling cycle โดย RVA จะใช้ตัวอย่างน้อยกว่า สามารถทำซ้ำได้ และใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นกว่า คือใช้เวลา 13 นาที เมื่ออัตราการให้ความร้อน และอัตราการให้ความเย็น 12 องศาเซลเซียส/นาที โดยสตาร์ชธัญพืชส่วนใหญ่ เช่น

สตาร์ชข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง จะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงกว่าสตาร์ชจากพืชหัว เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง มันฝรั่ง (ตารางที่ 2.4) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชจากพืชหัวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B ซึ่งอ่อนแอกว่าเม็ดสตาร์ชธัญพืช ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A หรือ C

ตารางที่ 2.4 สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชชนิดต่างๆ เมื่อวิเคราะห์โดย RVA

สตาร์ช	Gelatinization temperature (°C)	Peak viscosity	Breakdown	Setback	Paste type	Paste clarity
ข้าวสาลี	52-65	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง/ สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	62-72	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด ข้าวเหนียว	63-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
ข้าวฟ่าง	68-78	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเจ้า	61-78	ปานกลาง	ต่ำ/สูง	ปานกลาง/ สูง	สั้น	ทึบแสง
มันสำปะหลัง	50-68	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
มันฝรั่ง	56-59	สูง	สูง	ปานกลาง	ยาว	โปร่งแสง
สาคุ (sago)	60-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง

ที่มา : Newport Scientific Pty, Ltd. (1995)

การเกิดเจลในเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิ ส่วนใหญ่ประมาณ 8-12 °C (Schoch and Maywald, 1968) การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลในเซชันโดยวิธีอื่น เช่น Kolfer gelatinization temperature range ซึ่งเป็นการวัดโดยสังเกตการหายไปของ birefringence ที่ 5%, 50%, และ 95% ในระหว่างการเกิดเจลในเซชันภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Swinkels, 1985) เมื่อเปรียบเทียบ Kolfer gelatinization temperature range กับการวัดด้วย Brabender Visco Amylograph (ตารางที่ 2.5) จะพบว่า Kolfer gelatinization temperature range มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลในเซชันกว้างกว่า

ตารางที่ 2.5 การเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชแต่ละชนิด

สตาร์ช	Kolfer gelatinization temperature range ($^{\circ}\text{C}$) ^a	Brabender pasting temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^b
ข้าวโพด	62-67-72	75-80
มันฝรั่ง	58-63-68	60-65
ข้าวสาลี	58-61-64	80-85
มันสำปะหลัง	59-64-69	65-70
ข้าวโพดข้าวเหนียว	63-68-72	65-70
ข้าวฟ่าง	68-74-78	75-80
ข้าวเจ้า	68-74-78	70-75
สาหร่าย (sago)	60-66-67	65-70
เท้ายายม่อม	62-66-70	-
Amylomaize	67-80-92	90-95
มันเทศ	58-65-72	65-70

^a อุณหภูมิในระหว่างการเจลาตีโนเซชันของสตาร์ช ที่ birefringence หายไป 5%, 50%, และ 95% ตามลำดับ

^b starch concentration, 8%db

ที่มา : Swinkels (1985)

นอกจากนี้อาจศึกษาการเกิดเจลาตีโนเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ การวิเคราะห์การเกิดเจลาตีโนเซชันของสตาร์ชด้วย DSC ทำโดยการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงการเกิดเจลาตีโนเซชัน ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูป thermogram (รูปที่ ก.1, ภาคผนวก ก.) ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถวิเคราะห์หาพลังงานในการเกิดเจลาตีโนเซชัน ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตีโนเซชันของสตาร์ช (ตารางที่ 2.6)

ตารางที่ 2.6 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชชนิดต่างๆ โดย DSC

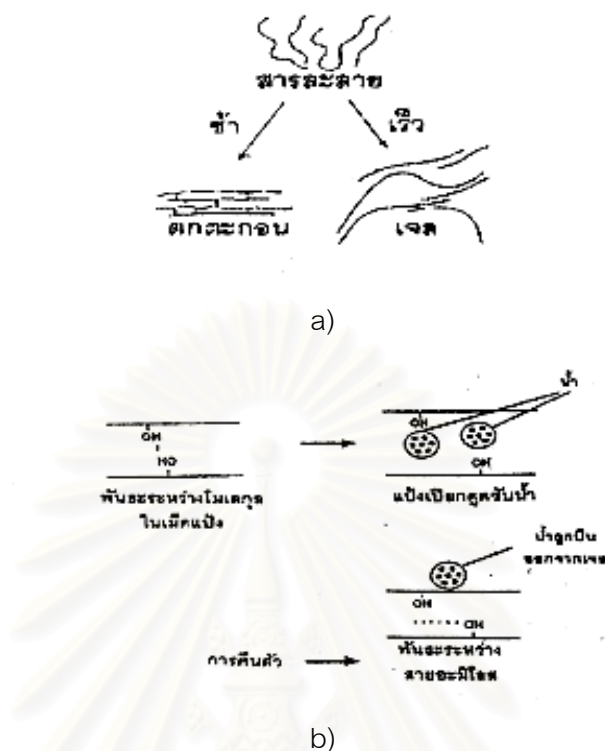
สตาร์ช	อุณหภูมิเกิดเจลลาติโนเซชัน ($^{\circ}\text{C}$)
ข้าวโพด	70-89
มันฝรั่ง	57-87
ข้าวสาลี	50-86
มันสำปะหลัง	68-92
ข้าวโพดข้าวเหนียว	68-90

ที่มา : Swinkels (1985)

ง. การเกิดรีโทรเกรดชัน

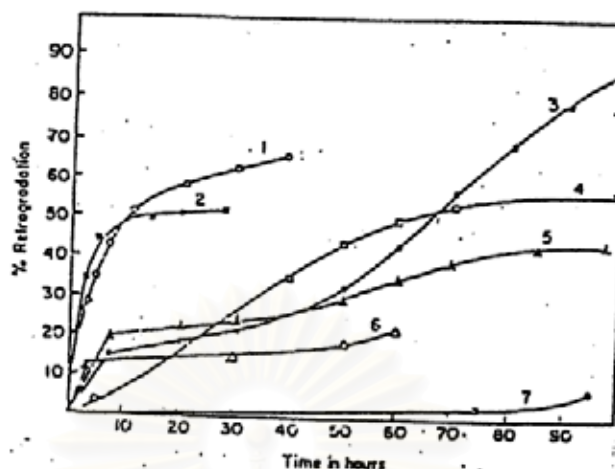
เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาติโนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป สตาร์ชจะเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นจนพองตัวเต็มที่ และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีการจัดตัวของโมเลกุลอะไมโลส ด้วยพันธะไฮโดรเจนใหม่ เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำได้ และไม่มีการดูดน้ำกลับเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรดชัน และเมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชถูกบีบออกมานอกเจล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองทำให้เจลมีความหนืดมากขึ้นและมีลักษณะขาวขุ่น ทึบแสง การเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Smith, 1979; Fruton and Simmonds, 1958) โดยกลไกการเกิดรีโทรเกรดชัน และ syneresis แสดงดังรูปที่ 2.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชัน และ syneresis ของสตาร์ช a) กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชัน
b) กลไกการเกิด syneresis (Fruton and Simmonds, 1958)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชชนิดต่างๆ (รูปที่ 2.13) สตาร์ชจากธัญพืช เช่น สตาร์ชข้าวโพด ข้าวสาลี เกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าพืชหัว เช่น สตาร์ชมันเทศ มันสำปะหลัง และสาคุไทย สำหรับสตาร์ช waxy corn ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสน้อย ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ช้ากว่า ส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อย ส่วนสตาร์ชมันฝรั่งมีการเกิดรีโทรเกรเดชันสูง เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดใหญ่กว่าสตาร์ชชนิดอื่น จึงมีความทนทานต่อความร้อนน้อยกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก ทำให้เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งพองตัว และแตกตัวได้ง่าย เมื่อเม็ดสตาร์ชมีการแตกตัว อะไมโลสจะหลุดออกมาได้มากกว่า ทำให้เมื่อเจลเย็นตัวลง อะไมโลสที่หลุดออกมาสามารถจับตัวด้วยพันธะไฮโดรเจนได้มากขึ้น ทำให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก (Collision, 1968)



รูปที่ 2.13 อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชชนิดต่างๆที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 (Collison, 1968)

- 1) สตาร์ชข้าวโพด, 2) สตาร์ชข้าวสาลี, 3) สตาร์ชมันฝรั่ง, 4) สตาร์ชมันเทศ,
- 5) สตาร์ช arrowroot, 6) สตาร์ชมันสำปะหลัง, 7) สตาร์ช waxy corn

Doremus, Crenshaw และ Thurber (1951) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้แก่ **อุณหภูมิ** การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลจะเกิดขึ้นเร็วขึ้นถ้าเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำทำให้อะไมโลสเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้เกิดการจับตัวกันได้เร็ว **ระยะเวลา** การยึดเกาะกันขึ้นเป็นโครงสร้างจะแน่นขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น **ปริมาณและขนาดของโมเลกุล** สตาร์ชที่มีอะไมโลสอยู่มากจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก และเร็วกว่าสตาร์ชที่มีอะไมโลสน้อย เช่น สตาร์ชจากธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสมากกว่าสตาร์ชพืชหัว ทำให้มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าสตาร์ชจากพืชหัว และสตาร์ชที่มีโมเลกุลของอะไมโลสขนาดปานกลางจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็ว เนื่องจากถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่เกินไปจะใช้เวลาในการยึดจับกันนาน ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะมีการเคลื่อนไหวแบบ Brownian อยู่ตลอดเวลาจนไม่สามารถยึดจับกันได้ **ความเป็นกรด หรือด่าง** มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยในสารละลายกรด การรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชจะเกิดอย่างช้าๆ เพราะโมเลกุลของอะไมโลสแตกตัวออก จึงไม่สามารถจับกันได้ง่าย

การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชอาจทำได้หลายวิธีได้แก่ การพิจารณาค่า total setback ของ สตาร์ชที่วัดได้โดยเครื่อง Brabender visco amylograph หรือ RVA (Miles, Morris, and Ring, 1985) หรือพิจารณาค่าเอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔH) ขณะเก็บเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC โดยเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$) และค่าพลังงานใน

การรีเจลาติไนเซชัน หรือค่าพลังงานในการเกิดรีโทรเกรเดชัน ($\Delta H_{\text{retrogradation}}$) (Stevens and Elton, 1971) และคำนวณค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันได้จากสมการ

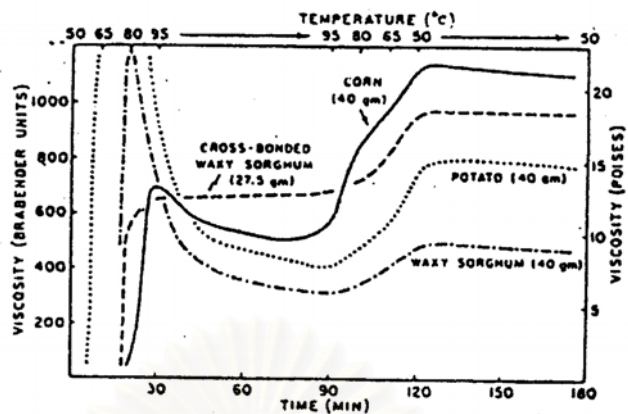
$$\% \text{ retrogradation} = (\Delta H_{\text{retrogradation}} * 100) / \Delta H_{\text{gelatinization}}$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถตรวจสอบได้จากการวัดค่า freeze-thaw stability ของเจลสตาร์ช (Schoch, 1968) โดยสามารถบอกแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันจากปริมาณน้ำที่เกิดจาก syneresis ของเจลสตาร์ช ซึ่งเจลสตาร์ชที่เกิด syneresis แสดงว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันมาก Varavinit, Anuntavuttikul และ Shobsngob (2000) พบว่าสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูงจะมี freeze-thaw stability ต่ำ และขั้นตอนในการเกิด freeze-thaw มีผลต่อ stability ของเจลสตาร์ช โดยการ freeze ที่อุณหภูมิต่ำ (-20 °C) และการ thaw ที่อุณหภูมิสูง (90 °C) สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้

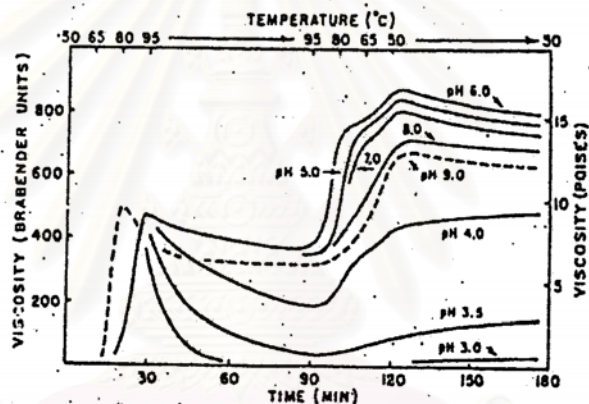
จ) สมบัติทางความหนืดของแป้งเปียก

สตาร์ชที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารจะอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวเป็นส่วนมาก คืออยู่ในลักษณะที่เรียกว่าแป้งเปียก (paste) ซึ่งลักษณะสำคัญของแป้งเปียกที่ควรคำนึงถึงในแง่การใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิในการเกิดเจล ความสม่ำเสมอของขนาดเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกในขณะเกิดเจล เสถียรภาพของแป้งเปียกต่อสภาพการได้รับความร้อน และแรงกวน setback หรือการเพิ่มขึ้นของความหนืดในช่วงที่แป้งเปียกมีอุณหภูมิลดลง เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาลักษณะที่สำคัญของแป้งเปียกเพื่อประโยชน์ในการใช้งาน จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก

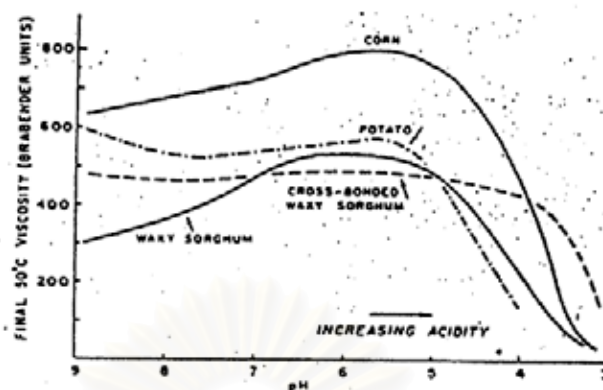
Schoch (1985) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle จากสตาร์ชต่างๆ ด้วยเครื่อง Brabender Visco Amylograph พบว่าสตาร์ชแต่ละชนิดมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.14) และ pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด (รูปที่ 2.15) เมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืด เมื่อสิ้นสุด heating - cooling cycle (ค่า breakdown) (รูปที่ 2.16) พบว่าสตาร์ชข้าวโพดมีเสถียรภาพสูงสุดที่ pH 6 เมื่อ pH ต่ำกว่า 4.5 ความหนืดจะลดลงมาก สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวโพด และ waxy sorghum เปลี่ยนแปลงความหนืดได้ง่ายในสภาพเป็นกรด ความหนืดจะลดลงอย่างมากเมื่อ pH ต่ำกว่า 5 และสตาร์ช cross-bonded waxy sorghum มีเสถียรภาพดีโดยสามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ถึง pH 3.5 และเมื่อ pH สูงกว่า 6 สตาร์ชข้าวโพด และ waxy sorghum จะมีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าที่ pH 6



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งเปียกเป็นกรัมของ น้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร (Schoch, 1985)



รูปที่ 2.15 ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากสตาร์ชข้าวโพดที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 35 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร (Schoch, 1985)



รูปที่ 2.16 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืดเมื่อสิ้นสุด heating-cooling cycle ของสตาร์ชชนิดต่างๆ (Schoch, 1985)

2.3 การดัดแปรสตาร์ช

การดัดแปรสตาร์ชเป็นการเปลี่ยนแปลง หรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพหรือเคมีบางประการของสตาร์ชด้วยวิธีการต่างๆ อาจเป็นการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม การดัดแปรโดยใช้เอนไซม์ การดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพ หรือดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี ทำให้เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (Smith, 1979)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีทางเคมี เป็นการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชโดยทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยด้วยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโมเลกุลสตาร์ชกับสารที่ใช้ดัดแปรในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงเป็น non-degradative modification ปฏิกิริยาที่ใช้ดัดแปรอาจจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ปฏิกิริยาการแทนที่ และอาจใช้ปฏิกิริยาร่วมระหว่าง 2 ปฏิกิริยาขึ้นไป หรือร่วมกับวิธีดัดแปรอื่นๆ (Smith, 1979) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

2.3.1 การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ เป็นการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ช สารที่มีหมู่สำหรับเกิดปฏิกิริยาเพียงหมู่เดียวเข้าทำปฏิกิริยาแทนที่กับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุล สตาร์ช สารเหล่านี้ได้แก่ กรดซัลฟูริก โซเดียมไนไตรต์ โซเดียมโบรไซด์ เอทิลีนออกไซด์ โพรพิลีนออกไซด์ โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต อะซิติกแอนไฮไดรด์ ไวนิลอะซิเตต และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น ปฏิกิริยาการแทนที่ที่เกิดขึ้นอาจเป็นปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน หรือเอสเทอร์ฟิเคชัน (Solarek, 1986) สตาร์ชที่ได้จะมีชื่อเรียกตามหมู่ที่เกิดการแทนที่ เช่น สตาร์ชซัลเฟต สตาร์ชไนเตรต สตาร์ชไฮดรอกซิลเอทิล สตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ที่อนุญาตให้ใช้ในอาหารได้มี 3 ชนิด คือ สตาร์ชไฮดรอกซิลโพรพิล โมโนสตาร์ชฟอสเฟต และสตาร์ชอะซิเตต เป็นต้น แต่ต้องมีสมบัติตามข้อกำหนดในมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ดังนี้ โมโนสตาร์ชฟอสเฟตที่ดัดแปรจากสตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชมันฝรั่งจะใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ต้องมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างซึ่งวิเคราะห์ในรูปแบบฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.50 ส่วนโมโนสตาร์ชฟอสเฟตที่ไม่ได้ดัดแปรจากสตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชมันฝรั่งจะใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ต้องมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างซึ่งวิเคราะห์ในรูปแบบฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.40 (โดยน้ำหนัก) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

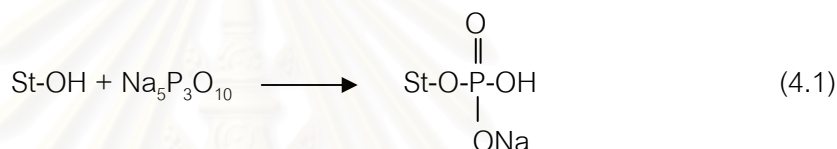
ก. สมบัติของสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแทนที่บนโมเลกุลสตาร์ชด้วยหมู่ต่างๆ แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลง สมบัติของสตาร์ชดัดแปรจึงแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติ ดังนี้ อุณหภูมิในการเกิดเจลลดลง ความหนืดที่จุดสูงสุดในช่วง heating จาก Brabender visco-amylogram เพิ่มขึ้น แป้งเปียกหลังการทำให้สุกมีลักษณะใส และเหนียวยืด (long-salve cohesive) มากขึ้น การคืนตัว และการแยกตัวของน้ำจากแป้งเปียกซาลง สามารถรักษาสภาพแป้งเปียกได้ดีขึ้น แม้ถูกเก็บที่อุณหภูมิต่ำ ทนต่อสภาวะที่เกิด freeze-thaw แต่สตาร์ชที่ได้ทนต่อความร้อน แรงกระทำ และกรดได้ต่ำ แป้งเปียกที่ผ่านสภาวะดังกล่าวจึงมีลักษณะเหลว (thinning) สมบัติของสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่จะแตกต่างกันขึ้นกับธรรมชาติของหมู่ที่เกิดการแทนที่ และระดับการแทนที่ การเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่อะซิเตต เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรง จึงสลายตัวให้หมู่อะซิเตต (deacetylate) ได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อได้รับความร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิด off-flavor จึงไม่นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อนสูง ส่วนสตาร์ชดัดแปรที่ได้จากการแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟตจะมีความสามารถในการจับน้ำมากกว่าสตาร์ชดัดแปรที่ได้จากการแทนที่ด้วยหมู่

อะซิเตต และหมู่ไฮดรอกซิลไพโรฟิด และโมโนสตาร์ชฟอสเฟตที่มีระดับการแทนที่ของหมู่ฟอสเฟตเพียง 0.07 จะละลายได้ดีแม้ในน้ำเย็น จึงนิยมใช้เป็นตัวเชื่อมในผลิตภัณฑ์ (binder) (Wurzburg, 1986)

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโมโนสตาร์ชฟอสเฟต

การผลิตโมโนสตาร์ชฟอสเฟตจะทำในระบบบึ่งแห้ง (semidry reaction) โดยสตาร์ชจะทำปฏิกิริยากับ polyfunctional phosphorus compound เกิดพันธะโมโนเอสเทอร์ และพันธะเชื่อมขวางขึ้น การควบคุมให้เกิดเฉพาะพันธะโมโนเอสเทอร์เพียงอย่างเดียวทำได้ยาก แต่การควบคุมให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางให้น้อยลงและให้มีพันธะโมโนเอสเทอร์เป็นส่วนใหญ่สามารถทำได้ โดยควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ pH อุณหภูมิ สารที่ใช้ทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น



โดยได้มีงานวิจัยศึกษาถึงผลของ pH ต่อการผลิตโมโนสตาร์ชฟอสเฟตต่างๆ ดังนี้ Wurzburg (1986) กล่าวว่า การผลิตโมโนสตาร์ชฟอสเฟตจะสามารถเกิดได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนถึงเบสอ่อน (pH 5-8.5) โดยถ้า pH ต่ำกว่า 5 ปฏิกิริยา hydrolysis จะเกิดร่วมด้วยและถ้า pH มากกว่า 8.5 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจะเกิดมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wang และคณะ (2000) ที่ศึกษาการผลิตโมโนสตาร์ชฟอสเฟตที่ pH 4.1 และ 6.2 ที่แสดงว่า pH 6.20 สตาร์ชข้าวเจ้าจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ได้ดีกว่าที่ pH 4.10 แต่ขัดแย้งกับผลงานวิจัยของ Muhammad และคณะ (1999) ที่ศึกษาผลของ pH ต่อการเกิดปฏิกิริยา phosphorylation ของสตาร์ชสาคุ (sago) ที่แสดงให้เห็นว่าที่ pH 8-11 สตาร์ชจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ได้ดีกว่าปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ในขณะที่ pH 6 สตาร์ชจะมีค่าความหนืดลดลง ซึ่งเขาได้อธิบายว่าน่าจะมาจากปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่เกิดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะสามารถเกิดได้ดีขึ้น อุณหภูมิทั่วไปที่ใช้ในการดัดแปรจะอยู่ในช่วง 120-160 °C ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณการแทนที่ที่ต้องการ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากกว่า 160 °C สตาร์ชที่ได้จะมีสีน้ำตาล ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์ และสำหรับการดัดแปรด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตจะนิยมใช้

อุณหภูมิในการดัดแปรที่ 120-130 °C (Wurzburg, 1986) และเนื่องจากโมโนสตาร์ชฟอสเฟตสามารถพองตัวได้ดีขึ้น จึงเกิดเจลาติไนเซชันง่ายกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ดังนั้นอาจเติมสารช่วยยับยั้งการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization inhibitor) ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ pH และอุณหภูมิแล้ว ความเข้มข้นของสาร และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาก็ล้วนแต่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทั้งสิ้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสาร หรือเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้สตาร์ชเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น

โมโนสตาร์ชฟอสเฟตทนต่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ตัวอื่น ๆ จึงนิยมใช้เป็นสารให้ความเหนียวในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง หรือผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องเก็บที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้สตาร์ชดัดแปรที่ได้ยังมีความสามารถในการพองตัว และการละลายเพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชดัดแปรที่มีระดับการแทนที่ 0.07 จะสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำลง ลดการคืนตัวของสตาร์ช และเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความข้นเหนียวที่มีความคงตัวสูง เช่นในน้ำเกรวี่ โดยใช้ร่วมกับ meat extract และ MSG ใช้ช่วยในการปรับปรุงกลิ่นรส (รักษากลิ่นรส เมื่ออายุการเก็บยาวนานขึ้น) และใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ในการผลิตน้ำสลัด มายองเนส เป็นต้น (Wurzburg, 1986)

2.3.2 การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางเป็นการปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชโดยใช้สารที่มีหมู่สำหรับเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลสตาร์ชตั้งแต่ 2 โมเลกุลขึ้นไป สารเหล่านี้ได้แก่ อีพิคลอโรไฮไดริน ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต อะโครลีน (acrolein) เป็นต้น ปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นอาจเป็นปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน หรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน (Smith and Tuschhoff, 1962) สตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่จะใช้เป็นตัวเจือปนในอาหารได้มี 2 ชนิด คือ ไดสตาร์ชฟอสเฟต และไดสตาร์ชกลีเซอรอล ซึ่งต้องมีสมบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) จึงใช้ได้

ก. สมบัติของสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

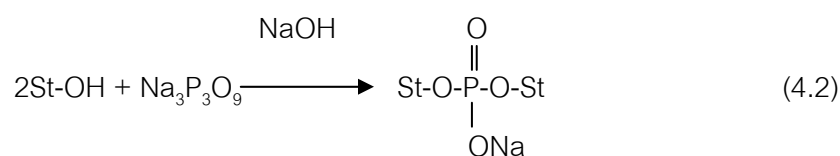
ปฏิกิริยาเชื่อมขวางเกิดได้ 2 ลักษณะ คือเกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุล และระหว่างโมเลกุล แต่ปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ช คือ การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล (Trimble, 1983) เพราะพันธะที่เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์จึงแข็งแรงมาก แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชจึงสูง และยังมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นด้วย โครงสร้างตาข่าย

(micellar network) ในเม็ดสตาร์ชจึงแข็งแรงขึ้น (Tuschhoff, 1986) สมบัติของสตาร์ชดัดแปรที่ได้จะแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติ โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น การพองตัวและการละลายลดลง ความหนืดที่จุดสูงสุดในช่วง heating จาก Brabender visco-amylogram ลดลง ทนต่อความร้อน ความดัน แรงแกระทำมากขึ้น จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านสภาวะต่างๆ ดังกล่าว แบ่งเป็ยที่ไ้ได้จะขึ้น ชุ่นที่บ แต่ไม่เหนียวยึด (short salve cohesive) (Schoch, 1985) ไ้สตาร์ชกลีเซอรอลเกิดจากปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน พันธะจึงแข็งแรงกว่าพันธะที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของไ้สตาร์ชฟอสเฟต แต่ปัจจุบันไม่นิยมผลิตและใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากสตาร์ชดัดแปรอาจมีอนุภาคมูลคลอโรไฮดรินที่เป็นสารก่อมะเร็งตกค้างมากเกินไป (ศิวาพร ศิวเวชช , 2529) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางของพันธะฟอสเฟต

การดัดแปรสตาร์ชด้วยหมู่ฟอสเฟตเป็นที่รู้จักกันมานาน ผลิตผลสำคัญที่ได้มี 2 ชนิด คือ โมโนสตาร์ชฟอสเฟต (จากปฏิกิริยาการแทนที่) และไ้สตาร์ชฟอสเฟต (จากปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง) ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร และสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร โมโนสตาร์ชฟอสเฟตได้จากการดัดแปรด้วยเกลือของออร์โธ ไพร หรือไตรโพลีฟอสฟอริกแอซิด ส่วนไ้สตาร์ชฟอสเฟตได้จากการดัดแปรสตาร์ชด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Kite, 1971; Katzbeck, 1972) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ซึ่งไ้สตาร์ชฟอสเฟตจำแนกออกเป็น 2 พวก ตามระดับการแทนที่ (degree of substitution, D.S.) หรือระดับการเชื่อมขวางของหมู่ฟอสเฟต (degree of cross-linking, D.P.) คือสตาร์ชที่มีระดับการแทนที่สูง (D.S. ประมาณ 5×10^{-3} หรือ D.P. ประมาณ 200 หน่วยกลูโคสต่อ 1 พันธะ, สตาร์ชเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางมาก) สตาร์ชจะไม่พองตัวในน้ำเดือด และสตาร์ชที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (D.S. ประมาณ 1×10^{-5} หรือ D.P. ประมาณ 10,000 หน่วยกลูโคสต่อ 1 พันธะ, สตาร์ชเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางน้อย) สตาร์ชจะสามารถพองตัวที่อุณหภูมิสูง (Solarek, 1986)

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไ้สตาร์ชฟอสเฟต

การผลิตไ้สตาร์ชฟอสเฟตด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะทำในระบที่ป็นน้ำ เพราะโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตละลายน้ำได้ดี โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ base หรือ alkali catalyst นั่นคือปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีในสภาวะที่ป็นต่าง (pH อยู่ในช่วง 9-12) ดังนั้นจึงต้องเติม alkali เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา (Kerr and Cleveland, 1957) ดังสมการที่ 4.1



หรือมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 0.05 โมลต่อสตาร์ชแห้ง 1 โมล โดยถ้าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระบบมากขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น แต่โดยทั่วไปจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เกิน 0.4 โมลต่ออลิทร นอกจากนี้ปฏิกิริยาจะสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ควรต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของสตาร์ช (Kite, 1971) เพื่อป้องกันการเกิดเจลลิตในเซชันในระหว่างการตัดแปรรูป ช่วงอุณหภูมิที่นิยมใช้ประมาณ 32.2 – 51.7 °C (หรือ 90 – 125 °F) เนื่องจากไดสตาร์ชฟอสเฟตมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยยับยั้งการเกิดเจลลิตในเซชัน อย่างไรก็ตามการเติมเกลือของด่าง เช่น โซเดียมซัลเฟต, โซเดียมคลอไรด์ ในระบบจะเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาได้ เพราะช่วยป้องกัน leaching ของโมเลกุลสตาร์ชในระหว่างการตัดแปรรูป (Weltztein and Lyon, 1956)

ไดสตาร์ชฟอสเฟตที่อนุญาตใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต้องผลิตจาก ฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตเท่านั้น โดยถ้าตัดแปรรูปจากฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ ปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ที่ใช้ต้องไม่เกินร้อยละ 0.1 (โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง) ส่วนโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตไม่กำหนดปริมาณสูงสุดไว้ อาจใช้ประมาณร้อยละ 0.01-3.00 (โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง) แต่นิยมใช้เพียงร้อยละ 0.01-0.60 (โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง) ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 0.5-8 ชั่วโมง (Rubin, 1980) ขึ้นกับสมบัติของสตาร์ชที่ต้องการ และสภาวะที่ใช้ในการตัดแปรรูป โดยสตาร์ชที่ผลิตได้จะต้องผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ดังนี้ ไดสตาร์ชฟอสเฟตที่ตัดแปรรูปจากสตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชมันฝรั่งจะใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ต้องมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างซึ่งวิเคราะห์ในรูปฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.14 ส่วนไดสตาร์ชฟอสเฟตไม่ได้ตัดแปรรูปจากสตาร์ชข้าวสาลี และสตาร์ชมันฝรั่งจะใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ต้องมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างซึ่งวิเคราะห์ในรูปฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.04 (โดยน้ำหนัก) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

ไดสตาร์ชฟอสเฟตทนทานต่อความร้อน ความดัน แรงกระทำ สภาวะกรด และด่างได้ดี จึงนิยมใช้สตาร์ชที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำเป็นสารให้ความข้นหนืดกับผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ ไล้พาย (fruit pie filling) น้ำสลัด (salad dressing) อาหารเด็ก ซุปกระป๋อง เป็นต้น (Kite, 1971; Katzbeck, 1972)

บทที่ 3

การทดลอง

วัตถุประสงค์

1. หัวสาकुไทย (*Maranta arundinaceae* L.) และสาकुจีน (*Canna edulis* Ker.) ที่อายุการเก็บเกี่ยว 225, 270, 315 วันในฤดูการเก็บเกี่ยวปีที่ 1 (พ.ศ. 2545) ซึ่งนำมาศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยวต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकुจีน และสาकुไทย

2. หัวสาकुไทย (*Maranta arundinaceae* L.) และสาकुจีน (*Canna edulis* Ker.) ที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วันในฤดูการเก็บเกี่ยวปีที่ 2 (พ.ศ. 2546) ซึ่งนำมาศึกษาผลของการตัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง และปฏิกิริยาการแทนที่ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकुจีน และสาकुไทย

โดยหัวสาकुทั้งสองชนิดได้จากกองพฤกษศาสตร์และวัชพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ซึ่งทำการเพาะปลูกที่จังหวัดตาก

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยว และชนิดของสาकुต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकु

3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुจีน และสาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว 225, 270 และ 315 วัน

นำหัวสาकुจีน และสาकुไทยที่ ผ่านการปกเปลือกมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังนี้

3.1.1.1 ความชื้น ตามวิธี AOAC 32.1.03 (2000) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.1)

3.1.1.2 โปรตีน ตามวิธี AOAC 32.1.32 (2000) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.2)

3.1.1.3 ไขมัน ตามวิธี AOAC 32.1.13 (2000) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.3)

3.1.1.4 เถ้า ตามวิธี AOAC 32.1.05 (2000) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.4)

3.1.1.5 เส้นใย (crude fiber) ตามวิธี AOAC 32.1.15 (2000) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.5)

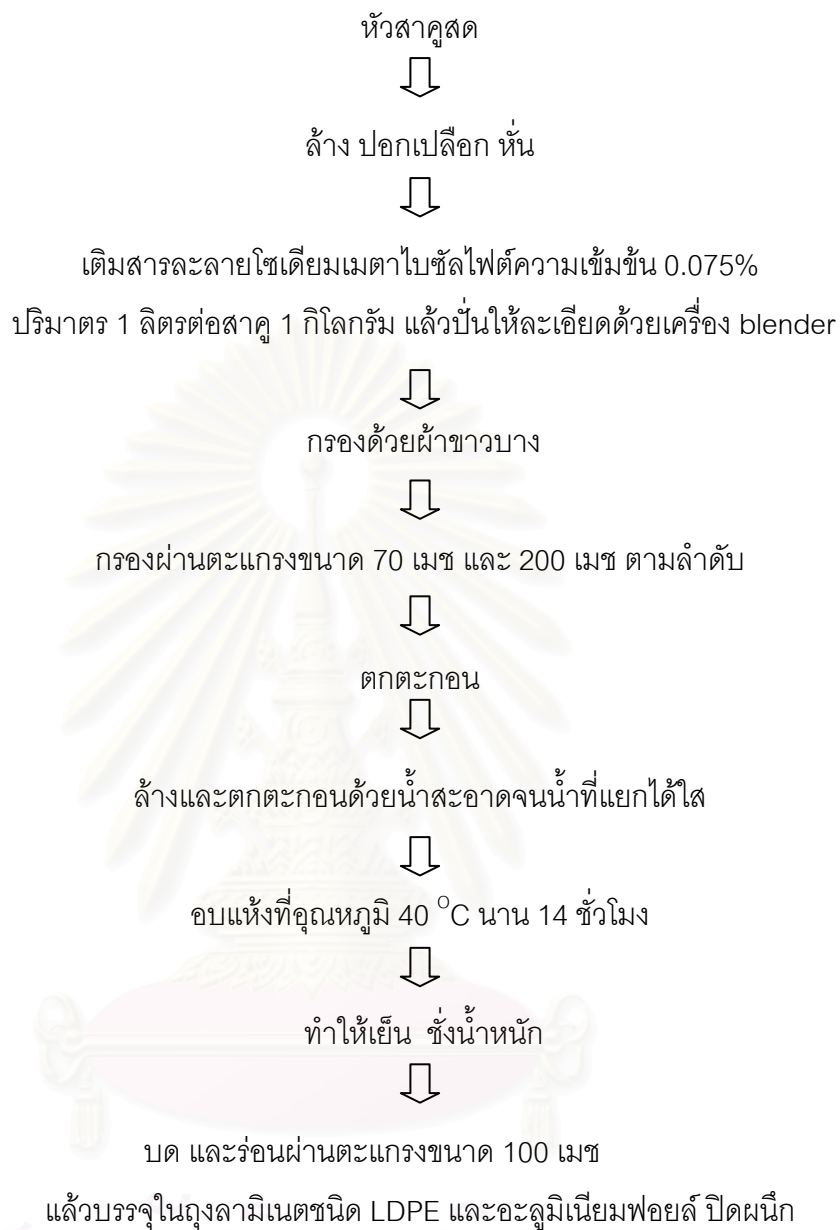
3.1.1.6 คาร์โบไฮเดรต (รายละเอียดในภาคผนวก ก.6)

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2x3 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วย Duncan 's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3.1.2 การสกัดสารสกัดจากหัวสาकुไทย และสาकुจีน

สกัดสารสกัดจากหัวสาकुไทย และสาकुจีน โดยดัดแปลงขั้นตอนการสกัดจากวิธีของ จิตรา เศรษฐอุดม (2528) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้หัวสาकुสดที่อายุการเก็บเกี่ยว 225, 270 และ 315 วัน มาล้าง ปอกเปลือก หั่น แล้วนำมาสกัดสารโดยการปั่นในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.075% ปริมาตร 1 ลิตรต่อหัวสาकु 1 กิโลกรัม กรองด้วยผ้าขาวบาง และจากนั้นนำไปกรองผ่านตะแกรงขนาด 70 เมช และ 200 เมช ตามลำดับ ตกตะกอน และล้างด้วยน้ำสะอาด และตกตะกอนจนน้ำที่แยกได้ใส นำสารสกัดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 14 ชั่วโมง ทำให้เย็น ชั่งน้ำหนัก และนำสารสกัดที่เตรียมได้มาบด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช และบรรจุในถุง ลามิเนตชนิด low-density polyethylene (LDPE) และอะลูมิเนียมฟอยล์ ปิดผนึกและเก็บไว้ที่ อุณหภูมิห้องเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป คำนวณปริมาณผลผลิตจาก

$$\text{ร้อยละปริมาณผลผลิต (\% Yield)} = \frac{\text{น้ำหนักของสารสกัดแห้ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของหัวสาकुสด (กรัม)}}$$



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสกัดสารหัวสาकु

3.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าวไทย และสาकुจิน

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าวไทย และสาकुจินตามข้อ 3.1.1 ปริมาณอะไมโลส โดยวิธีของ Juliano (1971) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.7) ฟอสฟอรัส ตามวิธี ISO 3946 (1982) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.8) ปริมาณสตาร์ช โดยวิธีของ AOAC 32.1.28 (2002) (รายละเอียดในภาคผนวก ก.9)

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2x3 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างทางสถิติด้วย DMRT โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3.1.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชจากข้าวไทย และสาकुจินที่อายุ การเก็บเกี่ยวต่างๆ

3.1.4.1 รูปร่าง ขนาด และ birefringence ของเม็ดสตาร์ช ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์

3.1.4.2 กำลังการพองตัวและการละลาย (รายละเอียดในภาคผนวก ก.11)

3.1.1.3 เสถียรภาพของแป้งเปียกต่อความร้อน และแรงเฉือน (ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง) โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกด้วย RVA (รายละเอียดในภาคผนวก ก.12)

3.1.1.4 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งเปียกสตาร์ชจากข้าว (ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างสตาร์ชจากข้าวไทยและสาकुจินที่อายุการเก็บเกี่ยวที่มีเสถียรภาพสูงสุดในช่วงให้ความร้อน) โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกด้วย RVA (เช่นเดียวกับข้อ 3.1.1.3)

3.1.4.5 เสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง (freeze - thaw stability) โดยดัดแปลงจากวิธีของสุรวัชร อนุตตุมิกุล, 2544 (รายละเอียดในภาคผนวก ก.14)

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2x3 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างทางสถิติด้วย DMRT โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดัดแปรสสารศาสตร์ชาวไทย และสาธุจีนด้วยปฏิบัติการการแทนที่

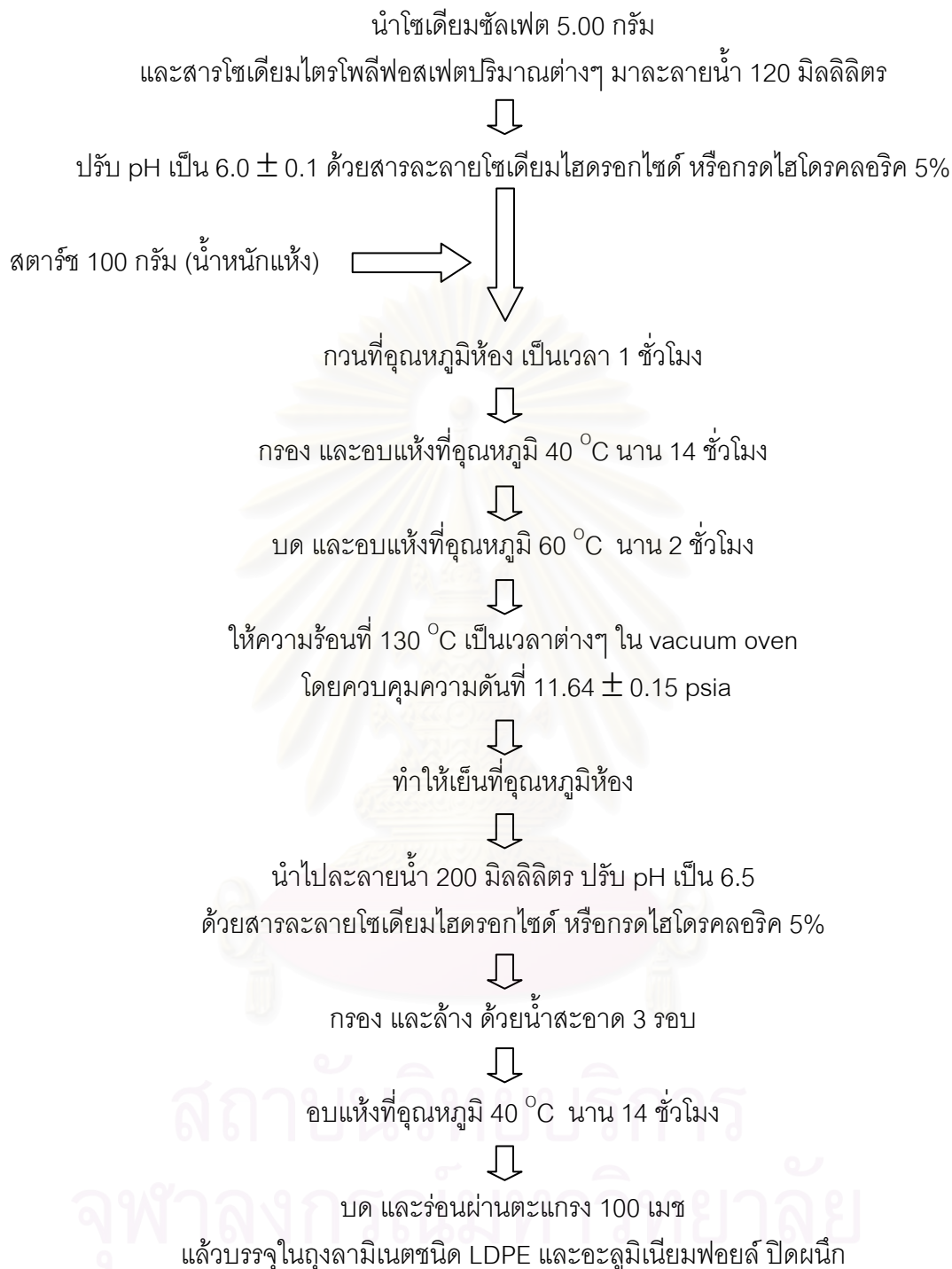
นำสสารศาสตร์ชาวไทย และสาธุจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน มาดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ ตามวิธีของ Lim และ Seib (1993) (ขั้นตอนตามรูปที่ 3.2) โดยใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเป็น substitution reagent ควบคุม pH ของสารละลายสสารศาสตร์ให้เท่ากับ 6 แปรความเข้มข้นของโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต 3 ระดับคือ ร้อยละ 2, 4, 6 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ระดับ คือ 1, 2, 3 ชั่วโมง วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพตามข้อ 3.1.4 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โครงสร้างผลึกของเม็ดสสารศาสตร์ โดย wide angle X-ray diffraction มุมในการวัดตั้งแต่ 5 องศา ถึง 45 องศา (รายละเอียดในภาคผนวก ก.10) สมบัติทางความร้อนของสสารศาสตร์ ด้วย DSC (รายละเอียดในภาคผนวก ก.13) และปริมาณฟอสเฟตตกค้างในรูปฟอสฟอรัสตามวิธี ISO 3946 (1982) และคำนวณระดับการแทนที่ (D.S.) (Wurzburg, 1986) จากสมการที่ (3.1)

$$D.S. = \frac{162(P)}{3100 - 102(P)} \quad (3.1)$$

เมื่อ (P) = % ฟอสฟอรัส (น้ำหนักแห้ง)

วางแผนการทดลองแบบ Symmetric Factorial Design ขนาด 3^2 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างทางสถิติด้วย DMRT โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดัดแปรสตา์ชด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดัดแปรสตาร์ชจากไทย และสา쿠จินด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

นำสตาร์ชจากไทย และสาคุจินที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน มาดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ตามวิธีของวรรณุช ศรีเจษฎารักษ์ (2530) (ขั้นตอนตามรูปที่ 3.3) โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต เป็น cross-linking reagent ควบคุม pH ของสารละลายสตาร์ชให้เท่ากับ 11 แปรความเข้มข้นของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต 3 ระดับคือ ร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ระดับคือ 1, 2.5, 4 ชั่วโมง วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพตามข้อ 3.1.4 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช โดย wide angle X-ray diffraction มุมในการวัดตั้งแต่ 5 องศา ถึง 45 องศา (รายละเอียดในภาคผนวก ก.10) สมบัติทางความร้อนของสตาร์ช ด้วย DSC (รายละเอียดในภาคผนวก ก.13) และปริมาณฟอสเฟตตกค้างในรูปฟอสฟอรัสตามวิธี ISO 3946 (1982) และคำนวณระดับการแทนที่ (D.S.) ตามสมการที่ (3.1)

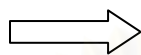
วางแผนการทดลองแบบ Symmetric Factorial Design ขนาด 3^2 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างทางสถิติด้วย DMRT โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

นำโซเดียมคาร์บอเนต 2.79 กรัม และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์
ความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.15% มาละลายน้ำ 140 มิลลิลิตร



ปรับ pH เป็น 12.60 ± 0.05 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 นอร์มัล

สตาร์ช 100 กรัม (น้ำหนักแห้ง)



น้ำแป้งที่มี pH 11 ± 0.10



ปรับอุณหภูมิที่ 50°C



กวนที่เวลาต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C



ทำให้เย็นทันที และหยุดปฏิกิริยา

โดยปรับ pH เป็น 6.5 ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก 1.5 นอร์มัล



กรอง และล้าง ด้วยน้ำสะอาด 3 รอบ



อบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C นาน 14 ชั่วโมง



บด และร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช

แล้วบรรจุในถุงลามิเนตชนิด LDPE และอะลูมิเนียมฟอยล์ ปิดผนึก

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยว และชนิดของสาकुต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकु

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225, 270 และ 315 วัน (ตารางที่ 4.1) และวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ตารางที่ ข.1, ภาคผนวก ข.) พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต แต่มีผลต่อปริมาณความชื้นของหัวสาकुทั้งสองชนิด โดยเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวมากขึ้น ความชื้นในหัวจะลดลง เนื่องจากการเก็บเกี่ยวครั้งแรกในช่วงปลายเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงที่ต้นเริ่มโทรม จะตรงกับช่วงปลายฤดูฝนต้นฤดูหนาว อากาศค่อนข้างแห้ง เมื่ออายุการเก็บเกี่ยวมากขึ้นโดยเฉพาะช่วง 315 วัน หัวซึ่งอยู่ใต้ดินนานจะเกิดการสูญเสียความชื้นเนื่องจากดินมีความชื้นต่ำกว่า โดยหัวสาकुไทยมีอัตราการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าหัวสาकुจีน เนื่องจากหัวสาकुไทยอยู่ลึกจากผิวดินมากกว่าหัวสาकुจีน ส่วนชนิดของสาकुมีผลต่อปริมาณความชื้น โปรตีน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต แต่ไม่มีผลต่อปริมาณไขมัน และเส้นใย โดยปริมาณความชื้น เถ้า และคาร์โบไฮเดรตในหัวสาकुไทยมีปริมาณต่ำกว่า แต่ปริมาณโปรตีนสูงกว่าหัวสาकुจีน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	สาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน)			สาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน)		
	225	270	315	225	270	315
ความชื้น (wb)	69.06 ± 0.64Ba	68.30 ± 0.29Ba	66.05 ± 2.02Aa	79.41 ± 1.14Bb	78.32 ± 0.92Bb	74.56 ± 2.38Ab
คาร์โบไฮเดรต (db)	88.47 ± 0.32Aa	88.15 ± 0.04Aa	87.75 ± 0.30Aa	88.31 ± 0.25Aa	88.68 ± 0.47Ab	88.97 ± 0.25Ab
โปรตีน (db)	4.43 ± 0.07Ab	4.48 ± 0.03Ab	4.42 ± 0.02Ab	3.55 ± 0.02Aa	3.50 ± 0.01Aa	3.45 ± 0.07Aa
ไขมัน (db) ^{ns}	0.27 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.25 ± 0.09	0.25 ± 0.02	0.27 ± 0.03	0.25 ± 0.02
เถ้า (db)	4.64 ± 0.13Aa	4.84 ± 0.08Aa	5.01 ± 0.08Aa	5.35 ± 0.20Ab	5.00 ± 0.01Ab	5.15 ± 0.15Aa
เส้นใย (db) ^{ns}	2.19 ± 0.24	2.27 ± 0.04	2.59 ± 0.09	2.47 ± 0.15	2.55 ± 0.44	2.68 ± 0.14

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของสาकुชนิดเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.1.2 การสกัดสตาโรซสาकुไทย และสาकुจีน

จากการสกัดสตาโรซจากหัวของสาकुทั้งสองชนิดโดยวิธีการไม่เปียก พบว่าสตาโรซสาकुทั้งสองชนิดสามารถตกตะกอนได้ดี โดยสตาโรซสาकुไทยตกตะกอนได้ช้ากว่าสตาโรซสาकुจีน สามารถแยกตะกอนได้โดยใช้เวลานาน 60 นาที ส่วนสตาโรซสาकुจีนใช้เวลาในการตกตะกอน 45 นาที น้ำที่ได้หลังจากการล้างสตาโรซของสาकुจีนจะเป็นสีแดงคล้ำซึ่งเป็นสีของรงควัตถุในหัว ดังนั้นจึงต้องล้างสตาโรซสาकुจีนที่ได้ด้วยน้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ส่วนสตาโรซสาकुไทยใช้การล้างด้วยน้ำเพียง 3 ครั้ง สตาโรซสาकुทั้งสองชนิดมีสีขาว โดยสตาโรซสาकुไทยจะมีความขาวมากกว่าสตาโรซสาकुจีน เนื่องจากสาकुจีนมีรงควัตถุสีเข้มกว่าสาकुไทย นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละปริมาณผลผลิตจากการสกัดสตาโรซจากหัวสาकुไทยอยู่ในช่วง 20.13-20.91% ซึ่งสูงกว่าหัวสาकुจีนที่มีร้อยละปริมาณผลผลิตเท่ากับ 16.83-16.99% ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นในหัวสาकुจีนสูงกว่าหัวสาकुไทย (ตารางที่ 4.1)

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของสสารซาคู

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสสารซาคูทั้งสองชนิดที่อายุการเก็บเกี่ยว 225, 270, 315 วัน และวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ตารางที่ ข.2, ภาคผนวก ข.) พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของสสารซาคูทั้งสองชนิด แต่ชนิดสาคูมีผลต่อปริมาณความชื้น โปรตีน อะไมโลส และฟอสฟอรัส โดยสสารซาคูไทยมีปริมาณความชื้น โปรตีน อะไมโลส และฟอสฟอรัสน้อยกว่าสสารซาคูจีน (ตารางที่ 4.2) ซึ่งการที่สสารซาคูไทยมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าในสสารซาคูจีน แม้ว่าหัวสาคูไทยจะมีปริมาณโปรตีนมากกว่าหัวสาคูจีน อาจเนื่องจากหัวสาคูไทยประกอบด้วยโปรตีนที่สามารถละลายในน้ำได้มากกว่าหัวสาคูจีน โปรตีนจึงละลายไปในระหว่างกระบวนการสกัดสสารได้มากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าสสารซาคูทั้งสองชนิดจัดเป็นสสารที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งมีปริมาณสสารมากกว่า 95% และมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่า 0.3% ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (อุตสาหกรรม, 2521) เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างสสารซาคูไทยที่สกัดได้กับรายงานของ Manavedan และคณะ (2000) พบว่าสสารซาคูไทยที่สกัดได้มีปริมาณความชื้น อะไมโลสสูงกว่า แต่มีปริมาณโปรตีน ไขมัน ถั่วต่ำกว่า (สสารซาคูไทยที่สกัดได้โดย Manavedan และคณะ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 98.61% โปรตีน 0.06% ไขมัน 0.88% ถั่ว 0.45% ความชื้น 9.82% และอะไมโลส 19.4%) ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสสารซาคูจีนที่สกัดได้กับรายงานของ Thitipraphunkul และคณะ (2003) พบว่าสสารซาคูที่สกัดได้มีปริมาณความชื้น ไขมัน อะไมโลสสูงกว่า แต่มีปริมาณโปรตีน และถั่วต่ำกว่า (สสารซาคูจีนที่สกัดได้โดย Thitipraphunkul และคณะ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต 99.58% โปรตีน 0.08% ไขมัน 0.02% ถั่ว 0.33% และความชื้น 9.39% และอะไมโลส 38%) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหัวสาคูที่นำมาสกัดสสารปลูกในสภาพภูมิประเทศ และภูมิอากาศที่แตกต่างกัน สสารซาคูทั้งสองชนิดจัดว่าเป็นสสารที่มีปริมาณอะไมโลสสูง โดยมีปริมาณอะไมโลสมากกว่าสสารซาคูจากพืชหัวชนิดอื่นๆ เช่น สสารซาคูแท้อยายม่อม สสารซาคูมันฝรั่ง สสารซาคูมันสำปะหลัง (Oates, 1996)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าวไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	สาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}			สาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}		
	225	270	315	225	270	315
ความชื้น (wb)	11.66 ± 0.07a	11.52 ± 0.07a	11.65 ± 0.21a	14.35 ± 0.10b	14.24 ± 0.13b	14.40 ± 0.21b
โปรตีน (db)	0.03 ± 0.01a	0.04 ± 0.02a	0.02 ± 0.01a	0.07 ± 0.01b	0.07 ± 0.02b	0.09 ± 0.01b
ไขมัน (db) ^{ns}	0.14 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.02
เส้นใย (db) ^{ns}	0.30 ± 0.05	0.42 ± 0.11	0.38 ± 0.02	0.33 ± 0.01	0.37 ± 0.22	0.31 ± 0.08
เถ้า (db) ^{ns}	0.16 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.16 ± 0.00
- ฟอสฟอรัส (db)	0.0289 ± 0.0011a	0.0290 ± 0.0002a	0.0291 ± 0.0001a	0.0569 ± 0.0005b	0.0569 ± 0.0002b	0.0570 ± 0.0002b
คาร์โบไฮเดรต (db) ^{ns}	99.37 ± 0.03	99.25 ± 0.24	99.31 ± 0.09	99.32 ± 0.08	99.27 ± 0.08	99.28 ± 0.05
- สตาร์ช (db) ^{ns}	97.66 ± 1.43	96.80 ± 0.59	97.93 ± 0.11	97.78 ± 1.66	98.40 ± 1.02	96.72 ± 0.40
- อะไมโลส (db)	38.45 ± 0.49a	38.38 ± 0.01a	38.33 ± 0.21a	52.85 ± 0.47b	52.85 ± 0.26b	52.88 ± 0.55b

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

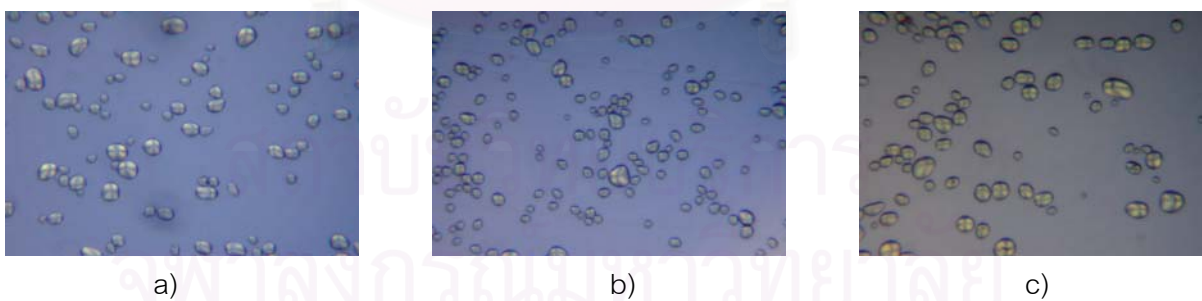
a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 สมบัติทางกายภาพของสตาโรซัส

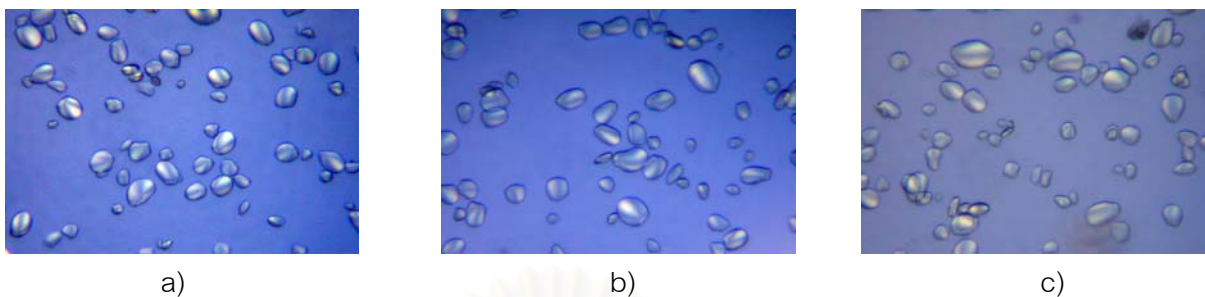
4.1.4.1 รูปร่าง ขนาด และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาโรซัสไทย และสาคุจิ้น

จากการศึกษารูปร่างของสตาโรซัสทั้งสองชนิดที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ พบว่าเม็ดสตาโรซัสไทยจะค่อนข้างกลม และมีขนาดประมาณ 10-25 μm . ส่วนเม็ดสตาโรซัสของสาคุจิ้นจะมีลักษณะกลมรี และมีขนาดประมาณ 25-80 μm . ซึ่งใกล้เคียงกับที่ศึกษาโดย Erdman (1986) ที่รายงานว่าเม็ดสตาโรซัสไทยมีขนาดประมาณ 10-17 μm . และ Santacruz และคณะ (2002) ที่รายงานว่าเม็ดสตาโรซัสจิ้นมีขนาดประมาณ 35-110 μm . โดยเม็ดสตาโรซัสชนิดเดียวกันที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างกันจะไม่มี ความแตกต่างกัน (รูปที่ 4.1-4.2) และจากการตรวจสอบลักษณะ birefringence ซึ่งเป็นการตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาโรซัส โดยหากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาโรซัสถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Gallant, Bouchet, and Baldwin, 1997) พบว่าเม็ดสตาโรซัสของสาคุทั้งสองชนิดที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ มี birefringence ที่ชัดเจน แสดงว่าวิธีการสกัดสตาโรซัสไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับเม็ดสตาโรซัส โดยตำแหน่งไฮลัมของเม็ดสตาโรซัสไทยจะเกิดที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาโรซัส (รูปที่ 4.1) ส่วนสตาโรซัสจิ้นจะเกิดค่อนไปทางด้านปลายของเม็ดสตาโรซัส (รูปที่ 4.2) แสดงว่าการสร้างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินของเม็ดสตาโรซัสไทยเริ่มสร้างสายพอลิเมอร์จากจุดศูนย์กลางและขยายออกตามแนวรัศมีของเม็ดสตาโรซัส ส่วนสตาโรซัสจิ้นเริ่มจากบริเวณที่ค่อนไปด้านปลายเม็ดสตาโรซัสและค่อยขยายออก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 4.1 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาโรซัสไทย ที่อายุการเก็บเกี่ยว

a) 225 วัน, b) 270 วัน, c) 315 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)

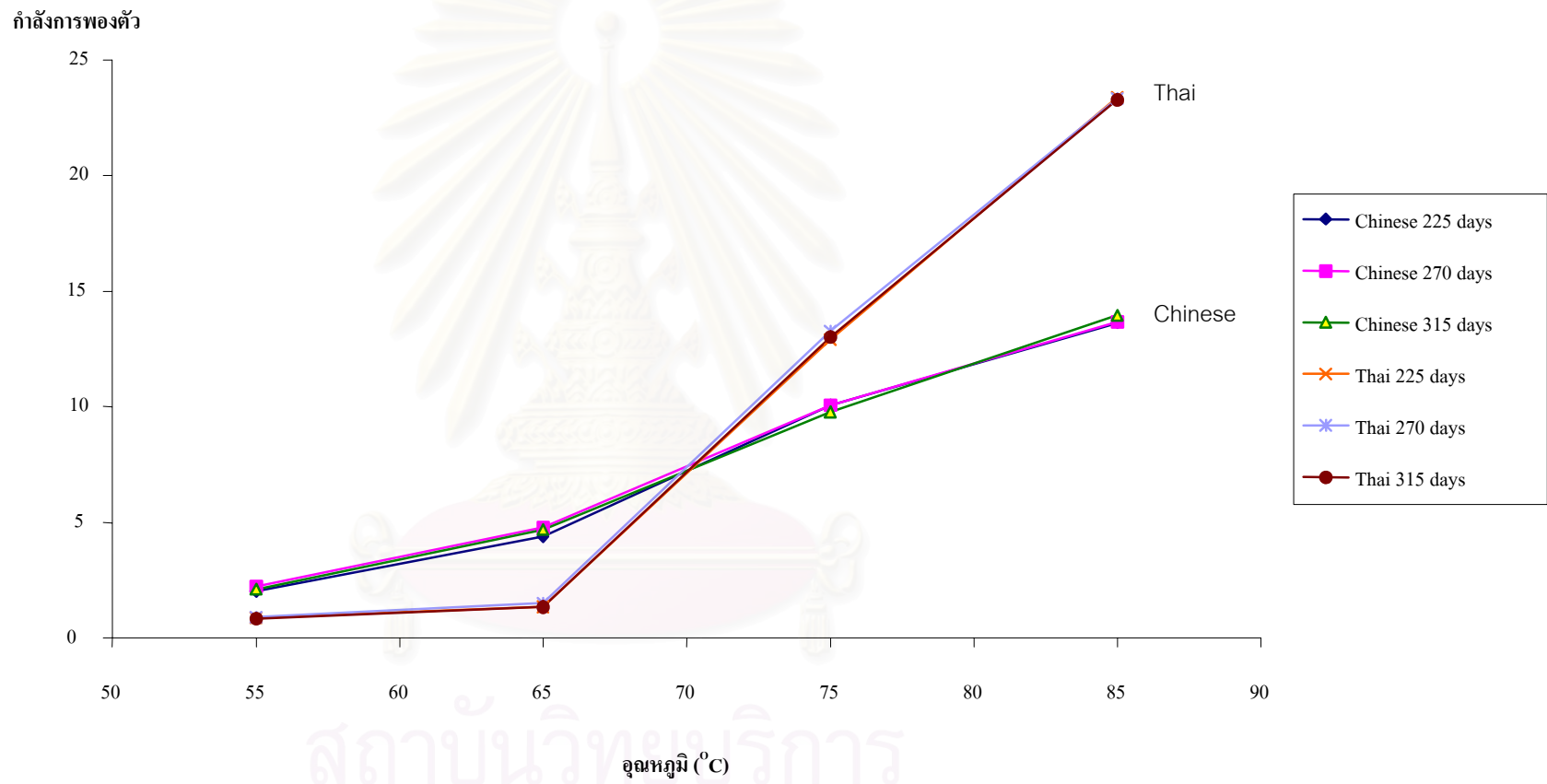


รูปที่ 4.2 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาคุจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยว

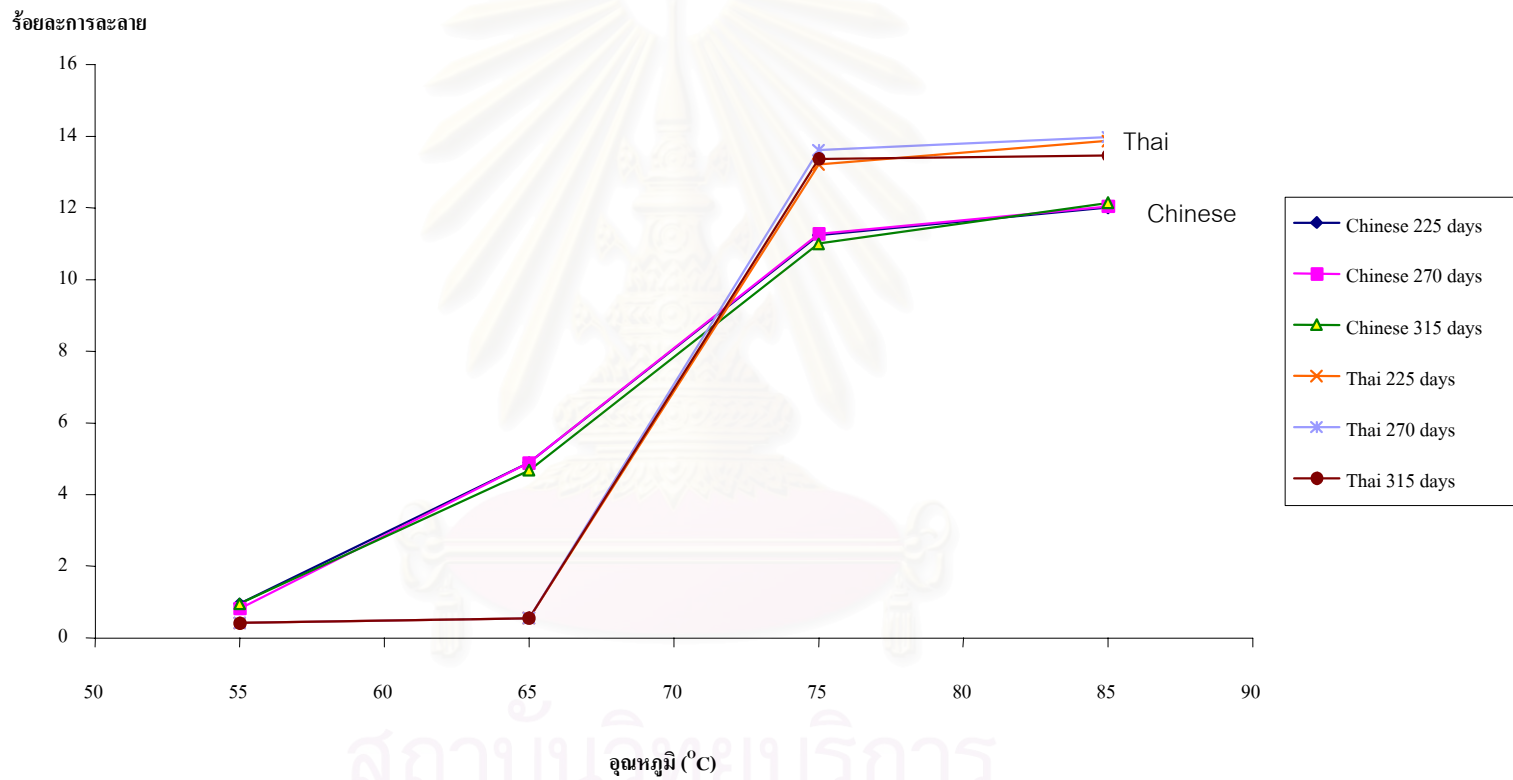
a) 225 วัน, b) 270 วัน, c) 315 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)

4.1.4.2 กำลังการพองตัวและการละลาย

จากการวิเคราะห์กำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุทั้งสองชนิดที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ (รูปที่ 4.3 และตารางที่ ค.1) พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อค่ากำลังการพองตัว แต่ชนิดของสาคุมีผลต่อค่ากำลังการพองตัว (ตารางที่ ข.3 - ข.4, ภาคผนวก ข.) โดยที่ 55-65 °C สตาร์ชสาคุไทยมีค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ชสาคุจีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ ค.1-ค.2, ภาคผนวก ค.; รูปที่ 4.3-4.4) แต่ที่อุณหภูมิ 75-85 °C สตาร์ชสาคุไทยกลับมีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชสาคุจีน โดยที่ 85 °C สตาร์ชสาคุไทยมีกำลังการพองตัวอยู่ในช่วง 23.29 – 23.38% ซึ่งมากกว่าสตาร์ชสาคุจีน (16.63 – 16.95%) การที่สตาร์ชสาคุไทยมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ชสาคุจีนที่อุณหภูมิต่ำ อาจเกิดเนื่องจากสตาร์ชสาคุจีนมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชสาคุไทย จึงมีความทนทานต่อความร้อนน้อยกว่า แตกตัวได้ง่ายกว่า และสตาร์ชสาคุจีนยังมีปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่าสตาร์ชสาคุไทย ซึ่งฟอสฟอรัสจะทำให้เม็ดสตาร์ชมีประจุเป็นลบ เม็ดสตาร์ชผลัดออกจากกัน จึงมีการพองตัวได้มากขึ้น (กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ส่วนการที่สตาร์ชสาคุไทยมีกำลังการพองตัวมากกว่าสตาร์ชสาคุจีนที่อุณหภูมิที่สูง (75-85 °C) เนื่องจากสตาร์ชสาคุไทยมีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าสตาร์ชสาคุจีน จึงมีโครงสร้างหนาแน่นน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Visser และคณะ (1997) ที่พบว่าอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น การพองตัวจึงเกิดได้ยากขึ้น ส่วนค่าการละลายพบว่าให้ผลเช่นเดียวกับค่าการพองตัว และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนกับค่าที่ได้จาก Manavedan และคณะ (2000) และ Thitipraphunkul และคณะ (2003) พบว่าสตาร์ชสาคุไทยและสาคุจีนที่สกัดได้มีค่ากำลังการพองตัวและการละลายน้อยกว่า ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับปริมาณอะไมโลสที่มากกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ฟิชจากไทย และสตาร์ฟิชจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

4.1.4.3 เสถียรภาพของแป้งเปียกต่อความร้อน และแรงเฉือน

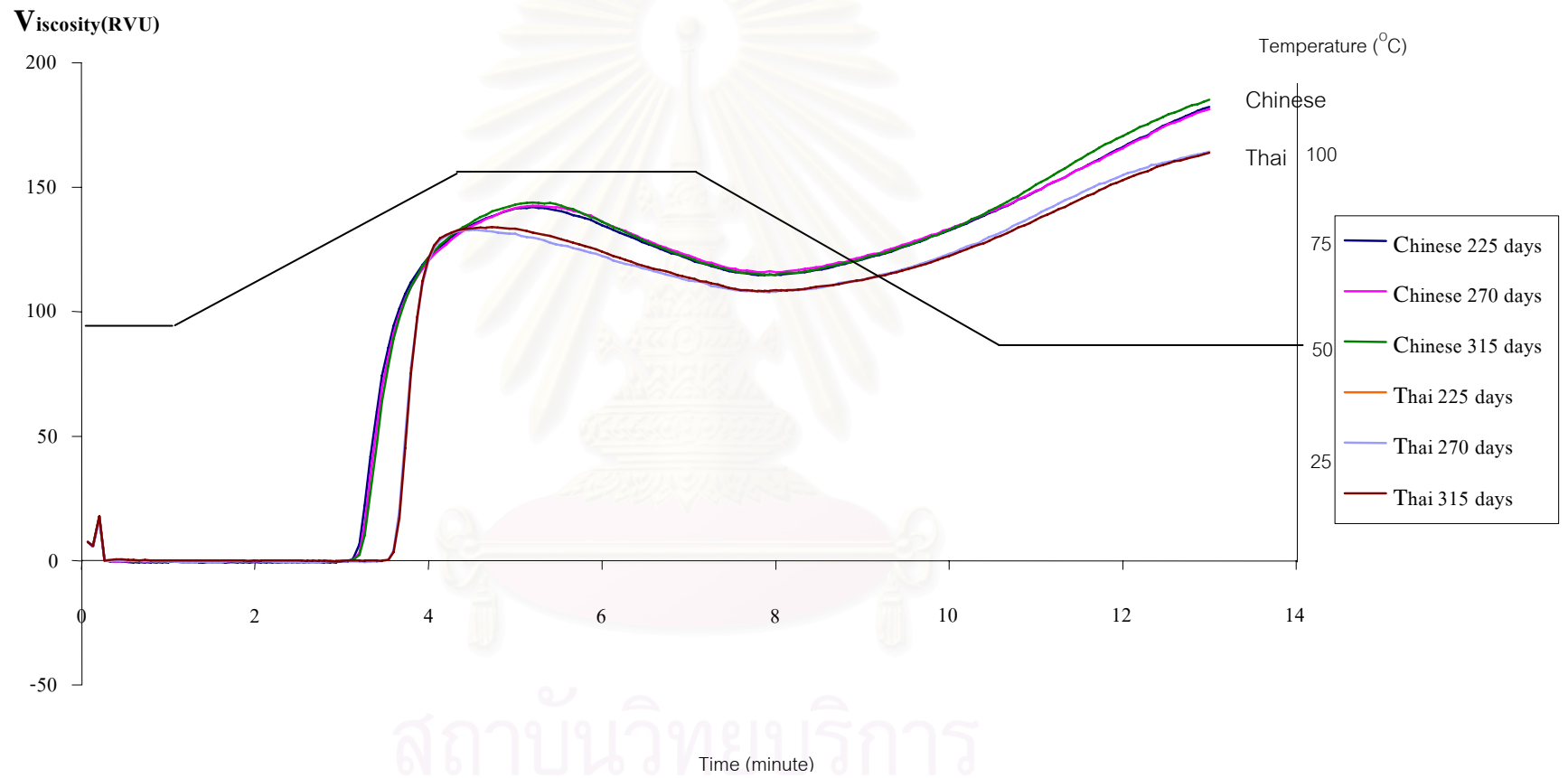
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle ด้วย RVA ที่ความเข้มข้น 6% และ pH 7 พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อการเกิดเจลของสตาร์ชทั้งสองชนิด (ตารางที่ ข.5, ภาคผนวก ข.) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่าสตาร์ชสาकुไทยจะมีคุณสมบัติในการเกิดเจลประมาณ (pasting temperature) 80 °C ส่วนสตาร์ชสาकुจีนมีค่า pasting temperature ต่ำกว่าสตาร์ชสาकुไทย (75 °C) (ตารางที่ 4.3, รูปที่ 4.5) ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชสาकुจีนมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชสาकुไทย จึงมีความทนทานต่อความร้อนน้อยกว่า แตกตัวได้ง่ายกว่า และสตาร์ชสาकुจีนยังมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าสตาร์ชสาकुไทย ทำให้เม็ดสตาร์ชมีประจุเป็นลบมากกว่า เม็ดสตาร์ชสาकुจีนจึงเกิดการพองตัวได้เร็วกว่า (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543; Collision, 1968) สตาร์ชสาकुไทยมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และ setback ต่ำกว่าสตาร์ชสาकुจีน เนื่องจากสตาร์ชสาकुไทยมีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าสตาร์ชสาकुจีน เมื่อเจลเย็นตัวลง สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสน้อยจะจัดเรียงตัวกันใหม่ได้น้อย และซ้ากว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสมาก จึงมีค่า setback ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้สตาร์ชสาकुไทยมีค่า breakdown ต่ำกว่าสตาร์ชสาकुจีนเล็กน้อย แสดงว่าสตาร์ชสาकुไทยมีความคงตัวต่อแรงเฉือนสูงกว่าสตาร์ชสาकुจีนเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชสาकुจีนมีขนาดใหญ่ มีความทนทานต่อความร้อนน้อย แตกตัวได้ง่าย ทำให้เม็ดสตาร์ชสาकुจีนมีเสถียรภาพของความหนืดน้อยกว่าเม็ดสตาร์ชสาकुไทย (Collision, 1968) และเมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดกับสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชเท้ายายม่อม พบว่าสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดนี้มีเสถียรภาพของความหนืดมากกว่า เนื่องจากมีค่า breakdown ต่ำกว่า เหมาะกับการใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่มีแรงกวน หรือใช้ความร้อนสูง เช่น ในอาหารกระป๋อง เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของ
สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ความเข้มข้น 6% ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

Pasting properties	สาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}			สาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}		
	225	270	315	225	270	315
Peak viscosity (RVU)	134.46 ± 2.29a	133.50 ± 0.46a	133.92 ± 0.12a	141.96 ± 0.88b	142.46 ± 1.23b	144.04 ± 1.00b
Trough (RVU)	109.34 ± 1.88a	108.42 ± 2.82a	108.25 ± 2.58a	114.71 ± 1.71b	113.67 ± 0.58b	114.96 ± 1.23b
Breakdown (RVU)	25.13 ± 0.41a	25.08 ± 0.30a	25.67 ± 0.47a	27.25 ± 0.82b	28.79 ± 0.65b	29.09 ± 0.23b
Final viscosity (RVU)	165.25 ± 1.17a	162.25 ± 0.24a	163.88 ± 2.05a	182.21 ± 1.23b	184.13 ± 2.53b	185.09 ± 1.18b
Setback (RVU)	55.92 ± 0.70a	56.75 ± 1.06a	55.63 ± 0.53a	67.50 ± 2.94b	68.63 ± 0.17b	70.13 ± 2.41b
Pasting temperature (°C)	80.25 ± 0.63b	79.93 ± 0.03b	80.13 ± 0.31b	75.05 ± 0.00a	75.05 ± 0.00a	75.08 ± 0.03a

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

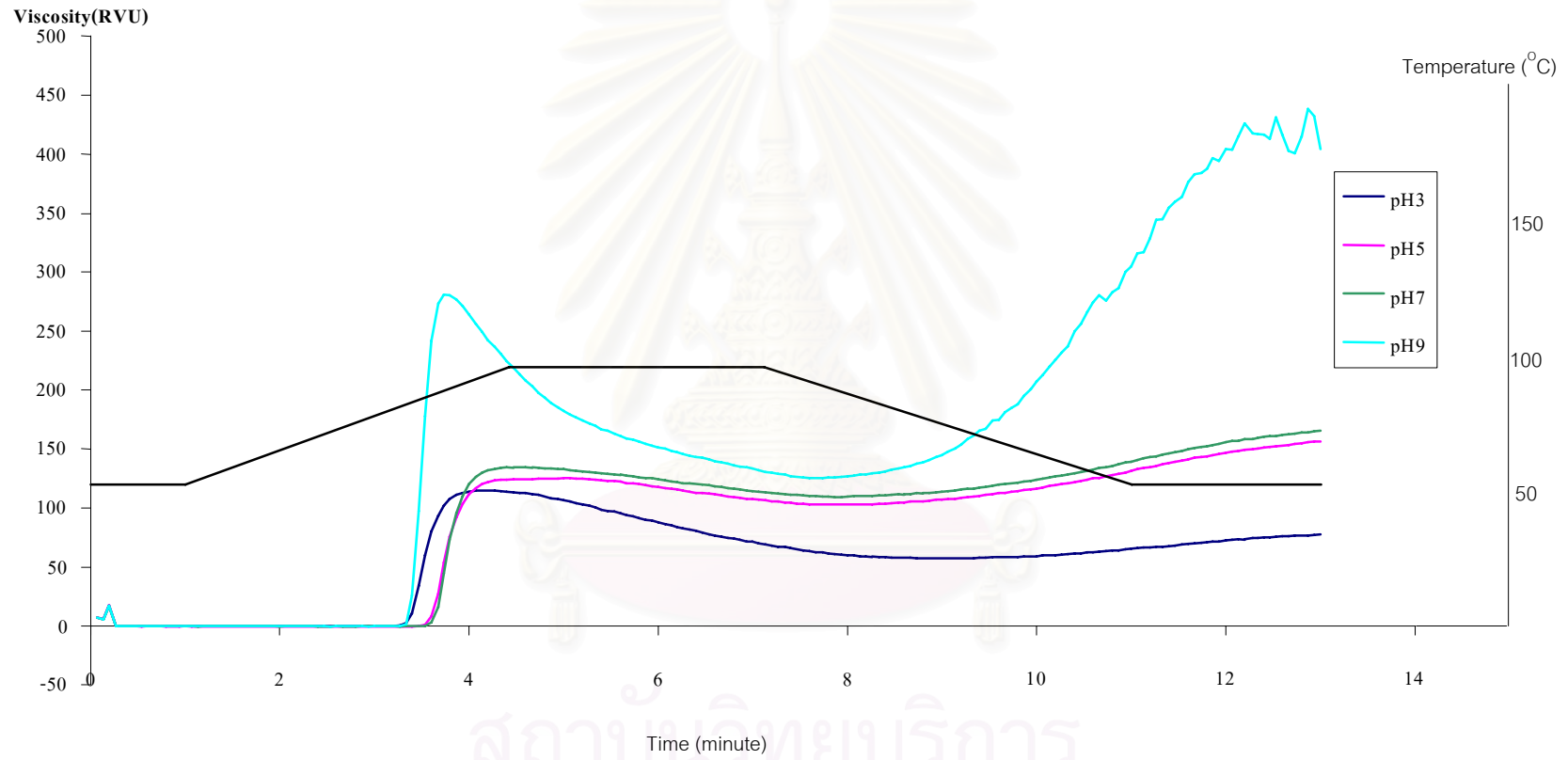


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาคูดไทย และสาคูดจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ (pH 7)

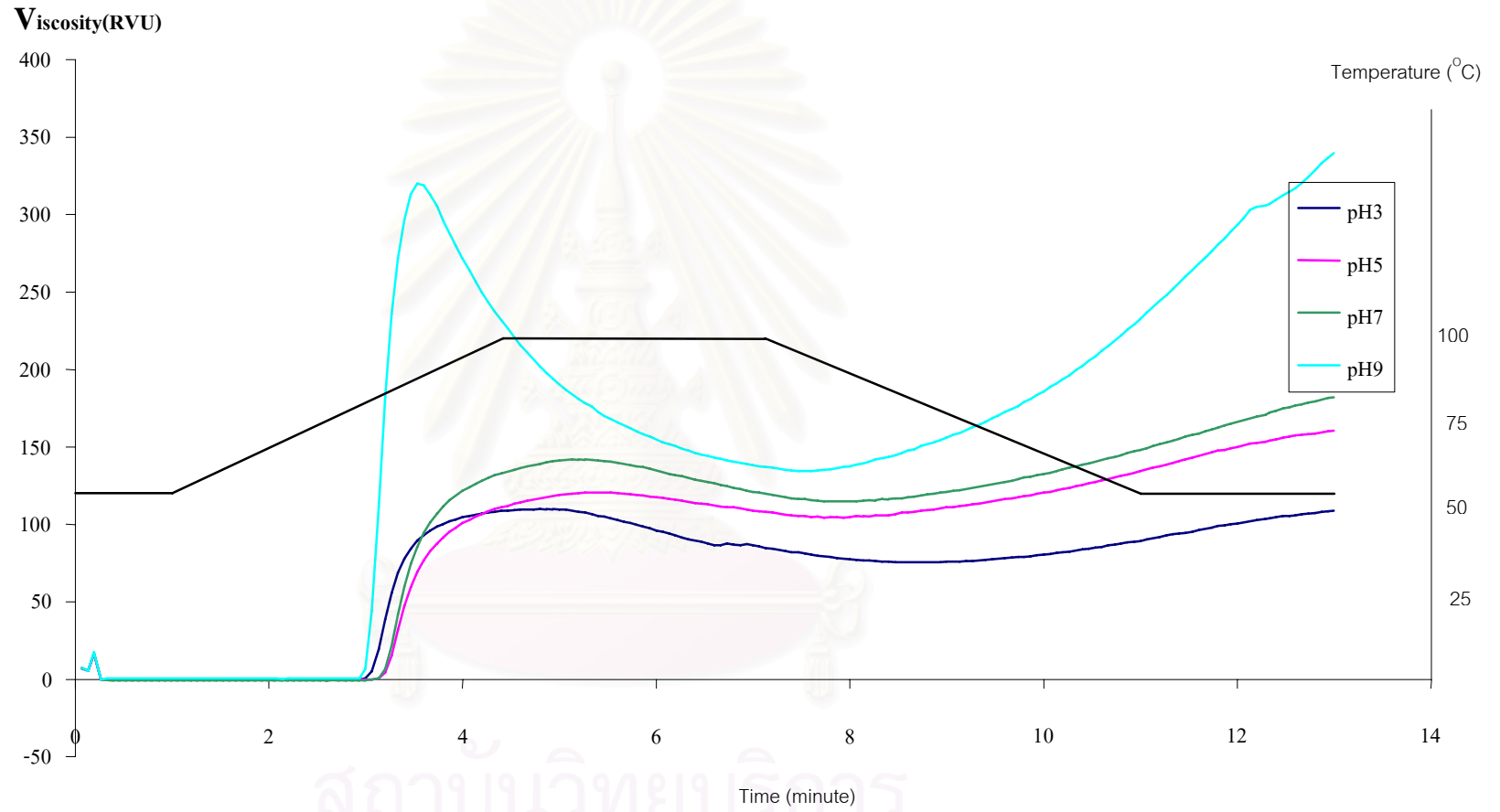
4.1.4.4 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชสาคู

กระบวนการผลิตอาหารที่มีการใช้สตาร์ช อาจมีการปรับ pH ให้เหมาะสมตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นจึงศึกษาผลของ pH ต่อเสถียรภาพด้านความหนืดของสตาร์ช โดยทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle ของสตาร์ช ที่ความเข้มข้น 6% และ pH ต่างๆ

จากการศึกษาผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของสาคูทั้งสองชนิด โดยเลือกศึกษาเฉพาะสตาร์ชที่ได้จากหัวสาคูที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน เนื่องจากอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคูในแต่ละชนิด พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ของสตาร์ชสาคูไทย และสาคูจีนเหมือนกัน (รูปที่ 4.6-4.7) โดยเมื่อ pH ต่ำกว่า pH 7 (pH ปกติของสตาร์ช) ค่า peak viscosity และ setback จะลดลง ที่ pH 7 และ pH 5 สตาร์ชมีค่า breakdown น้อยที่สุด (ตารางที่ 4.4-4.5) แสดงว่าสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงเค้นสูงสุด และมีค่า pasting temperature สูงสุด ส่วนที่ pH 3 ค่าความคงทนต่อแรงเค้นจะน้อยกว่าที่ pH 7 และ pH 5 เนื่องจากในสภาวะกรดที่รุนแรง เม็ดสตาร์ชจะถูกไฮโดรไลซ์ โดยเกิดการตัดพันธะ glycosidic ของโมเลกุลสตาร์ชทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออก โมเลกุลสตาร์ชเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ดังนั้นที่ pH 3 สตาร์ชจึงมีความคงทนต่อแรงเค้น และ pasting temperature ต่ำกว่าที่ pH 7 และ pH 5 (Doremus *et al.*, 1951) นอกจากนี้ในสภาวะกรด สายอะมิโลสบางส่วนจะถูก hydrolyse ทำให้สั้นลง การรวมตัวกันของอะมิโลสจึงเกิดได้ช้า และน้อยลง ค่า setback จึงลดลง ส่วนที่ pH 9 ค่าความหนืดของสตาร์ช และค่า setback จะสูงขึ้นมาก แต่ pasting temperature จะต่ำลง และความคงทนต่อแรงเค้นของเม็ดสตาร์ชจะต่ำมาก เนื่องจากในสภาวะด่าง จะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้สายของโมเลกุลสตาร์ชคลี่ออก เม็ดสตาร์ชจะมีการบวม และพองตัวมากขึ้น (Freeman and Verr, 1972; Schoch, 1985) แสดงว่าสตาร์ชสาคูทั้งสองชนิดนี้จะมีความไวต่อสภาวะความเป็นด่างมากกว่าในสภาวะกรดมาก ดังนั้นสตาร์ชสาคูทั้งสองชนิดจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มี pH อยู่ในช่วง 5-7 แต่ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มี pH สูง หรือต่ำกว่านี้มาก



รูปที่ 4.6 ผลของ pH ต่อค่าความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาคุไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6



รูปที่ 4.7 ผลของ pH ต่อค่าความหนืดกับเวลาของสตาร์ชสาคูลินที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6

ตารางที่ 4.4 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुไทยความเข้มข้น 6%

Condition	Peak(RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
pH 3	114.88 ± 1.12a	56.96 ± 0.88a	57.92 ± 2.00b	77.63 ± 0.99a	20.67 ± 0.12a	77.58 ± 0.45a
pH 5	125.21 ± 0.18b	102.71 ± 0.18b	22.50 ± 0.35a	156.34 ± 0.23b	53.63 ± 0.42b	79.53 ± 0.38b
pH 7	134.46 ± 2.29c	109.34 ± 1.88c	25.13 ± 0.41a	165.25 ± 1.17c	55.92 ± 0.70b	80.25 ± 0.63b
pH 9	281.17 ± 0.94d	125.50 ± 1.52d	155.67 ± 2.47c	404.34 ± 3.90d	278.83 ± 2.37c	77.53 ± 0.03a

a, b, c, d ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ pH ต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

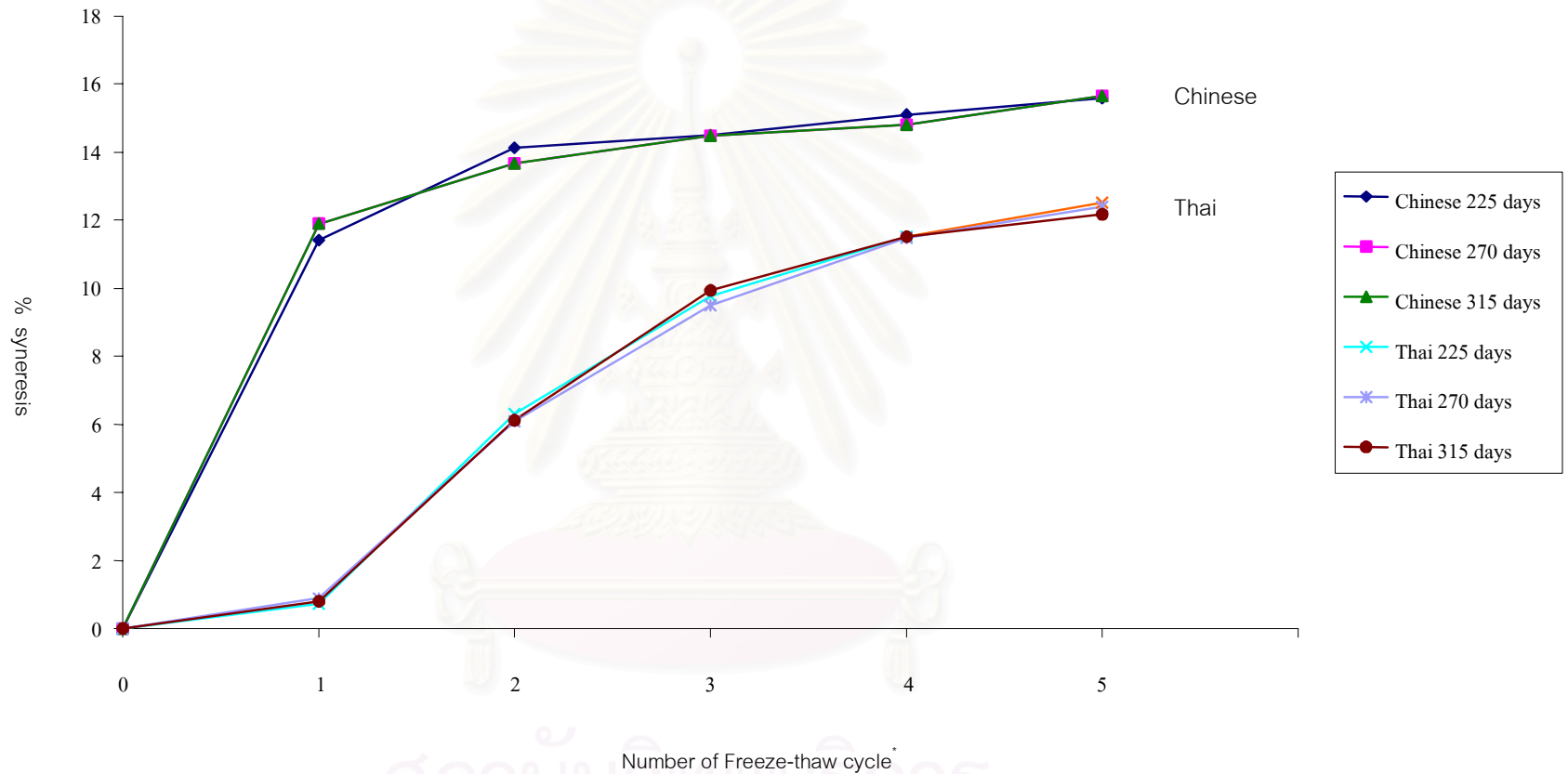
ตารางที่ 4.5 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจีนความเข้มข้น 6%

Condition	Peak(RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
pH 3	109.96 ± 0.29a	75.54 ± 0.41a	34.42 ± 0.12c	108.83 ± 0.70a	33.29 ± 0.29a	73.58 ± 0.03a
pH 5	120.42 ± 0.82b	104.04 ± 1.00b	16.38 ± 0.17a	160.71 ± 1.11b	56.67 ± 0.12b	75.08 ± 0.03b
pH 7	141.96 ± 0.88c	114.71 ± 1.71c	27.25 ± 0.82b	182.21 ± 1.23c	67.50 ± 2.94c	75.05 ± 0.00b
pH 9	308.13 ± 0.06d	130.04 ± 0.05d	178.08 ± 0.00d	311.38 ± 0.41d	181.34 ± 0.47d	73.83 ± 0.60a

a, b, c, d ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ pH ต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.1.4.5 เสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชสาคุ

จากการศึกษาเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง โดยวัดปริมาณ น้ำที่แยกออกจากเจล ที่ความเข้มข้น 6% หลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge หรือค่า %syneresis พบว่าชนิดของสาคุเท่านั้นที่มีผลต่อค่าเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง (ตารางที่ ข.8, ภาคผนวก ข.) โดยเจลสตาร์ชสาคุไทยมีน้ำแยกออกมามากในรอบที่สองของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง ส่วนเจลสตาร์ชสาคุจีนมีน้ำที่แยกตัวออกจากเจลหลังจากการปั่นเหวี่ยงในรอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง (ตารางที่ ค.3, ภาคผนวก ค.; รูปที่ 4.8) และในรอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง โครงสร้างของเจลสตาร์ชสาคุทั้งสองชนิดจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างคล้าย ฟองน้ำ ซึ่งสามารถดูดน้ำกลับได้หลังจากทิ้งไว้ การเกิดโครงสร้างคล้ายฟองน้ำของเจลสตาร์ชสาคุทั้งสองชนิด แสดงว่าสตาร์ชสาคุทั้งสองชนิดนี้มีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำ ไม่เหมาะ ในการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้การที่สตาร์ชสาคุมีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำ แสดงว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี (Varavinit *et al.*, 2002) เนื่องจาก สตาร์ชสาคุทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณอะไมโลสสูง (Doremus *et al.*, 1951) อย่างไรก็ตามผลจากการ วิเคราะห์ด้วย RVA จะเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจะต้องใช้เวลานาน แต่การวิเคราะห์ด้วย RVA ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นจนอาจไม่เพียงพอที่จะแสดงผลการเกิดกรีโทร เกรเดชันของสตาร์ช (Haasse *et al.*, 1995) ดังนั้นสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนที่ได้ก็นำไปใช้ใน ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการเกิดรีโทรเกรเดชัน เช่น วุ้นเส้น ก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับ สตาร์ชชนิดอื่นพบว่า สตาร์ชสาคุทั้งสองชนิดนี้มีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำกว่า สตาร์ชทำายายม่อม และสตาร์ชข้าวเจ้า เนื่องจากสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างเป็นโครงสร้างฟองน้ำตั้งแต่วงแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง ในขณะที่สตาร์ช ทำายายม่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นโครงสร้างฟองน้ำในรอบที่สามของการแช่แข็ง-การ ละลายน้ำแข็ง (ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์, 2546) ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น ฟองน้ำ (Varavinit *et al.*, 2002)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชจากข้าวไทย และสตาร์ชจากข้าวญี่ปุ่น ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

* 1 freeze-thaw cycle คือ แช่แข็งที่ -18°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2 การศึกษาผลของการตัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของ สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน

จากข้อ 4.1 พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ดังนั้นจึงสกัดสตาร์ชจากหัวสาकुไทย และสาकुจีนในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 (lot2) ที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน แล้วนำไปตัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ และปฏิบัติการเชื่อมขวาง

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีนในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 (lot2) ที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน พบว่าชนิดสาकु ฤดูการเพาะปลูก และปัจจัยร่วมระหว่างชนิดสาकु และฤดูการเพาะปลูกมีผลต่อปริมาณความชื้น โปรตีน เถ้า อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเฉพาะฤดูการเพาะปลูกเท่านั้นที่มีผลต่อปริมาณเส้นใย และคาร์โบไฮเดรต แต่ทั้งชนิดสาकु ฤดูการเพาะปลูกไม่มีผลต่อปริมาณไขมัน (ตารางที่ ข.9, ภาคผนวก ข.) โดยหัวสาकुไทยในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 มีปริมาณโปรตีน และเถ้า น้อยกว่าในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 (ตารางที่ 4.6) แต่คาร์โบไฮเดรต ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 มากกว่าในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 ในขณะที่หัวสาकुจีนมีปริมาณเถ้า เส้นใยในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 น้อยกว่าในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 แต่มีปริมาณความชื้น โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 มากกว่าในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพาะปลูกทำโดยการปล่อยทิ้งไว้ในธรรมชาติ ซึ่งสภาพภูมิอากาศมีความแตกต่างกันในแต่ละปี

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของหัวสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)			
	สาकुไทยที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่		สาकुจีนที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่	
	1	2	1	2
ความชื้น (wb)	69.06 ± 0.64Aa	69.24 ± 0.50Aa	79.41 ± 1.14Ab	82.58 ± 0.56Bb
โปรตีน (db)	4.43 ± 0.07Bb	3.15 ± 0.01Aa	3.55 ± 0.02Aa	3.72 ± 0.01Bb
ไขมัน (db) ^{ns}	0.27 ± 0.05	0.28 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.25 ± 0.01
เถ้า (db)	4.64 ± 0.13Ba	3.72 ± 0.08Aa	5.35 ± 0.20Bb	3.91 ± 0.12Ab
เส้นใย (db)	2.19 ± 0.24Aa	2.02 ± 0.01Aa	2.47 ± 0.15Ba	1.80 ± 0.08Aa
คาร์โบไฮเดรต (db)	88.47 ± 0.32Aa	89.95 ± 0.15Ba	88.31 ± 0.25Aa	90.06 ± 0.29Ba

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2 ของแต่ละชนิดสาकुมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของสาकुไทย และสาकुจีน ในแต่ละฤดูการเพาะปลูกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดที่ได้จากหัวสาकुไทย และสาकुจีนในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 2 (lot2) ที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน พบว่าชนิดสาकु ฤดูการเพาะปลูก และปัจจัยร่วมระหว่างชนิดสาकुและฤดูการเพาะปลูกมีผลต่อปริมาณความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เฉพาะชนิดสาकु และฤดูการเพาะปลูกมีผลต่อปริมาณโปรตีน เฉพาะฤดูการเพาะปลูกเท่านั้นที่มีผลต่อปริมาณเถ้า และเส้นใย โดยสตาร์ชสาकुไทยใน lot 2 จะมีโปรตีนสูงกว่าใน lot 1 (ตารางที่ 4.7) แต่ปริมาณความชื้น เส้นใย และเถ้า ใน lot 2 ต่ำกว่าใน lot 1 ในขณะที่สตาร์ชสาकुจีนมีปริมาณความชื้น และเส้นใยใน lot 2 ต่ำกว่าใน lot 1 ซึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้นที่แตกต่างกัน และเฉพาะชนิดสาकुเท่านั้นที่มีผลต่อปริมาณอะไมโลส และฟอสฟอรัส (ตารางที่ ข.10, ภาคผนวก ข.) โดยสตาร์ชสาकुไทยมีปริมาณอะไมโลส และฟอสฟอรัสน้อยกว่าสตาร์ชสาकुจีน

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว 225 วัน
ในฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในสตาร์ชสาकु (%)			
	สาकुไทยที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่		สาकुจีนที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่	
	1	2	1	2
ความชื้น (wb)	11.66 ± 0.07Ba	10.73 ± 0.08Aa	14.35 ± 0.10Bb	13.69 ± 0.05Ab
โปรตีน (db)	0.03 ± 0.01Aa	0.05 ± 0.00Ba	0.07 ± 0.01Ab	0.09 ± 0.01Ab
ไขมัน (db) ^{ns}	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.00
เส้นใย (db)	0.30 ± 0.05Ba	0.00 ± 0.00Aa	0.33 ± 0.01Ba	0.00 ± 0.00Aa
เถ้า (db)	0.16 ± 0.01Ba	0.12 ± 0.00Aa	0.15 ± 0.01Aa	0.14 ± 0.00Aa
- ฟอสฟอรัส	0.0289 ± 0.0005Aa	0.0284 ± 0.0001Aa	0.0569 ± 0.0011Ab	0.0581 ± 0.0003Ab
คาร์โบไฮเดรต (db) ^{ns}	99.37 ± 0.28	99.71 ± 0.12	99.32 ± 0.11	99.64 ± 0.25
- สตาร์ช (db) ^{ns}	97.66 ± 1.43	96.21 ± 1.47	97.78 ± 1.66	97.20 ± 1.37
- อะไมโลส (db)	38.45 ± 0.49Aa	38.45 ± 0.16Aa	52.85 ± 0.47Ab	53.18 ± 0.66Ab

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ฤดูการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2 ของแต่ละชนิดสาकुมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของสาकुไทย และสาकुจีน ในแต่ละฤดูการเพาะปลูกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

จากผลของการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (STPP) เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.11, ภาคผนวก ข.) โดยปัจจัยเหล่านี้ต่างส่งผลให้ปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชดัดแปรเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.8 - 4.9) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ STPP จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชมากกว่าการเพิ่มของเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งระดับฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาการแทนที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร และสตาร์ชสาकुจีนดัดแปร พบว่าสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้นมากกว่าสตาร์ชสาकुจีนดัดแปร แสดงว่าสตาร์ชสาकुไทยเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชสาकुไทยมีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชสาकुจีน จึงมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ประกอบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรสูง (130°C) จึงทำให้สตาร์ชสาकुไทยเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่มีปริมาณฟอสเฟตตกค้างที่คำนวณในรูปฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.4% ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP
ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	% Phosphorus (g / 100 g dry starch)	% Phosphorus (db) ที่เพิ่มขึ้น* (g / 100 g dry starch)	D.S. x 10 ²
2%	1 ชั่วโมง	0.0916 ± 0.0001Aa	0.0632Aa	0.34
4%		0.2113 ± 0.0004Ba	0.1829Ba	1.02
6%		0.3036 ± 0.0004Ca	0.2752Ca	1.58
2%	2 ชั่วโมง	0.0940 ± 0.0004Ab	0.0656Ab	0.35
4%		0.2301 ± 0.0003Bb	0.2017Bb	1.13
6%		0.3221 ± 0.0002Cb	0.2937Cb	1.70
2%	3 ชั่วโมง	0.1450 ± 0.0001Ac	0.1166Ac	0.63
4%		0.2371 ± 0.0001Bc	0.2087Bc	1.17
6%		0.3249 ± 0.0004Cc	0.2965Cc	1.72
สตาร์ชธรรมชาติ		0.0284 ± 0.0001	-	-

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* %P(db) ที่เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชธรรมชาติ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาคุจินัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP

ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิบัติการ	%Phosphorus (db) (g / 100 g dry starch)	% Phosphorus (db) ที่เพิ่มขึ้น* (g / 100 g dry starch)	D.S. x 10 ²
2%	1 ชั่วโมง	0.0978 ± 0.0003Aa	0.0397Aa	0.21
4%		0.1316 ± 0.000Ba	0.0735Ab	0.39
6%		0.1795 ± 0.0001Ca	0.1214Ac	0.66
2%	2 ชั่วโมง	0.0984 ± 0.0001Ab	0.0403Ba	0.21
4%		0.1323 ± 0.0003Bb	0.0742Bb	0.40
6%		0.1802 ± 0.0001Cb	0.1221Bc	0.66
2%	3 ชั่วโมง	0.0995 ± 0.0001Ac	0.0414Ca	0.22
4%		0.1326 ± 0.0000Bb	0.0745Bb	0.40
6%		0.1805 ± 0.0001Cb	0.1224Bc	0.67
สตาร์ชธรรมชาติ		0.0581 ± 0.0003	-	-

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิบัติการ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิบัติการต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* %P(db) ที่เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

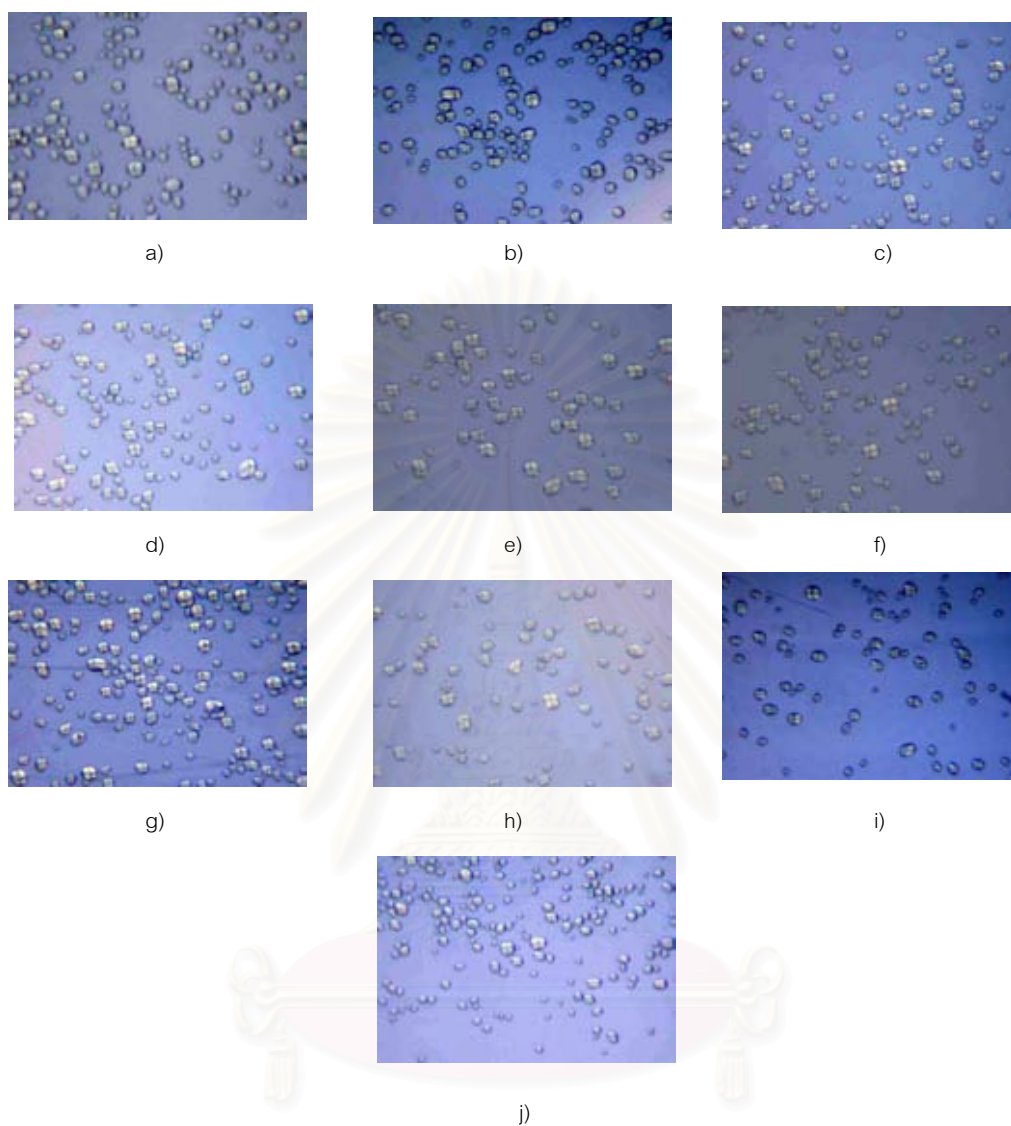
4.2.4 สมบัติทางกายภาพของสตาโรซซาโคไทย และสาโคจันดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่

4.2.4.1 รูปร่าง ขนาด และ birefringence ของเม็ดสตาโรซซาโคไทย และสาโคจันดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่

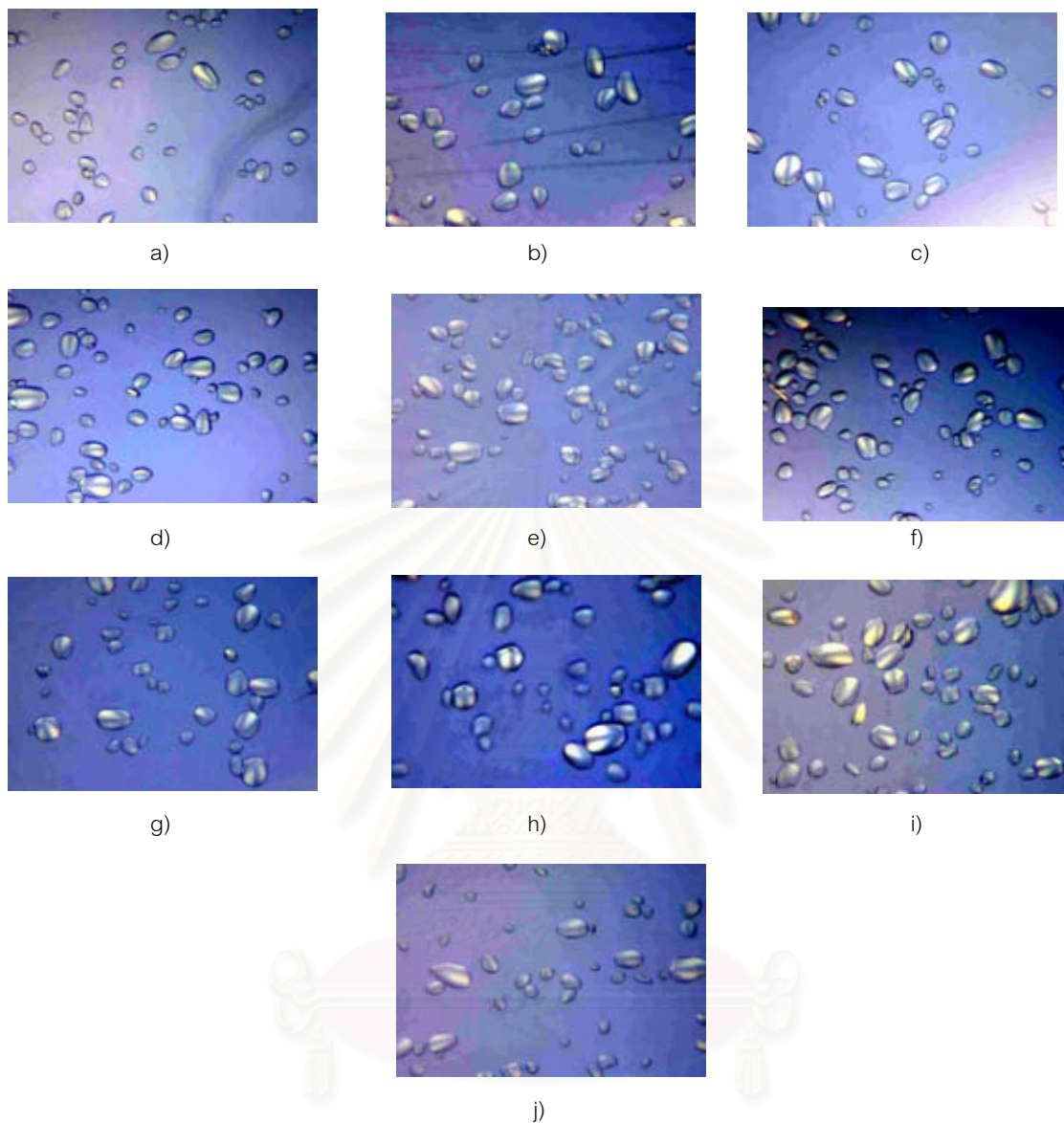
จากการศึกษารูปร่างของสตาโรซซาโคไทย และสาโคจันดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ (รูปที่ 4.9 - 4.10) พบว่าเม็ดสตาโรซซาโคไทยดัดแปร มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-25 μm . มี birefringence ชัดเจน ตำแหน่งไฮลัมอยู่ตรงกลางของเม็ดสตาโรซซาโค ส่วนสตาโรซซาโคจันดัดแปร มีลักษณะกลมรี ขนาดประมาณ 20-80 μm . มี birefringence ชัดเจน ตำแหน่งไฮลัมอยู่ค่อนข้างไปทางปลายของเม็ดสตาโรซซาโค และจากการศึกษารูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาโรซซาโคโดยใช้กล้อง SEM พบว่าเม็ดสตาโรซซาโคดัดแปรทั้งสองชนิดมีพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก และไม่มีรูพรุนในเม็ดสตาโรซซาโค เช่นเดียวกับสตาโรซซาโคธรรมชาติ (รูปที่ 4.11) แสดงว่าสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรไม่รุนแรงจนทำให้สตาโรซซาโคดัดแปรทั้งสองชนิดเกิดความเสียหาย

4.2.4.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาโรซซาโคไทย และสาโคจันดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่

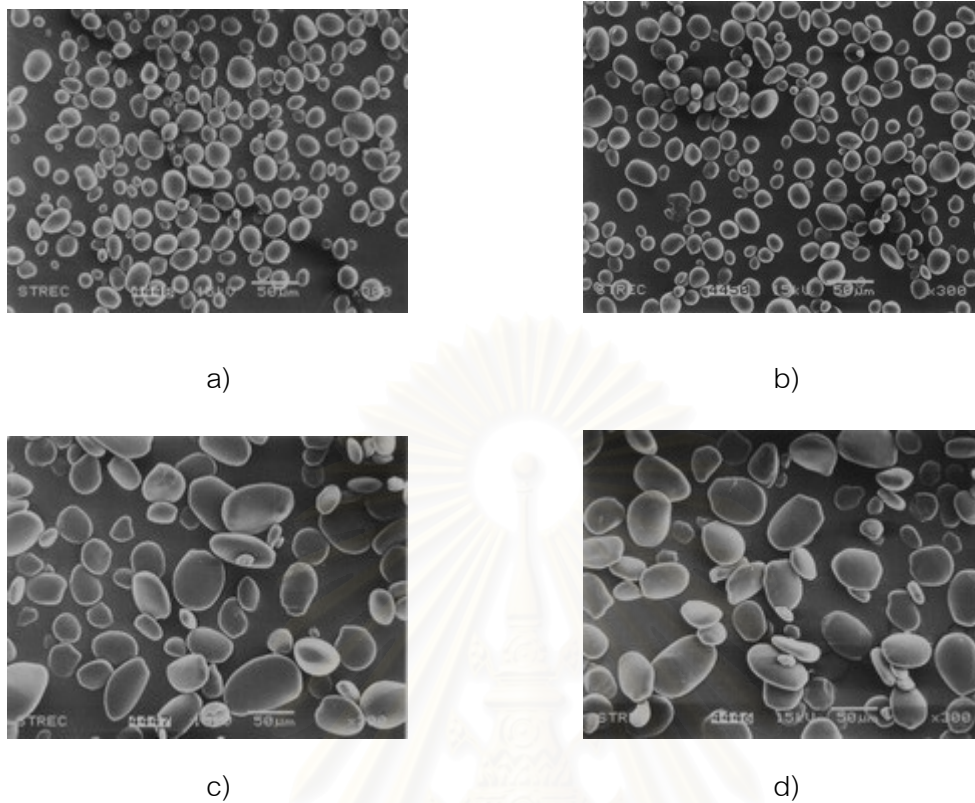
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาโรซซาโคไทย และสาโคจันดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ เปรียบเทียบกับสตาโรซซาโคธรรมชาติ โดยใช้ wide angle X-ray diffraction (รูปที่ 4.12) พบว่ามี peak ที่มุมหักเห 5.6, 17 และ 17.9 $^{\circ}$ แสดงว่าสตาโรซซาโคไทยดัดแปร มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งแตกต่างจากสตาโรซซาโคธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C (มี peak ที่มุมหักเห 17 และ 17.9 $^{\circ}$) ส่วนสตาโรซซาโคจันดัดแปร มี peak ที่มุมหักเห 5.6 และ 17 $^{\circ}$ แสดงว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เหมือนสตาโรซซาโคธรรมชาติ (Hoseney, 1994) โครงสร้างผลึกแบบ C เป็นการเรียงตัวผสมกันระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B ในเม็ดสตาโรซซาโคเดียวกัน โดยโครงสร้างผลึกแบบ B จะอยู่ที่ตำแหน่งไฮลัม (hilum) ซึ่งเป็นส่วนที่พันธะมีความอ่อนแอ จึงถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายในสภาวะที่มีความเป็นกรดอ่อน หรือด่างอ่อน ดังนั้นเมื่อสภาวะการดัดแปรที่ใช้เป็นกรดอ่อน (pH 6) พันธะบริเวณนี้จึงถูกไฮโดรไลซ์ ทำให้ส่วนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B หายไป ส่วนโครงสร้างผลึกแบบ A ที่อยู่ในบริเวณรอบๆไฮลัม มีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณไฮลัม จึงไม่ถูกไฮโดรไลซ์ในระหว่างกระบวนการดัดแปร (McPherson and Jane, 1999) สำหรับสตาโรซซาโคจันดัดแปร แม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก แต่จำนวนผลึกน่าจะมีปริมาณที่น้อยลง โดยเฉพาะผลึกบริเวณไฮลัม เนื่องจากเป็นส่วนที่มีความอ่อนแอ ซึ่งน่าจะถูกไฮโดรไลซ์ไปในระหว่างกระบวนการดัดแปรเช่นเดียวกับสตาโรซซาโคไทย



รูปที่ 4.9 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชจากข้าวไทยธรรมชาติ และที่ดัดแปร ด้วยปฏิบัติการแทนที่ ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ (กำลังขยาย 50 เท่า) a) 2%, 1hr; b) 2%, 2hr; c) 2%, 3hr; d) 4%, 1hr; e) 4%, 2hr; f) 4%, 3hr; g) 6%, 1hr; h) 6%, 2hr; i) 6%, 3hr; j) สตาร์ชธรรมชาติ

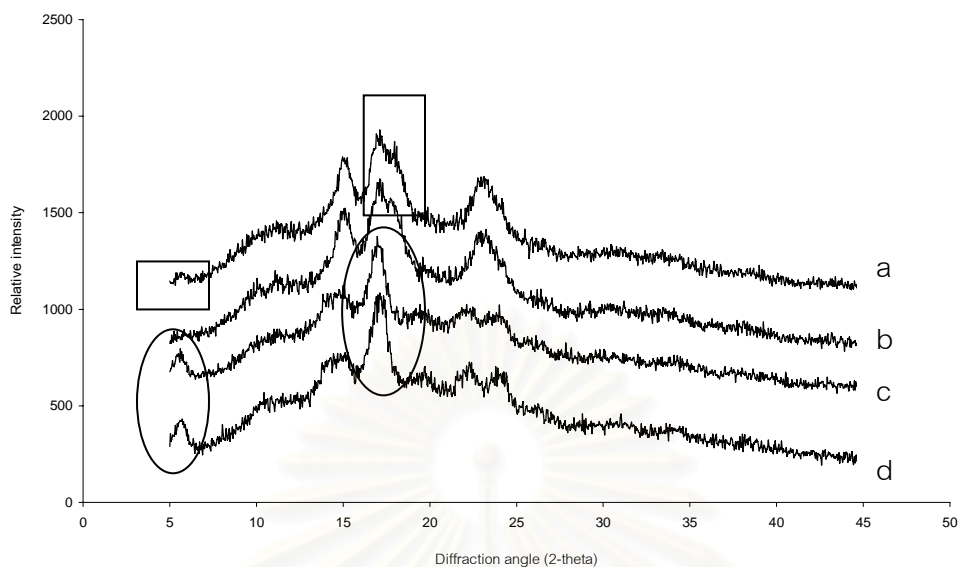


รูปที่ 4.10 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुจินธรรมชาติ และที่ดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ (กำลังขยาย 50 เท่า) a) 2%, 1hr ; b) 2%, 2hr; c) 2%, 3hr; d) 4%, 1hr; e) 4%, 2hr; f) 4%, 3hr; g) 6%, 1hr; h) 6%, 2hr; i) 6%, 3hr; j) สตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.11 รูปร่าง พื้นผิว และขนาดของเม็ดสตาร์จาก SEM micrograph (กำลังขยาย 300 เท่า)
 a) สตาร์ชสาकुไทยธรรมชาติ, b) สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ ที่ 6%, 3hr.,
 c) สตาร์ชสาकुจีนธรรมชาติ, d) สตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ ที่ 6%, 3hr.

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 X-ray diffraction pattern สตาร์ชสาकुธรรมชาติ และสาकुดัดแปร

- a) สตาร์ชสาकुไทยธรรมชาติ, b) สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่,
c) สตาร์ชสาकुจีนธรรมชาติ, d) สตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่

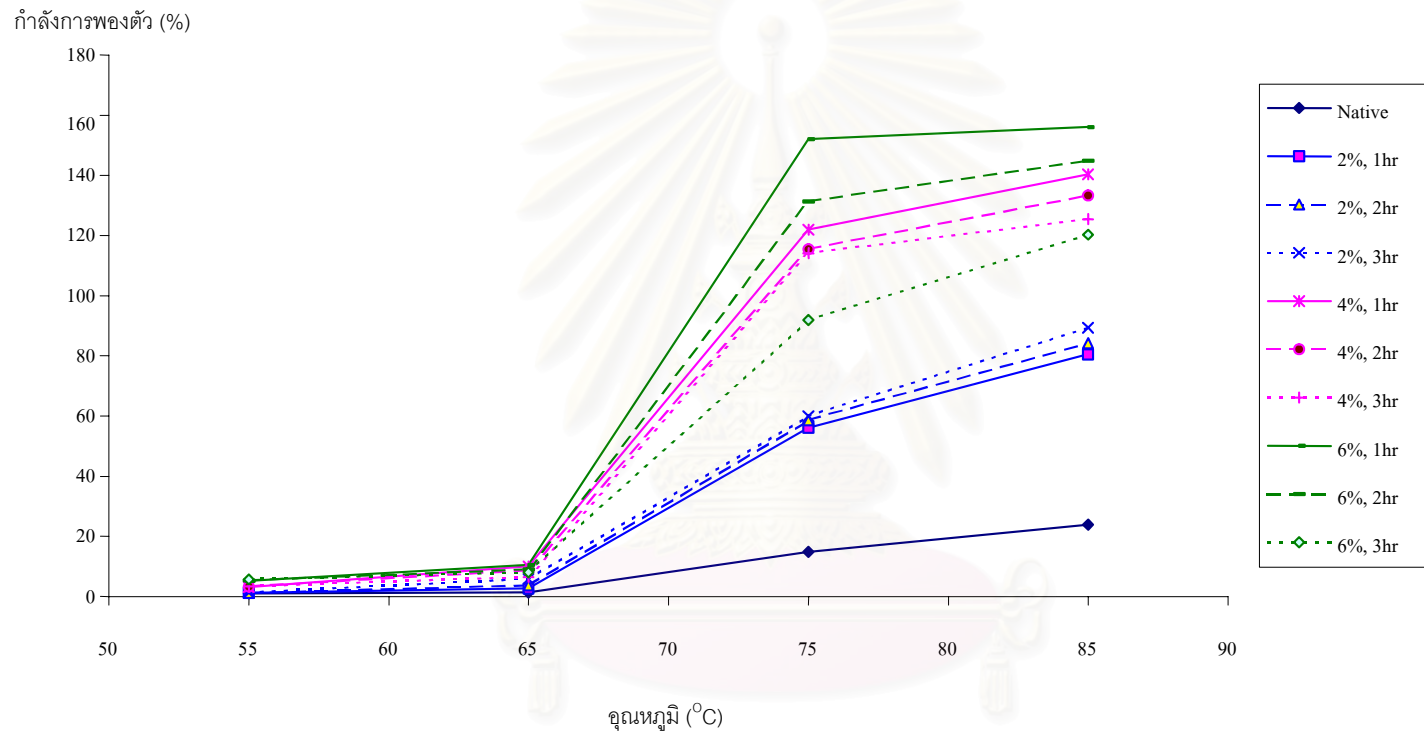
4.2.4.3 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัว และค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ พบว่าความเข้มข้นของ STPP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่ากำลังการพองตัวและการละลายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข. 12 - ข.15, ภาคผนวก ข.) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่ 55-85 °C เป็นแบบ polynomial กำลัง 2 (สมการกำลังสอง) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ในช่วง 0.79 - 0.93 และ 0.82 - 0.91 ตามลำดับ (ตารางที่ ง.1, ภาคผนวก ง.) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่าร้อยละการละลายที่ 55-85 °C ของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ก็เป็นแบบเดียวกัน โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.86 - 0.56 และ 0.74 - 0.84 ตามลำดับ (ตารางที่ ง.2, ภาคผนวก ง.) สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ มีค่ากำลังการพองตัว และการละลายสูงขึ้น เมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ พบว่าสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรมีค่ากำลังการพองตัว และการละลายสูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ (รูปที่ 4.13-4.16) ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชเมื่อผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ หมู่ฟอสเฟตจะเข้าไป

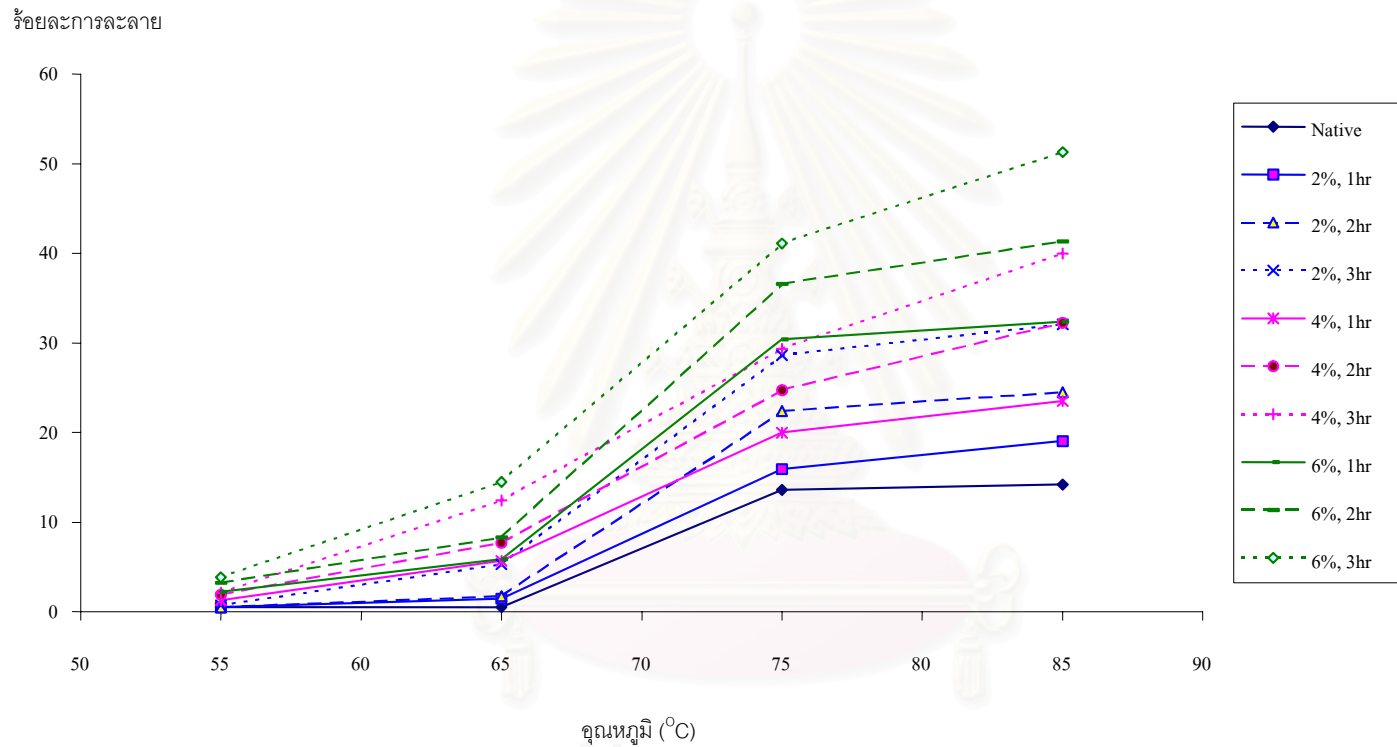
แทนที่ไฮโดรเจนอะตอม ทำให้เม็ดสตาร์ชมีประจุลบ จึงสามารถดูดน้ำ และเกิดการพองตัวได้ดี (Wurzburg, 1986) อย่างไรก็ตามสาคุไทยที่ดัดแปรด้วย 4% STPP นาน 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง และ 6% STPP นาน 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง และสตาร์ชสาคุจีนที่ได้ดัดแปรด้วย 6% STPP นาน 3 ชั่วโมง จะมีกำลังการพองตัวลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากภาวะการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางร่วมกับปฏิกิริยาการแทนที่ในอัตราส่วนที่มากขึ้น สตาร์ชดัดแปรที่ได้จึงแสดงสมบัติร่วมระหว่างปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Muhammad *et al.*, 1999)



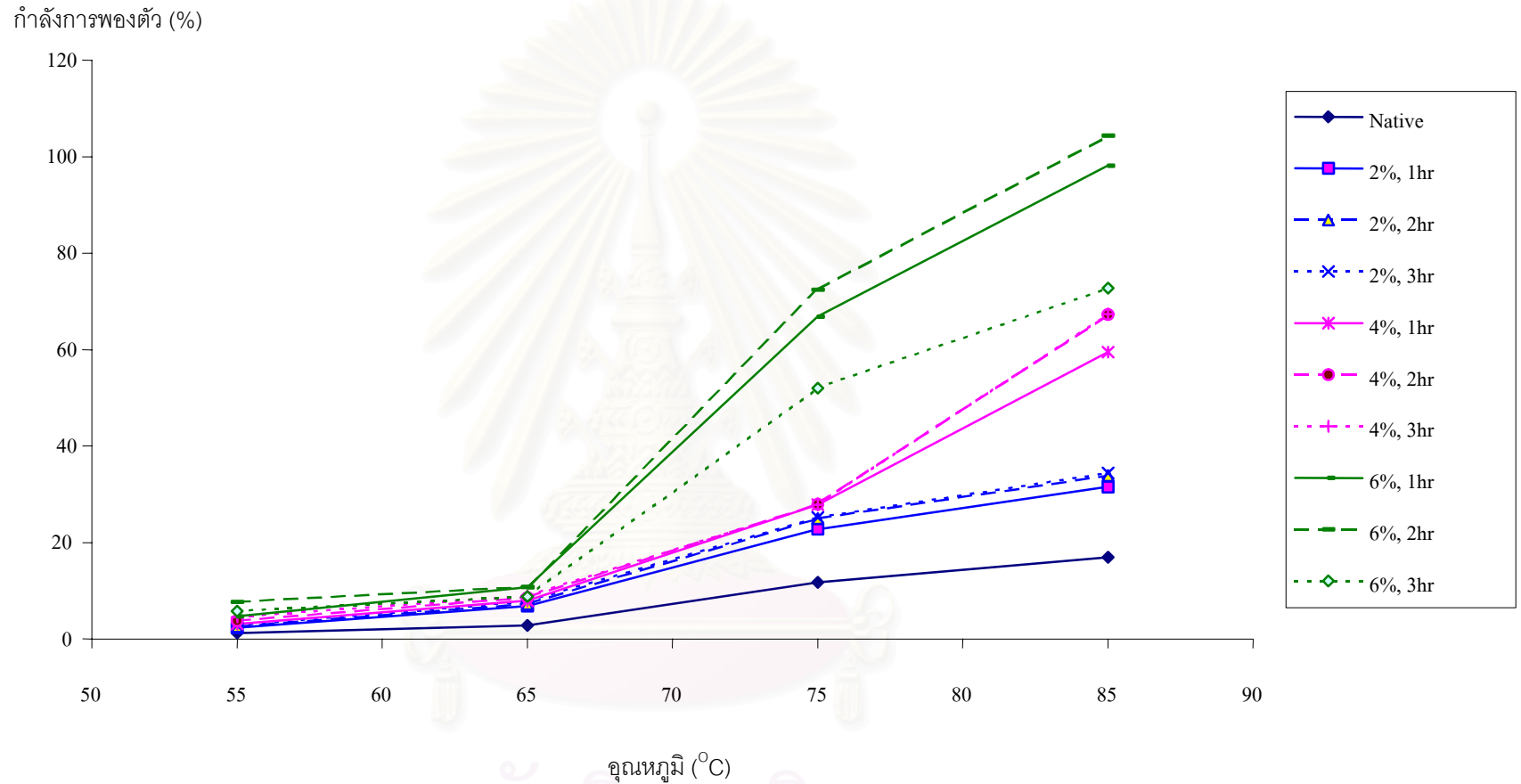
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



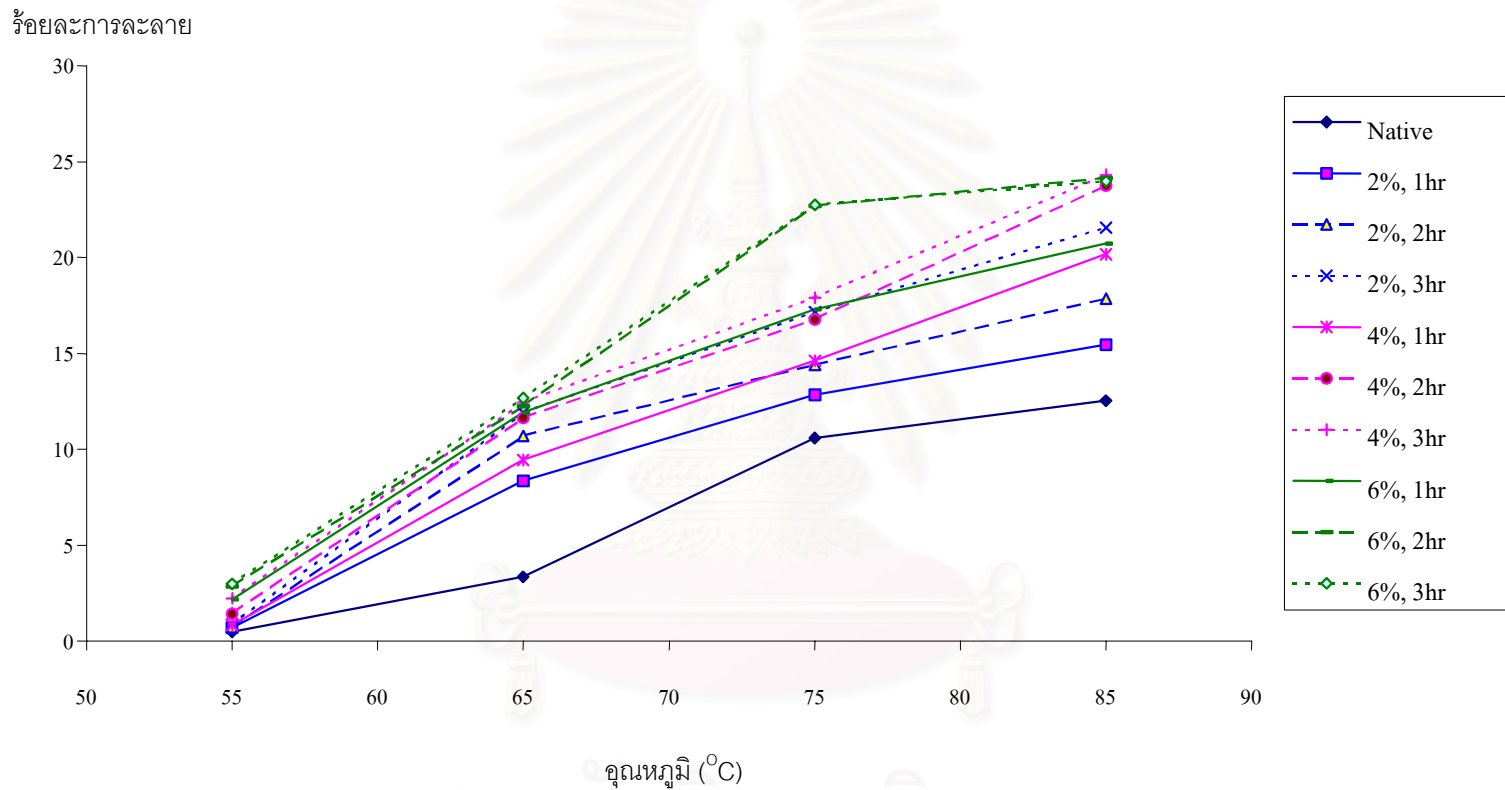
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคูลินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชสาคู้จินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

4.2.4.4 เสถียรภาพของแป้งเปียกต่อความร้อน และแรงเฉือนสตราซสาคุไทย และสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle ของ สตราซสาคุไทย และสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ ที่ความเข้มข้น 6% และ pH 7 พบว่า ความเข้มข้นของ STPP มีผลต่อค่า pasting temperature อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.16-ข.17, ภาคผนวก ข.) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า pasting temperature ของสตราซสาคุไทย และสาคุจินดัดแปร พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบ polynomial กำลัง 2 โดยมีค่า R^2 เป็น 0.98 และ 0.72 ตามลำดับ (ตารางที่ ง.3, ภาคผนวก ง.) สตราซสาคุไทย และสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ มีค่า pasting temperature ลดลง เมื่อระดับการแทนที่ เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.10-4.11) ทั้งนี้เนื่องจากสตราซซที่เกิดปฏิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟตจะมีประจุลบ สามารถจับน้ำได้ดีขึ้น การพองตัวเพิ่มขึ้น จึงต้องการพลังงานในการเกิดเจลาติโนเซชันต่ำลง ดังนั้นค่า pasting temperature ของสตราซซจึงต่ำลง สตราซซที่มีระดับการแทนที่มากจะเริ่มเกิดปฏิริยากับน้ำได้เร็วกว่าสตราซซที่มีระดับการแทนที่น้อย pasting temperature ของสตราซซจึงลดลงมากกว่า (Wootton and Manatsathit, 1984) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิริยามีผลต่อค่า peak viscosity, ค่า breakdown และค่า setback ของสตราซสาคุไทย และสาคุจินดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.16-ข.17, ภาคผนวก ข.) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ของสตราซสาคุไทยเป็นแบบ polynomial กำลัง 2 เช่นเดียวกัน โดยมีค่า R^2 ของค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown เป็น 0.91 ส่วนค่าระดับการแทนที่กับค่า peak viscosity และค่าระดับการแทนที่กับค่า setback ของสตราซสาคุไทยและสาคุจิน และค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ของสตราซสาคุจิน ไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กัน (ตารางที่ ง.3, ภาคผนวก ง.) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการดัดแปรที่เกิดขึ้นมีปฏิริยาเกิดร่วมกัน 2 ปฏิริยาได้แก่ ปฏิริยาการแทนที่ และปฏิริยาเชื่อมขวาง ซึ่งทั้งสองปฏิริยานี้ให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ปฏิริยาการแทนที่จะเพิ่ม peak viscosity และ breakdown ของสตราซซ ในขณะที่ปฏิริยาเชื่อมขวาง จะลด peak viscosity และ breakdown ของสตราซซ จึงทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า peak viscosity ระดับการแทนที่กับค่า breakdown และระดับการแทนที่กับค่า setback ได้ โดยสตราซสาคุไทย และสาคุจินที่ดัดแปรด้วยปฏิริยาการแทนที่ทุกสภาวะมีค่า peak viscosity, ค่า breakdown และค่า setback ลดลง ยกเว้นค่า breakdown ของสตราซสาคุจินดัดแปรที่เวลาในการทำปฏิริยา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิริยาการแทนที่ไม่เกิดขึ้นเดี่ยวๆ แต่เกิดร่วมกับปฏิริยาเชื่อมขวาง (Wurzberg, 1986) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสมบัติของสตราซซดัดแปรคือ

pasting temperature ลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของสตาร์ชดัดแปรจากปฏิกิริยาการแทนที่ ค่า peak viscosity และค่า breakdown ลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของสตาร์ชดัดแปรจากปฏิกิริยาเชื่อมขวาง และค่า setback ลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของสตาร์ชดัดแปรจากปฏิกิริยาการแทนที่ และเชื่อมขวาง (Muhammad *et al.*, 1999) และเมื่อความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น สตาร์ชที่ได้จะแสดงสมบัติร่วมระหว่างปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากขึ้น (Muhammad *et al.*, 1999) โดยที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 2.5 และ 4 ชั่วโมง สตาร์ชดัดแปรที่ได้มีสมบัติคล้ายกับทางสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากข้าวไทย
ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา
1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH7

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1 ชั่วโมง	109.13 ± 0.64Cc	91.38 ± 0.18Cc	17.75 ± 0.27Ba	138.50 ± 2.59Bc	47.13 ± 2.76Bc	80.33 ± 0.60Ca
4%		98.59 ± 5.96Bc	82.21 ± 5.36Bc	16.38 ± 0.60Ba	120.71 ± 7.83Ac	38.50 ± 0.47Ac	79.18 ± 0.04Ba
6%		88.92 ± 0.47Ac	75.34 ± 0.59Ac	13.59 ± 0.12Aa	114.21 ± 2.18Ac	38.88 ± 0.59Ac	77.53 ± 0.04Aa
2%	2 ชั่วโมง	99.55 ± 0.88Cb	79.17 ± 0.83Bb	20.38 ± 0.06Cb	117.8 ± 0.88Bb	38.63 ± 0.06Bb	80.35 ± 0.71Ba
4%		73.75 ± 3.30Bb	57.13 ± 2.59Ab	16.63 ± 1.30Ba	81.92 ± 4.19Ab	24.79 ± 0.59Ab	78.73 ± 0.60Aa
6%		72.46 ± 2.30Ab	56.92 ± 2.01Ab	13.54 ± 0.30Aa	83.75 ± 3.77Ab	26.83 ± 1.77Ab	78.03 ± 0.74Aa
2%	3 ชั่วโมง	61.05 ± 1.59Ca	44.63 ± 1.12Ca	16.42 ± 0.47Ba	62.67 ± 2.00Ba	18.05 ± 0.88Ca	79.88 ± 0.04Ca
4%		51.46 ± 0.41Ba	35.33 ± 0.35Ba	16.13 ± 0.06Ba	49.63 ± 0.29Ab	14.29 ± 0.06Ba	79.20 ± 0.07Ba
6%		38.80 ± 0.18Aa	24.88 ± 0.18Aa	13.92 ± 0.00Aa	35.21 ± 0.21Aa	10.34 ± 0.13Aa	77.53 ± 0.04Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		134.83 ± 0.71	108.00 ± 0.24	26.84 ± 0.94	164.46 ± 0.76	55.46 ± 0.53	81.58 ± 0.04

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้น
ของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.11 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง RVA ของสตาร์ช
 สาคูลินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH7

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	134.84 ± 0.94Bb	104.25 ± 0.95Cb	30.58 ± 0.00Ac	151.59 ± 0.12Bb	47.34 ± 0.83Bb	72.58 ± 0.04Ba
4%		129.88 ± 6.30Bc	99.71 ± 2.18Bb	30.17 ± 4.12Ac	139.13 ± 6.19Ac	39.42 ± 0.41Ac	73.05 ± 0.64Bb
6%		121.79 ± 0.30Ac	91.59 ± 0.59Ab	30.21 ± 0.30Ac	138.88 ± 3.25Ac	47.30 ± 2.65Bb	71.43 ± 0.67Aa
2%	2	105.13 ± 6.26Aa	88.59 ± 3.66Aa	20.92 ± 1.18Ab	118.75 ± 9.19Aa	30.17 ± 5.54Aa	73.05 ± 0.64Ba
4%		106.17 ± 1.53Ab	85.25 ± 2.72Aa	16.54 ± 0.60Ab	114.80 ± 0.18Ab	29.54 ± 2.88Ab	73.03 ± 0.67Bb
6%		103.13 ± 0.64Ab	87.13 ± 1.48Ab	16.00 ± 0.12Ab	113.42 ± 2.12Ab	26.29 ± 0.65Aa	70.98 ± 0.18Aa
2%	3	102.96 ± 0.76Ca	86.04 ± 1.47Ca	16.92 ± 0.71Aa	117.38 ± 0.06Ca	31.33 ± 0.41Ba	72.60 ± 0.00Aa
4%		91.54 ± 1.71Ba	81.63 ± 1.00Ba	13.92 ± 0.47Aa	102.96 ± 0.18Ba	21.34 ± 0.83Aa	72.28 ± 0.53Aa
6%		86.75 ± 1.88Aa	72.84 ± 2.35Aa	9.92 ± 0.21Aa	97.46 ± 1.36Aa	24.63 ± 1.00Aa	72.68 ± 0.11Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		141.67 ± 0.59	119.42 ± 2.24	22.25 ± 1.65	174.71 ± 1.94	55.29 ± 0.30	75.70 ± 0.35

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้น
 ของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.4.5 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งเปียกสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

จากการศึกษาผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ ที่ความเข้มข้นน้ำแป้ง 6%, pH 3-9 โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะค่า breakdown ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพของความหนืดเท่านั้น พบว่าความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่า breakdown อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.18-ข.19, ภาคผนวก ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ของสตาร์ชสาकुไทยเป็นแบบ polynomial กำลัง 2 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.59 - 0.91 ส่วนสตาร์ชสาकुจินไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และค่า breakdown (ตารางที่ ง.4) ทั้งนี้เนื่องจากการดัดแปรที่เกิดขึ้นมีปฏิกิริยาเกิดร่วมกัน 2 ปฏิกิริยาได้แก่ ปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาเชื่อมขวาง และสตาร์ชสาकुไทยเกิดปฏิกิริยามากกว่าสตาร์ชสาकुจิน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากกว่าปฏิกิริยาการแทนที่ ทำให้สตาร์ชดัดแปรที่ได้มีสมบัติคล้ายสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรมีค่า breakdown ลดลงในทุก pH (ตารางที่ 4.12-4.13) แสดงว่าสตาร์ชดัดแปรมีเสถียรภาพของความหนืดเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่า breakdown ของสตาร์ชสาकुจินดัดแปรที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่ pH 5, 7, 9 ซึ่งสตาร์ชสาकुไทยจะมีเสถียรภาพของความหนืดมากที่สุด ที่ pH 5 และ pH 7 (ค่า breakdown น้อยที่สุด) ส่วนสตาร์ชสาकुจินดัดแปรมีเสถียรภาพของความหนืดมากที่สุดที่ pH 5 และสตาร์ชดัดแปรจะมีเสถียรภาพของความหนืดน้อยที่สุดที่ pH 9 ทั้งนี้เนื่องจากที่ pH สูง หรือต่ำเกินไปพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ชอาจถูกไฮโดรไลซ์ ทำให้สตาร์ชมีเสถียรภาพของความหนืดลดลง (Doremus *et al.*, 1951) โดยสตาร์ชสาकुไทยและสาकुจินดัดแปรมีความไวต่อสภาวะต่างมากกว่าสภาวะกรด และเมื่อดัดแปรสตาร์ชที่ความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น สตาร์ชดัดแปรที่ได้จะสามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรด หรือด่างได้ดีขึ้น แสดงว่าโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น อาจเกิดเนื่องจากสตาร์ชดัดแปรเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากขึ้น (Muhammad *et al.*, 1999)

ตารางที่ 4.12 ค่า Breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH3-9

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่า breakdown (RVU) ที่ pH ต่างๆ			
		3	5	7	9
2%	1	45.08±2.12Bb	15.38±0.29Aa	17.75±0.27Ba	110.75±0.11Cc
4%		41.17±3.77Bc	15.42±0.59Aa	16.38±0.60Ba	70.17 ±3.95Bc
6%		36.13±0.06Ac	14.13±0.64Aa	13.59±0.12Aa	40.13 ± 0.18Ac
2%	2	44.79±0.30Cb	16.09±0.23Aa	20.38±0.06Ca	96.96 ±4.42Cb
4%		32.00±0.24Bb	15.75±0.35Aa	16.63±1.30Ba	45.00 ±0.24Bb
6%		27.17±0.12Ab	14.63±0.29Ba	13.54±0.30Aa	29.00 ± 0.24Ab
2%	3	28.21±0.18Ca	15.84±0.47Ba	16.42±0.47Ba	48.79 ±1.00Ca
4%		24.13±0.29Ba	15.92±0.47Ba	16.13±0.06Ba	31.80 ±0.18Ba
6%		19.88±0.06Aa	13.59±0.12Aa	13.92±0.00Aa	21.33 ± 0.35Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		54.75 ± 0.00	17.46 ± 1.71	26.84 ± 0.94	146.75 ± 2.12

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.13 ค่า Breakdown ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง RVA ของสตาร์ชจากคิงดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH3-9

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่า breakdown (RVA) ที่ pH ต่างๆ			
		3	5	7	9
2%	1	26.34±0.59Ca	16.33±1.41Ba	30.58±0.00Ca	175.25±3.30Ca
4%		25.34±0.12Ca	15.17±0.60Ba	30.17±4.12Ca	186.25±6.60Cb
6%		27.30±0.18Cb	15.13±0.36Ba	30.21±0.30Ca	191.55±0.88Cb
2%	2	19.84±0.12Ba	7.54 ± 0.18Aa	20.92±1.18Bb	160.13±0.06Ba
4%		20.67±1.77Ba	9.63 ± 2.89Aa	16.54±0.60Ba	162.29±1.71Ba
6%		20.63±0.18Ba	8.84 ± 0.59Aa	16.00±0.12Ba	165.58±0.71Ba
2%	3	16.46±0.30Ab	7.63 ± 0.18Aa	16.92±0.71Ac	147.71±1.82Ac
4%		16.79±0.06Ab	7.17 ± 0.60Aa	13.92±0.47Ab	142.29±0.76Ab
6%		14.46±0.06Aa	9.13 ± 0.42Aa	9.92 ± 0.21Aa	137.21±0.18Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		32.42 ± 0.12	14.25 ± 0.24	22.25 ± 1.65	178.08 ± 0.00

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.4.6 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสากลุไทย และสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่วัดด้วย DSC ของสตาร์ชสากลุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ (ตารางที่ 4.14) พบว่าความเข้มข้นของ STPP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า onset temperature, peak temperature และค่า %retrogradation อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.20, ภาคผนวก ข.) โดยพบว่าสตาร์ชสากลุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่มี onset temperature, peak temperature และค่า %retrogradation ลดลง (ตารางที่ 4.14) และเฉพาะความเข้มข้นของ STPP เท่านั้นที่มีผลต่อค่า final temperature และ $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชสากลุไทยดัดแปรที่มีค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ลดลง ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชสากลุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่มี onset temperature, peak temperature ค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ และค่า %retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ สำหรับสตาร์ชสาคุจินดัดแปร ความเข้มข้นของ STPP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า onset temperature, peak temperature และค่า % retrogradation อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.21, ภาคผนวก ข.) โดยพบว่าสตาร์ชสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่มี onset temperature, peak temperature และค่า % retrogradation ลดลง และเฉพาะความเข้มข้นของ STPP เท่านั้นที่มีผลต่อค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ โดยสตาร์ชสาคุจินดัดแปรที่มีค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ลดลง ส่วนค่า final temperature ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร (ตารางที่ 4.15) สตาร์ชสาคุจินดัดแปรที่มีค่า onset temperature, ค่า peak temperature และค่า final temperature ค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ และค่า %retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชดัดแปรที่ได้มีประจุลบ ทำให้เกิดแรงผลึกโมเลกุลสตาร์ช สตาร์ชจึงมีวิโทรเกรเดชันที่ลดลง (Wurzburg, 1986; Chung, Woo, and Lim, 2003) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่า setback ที่วิเคราะห์ได้จาก RVA

ตารางที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดย DSC ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร ปฏิกริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH7

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกริยา (ชั่วโมง)	Onset temperature (°C)	Peak temperature (°C)	Final temperature (°C)	$\Delta H_{gelatinization}$ (J/g)	%Retrogradation ^a
2%	1	66.73 ± 0.25Cc	72.02 ± 0.56Ab	82.83 ± 0.78Aa	16.28 ± 0.31Ab	48.67 ± 0.97Ab
4%		62.57 ± 0.29Cb	71.71 ± 0.20Bb	86.59 ± 0.96Ab	15.36 ± 0.43Ab	45.83 ± 0.65Bb
6%		59.26 ± 0.42Ba	70.15 ± 0.29Aa	86.59 ± 1.04Ab	14.53 ± 0.26Aa	35.45 ± 0.81Ca
2%	2	65.41 ± 0.02Bc	72.00 ± 0.10Ab	82.34 ± 0.46Aa	16.10 ± 0.25Ac	48.48 ± 0.11Ab
4%		60.67 ± 0.22Bb	70.75 ± 0.26Aa	86.53 ± 0.90Ab	15.20 ± 0.63Ab	42.33 ± 0.71Ab
6%		58.42 ± 0.10Aa	70.86 ± 0.47Aa	85.81 ± 0.72Ab	14.13 ± 0.37Aa	30.42 ± 0.85Ba
2%	3	65.13 ± 0.20Ac	71.90 ± 0.16Aa	83.23 ± 0.46Aa	16.02 ± 0.77Ab	48.17 ± 0.29Ab
4%		59.89 ± 0.29Ab	70.71 ± 0.79Aa	86.27 ± 0.30Ab	14.70 ± 0.54Aa	42.60 ± 0.27Ab
6%		58.05 ± 0.46Aa	71.90 ± 0.16Ba	86.07 ± 0.63Ab	13.99 ± 0.37Aa	26.47 ± 0.90Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		69.68 ± 0.20	73.53 ± 0.42	81.36 ± 1.98	15.99 ± 0.85	67.97 ± 1.34

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^a เก็บเจลสตาร์ชที่ 4 °C นาน 7 วัน

ตารางที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง DSC ของสตาร์ชสาकुจิ้นดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH7

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Onset temperature (°C)	Peak temperature (°C)	Final temperature (°C)	$\Delta H_{\text{gelatinization}}$ (J/g)	%Retrogradation
2%	1	62.61 ± 0.10Cb	66.60 ± 0.17Cb	73.97 ± 0.43	16.36 ± 0.61Ba	89.77 ± 0.79Cb
4%		61.83 ± 0.10Bb	66.07 ± 0.01Bb	73.58 ± 0.84	16.07 ± 0.54Ba	58.62 ± 0.62Ba
6%		60.06 ± 0.14Aa	64.38 ± 0.27Aa	73.69 ± 1.94	14.94 ± 0.45Aa	50.45 ± 0.86Ac
2%	2	62.07 ± 0.10Ca	66.08 ± 0.18Ca	73.51 ± 0.40	15.94 ± 0.88Ba	81.58 ± 0.42Ca
4%		61.06 ± 0.25Ba	65.56 ± 0.59Ba	72.70 ± 1.89	15.73 ± 0.32ABa	57.31 ± 0.77Ba
6%		58.96 ± 0.08Aa	64.35 ± 0.10Aa	74.00 ± 0.25	14.78 ± 0.59Aa	45.79 ± 0.39Ab
2%	3	62.05 ± 0.04Ca	66.02 ± 0.10Ca	73.24 ± 0.65	15.66 ± 0.80Ba	80.56 ± 0.90Ca
4%		61.02 ± 0.11Ba	65.52 ± 0.10Ba	73.12 ± 0.43	15.35 ± 0.30Ba	56.23 ± 0.60Ba
6%		59.76 ± 0.16Aa	64.84 ± 0.10Ab	74.05 ± 0.34	14.60 ± 0.30Aa	41.26 ± 0.79Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		67.19 ± 0.12	70.34 ± 0.26	76.15 ± 1.12	18.10 ± 0.60	94.65 ± 0.85

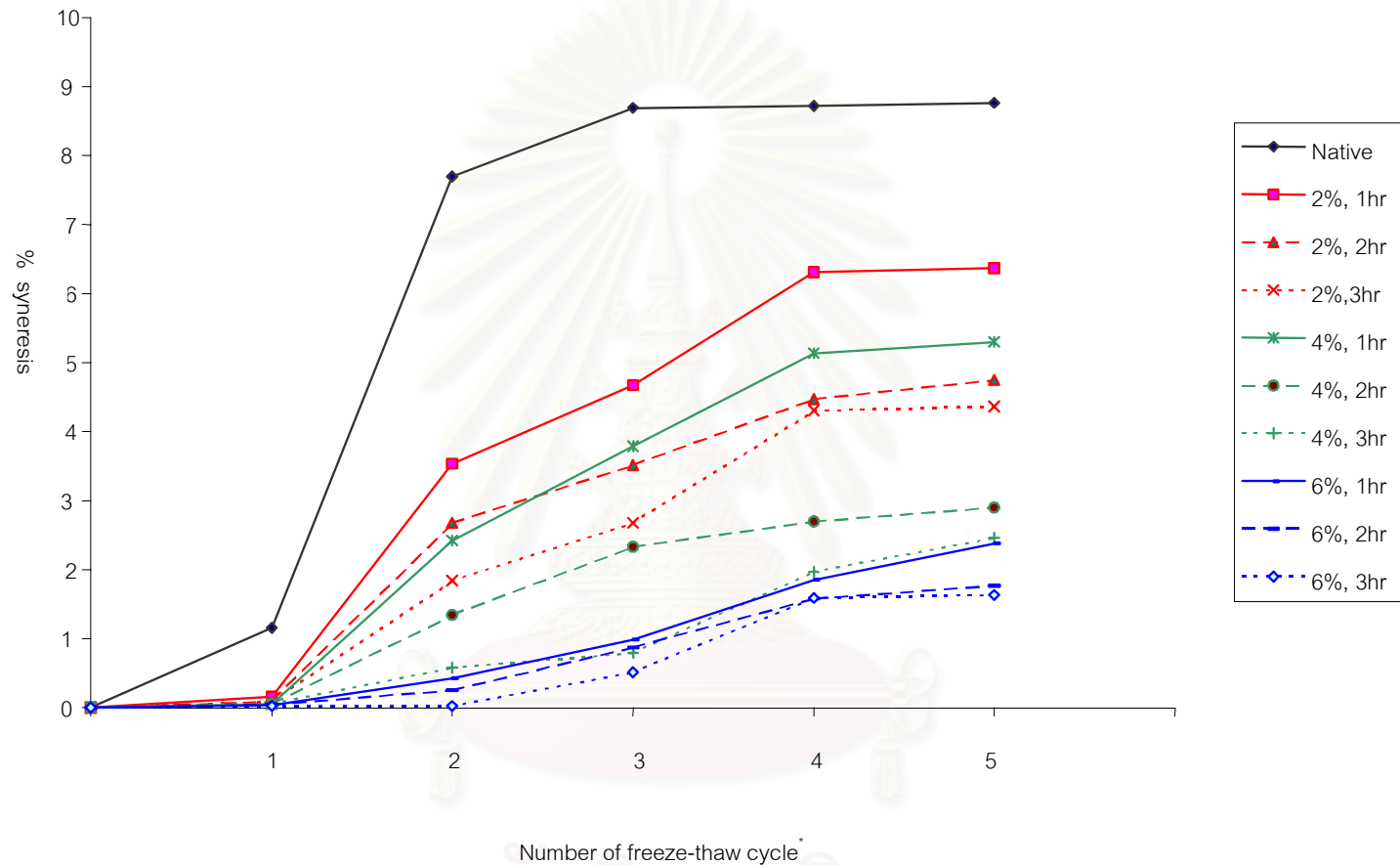
ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

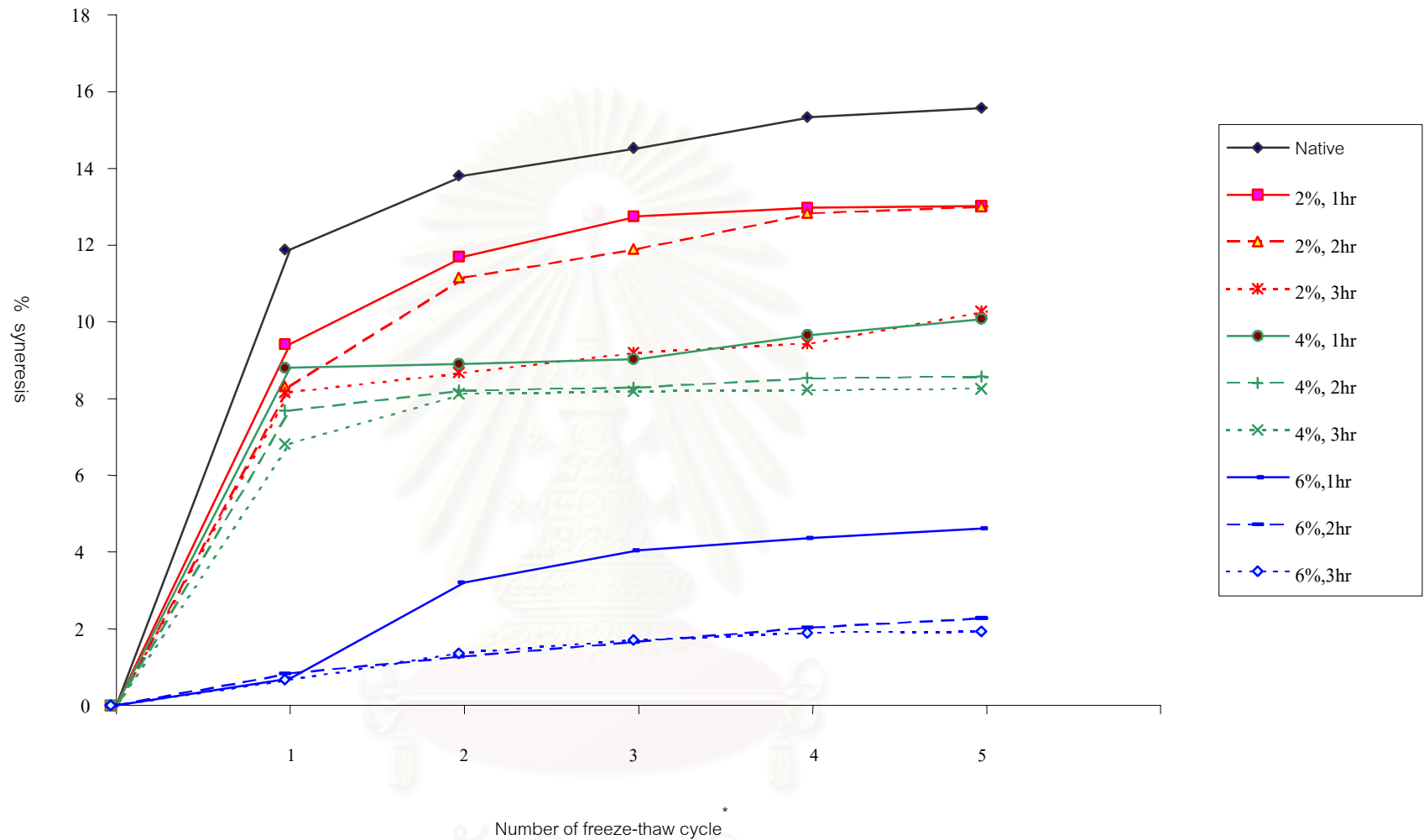
4.2.4.7 เสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชสาकुไทย และ สาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่

จากการศึกษาเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง โดยวัดปริมาณ น้ำที่แยกออกจากเจล ที่ความเข้มข้น 6% หลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge หรือค่า %syneresis พบว่า ความเข้มข้นของ STPP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมกันระหว่างความเข้มข้นของ STPP และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มีผลต่อปริมาณน้ำที่แยกออกมาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.22 – ข.23, ภาคผนวก ข.) โดยเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ มีค่า % syneresis ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติพบว่าสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรมีค่า % syneresis น้อยกว่าสตาร์ชสาकुธรรมชาติ (รูปที่ 4.17-4.18) โดยเจลสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรที่ความเข้มข้นของ STPP 2% และ 4% และสตาร์ชสาकुจินดัดแปรที่ทุกสภาวะที่ได้หลังจากการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง มีลักษณะคล้ายฟองน้ำในรอบที่สามของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง ส่วนเจลสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรที่ความเข้มข้นของ STPP 6% มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ ในรอบที่สี่ของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง และเจลของสตาร์ชสาकुธรรมชาติทั้งสองชนิดมีลักษณะคล้ายฟองน้ำตั้งแต่ในรอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง เจลสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรจะมีอัตราการแยกน้ำต่ำกว่าเจลสตาร์ชสาकुจินดัดแปร และมีน้ำแยกออกมาตั้งแต่รอบที่สองของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง ส่วนเจลสตาร์ชสาकुจินดัดแปรจะเริ่มเห็นน้ำแยกออกมาชัดเจนในรอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง แสดงว่าสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่มีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งดีกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ Wurzburg (1986) ที่พบว่าสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างของเจลสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรมีลักษณะคล้ายฟองน้ำภายในห้วงรอบของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง จึงถือว่าสตาร์ชดัดแปรทั้งสองไม่มีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง และไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทแช่เยือกแข็ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิบัติการ 1-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

* 1 freeze-thaw cycle คือ แช่แข็งที่ -18°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชสาคูกิ้นดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

* 1 freeze-thaw cycle คือ แช่แข็งที่ -18°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3 การศึกษาผลของการดัดแปรด้วยปฏิกริยาการเชื่อมขวางต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน

4.3.1 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวาง

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในรูปฟอสฟอรัส พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเมตาฟอสเฟต (STMP) เวลาในการทำปฏิกริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกริยา มีผลต่อปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.24, ภาคผนวก ข.) โดยปัจจัยเหล่านี้ทำให้ปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชดัดแปรเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.16 - 4.17) โดยฟอสเฟต 1 โมเลกุลจะเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนของสตาร์ช 2 โมเลกุล ทำให้โมเลกุลสตาร์ชเกิดการจับกัน เกิดเป็นพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล (Tuschhoff, 1986) ซึ่งการที่สตาร์ชดัดแปร มีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเกิดปฏิกริยาเชื่อมขวางมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชสาคุไทยและสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร พบว่าสตาร์ชสาคุจีนดัดแปร มีปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้นมากกว่าสตาร์ชสาคุไทยดัดแปร แสดงว่าสตาร์ชสาคุจีนเกิดปฏิกริยาได้ดีกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ชสาคุจีนธรรมชาติมีปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่าสตาร์ชสาคุไทยธรรมชาติ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (การดัดแปรสตาร์ชทำที่อุณหภูมิ 50 °C) และในสภาวะต่าง สตาร์ชจะเกิดการพองตัวได้ดีขึ้น STMP จึงสามารถเข้าทำปฏิกริยากับสตาร์ชสาคุจีนได้ดีกว่าสตาร์ชสาคุไทยซึ่งมีการพองตัวน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชสาคุดัดแปรด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวางกับสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ พบว่าสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวางมีการเพิ่มของปริมาณฟอสเฟตน้อยกว่า เนื่องจากการดัดแปรด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวางใช้ความเข้มข้นของสารทำปฏิกริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกริยาต่ำกว่าปฏิกริยาการแทนที่ โดยทั้งสตาร์ชสาคุไทยและสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวางมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่า 0.04% ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

ตารางที่ 4.16 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาคูไทยตัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP(%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา	% Phosphorus (g / 100 g dry starch)	% Phosphorus ที่เพิ่มขึ้น* (g / 100 g dry starch)	D.S. x 10 ⁴
0.05%	1 ชั่วโมง	0.0286 ± 0.0002Aa	0.0002Aa	0.11
0.10%,		0.0286 ± 0.0001Aa	0.0002Aa	0.12
0.15%,		0.0287 ± 0.0001Aa	0.0003Aa	0.16
0.05%,	2.5 ชั่วโมง	0.0289 ± 0.0002Aab	0.0005Aab	0.25
0.10%,		0.0293 ± 0.0002ABb	0.0009ABb	0.48
0.15%		0.0296 ± 0.0003Bb	0.0012Bb	0.66
0.05%	4 ชั่วโมง	0.0291 ± 0.0003Ab	0.0007Ab	0.38
0.10%		0.0295 ± 0.0001Bb	0.0011Bb	0.62
0.15%		0.0297 ± 0.0002Bb	0.0013Bb	0.73
สตาร์ชธรรมชาติ		0.0284 ± 0.0001	-	-

A, B ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* %P(db) ที่เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชธรรมชาติ

ตารางที่ 4.17 ปริมาณฟอสฟอรัสในสตาร์ชสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP

ความเข้มข้น 0.05 – 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP(%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา	% Phosphorus (g / 100 g dry starch)	% Phosphorus (db) ที่เพิ่มขึ้น* (g / 100 g dry starch)	D.S. x 10 ⁴
0.05%	1 ชั่วโมง	0.0584 ± 0.0001Aa	0.0003Aa	0.16
0.10%,		0.0584 ± 0.0002Aa	0.0003Aa	0.18
0.15%,		0.0596 ± 0.0003Ba	0.0015Ba	0.81
0.05%,	2.5 ชั่วโมง	0.0585 ± 0.0000Aa	0.0004Aa	0.23
0.10%,		0.0591 ± 0.0003Bb	0.0010Bb	0.53
0.15%		0.0599 ± 0.0002Ca	0.0018Cb	1.02
0.05%	4 ชั่วโมง	0.0588 ± 0.0002Ab	0.0007Ab	0.40
0.10%		0.0608 ± 0.0001Bc	0.0027Bc	1.52
0.15%		0.0630 ± 0.0003Cb	0.0049Cc	3.07
สตาร์ชธรรมชาติ		0.0581 ± 0.0003	-	-

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* %P(db) ที่เพิ่มขึ้นจากสตาร์ชธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

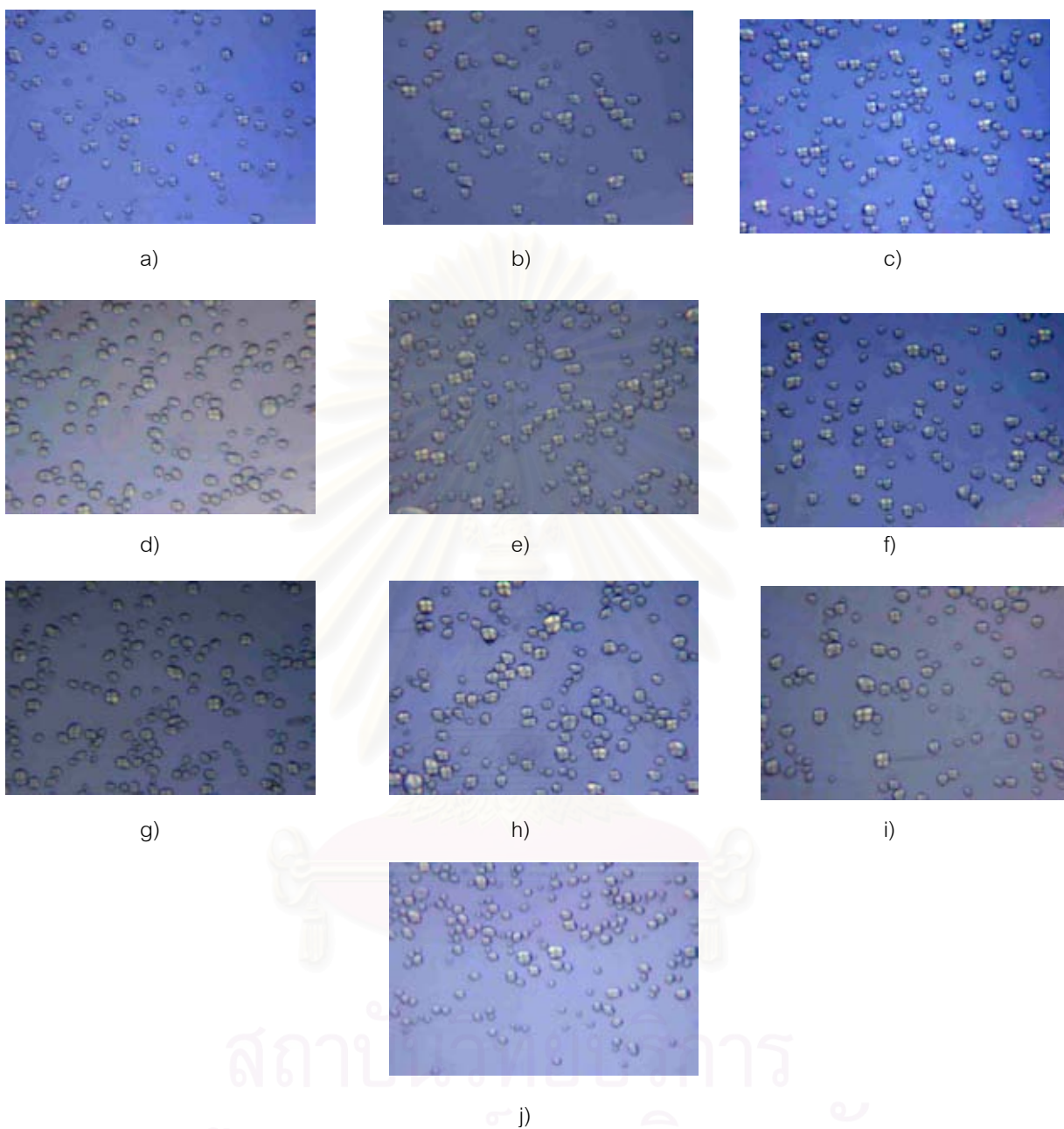
4.3.2 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

4.3.2.1 รูปร่าง และ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

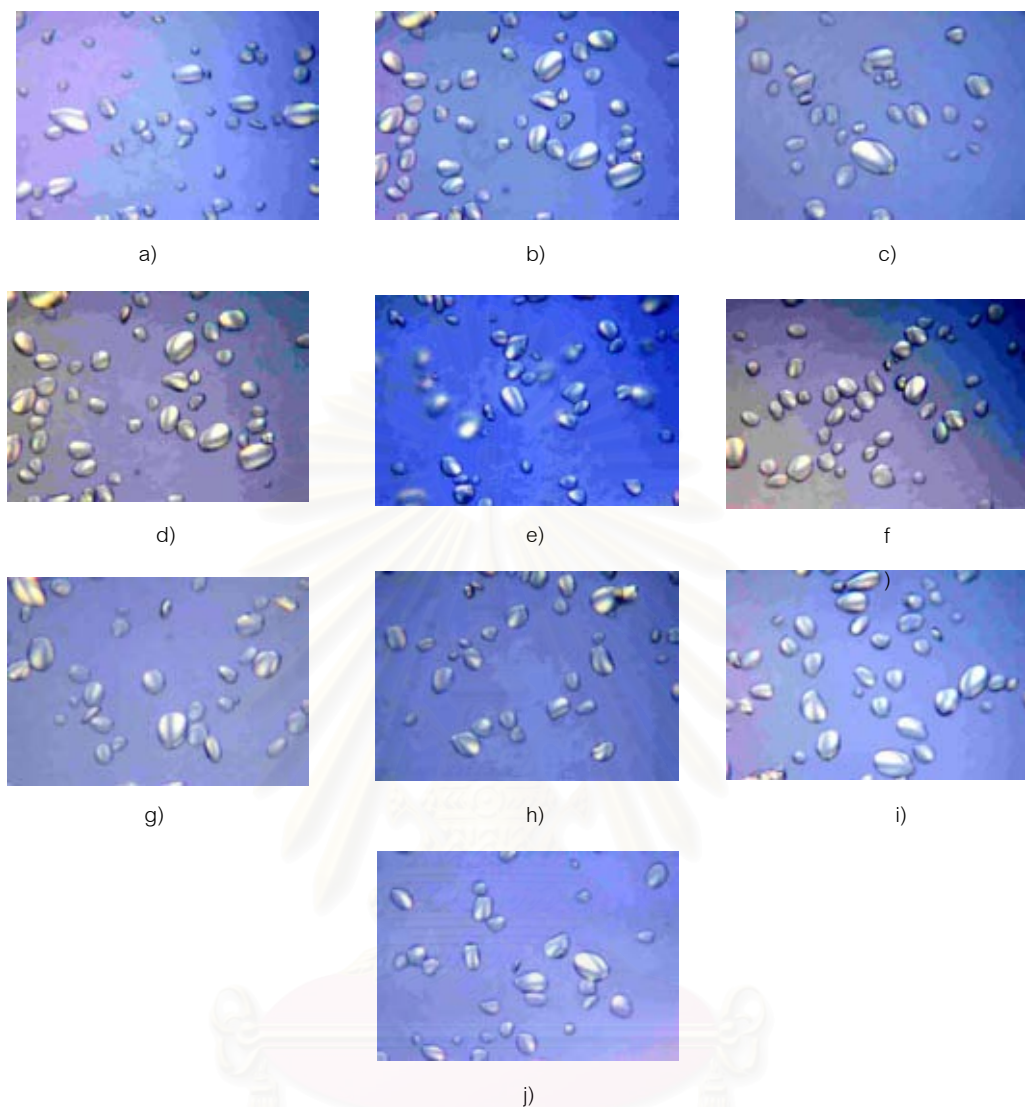
จากการศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (รูปที่ 4.19-4.20) พบว่าเม็ดสตาร์ชสาकुไทยมีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 10-25 μm . มี birefringence ชัดเจน ตำแหน่งไฮลัมอยู่ตรงกลางของเม็ดสตาร์ช ส่วนเม็ดของสตาร์ชสาकुจินมีลักษณะกลมรี ขนาดประมาณ 20 – 80 μm . มี birefringence ชัดเจน ตำแหน่งไฮลัมอยู่ค่อนข้างไปทางปลายของเม็ดสตาร์ชเหมือนกับสตาร์ชธรรมชาติ และจากการศึกษารูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้อง scanning electron microscope (SEM) พบว่าเม็ดสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดมีพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก และไม่มีรูพรุนในเม็ดสตาร์ชเช่นเดียวกับสตาร์ชธรรมชาติ (รูปที่ 4.21) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ Wurzburg (1986) ที่กล่าวว่า การดัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ช

4.3.2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

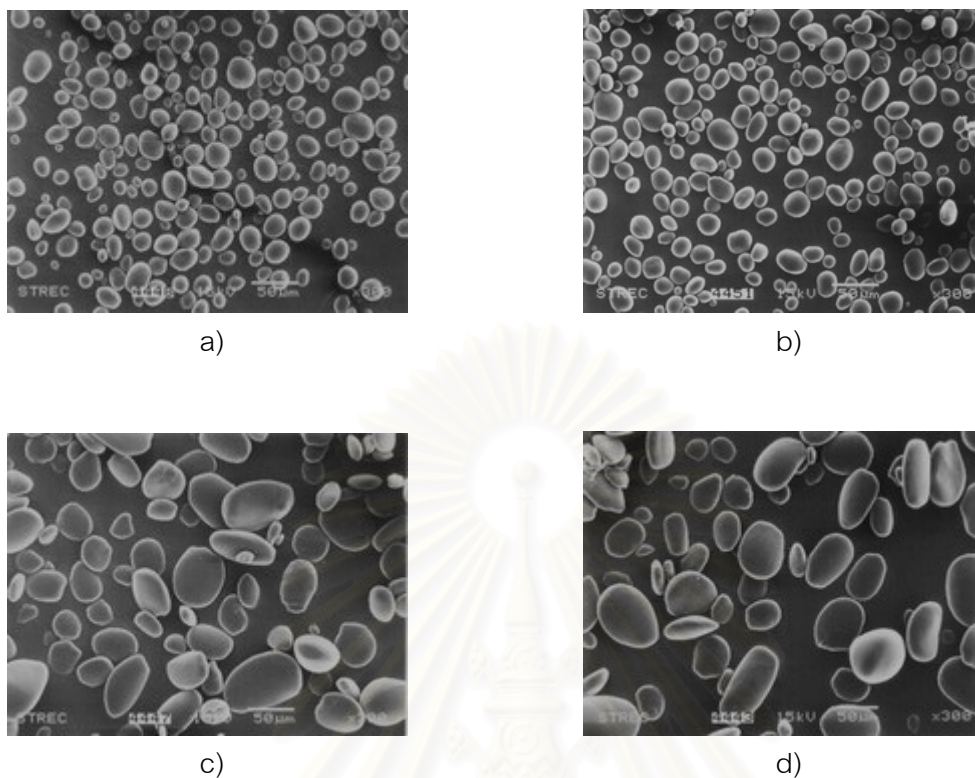
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ โดยใช้ wide angle X-ray diffraction (รูปที่ 4.22) พบว่าสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ซึ่งแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C ส่วนสตาร์ชสาकुจินดัดแปวยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เหมือนสตาร์ชธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรเป็นสภาวะต่างที่ pH 11 ไม่ใช่สภาวะที่เป็นกลาง ผลึกบางส่วนโดยเฉพาะบริเวณไฮลัม ซึ่งเป็นส่วนที่พันธะมีความอ่อนแอ จึงถูกไฮโดรไลซ์ไปเช่นเดียวกับการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่



รูปที่ 4.19 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชจากข้าวไทยธรรมชาติ และที่ดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ (กำลังขยาย 50 เท่า) a) 0.05%, 1hr; b) 0.10%, 1hr; c) 0.15%, 1hr; d) 0.05%, 2.5hr; e) 0.10%, 2.5hr; f) 0.15%, 2.5hr; g) 0.05%, 4hr; h) 0.10%, 4hr; i) 0.15%, 4hr; j) สตาร์ชธรรมชาติ

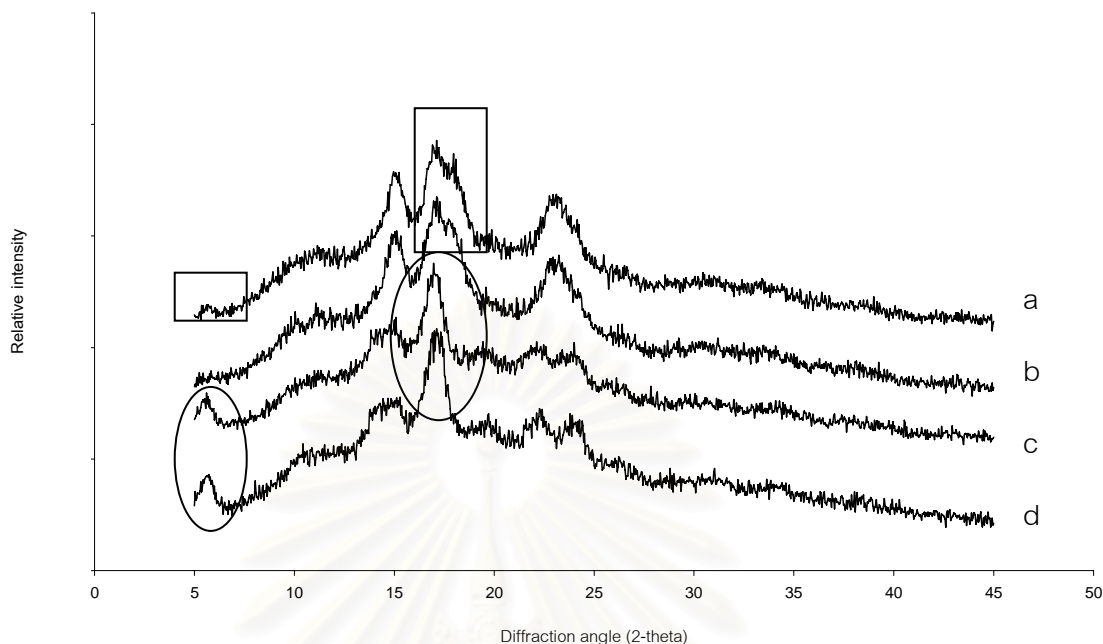


รูปที่ 4.20 รูปร่าง และตำแหน่งของ birefringence ของเม็ดสตาร์ชสาคูจีนธรรมชาติ และที่ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ (กำลังขยาย 50 เท่า) a) 0.05%, 1hr ; b) 0.10%, 1hr; c) 0.15%, 1hr; d) 0.05%, 2.5hr; e) 0.10%, 2.5hr; f) 0.15%, 2.5hr; g) 0.05%, 4hr; h) 0.10%, 4hr; i) 0.15%, 4hr; j) สตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.21 รูปร่าง พื้นผิว และขนาดของเม็ดสตาร์ชจาก SEM micrograph (กำลังขยาย 300 เท่า)
 a) สตาร์ชสาकुไทยธรรมชาติ, b) สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง
 ที่ 0.15%, 4hr., c) สตาร์ชสาकुจีนธรรมชาติ, d) สตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยา
 เชื่อมขวาง ที่ 0.15%, 4hr

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



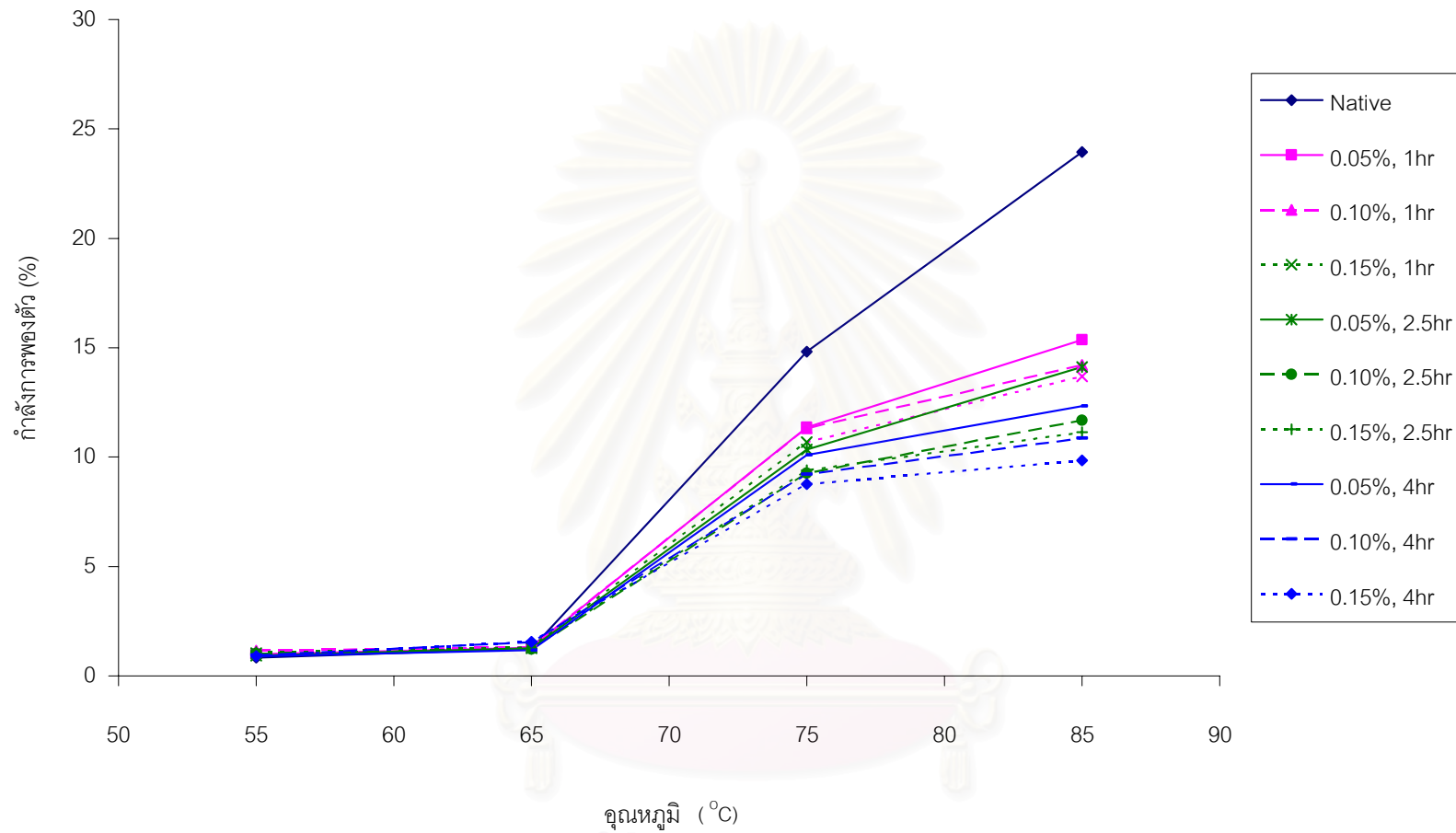
รูปที่ 4.22 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชสาकुธรรมชาติ และสาकुดัดแปร

- a) สตาร์ชสาकुไทยธรรมชาติ, b) สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ,
c) สตาร์ชสาकुจีนธรรมชาติ, d) สตาร์ชสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

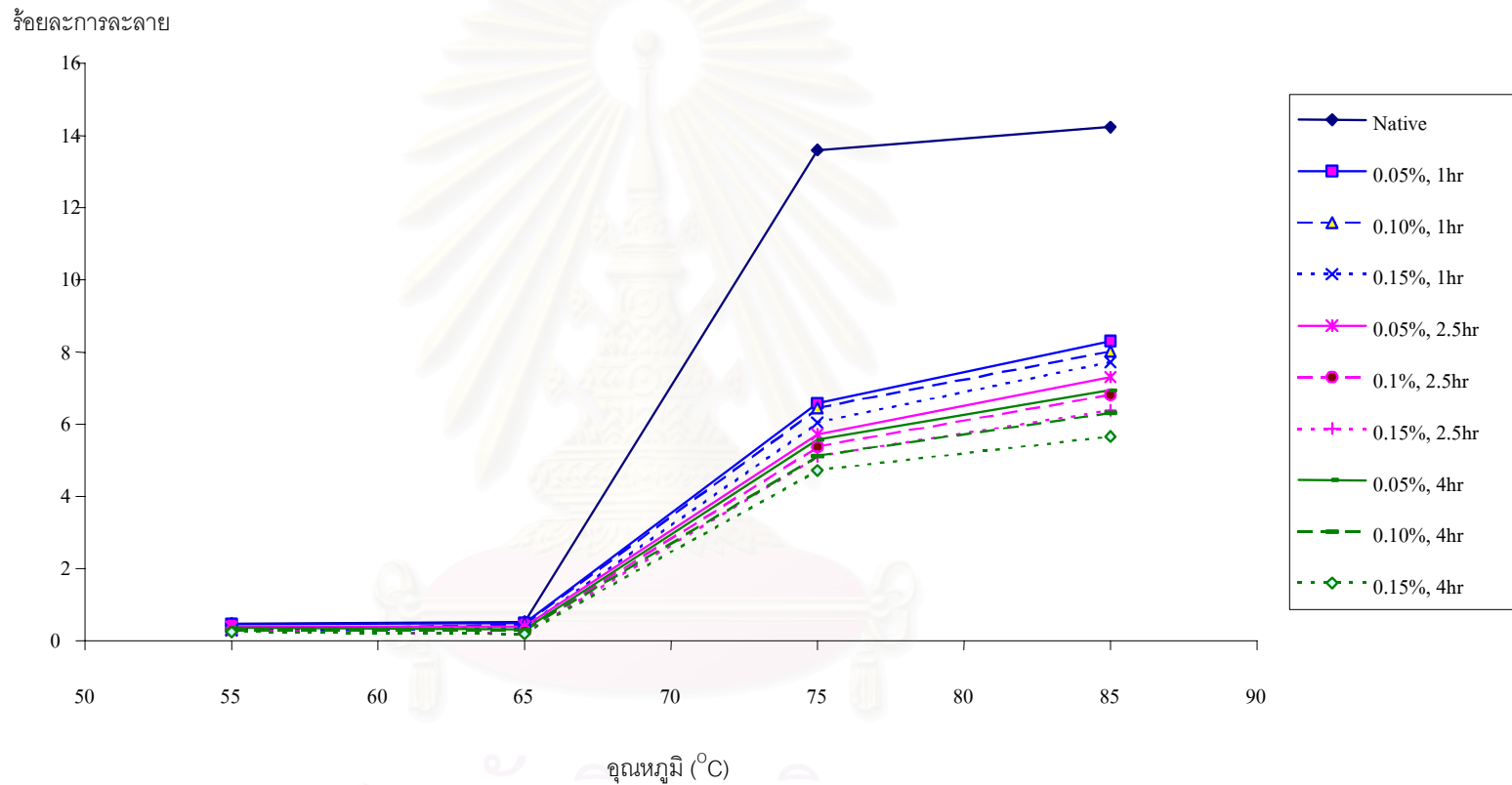
4.3.2.3 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

จากการวิเคราะห์กำลังการพองตัว และค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่ากำลังการพองตัว ที่ 75 – 85 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ ข.25 – ข.26, ภาคผนวก ข.) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่ากำลังการพองตัวที่ 75-85 °C ของสตาร์ชสาकुไทย เป็นแบบ polynomial กำลัง 2 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.85-0.86 (ตารางที่ ง.5 ภาคผนวก ง.) โดยสตาร์ชสาकुไทยที่ระดับการแทนที่มากขึ้น มีค่ากำลังการพองตัวต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ พบว่าสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรมีค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ส่วนค่าการละลาย พบว่าที่ 55 °C ความเข้มข้นของ STMP เท่านั้นที่มีผลต่อค่าการละลาย แต่ที่ 65-85 °C ทั้งความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่าการละลาย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง

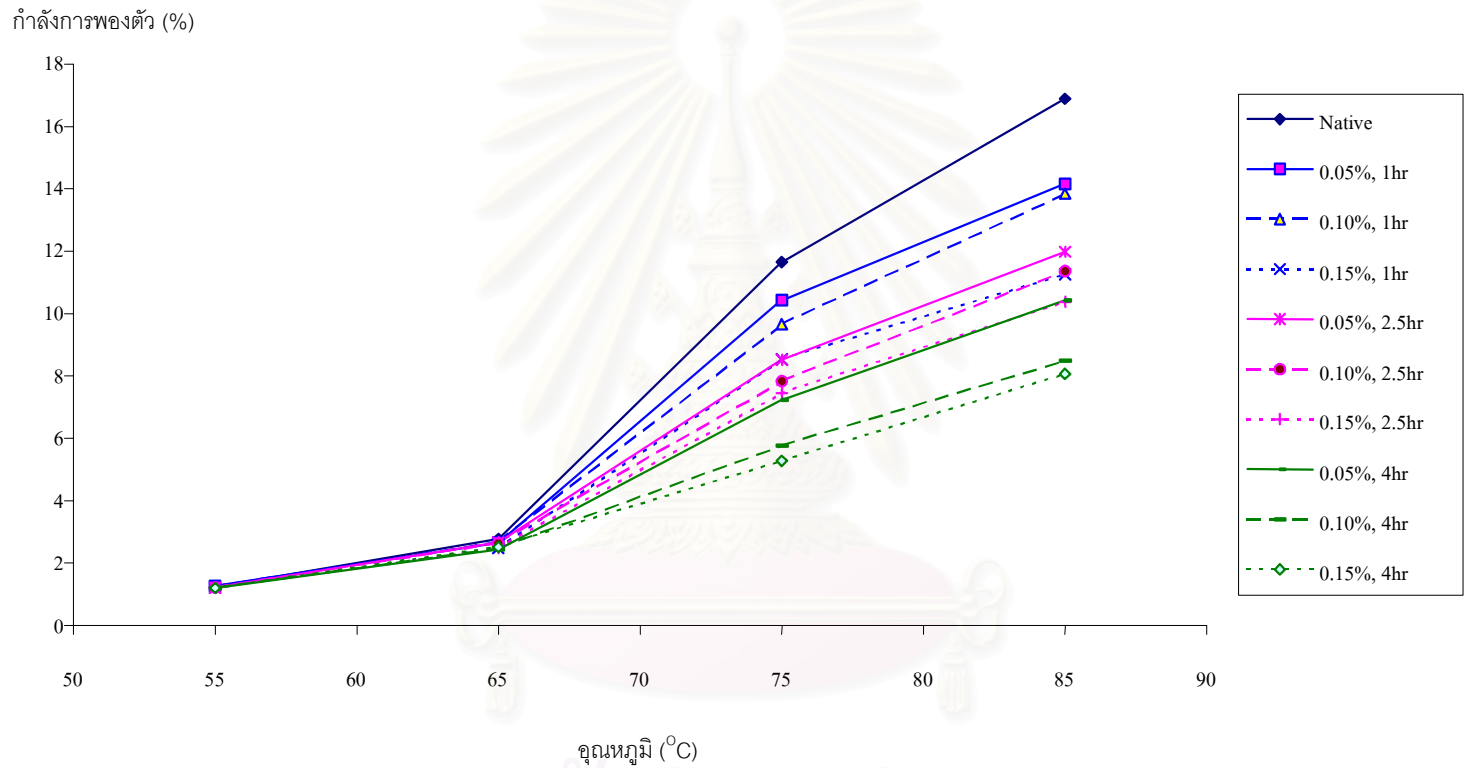
ค่าระดับการแทนที่ และค่าการละลายที่ 65-85 °C ของสตาโรซซาคุไทย เป็นไปในลักษณะเดียวกับค่าการพองตัว มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.76-0.90 (ตารางที่ ง.6 ภาคผนวก ง.) โดยสตาโรซซาคุไทยดัดแปรที่ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น มีค่าการละลายลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาโรซซาคุธรรมชาติ พบว่าสตาโรซซาคุไทยดัดแปร มีค่าการละลายต่ำกว่าสตาโรซซาคุธรรมชาติเช่นเดียวกับค่ากำลังการพองตัว สำหรับสตาโรซซาคุจีน พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่ากำลังการพองตัว และการละลายที่ 55 และ 65 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่ากำลังการพองตัว และการละลายที่ 75 และ 85 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ ข.27 - ข.28, ภาคผนวก ข.) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่ากำลังการพองตัว ที่ 75-85 °C และค่าระดับการแทนที่กับค่าการละลายที่ 75-85 °C ของสตาโรซซาคุจีนเป็นแบบเดียวกับสตาโรซซาคุไทย โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.80-0.82 และ 0.66-0.68 ตามลำดับ (ตารางที่ ง.5-ง.6 ภาคผนวก ง.) ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา ทำให้สตาโรซซาคุจีนดัดแปร มีค่าระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังการพองตัว และการละลายต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาโรซซาคุธรรมชาติ พบว่าสตาโรซซาคุจีนดัดแปร มีค่ากำลังการพองตัว และการละลายต่ำกว่าสตาโรซซาคุธรรมชาติ ทั้งนี้ เนื่องจากการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะของหมู่ฟอสเฟต ทำให้เม็ดสตาโรซซาคุมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นจึงสามารถควบคุมการดูดน้ำ การพองตัว และการละลายได้ดีขึ้น (Tuschhoff, 1986) ส่วนที่อุณหภูมิ 55 - 65 °C กำลังการพองตัวของสตาโรซซาคุดัดแปรที่สภาวะต่างๆ ไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของสตาโรซซาคุ เม็ดสตาโรซซาคุธรรมชาติจึงยังคงมีความแข็งแรง การพองตัวจึงเกิดได้น้อย ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างระหว่างสตาโรซซาคุธรรมชาติและสตาโรซซาคุดัดแปร



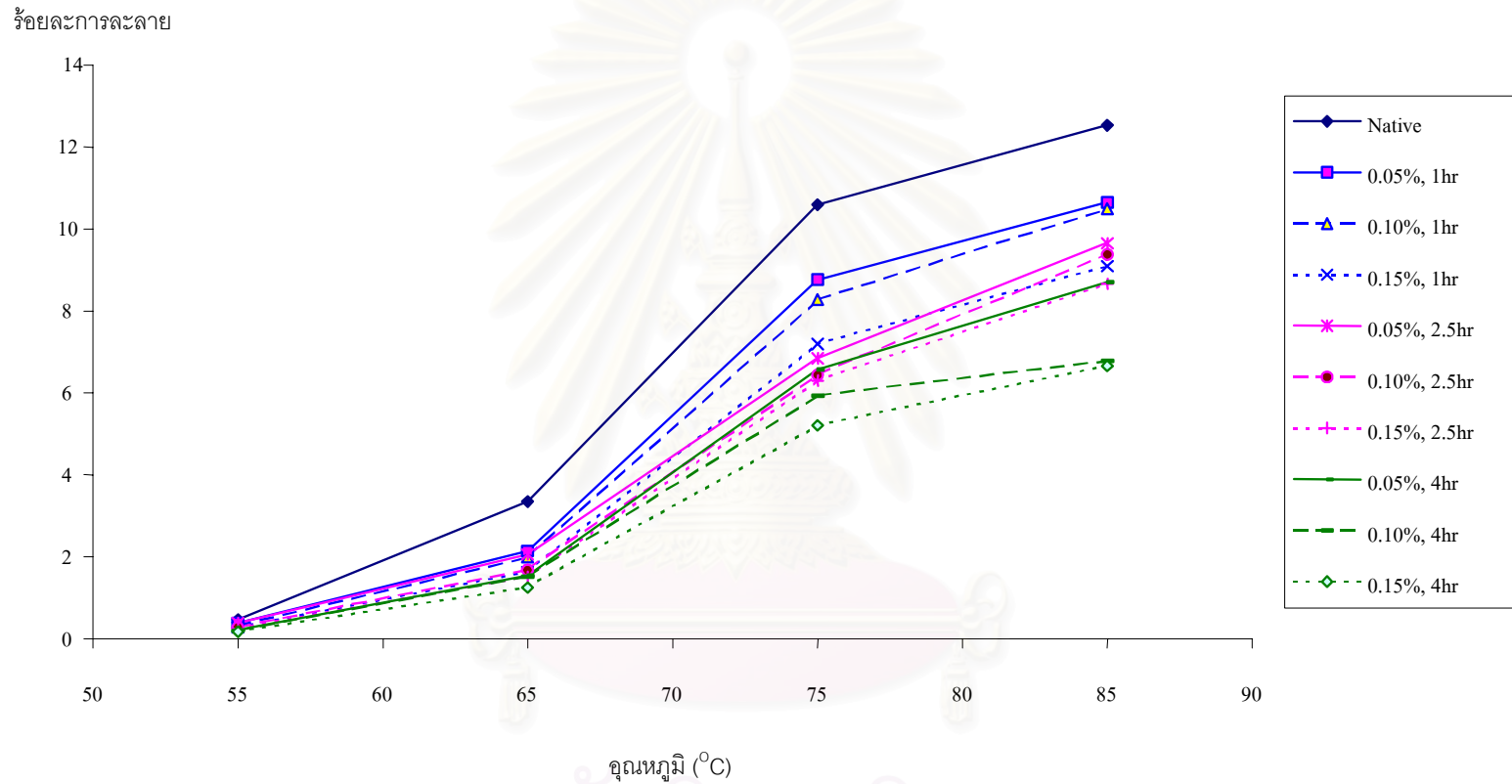
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาโรซาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาโรซาคูธรรมชาติ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิของสตาโรลสาคูเงินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาโรลธรรมชาติ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการละลาย และอุณหภูมิของสตาร์ฟิชที่ถูกฉีดแปรรูปด้วยปฏิกริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ฟิชธรรมชาติ

4.3.2.4 เสถียรภาพของแป้งเปียกของสตร้าชสาคุไทย และสาคุจินที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางต่อความร้อน และแรงเฉือน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle ของสตร้าชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยติดตามที่ความเข้มข้น 6% และ pH 7 พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่า peak viscosity, breakdown, setback อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเฉพาะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่านั้นที่มีผลต่อค่า pasting temperature อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ ข.33, ภาคผนวก ข.) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า peak viscosity, ค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown, ค่าระดับการแทนที่กับค่า setback และค่าระดับการแทนที่กับค่า pasting temperature ของสตร้าชสาคุไทยเป็นแบบ polynomial กำลัง 2 โดยมีค่า R^2 เป็น 0.85, 0.78, 0.94 และ 0.76 ตามลำดับ (ตารางที่ ง.7, ภาคผนวก ง.) โดยสตร้าชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น มีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.18) แต่มีค่า peak viscosity ค่า setback และค่า breakdown ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตร้าชธรรมชาติ สตร้าชสาคุไทยดัดแปรจะมีค่า pasting temperature มากกว่า แต่มีค่า breakdown น้อยกว่าสตร้าชธรรมชาติ แสดงว่าการดัดแปรทำให้สตร้าชมีเสถียรภาพของความหนืดเพิ่มขึ้น โดยสตร้าชสาคุไทยดัดแปรที่สภาวะความเข้มข้นของ STMP 0.05-0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง และ STMP 0.05-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง มีค่า breakdown เป็นศูนย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับสตร้าชธรรมชาติ พบว่าสตร้าชสาคุไทยดัดแปรมีค่า breakdown น้อยกว่าสตร้าชธรรมชาติ ส่วนสตร้าชสาคุไทยที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ระดับการแทนที่ต่ำ (STMP 0.05-0.15% เวลา 1 ชั่วโมง และ STMP 0.05% เวลา 2.5 ชั่วโมง) จะมีค่า peak viscosity และค่า setback สูงกว่าสตร้าชธรรมชาติ เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้น ทำให้เม็ดสตร้าชมีความแข็งแรงขึ้น ในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และมีแรงเฉือน สายโมเลกุลจะไม่เกิดการฉีกขาด สตร้าชจึงมีความหนืดสูงกว่าสตร้าชธรรมชาติ แต่เมื่อระดับการแทนที่มากขึ้น สตร้าชสาคุไทยที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะมีค่า peak viscosity และค่า setback น้อยกว่าสตร้าชธรรมชาติ เนื่องจากเมื่อสตร้าชผ่านการดัดแปรมากขึ้นจะเกิดพันธะโควาเลนต์มากขึ้น ทำให้เม็ดสตร้าชแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้การพองตัวของเม็ดสตร้าชลดลง ทำให้สตร้าชมีค่า peak viscosity ลดลง และเมื่อเม็ดสตร้าชแข็งแรงมากขึ้น การแตกของเม็ดสตร้าชลดลงจะไม่ไหลหลุดออกจากเม็ดสตร้าชลดลง สตร้าชจึงมีค่า setback ลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Kite (1971)

สำหรับการดัดแปรสสารข้าวเจ้าด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า pasting temperature ของสสารข้าวเจ้าดัดแปร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ข.34, ภาคผนวก ข.) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ และค่า pasting temperature ของสสารข้าวเจ้า เป็นแบบ polynomial กำลัง 2 มีค่า R^2 เป็น 0.82 (ตารางที่ ง.7, ภาคผนวก ง.) โดยสสารข้าวเจ้าที่มีระดับการแทนที่มากขึ้นมีค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสสารธรรมชาติ พบว่าสสารดัดแปรที่มีค่า pasting temperature สูงกว่าสสารธรรมชาติ (ตารางที่ 4.19) ส่วนความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า peak viscosity, ค่า breakdown และค่า setback อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า peak viscosity และค่าระดับการแทนที่กับค่า setback ของสสารข้าวเจ้าเป็นแบบ polynomial กำลัง 2 เช่นเดียวกัน โดยมีค่า R^2 เป็น 0.81 และ 0.97 ตามลำดับ ส่วนค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กัน โดยสสารข้าวเจ้าดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น มีค่า peak viscosity และค่า setback ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสสารธรรมชาติ พบว่าค่า peak viscosity และค่า setback ของสสารดัดแปรมีค่าน้อยกว่าสสารธรรมชาติ ยกเว้นค่า setback ที่ความเข้มข้นของ STMP 0.05-0.10% เวลา 1 ชั่วโมง ส่วนค่า breakdown ที่ไม่พบความสัมพันธ์อาจเนื่องจากสสารข้าวเจ้าดัดแปรเกิดปฏิกิริยาได้มาก จึงทำให้ค่า breakdown ลดลง และเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว โดยสสารข้าวเจ้าดัดแปรที่สภาวะความเข้มข้นของ STMP 0.15% เวลา 1 ชั่วโมง; STMP 0.10-0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง และ STMP 0.05-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง มีค่า breakdown เป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะฟอสเฟตที่เชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลสสารเป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีแรงยึดเหนี่ยวมาก โครงสร้างภายในเม็ดสสารจึงแข็งแรงขึ้น จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำให้เกิดเจลลิตในเซชัน ทำให้สสารมี pasting temperature สูงขึ้น เม็ดสสารดัดแปรดูน้ำ และพองตัวในขณะให้ความร้อนได้ช้า และน้อยลง ทำให้ค่า peak viscosity ลดลง การแตกของเม็ดสสารลดลง ทำให้เม็ดสสารมีเสถียรภาพของความหนืดเพิ่มขึ้น อะไมโลสหลุดออกจากเม็ดสสารได้น้อยลง การรวมตัวของอะไมโลสจึงเกิดได้ช้า และน้อยลง ค่า setback จึงลดลง (Wurzburg, 1986) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสสารข้าวไทย และสสารข้าวเจ้าดัดแปร พบว่าที่สภาวะการดัดแปรเดียวกัน สสารข้าวไทยเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ดังนั้นถ้าต้องการดัดแปรสสารข้าวไทยให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกับสสารข้าวเจ้า เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของสสาร เช่นปรับค่า breakdown ให้เป็นศูนย์ จะต้องใช้ความเข้มข้น และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.18 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากข้าวไทย
ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ
ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH7

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าต่างๆที่อ่านได้จากเครื่อง RVA					
		Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	160.21 ± 0.76Bc	152.13 ± 2.06Ab	8.09 ± 1.29Cb	256.30 ± 1.94Ab	104.17 ± 0.12Ab	82.68 ± 0.74Aa
0.10%,		164.00 ± 1.53Bc	159.21 ± 4.54Ac	4.80 ± 0.31Bb	271.38 ± 4.89Ac	112.17 ± 0.35Ab	82.03 ± 0.67Aa
0.15%,		152.50 ± 4.84Ac	151.63 ± 4.31Ac	0.88 ± 0.03Ab	259.54 ± 9.79Ac	107.92 ± 5.49Ab	82.45 ± 0.00Aa
0.05%,	2.5	147.29 ± 3.13Cb	147.42 ± 3.06Cb	0.00 ± 0.00Aa	252.30 ± 4.77Cb	104.88 ± 1.70Bb	82.40 ± 0.07Aa
0.10%,		69.13 ± 0.18Bb	70.38 ± 0.06Bb	0.00 ± 0.00Aa	113.42 ± 0.23Bb	43.04 ± 0.30Aa	83.18 ± 0.04Ab
0.15%		48.25 ± 3.54Ab	49.29 ± 3.48Ab	0.00 ± 0.00Aa	83.38 ± 5.08Ab	34.09 ± 1.30Aa	83.15 ± 0.00Ab
0.05%	4	106.21 ± 6.42Ca	107.00 ± 6.48Ca	0.00 ± 0.00Aa	182.00 ± 7.56Ca	75.00 ± 4.08Ba	82.78 ± 0.53Aa
0.10%		49.09 ± 3.06Ba	50.29 ± 3.77Ba	0.00 ± 0.00Aa	85.25 ± 4.79Ba	34.96 ± 1.01Aa	83.15 ± 0.00Ab
0.15%		24.92 ± 0.35Aa	25.21 ± 0.30Aa	0.00 ± 0.00Aa	50.13 ± 0.29Aa	24.92 ± 0.00Aa	83.60 ± 0.57Ab
สตาร์ชธรรมชาติ		134.83 ± 0.71	108.00 ± 0.24	26.84 ± 0.94	164.46 ± 0.76	55.46 ± 0.53	81.58 ± 0.04

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้น
ของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.19 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาकुจิ้น ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH7

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าต่างๆที่อ่านได้จากเครื่อง RVA					
		Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	129.46 ± 0.30Bc	126.96 ± 2.53Cc	2.50 ± 0.83Bc	196.17 ± 2.47Cc	69.21 ± 0.06Bc	77.43 ± 0.04Aa
0.10%,		126.00 ± 6.25Bc	117.75 ± 3.38Bc	8.25 ± 0.47Cb	186.13 ± 5.48Bc	68.38 ± 1.70Bc	76.73 ± 0.04Aa
0.15%,		57.75 ± 4.84Ac	58.42 ± 5.07Ac	0.00 ± 0.00Aa	87.17 ± 7.30Ac	28.75 ± 2.23Ac	77.43 ± 0.04Aa
0.05%,	2.5	95.21 ± 3.01Cb	95.21 ± 4.30Cb	0.46 ± 0.05Bb	133.54 ± 0.30Cb	38.33 ± 4.60Cb	77.73 ± 0.25Aa
0.10%,		66.46 ± 0.76Bb	67.54 ± 0.41Bb	0.00 ± 0.00Aa	97.25 ± 0.35Bb	29.71 ± 0.76Bb	77.88 ± 0.67Ab
0.15%		42.58 ± 4.95Ab	43.71 ± 5.01Ab	0.00 ± 0.00Aa	67.00 ± 6.25Ab	23.30 ± 1.24Ab	78.35 ± 0.00Ab
0.05%	4	84.63 ± 4.66Ba	86.00 ± 4.71Ba	0.00 ± 0.00Aa	118.29 ± 6.07Ba	32.29 ± 1.36Ba	77.43 ± 0.04Aa
0.10%		7.71 ± 1.12Aa	7.92 ± 1.18Aa	0.00 ± 0.00Aa	17.63 ± 1.83Aa	9.71 ± 0.65Aa	79.20 ± 0.02Ab
0.15%		5.21 ± 1.12Aa	5.30 ± 1.24Aa	0.00 ± 0.00Aa	12.05 ± 3.36Aa	6.75 ± 2.12Aa	79.40 ± 0.00Ab
สตาร์ชธรรมชาติ		141.67 ± 0.59	119.42 ± 2.24	22.25 ± 1.65Aa	174.71 ± 1.94	55.29 ± 0.30	75.70 ± 0.35

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

4.3.2.5 ผลของ pH ต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งเปียกในสตาρχสาคูไทย และสาคูจีนที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

จากการศึกษาผลของ pH ต่อสมบัติด้านความเหนียวของสตาρχสาคูไทย และสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยติดตามที่ความเข้มข้น 6% และ pH 3-9 โดยในที่นี่จะพิจารณาเฉพาะค่า breakdown ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพของความเหนียวเท่านั้น พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า breakdown อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.31- ง.32, ภาคผนวก ข.) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ของสตาρχสาคูไทย เป็นแบบ polynomial กำลัง 2 (R^2 อยู่ในช่วง 0.72-1.00) (ตารางที่ ง.8, ภาคผนวก ง.) ส่วนสตาρχสาคูจีนไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน สตาρχสาคูจีนเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าสตาρχสาคูไทย จึงทำให้ค่า breakdown ลดลง และเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่กับค่า breakdown ได้ ส่วนสตาρχสาคูไทยเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ทำให้ค่า breakdown ลดลงช้ากว่า จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่กับค่า breakdown ได้ โดยสตาρχสาคูไทย และสาคูจีนดัดแปรที่มีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นมีค่า breakdown ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาρχธรรมชาติ พบว่าสตาρχดัดแปรมีค่า breakdown น้อยกว่าสตาρχธรรมชาติ (ตารางที่ 4.20-4.21) สตาρχสาคูไทยดัดแปรที่สภาวะความเข้มข้น STMP 0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง; STMP 0.10-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง และสตาρχสาคูจีนดัดแปรที่สภาวะความเข้มข้น STMP 0.15% เวลา 1 ชั่วโมง; STMP 0.10-0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง; STMP 0.05-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง มีค่า breakdown เป็นศูนย์ในทุก pH ทั้งนี้เนื่องจากการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างโมเลกุลสตาρχ ทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาρχแข็งแรงขึ้น เมื่อสภาวะในการดัดแปรรุนแรงขึ้นพันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลสตาρχจะมากขึ้น โครงสร้างของเม็ดสตาρχจะแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรด และด่างได้ดีขึ้น (Tuschhoff, 1986) ดังนั้นสตาρχดัดแปรที่ได้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน หรือสภาพที่เป็นกรด หรือด่างได้ดี เช่น ใช้เพิ่มความข้นเหนียวในอุตสาหกรรมทำซอสมะเขือเทศ ซอสพริก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมหลักที่ใช้สตาρχดัดแปร (สุนีรัตน์ หทัยรักษ์ธรรม, 2543)

ตารางที่ 4.20 ค่า Breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH3-9

ความเข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชม.)	ค่า breakdown (RVU) ที่ pH ต่างๆ			
		3	5	7	9
0.05%	1	38.75±0.82Bc	2.67 ±0.12Bb	8.09 ±1.29Cb	150.09±0.94Bc
0.10%		37.13±0.53Bb	3.13 ±0.29Bb	4.80 ±0.31Bb	143.46±2.06Bb
0.15%		28.92±4.72Ab	0.13 ±0.00Ab	0.88 ±0.03Ab	109.00±5.38Ab
0.05%	2.5	23.50±1.06Bb	0.00± 0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	84.30 ± 3.71Bb
0.10%		2.50 ± 0.82Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.59 ± 0.23Aa
0.15%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.05%	4	10.17±2.35Ba	0.00 ±0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	23.25 ± 1.07Ba
0.10%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.15%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		54.75 ± 0.00	17.46 ± 1.71	26.84 ± 0.94	146.75 ± 2.12

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.21 ค่า Breakdown ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH3-9

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชม.)	ค่า breakdown (RVU) ที่ pH ต่างๆ			
		3	5 ^{ns}	7	9
0.05%	1	17.96±2.17Cb	0.00 ± 0.00	2.50 ±0.83Bc	80.88 ±6.78Cb
0.10%		9.04 ± 1.11Bb	0.00 ± 0.00	8.25 ±0.47Cb	44.55±17.50Bb
0.15%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ± 0.00	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.05%	2.5	1.38 ± 0.06Ba	0.00 ± 0.00	0.46 ±0.05Bb	3.38 ± 1.12Aa
0.10%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ± 0.00	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.15%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ± 0.00	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.05%	4	0.00 ± 0.00Aa	0.00 ± 0.00	0.00 ±0.00Aa	0.38 ± 0.03Aa
0.10%		0.00 ± 0.00Aa	0.00 ± 0.00	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
0.15%		0.00 ± 0.00Aa	0.04 ± 0.02	0.00 ±0.00Aa	0.00 ± 0.00Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		32.42 ± 0.12	14.25 ± 0.24	22.25 ± 1.65	178.08 ± 0.00

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3.2.6 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่ผ่านการ ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย DSC (ตารางที่ 4.22) พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า % retrogradation อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.33, ภาคผนวก ข.) โดยสตาร์ชดัดแปรที่ทุกสภาวะมีค่า % retrogradation ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเฉพาะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่านั้นที่มีผลต่อค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ โดยสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรที่มีค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชดัดแปรที่มีค่า onset temperature, peak temperature, final temperature สูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ส่วนค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ จะต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ โดยสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรที่ระดับการแทนที่ต่ำมีค่า % retrogradation สูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ในขณะที่สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรที่ระดับการแทนที่สูง (STMP 0.05-0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง และ STMP 0.05-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง) ค่า % retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่า setback ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย RVA

สำหรับการดัดแปรสตาร์ชสาकुจีนด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง พบว่าความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่า % retrogradation อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเฉพาะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่านั้น ที่มีผลต่อ onset temperature, peak temperature, final temperature อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.34, ภาคผนวก ข.) ส่วนค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร (ตารางที่ 4.23) เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชสาकुจีนดัดแปรที่มีค่า onset temperature, peak temperature, final temperature สูงกว่า แต่ค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ และค่า % retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากฟอสเฟตทำให้สตาร์ชดัดแปรที่ได้มีประจุลบ จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลสตาร์ช (Chung, Woo, and Lim, 2003) โดยสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมากขึ้นจะมีค่า % retrogradation ลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่า setback จากการวิเคราะห์ด้วย RVA

ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง DSC ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลา ในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH7

ความเข้มข้น ของ STMP(%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Onset temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^{ns}	Peak temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^{ns}	Final temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^{ns}	$\Delta H_{\text{gelatinization}}$ (J/g)	%Retrogradation
0.05%	1	70.25 \pm 0.22	74.79 \pm 0.22	83.84 \pm 0.38	12.34 \pm 0.35Aa	78.03 \pm 1.87Bc
0.10%,		70.45 \pm 0.08	74.82 \pm 0.08	83.88 \pm 0.33	12.63 \pm 0.77Aa	75.89 \pm 0.85Bc
0.15%,		70.54 \pm 0.07	74.90 \pm 0.10	83.90 \pm 0.14	12.93 \pm 0.52Aa	68.29 \pm 0.45Ac
0.05%,	2.5	71.17 \pm 0.12	74.68 \pm 0.19	83.94 \pm 0.59	13.96 \pm 0.81Ab	66.37 \pm 0.96Bb
0.10%,		71.22 \pm 0.20	74.87 \pm 0.17	84.05 \pm 1 .20	14.36 \pm 0.76Ab	66.15 \pm 0.94Bb
0.15%		71.39 \pm 0.03	74.98 \pm 0.00	84.11 \pm 0.17	14.54 \pm 0.78Ab	61.48 \pm 0.96Ab
0.05%	4	71.27 \pm 0.17	75.00 \pm 0.56	83.94 \pm 2.05	15.35 \pm 0.81Ac	58.36 \pm 0.20Ca
0.10%		71.32 \pm 0.09	75.08 \pm 0.23	84.08 \pm 1.16	15.49 \pm 0.22Ac	55.38 \pm 1.09Ba
0.15%		71.47 \pm 0.13	75.16 \pm 0.10	84.13 \pm 0.17	15.60 \pm 0.38Ac	51.51 \pm 0.81Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		69.68 \pm 0.20	73.53 \pm 0.42	81.36 \pm 1.98	15.99 \pm 0.85	67.97 \pm 1.34

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง DSC ของสตาร์ชสาคุจินัดแปรร
ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลา
ในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH7

ความเข้มข้น ของ STMP(%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Onset temperature (°C)	Peak temperature (°C)	Final temperature (°C)	$\Delta H_{\text{gelatinization}}^{\text{ns}}$ (J/g)	%Retrogradation
0.05%	1	68.29 ± 0.07Aa	71.18 ± 0.02Aa	76.52 ± 0.17Aa	16.39 ± 0.65	81.82 ± 1.10Cc
0.10%,		68.36 ± 0.10Aa	71.27 ± 0.53Aa	76.63 ± 0.66Aa	16.46 ± 0.53	73.36 ± 0.27Bc
0.15%,		68.65 ± 0.04Aa	71.31 ± 0.00Aa	76.71 ± 0.10Aa	16.56 ± 0.51	69.77 ± 0.24Ac
0.05%,	2.5	69.24 ± 0.13Ab	71.80 ± 0.17Ab	76.68 ± 0.39Aa	16.52 ± 0.82	66.38 ± 0.54Bb
0.10%,		69.41 ± 0.13Ab	71.84 ± 0.19Aa	77.18 ± 0.21Aa	16.73 ± 0.46	65.18 ± 0.70Bb
0.15%		69.52 ± 0.10Ab	71.89 ± 0.09Ab	77.27 ± 0.25Ab	16.79 ± 0.72	57.35 ± 0.82Ab
0.05%	4	69.82 ± 0.24Ac	72.02 ± 0.19Ab	77.07 ± 0.36Aa	17.07 ± 0.57	57.18 ± 0.20Ba
0.10%		69.93 ± 0.18Ac	72.32 ± 0.29Aa	77.94 ± 0.29Ab	17.57 ± 0.51	49.84 ± 0.30Aa
0.15%		69.97 ± 0.02Ac	72.36 ± 0.10Ac	77.95 ± 0.52Ac	17.71 ± 0.23	47.39 ± 0.69Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		67.19 ± 0.12	70.34 ± 0.26	76.15 ± 1.12	18.10 ± 0.60	94.65 ± 0.85

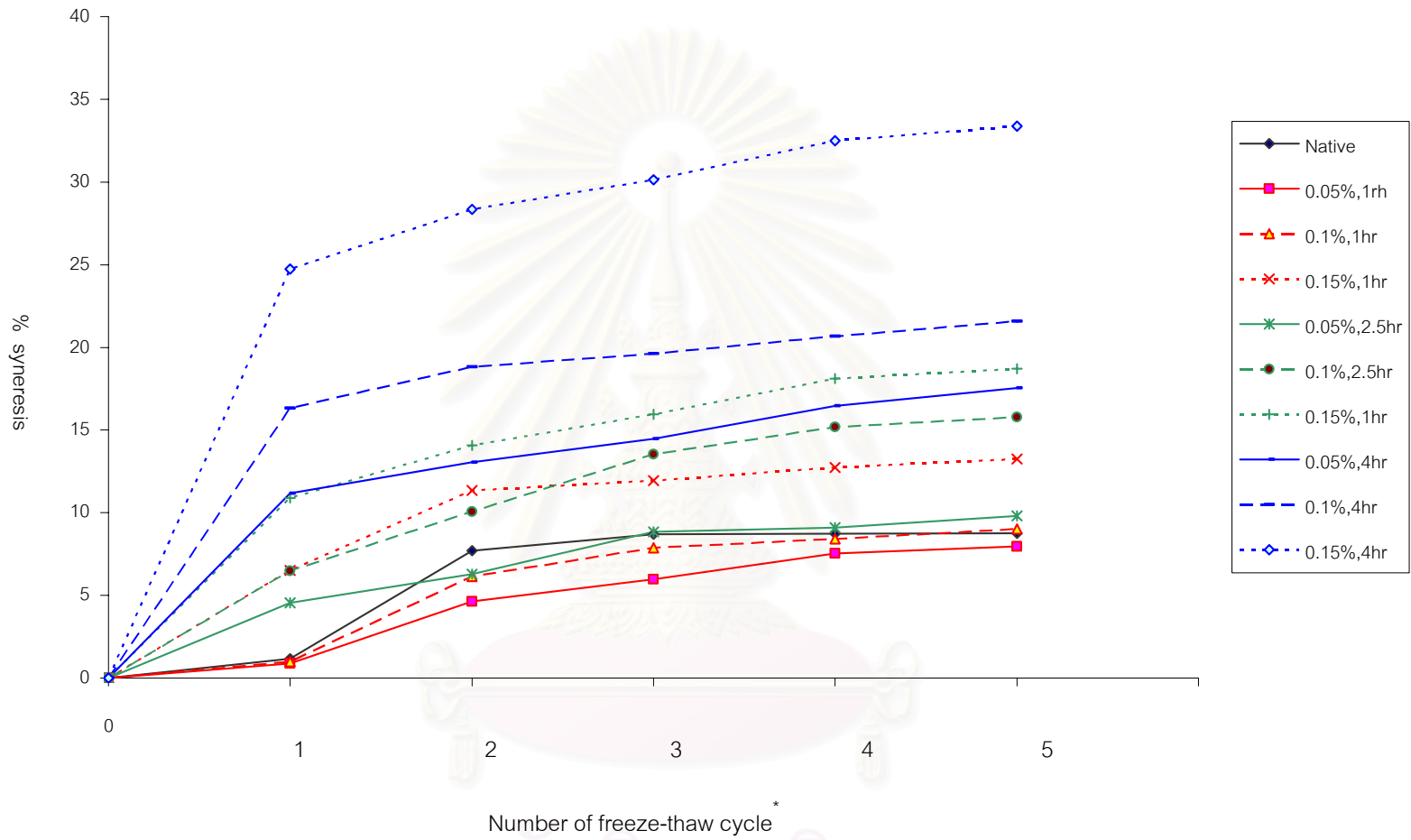
ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

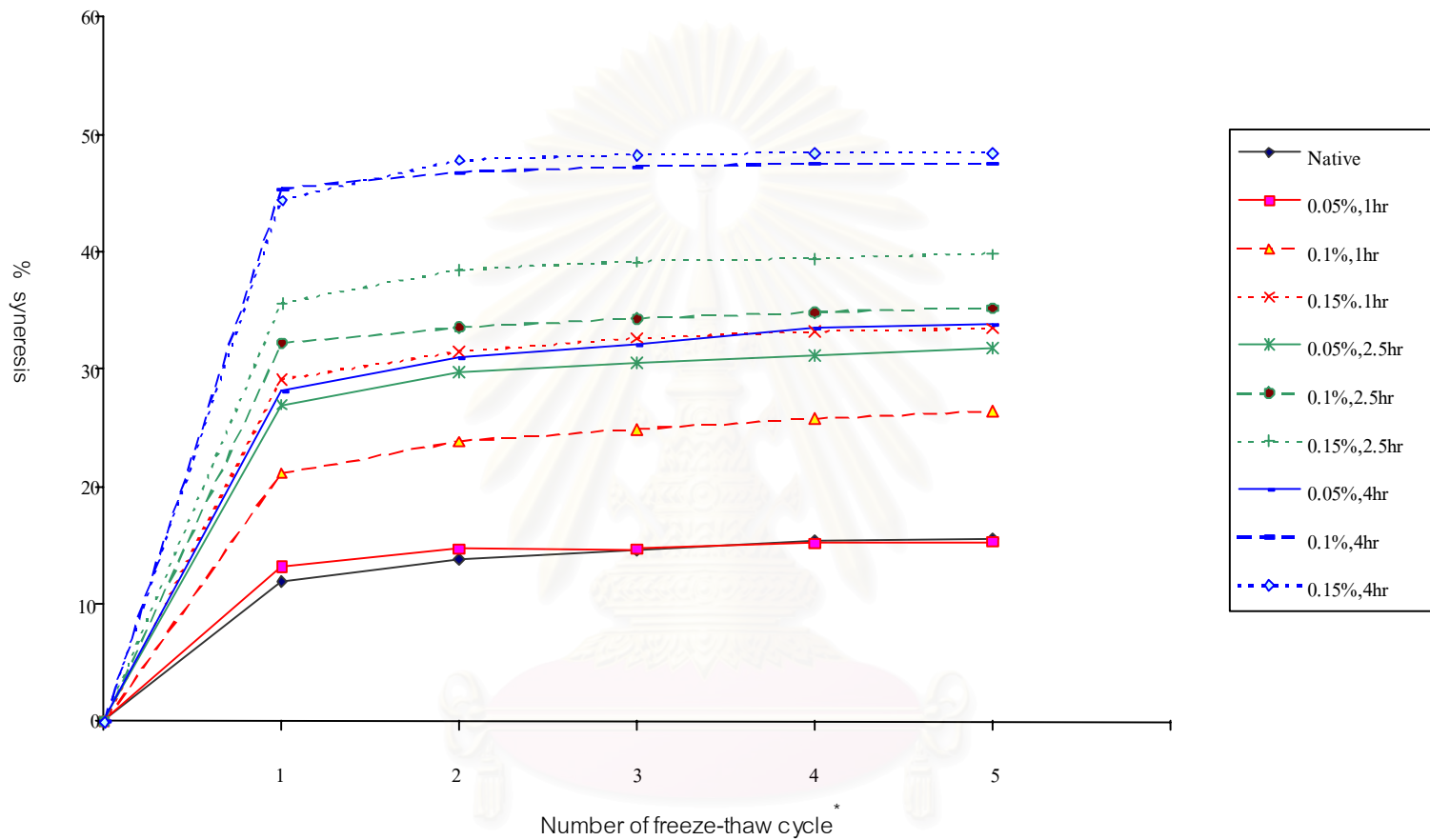
4.3.4.7 เสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชจากข้าวไทย และ สา쿠จินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง

จากการศึกษาเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง โดยวัดปริมาณ น้ำที่แยกออกจากเจล ที่ความเข้มข้น 6% หลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge หรือค่า %syneresis พบว่า ความเข้มข้นของ STMP เวลาในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของ STMP และเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อค่า % syneresis อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.35 – ข.36, ภาคผนวก ข.) โดยสตาร์ชจากข้าวไทย และสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางมีค่า % syneresis สูงขึ้น เมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ พบว่าสตาร์ชจากข้าวไทย และสาคุจินดัดแปรมีค่า% syneresis สูงกว่าสตาร์ชจากธรรมชาติ (รูปที่ 4.27 - 4.28) และสตาร์ชจากข้าวไทย และสาคุจินดัดแปรจะมีน้ำแยกออกมาจากเจลอย่างชัดเจนในรอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง อย่างไรก็ตามพบว่าเจลที่ได้หลังจากการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy) ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง แสดงว่าสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางมีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับ Wurzburg (1986) ที่กล่าวว่า การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางไม่ทำให้สตาร์ชมีเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง เพิ่มขึ้น ดังนั้นสตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ได้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ

* 1 freeze-thaw cycle คือ แช่แข็งที่ -18 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่ 30 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง %syneresis กับรอบในการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งของสตาร์ชจากจุลินทรีย์ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ
 * 1 freeze-thaw cycle คือ แช่แข็งที่ -18 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่ 30 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างกัน มีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน โดย %yeild ในการสกัดสตาร์ชสาकुไทยมีค่าเท่ากับ 20.1-20.9% ผลผลิตที่ได้มีสตาร์ช 96.8-97.9% อะไมโลส 38.4% และมีโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ฟอสฟอรัส อยู่ในปริมาณต่ำ ส่วน %yeild ในการสกัดสตาร์ชจากหัวสาकुจีนมีค่าเท่ากับ 16.8-17.0% ผลผลิตที่ได้มีสตาร์ช 96.7-97.8% อะไมโลส 52.9% และมีโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ฟอสฟอรัส อยู่ในปริมาณต่ำ เช่นเดียวกับสตาร์ชสาकुไทย

2. เม็ดสตาร์ชสาकुไทย มีลักษณะกลม ขนาด 10 – 25 μm . และมี birefringence อยู่ ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช ส่วนเม็ดสตาร์ชสาकुจีนมีลักษณะกลมรี ขนาด 20-80 μm . และมี birefringence อยู่ด้านปลายของเม็ดสตาร์ช สตาร์ชสาकुไทยมีค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลายที่ 75-85 $^{\circ}\text{C}$ สูงกว่าสตาร์ชสาकुจีน สตาร์ชสาकुไทยมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน ประมาณ 85 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชสาकुจีนที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันประมาณ 75 $^{\circ}\text{C}$ โดยสตาร์ชสาकुไทยมีค่า peak viscosity ค่า setback และเสถียรภาพของความหนืดมากกว่าสตาร์ชสาकुจีน (ค่า breakdown ต่ำกว่า) แต่สตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดมีเสถียรภาพของความหนืดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชทำวยายม่อม และเมื่อศึกษาผลของ pH ต่อสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนที่ pH 3-9 พบว่าสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ pH 3 และ pH 9 โดยจะเปลี่ยนแปลงที่ pH 9 มากกว่าที่ pH 3 และจากการศึกษาเสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง พบว่าสตาร์ชสาकुทั้งสองชนิดมีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำ โดยเฉพาะจะเป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

3. การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ทำให้สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนมีปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้น โดยปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชสาकुไทยเพิ่มขึ้นมากกว่าสตาร์ชสาकुจีน แต่ปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรที่ได้มีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สตาร์ชสาकुไทยดัดแปรมีโครงสร้างผลึก A ซึ่งแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ส่วนสตาร์ชสาकुจีนดัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เหมือนสตาร์ชธรรมชาติ

สตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปรมีค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลายสูงขึ้น และสตาร์ชดัดแปรที่ได้มีเสถียรภาพของความหนืดสูงขึ้น แต่ค่า pasting temperature, ค่า peak viscosity, ค่า setback และ % retrogradation ต่ำลง นอกจากนี้การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งได้เล็กน้อย

4. การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางทำให้สตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนมีปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้น โดยปริมาณฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นในสตาร์ชสาคุจีนมากกว่าสตาร์ชสาคุไทย แต่ปริมาณฟอสเฟตในสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปรที่ได้มีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สตาร์ชสาคุไทยดัดแปรมีโครงสร้างผลึก A ซึ่งแตกต่างจากสตาร์ชธรรมชาติที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ส่วนสตาร์ชสาคุจีนดัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B เหมือนสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีนดัดแปรมีค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลายต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ และสตาร์ชดัดแปรจะมีเสถียรภาพของความหนืดสูงขึ้น โดยที่ระดับการแทนที่ต่ำ สตาร์ชมีค่า peak viscosity, ค่า setback และ % retrogradation สูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ แต่ที่ระดับการแทนที่สูงขึ้น สตาร์ชมีค่า peak viscosity, ค่า setback และ % retrogradation ต่ำกว่าสตาร์ชธรรมชาติ นอกจากนี้สตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะสามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดและด่างได้เพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชสาคุไทยที่ดัดแปรโดยใช้ความเข้มข้นของ STMP 0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง; STMP 0.10-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง และสตาร์ชสาคุจีนที่ดัดแปรโดยใช้ความเข้มข้นของ STMP 0.15% เวลา 1 ชั่วโมง; STMP 0.10-0.15% เวลา 2.5 ชั่วโมง; STMP 0.05-0.15% เวลา 4 ชั่วโมง มีเสถียรภาพของความหนืดสูงมากในทุก pH แต่อย่างไรก็ตามการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางไม่ช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาสมบัติการย่อยของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนเพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ ซึ่งควรควบคุมสภาวะให้คล้ายกับการย่อยในร่างกายมนุษย์ จากที่ผู้ทดลองได้ทำการวิจัยเบื้องต้น โดยทำการทดลองแบบ enzyme digestibility พบว่าสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -amylase ที่สกัดจากตับอ่อนหมูได้น้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชถั่วเขียวที่ pH 7 เวลา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ควรศึกษาการย่อยที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น และอาจนำสตาร์ชไปผ่านสภาวะที่เป็นกรด และทำให้เป็นกลางก่อนนำมาย่อยเพื่อเป็นการจำลองสภาวะการย่อยในร่างกาย

2. ควรมีการศึกษาการนำสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น นำสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนธรรมชาติไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในอาหารกระป๋อง สตาร์ชดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในซอส มะเขือเทศ และซอสพริก เป็นต้น

3. ควรศึกษาการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่เพิ่มเติม โดยเปลี่ยนสภาวะในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้สตาร์ชดัดแปรมีความเสถียรต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิตรา เศรษฐอุดม. 2528. ผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของแป้งมันฝรั่งที่ปลูกในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์. 2546. สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชทำวยายม่อม *Tacca leontopetaloides* Kize. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดำริ ถาวรมาศ. 2532. สาคร. กสิกร. 62(6): 567-571.
- วรรณุช ศรีเจษฎารักษ์. 2530. การแปรสภาพแป้งมันฝรั่งเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิวาพร ศิวเวชช. 2529. วัตถุประสงค์ในอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุนีรัตน์ ทักษิณธรรม. 2543. การวิเคราะห์ตลาดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. คณะเศรษฐศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรังรักษ์ อนุตตุมิกุล. 2544. การปรับปรุงคุณสมบัติความคงตัวของแป้งมันสำปะหลัง แปะ้ง และการทำให้ละลายของแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาคร และแป้งข้าวเจ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ไสว พงษ์เก๋า และสมภณ สินธุประมา. 2523. พืชหัว. สารานุกรมไทยฉบับเยาวชน. เล่มที่ 5. 177-180.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2521. มาตรฐานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง มอก. 274-2521: สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2535. มาตรฐานอุตสาหกรรมแป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร มอก. 1073 -2535: สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

- A.O.A.C. 2000. Official Methods of Analysis. *Association of the Official Analytical Chemists*. 17th ed. Washington, DC.: AOAC. International.
- Baker, L.A., and Duarte, P.R. 1995. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperature and the effect of salt and sugars. *Cereal Chemistry*. 75(3): 308 -314
- Bowers, J. 1992. *Food theory and applications*. New York: Macmillian Publishing Company.
- Brogracheva, T.Y., Morris, V.J., Ring, S.G., and Hedley, C.L. 1998. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization. *Biopolymers*. 45: 323 -332.
- Chung, H.J., Woo, K.S., and Lim, S.T. 2003. Glass transition and enthalpy relaxation of cross-linked starches. *Carbohydrate Polymer*. 55: 9 -15.
- Collison, R. 1968. Starch retrogradation. In J.A. Radley (ed.). *Starch and its derivative*. pp. 395-420. London: Chapman and Hall.
- Doremus, G.L., Crenshaw, F.A., and Thurber, F.H. 1951. Amylose content of sweet potato starch. *Cereal Chemistry*. 28(4): 308-317.
- Erdman, M.D. 1986. Starch from arrowroot (*Maranta arundinacea*) grown of Tifton and Georgia. *Cereal Chemistry*. 63(3): 277-279.
- Flanch, B.M., and Rumawas, F. 1996. Plants yielding non-seeding carbohydrate. *Plant Research of South - East Asia*. 9:156-159.
- Freeman, J.E. and Verr, W.J. 1972. A rapid procedure for measuring starch paste development and its application to corn and sorghum starches. *Cereal Science Today*. 17(2): 46-53.
- French, D. 1975. Chemistry and biochemistry of starch. In W.J. Whelan (ed.), *Biochemistry of carbohydrates*. pp. 267-335. London: Butterworths.
- Fruton, J.S., and Simmonds, S. 1958. *General biochemistry*. 2nd ed. pp. 235-318. New York: John Wiley and Sons.
- Furia, T.E. 1972. *CRC Handbook of food additive*. pp. 384 -392, 542-545. Vol I. Ohio: CRC Press.

- Gallant, D.J., Bouchet, B., and Baldwin, P.M. 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granular organization. *Carbohydrate Polymer*. 32: 177.
- Goldstein, A.M., Kohl, F.A., and Kaplan, L. 1966. Modified starch. *U.S. patent*. 3,278,522. October 11.
- Haasse, N.U. Mintus, T., and Weipert, D. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with the Rapid Visco Analyzer. *Starch/Starke*. 47: 123-126.
- Hizukuli, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. *Carbohydrate Research*. 14: 398-342.
- Hoseney, R.C. 1994. *Cereal science and technology*. New York: American Association of Cereal Chemists.
- International Organization for Standardization (ISO). 1982. *ISO 3946: Starches and derivative products-determination of total phosphorus-spectrophotometric methods*.
- Jane, J.L. and Chen, J.F. 1991. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*. 69(10): 60-65.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled rice amylase. *Cereal Science Today*. 16(10): 334-360
- Katzbeck, W. 1972. Phosphate cross-bonded waxy corn starches solve many food application problems. *Food Technology*. 26(3): 32-33.
- Kerr, R.W. 1950. *Chemistry and industry of starch*. 2nd ed. New York: Academic Press.
- Kerr, R. W. and Cleveland, F. C. 1957. Process for the preparation of distarch phosphate and the resulting products. *U.S. patent*. 2,081,242. July 30.
- Kim, Y.S., Wiesinborn, D.P., Orr, P.H., and Grant, L.A. 1995. Differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*. 60(5): 1060-1065.
- Kite, F.E. 1971. The use of phosphates in food products. In J.M. Deman (eds.). *Symposium: Phosphate in food processing*. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, Inc.
- Kugimiya, M., Donovan, J.W., and Wong, R.Y. 1980. Phase transition of amylase-lipid complexes in starches: A calorimetric study. *Starch/Starke*. 32: 265.

- Leach, H.W., McCowen, L.D., and Schoch, T.J. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility pattern of various starches. *Cereal Chemistry*. 36: 534-544.
- Lim, S., and Seib, P. A. 1993. Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphates. *Cereal Chemistry*. 70. 137-144.
- Madamba, L.S.P., Bustrillose, F.A., and San Pedro, E.L. 1975. Sweet potato starch: Physicochemical properties of whole starch. *The Philippines Agriculturist*. 58(9-10): 338-350.
- Magningat, C.C., and Seib, P.A. 1992. Starch: Occurrence, isolation, and properties of starch granules. In AACC Short Course, *Starch : Structure, properties, and food use*. December 3-4, 1992. Chicago.
- Manavedan, K.C., Raja, and Sindhu, P. 2000. Properties of steam-treated arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch. *Starch/Starke*. 52: 1471-1476.
- McPherson, A.E., and Jane, J. 1999. Comparison of waxy potato with other root and tuber starches. *Carbohydrate polymer*. 40: 57-70
- Miles, M.J., Morris, V.J., and Ring, S.G. 1985. Gelation of amylose. *Carbohydrate Research*. 135: 271-278.
- Muhammad, K., Husin, F., Man, H.M., Ghazali, H.M., and Kennedy, J.F. 1999. Effect of pH on phosphorylation of sago starch. *Carbohydrate polymer*. 42: 85-90.
- Newport Scientific Pty, Ltd. 1995. *Operation manual for series 4 Rapid Visco Analyzer*. pp. 93. Australia: Newport Scientific Pty, Ltd.
- Norbert, U.H., Mintus, T., and Detmold, D.W. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with the Rapid Visco Analyzer. *Starch/Starke*. 47: 123-126
- Oates, C.G. 1996. Physical modification of starch. In *Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology*. Jan. 22-26 and Feb. 19-23, 1996. Bangkok: AIT Center.
- Oates, C.G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends in Food Science and Technology*. 8: 375-382.
- Penfield, M.P., and Campbell, A.M. 1990. *Starch experimental food science*. pp. 189-214 London: Academic Press.

- Perez, E., Lares, M., and Gonzalez, Z. 1997. Some characteristics of *sagu* (*Canna edulis*) and zulu (*Maranta sp.*) rhizomes. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 45(7): 2546-2549.
- Richard, R.M. 1968. Tailoring starches for the baking industry. *The Baker Digest*. 64: 48-53.
- Robin, J.P., Mercier, C., Charbonneire, R., and Guilbot, J.A. 1974. Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. *Cereal Chemistry*. 51: 389-406.
- Rubin, R.W. 1980. Foodstuffs containing crosslinking starches using STMP. *U.S. patent 4,183,969*. January 15
- Sanders, J.P.M. 1996. Starch manufacturing in the world. In *Advanced post-academic course on tapioca starch technology(I)*. January 22-26 and February 19-23, 1996. Bangkok: AIT.
- Santacruz, S., Koch, K., Svensson, E., Ruales, J., and Eliasson, A.-C. 2002. Three under-utilised sources of starch from the Andean region in Ecuador Part I. Physicochemical characterisation. *Journal of Carbohydrate Polymer*. 49(1): 63-70.
- Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches. In R.L. Whistler, R.L., Smith, and J.N., Bemiller (eds.). *Methods in carbohydrate chemistry*, Vol. IV, pp. 106-108. New York: Academic Press.
- Schoch, T.J. 1968. Effect of freezing and cold storage on pasted starches. In D.K. Tressler, W.B. Van Arsdell, and M.J. Copley (eds.). *The freezing preservation of foods*, Vol. IV, pp. 51-59. London: Academic Press.
- Schoch, T.J. 1985. Food application. In Y. Pomeroy (eds.). *Functional properties of food components*. pp. 51-59. London: Academic Press, Inc.
- Schoch, T.J., and Maywald, E.C. 1968. Preparation and properties of various legume starches. *Cereal Chemistry*. 45: 564-573.
- Smith, P.S. 1979. Starch derivative and their use in food. In D.R. Lineback (ed.). *Food Carbohydrate*. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, Inc.

- Smith, C.E., and Tuschhoff, J.V. 1962. Process for modifying starch and the resulting products. *U.S. patent 3,069,410*. December 18
- Solarek, D.B. 1986. Cationic starch. In Wurzburg, O.B. (ed.). *Modified starches : Properties and uses*. pp. 113-124. Florida: CRC Press, Inc.
- Soni, P. L., Sharma, H., Srivastava, H. C., and Gharia, M. M. 1990. Physicochemical properties of *Canna edulis* starch-Comparison with maize starch . *Starch/Starke*. 42: 460-464.
- Stevens, D.J., and Elton, G.A.H. 1971. Thermal properties of starch/water system. I. Measurement of heat of gelatinization by differential scanning calorimeter. *Starch/Starke*. 23:8 -11.
- Swinkels, J.J.M. 1985. Source of starch, its chemistry and physics In Van Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. (eds.) *Starch Conversion Technology*. New York: Marcel Dekker.
- Thiewes, H.J., and Steeneken, P.A.M. 1997. Comparison of the Brabender Viscograph and the Rapid Visco Analyzer. 1. Statistical evaluation of the pasting profile. *Starch/Starke*. 49: 85-92.
- Thitipraphunkul, K., Uttapap, D., Piyachomkwan, K., and Takeda, Y. 2003. A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from different cultivars. Part **I**. Chemical composition and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymer*. 53(3): 317-324.
- Trimble. 1983. Modified starches in foods. *Journal of Consumer and Home Economic*. 7(3): 247-260.
- Tuschhoff, J.V. 1986. Hydroxypropylate starches. In O.B. Wurzburg (ed.). *Modified starches : Properties and uses*. pp. 41-54, 79-130. Florida: CRC Press.
- Varavinit, S., Anuntavuttikul, S., and Shobsngob, S. 2000. Influence of freezing and thawing techniques on stability of sago and tapioca starch pastes. *Starch/Starke*. 52: 214-217.
- Varavinit, S., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P., and Naivikul, O. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability of different varieties of rice flour. *Starch/Starke*. 54: 31-36.

- Visser, R.G.F., Suurs, L.C.G.M., Steenaken, P.A.M., and Jacobsen, E. 1997. *Some physicochemical properties of amylase-free potato starch*. New York: Academic Press, Inc.
- Wang, H.H., Sun, D.W., Zeng, Q., and Yinquan, L. 2000. Effect of pH, corn starches and phosphates on the pasting properties of rice flour. *Journal of Food Engineering*. 46: 133-138.
- Weltztein, H.L., and Lyon, P. 1956. Modified starches. *Chemical Abstracts*. 50: 13489.
- Whistler, R.L., and Smart, C.L. 1953. *Polysaccharide Chemistry*. pp.239-245. New York.: Academic Press.
- Wootton, M., and Manatsathit, A. 1984. The influence of molar substitution on the gelatinization of hydroxypropyl maize starches. *Starch/Starke*. 36(6): 207-208.
- Wurzburg, O.B. 1972. Starch in the food industry. *Handbook of food additive*, Vol I, pp. 361-375. New York: CRC Press.
- Wurzburg, O.B. 1986. *Modified starches : Properties and uses*. Florida: CRC Press, Inc.
- Zobel, H.F. 1964. X-ray analysis of granular starches. In R.L. Whistler, R.L., Smith, and J.N., Bemiller (eds.). *Methods in carbohydrate chemistry*, Vol. IV, pp. 109. New York: Academic Press.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC 32.1.03 (2000)

อุปกรณ์

ตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น Modell 600, Germany)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียม (aluminium dish) ที่มีฝาปิด เคลือบให้กระจายอย่างสม่ำเสมอ
2. นำไปอบแห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 135 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขณะที่อบเปิดฝาไว้
3. หลังจากอบปิดฝาให้สนิทและนำไปใส่ในเดสซิเคเตอร์เพื่อให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาความชื้นจากสมการ

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}}$$

ก.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ AOAC 32.1.32 (2000)

อุปกรณ์

1. BÜchi Digestion Unit (ยี่ห้อ BÜchi รุ่น K-424, Switzerland)
2. BÜchi Distillation Unit (ยี่ห้อ BÜchi รุ่น B-324, Switzerland)

วิธีทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ทราบแน่นอนประมาณ 2 gm ใส่ใน Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา (selenium mixture) 5 กรัม และเติม H_2SO_4 เข้มข้น 20 ml
3. ย่อยด้วยเครื่อง digestion unit เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนตัวอย่างใสเป็นสีเขียวอ่อน
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และนำเข้าเครื่องกลั่น โดยตั้งโปรแกรมให้เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 75 มล. กรดบอริก 50 มล. แล้วทำการกลั่นนาน 5 นาที
5. รองรับสารที่กลั่นได้ด้วยกรดบอริกเข้มข้น 4% ปริมาตร 50 มล. ซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ (เมธิลเรด 0.125 กรัม และเมธิลีนบลู 0.0825 กรัม ในเอทานอล (90%) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร)

6. นำสารละลายที่กลั่นได้มาไตเตรทด้วยกรดเกลือความเข้มข้น 0.1 N แล้วคำนวณเป็นปริมาณโปรตีนจากสมการ

$$\text{ปริมาณโปรตีน(\%)} = \frac{[\text{ปริมาณกรดเกลือที่ใช้ไตเตรท (มล.)} \times \text{ความเข้มข้นของกรดเกลือ(N)} \times 1.4 \times 6.25]}{[\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)*}]}$$

$$* \text{ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่าง} \times (100 - \% \text{ ความชื้น})]}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

ก.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธีของ AOAC 32.1.13 (2000)

อุปกรณ์

Soxhlet (ยี่ห้อ Gerhardt รุ่น HC61, Germany)

วิธีทดลอง

1. อบขวดก้นกลมที่อุณหภูมิ 135 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างใส่กระดาษกรองเบอร์ 1 ประมาณ 3 กรัม นำไปใส่ไว้ใน thimble
3. ใส่ petroleum ether 250 มล. ลงในขวดก้นกลมที่ผ่านการอบ และชั่งน้ำหนักแล้ว
4. นำไปประกอบเข้ากับชุดสกัดไขมัน ทำการสกัดไขมันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. ระเหย Petroleum ether แล้วนำขวดก้นกลมไปอบที่ อุณหภูมิ 135 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณไขมันจาก

$$\% \text{ ไขมัน} = \frac{(\text{น้ำหนักขวดก้นกลมหลังสกัดไขมัน} - \text{น้ำหนักขวดก้นกลมก่อนสกัดไขมัน}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

ก.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC 32.1.05 (2000)

อุปกรณ์

เตาเผา (muffle furnace, ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotherm, USA)

วิธีทดลอง

1. เเผครุชีเบิล (crucible) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่าง 3 - 5 กรัม ใส่ในครุชีเบิลที่เผา และทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
3. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่

4. นำมาทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณปริมาณได้จากสมการ

$$\text{ปริมาณเก่า} = \frac{\text{น้ำหนักเก่า} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

ก.5 ปริมาณเส้นใย ตามวิธีของ AOAC 32.1.15-2000

อุปกรณ์

1. กรวยบุชเนอร์
2. ตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น model 600, Germany)
3. เตาเผา (muffle furnace, ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotherm, USA)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันและอบแห้งแล้ว (หรือตัวอย่างที่มีปริมาณไขมัน < 1%) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 ml.
2. เติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 ml ลงในบีกเกอร์ ต้มให้สารละลายเดือดตลอดเวลานาน 30 นาที และสังเกตไม่ให้ปริมาตรของสารละลายลดลง หากลดลงให้เติมน้ำร้อนลงไป
3. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรดผ่านกรวยบุชเนอร์เซรามิกที่รองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์กรด
4. นำกากที่ได้มาย่อยต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 ml ต้มเดือดนาน 30 นาที และควบคุมปริมาตรของสารละลายเช่นเดียวกับข้อ 2
5. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยด่างผ่านกรวยบุชเนอร์ที่รองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างกากด้วยน้ำกลั่นจนหมดฤทธิ์ด่าง
6. ล้างกากที่ได้ด้วยเอทานอลปริมาตร 25 ml อีก 2 ครั้ง
7. นำกากที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ $130 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
8. ทิ้งให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักจะได้เป็นน้ำหนักก่อนเผา
9. นำตัวอย่างใส่ครุชีเบลที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
10. เผาครุชีเบลพร้อมตัวอย่างที่อุณหภูมิ $600 \pm 15^{\circ}\text{C}$ จนเถ้าเป็นสีขาว
11. ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
12. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา นำมาคำนวณหาปริมาณเส้นใยโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณเส้นใย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา(gm)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา(gm)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการหาปริมาณไขมัน (gm)}} \times 100$$

ก. 6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\%)} = 100 - \%(\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เถ้า} + \text{เส้นใย})$$

ก. 7 ปริมาณอะไมโลสในแป้ง ตามวิธีของ Juliano (1971)

อุปกรณ์

เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) (ยี่ห้อ Spectronic รุ่น Genesys 20, USA)

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดน้ำส้มสายชูความเข้มข้น 1 โมลาร์
ตวงกรดน้ำส้มสายชูเข้มข้นปริมาตร 56.9 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร
2. สารละลายไอโอดีน
ชั่งไอโอดีน 0.2000 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0000 กรัม ผสมให้เข้ากัน ละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์
ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
4. สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95
ตวงเอทานอลสมบูร์ก จำนวน 95 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
5. สารละลายมาตรฐานอะไมโลส
ชั่งสารมาตรฐานอะไมโลส 0.0400 กรัม เติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 จำนวน 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันนำไปให้ความร้อนใน water bath เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

วิธีทดลอง

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน(calibration curve)

1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานอะไมโลสจำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ,5, 6, 7 และ 8 มิลลิลิตร ใส่ใน volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ

1.2 เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละขวด 70 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายกรดน้ำส้มสายชู ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 0.2 ,0.4 ,0.6 ,0.8 และ1.0 มิลลิลิตรตามลำดับ

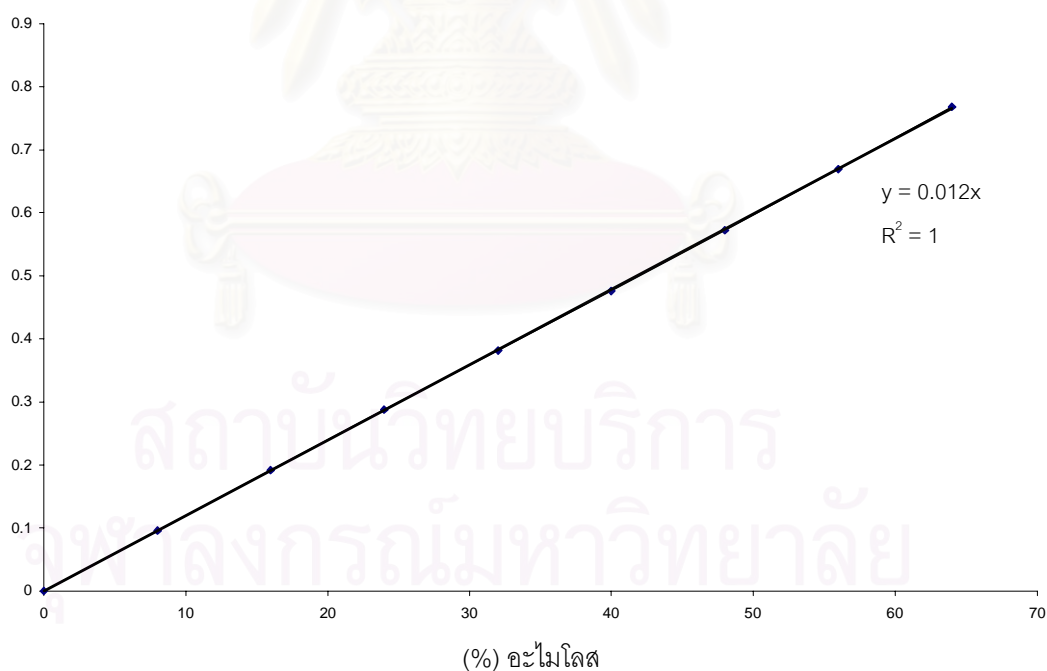
1.3 เติมสารละลายไอโอดีนลงในแต่ละขวด 2 มิลลิลิตร

1.4 ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานอะไมโลส ในสารละลายตัวอย่างที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 ,16 ,24 ,32, 40, 48 และ 56 ตามลำดับ

1.5 เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

1.6 เขียนกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน อะไมโลส

ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 620 nm.



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณอะไมโลส

2. การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

2.1 ชั่งแบ่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม (น้ำหนักแห้ง) เติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 จำนวน 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ

2.2 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 9 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนใน water bath เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และปรับปริมาตรเป็น 100 ml. จะได้สารละลายตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นอะไมโลสต่อไป

3. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอะไมโลสในสารละลายตัวอย่าง

3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ จำนวน 5 มิลลิลิตร กรณีทำ blank ใช้น้ำกลั่นจำนวน 5 มิลลิลิตรแทนสารละลายตัวอย่าง

3.2 เติมน้ำกลั่นจำนวน 70 มิลลิลิตร กรดน้ำส้มสายชูความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 1 มิลลิลิตร สารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

3.3 เขย่า และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

3.4 คำนวณความเข้มข้นของอะไมโลสในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน

ก.8 ปริมาณฟอสฟอรัส ตามวิธีของ ISO 3946 (1982)

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer, ยี่ห้อ Spectronic รุ่น Genesys 20, USA)

2. เตาเผา (muffle furnace, ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotherm, USA)

การเตรียมรีเอเจนต์

1. Sulpho – nitric reagent เตรียมโดยผสม H_2SO_4 เข้มข้น 98% และ HNO_3 เข้มข้น 69% ในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร

2. สารละลายวิตามินซี เตรียมโดยละลายวิตามินซี 50 กรัมในน้ำ 1 ลิตร

3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต เตรียมโดยชั่งแอมโมเนียมโมลิบเดต 10.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติม H_2SO_4 10 M จำนวน 500 มิลลิลิตร ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 M เตรียมโดยชั่ง NaOH 200 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร

5. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสความเข้มข้น 100 mg/ml เตรียมโดยชั่ง KH_2PO_4 (AR grade) ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ จำนวน 435.7 mg ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 ml เขย่าให้เข้ากัน

วิธีทดลอง

1. การสร้างกราฟมาตรฐาน

1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสปริมาตร 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ml. ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml

1.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 30 ml

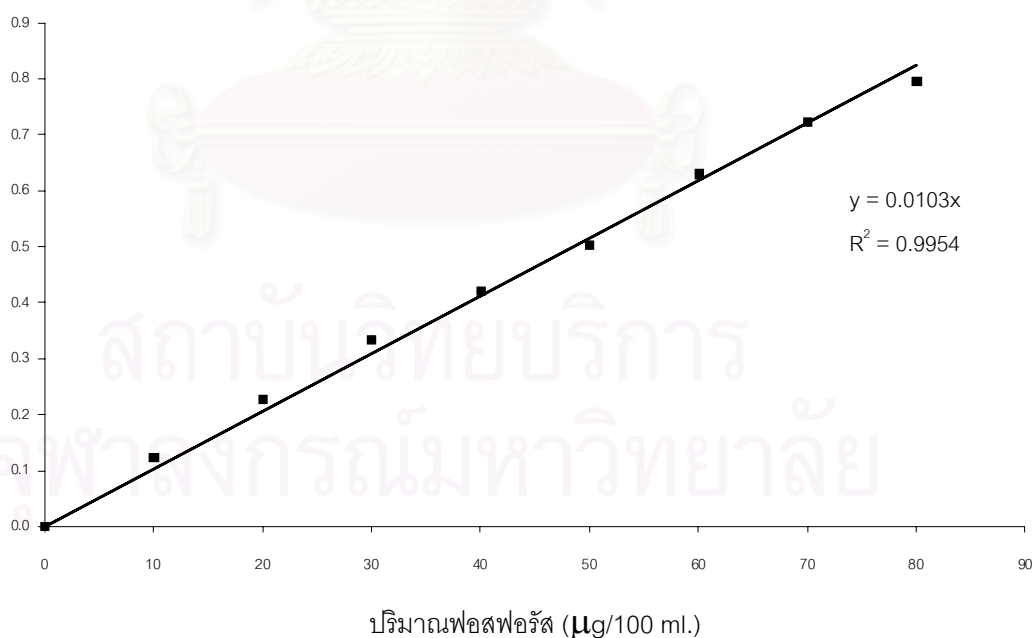
1.3 เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 4 มิลลิลิตร และสารละลายวิตามินซี 2 มิลลิลิตร

1.4 เขย่าให้เข้ากัน แล้วให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดนาน 10 นาที ทำให้เย็นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

1.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 825 นาโนเมตร

1.6 นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟอสฟอรัสกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

ค่าการดูดกลืนแสงที่ 825 nm.



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณฟอสฟอรัส

2. การเตรียมตัวอย่าง

- 2.1 ชั่งแบ่ง 0.5000 ± 0.0002 กรัม (m_0) ใส่ในขวดรูปชมพู่ และเติม Sulpho – nitric reagent จำนวน 15 มิลลิลิตร
- 2.2 ให้ความร้อนจนเดือดเบาๆ และใส่น้ำตาลกลายเป็นสีขาว ของเหลวสุดท้ายที่ได้ต้องใส ถ้าของเหลวมีสีดำให้เติมกรดไนตริกเข้มข้น แล้วย่อยต่อ
- 2.3 ทำให้เย็น เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเพื่อไล่กรดไนตริกส่วนเกินออก
- 2.4 ทำให้เย็นเติมน้ำกลั่น 45 มิลลิลิตร ปรับ pH เป็น 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (V_0)
3. การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในตัวอย่าง
- 3.1 ปิเปตสารที่เตรียมได้ในข้อ 2 จำนวน 25 มิลลิลิตร (V_1)
- 3.2 เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 4 มิลลิลิตร และสารละลายวิตามินซี 2 มิลลิลิตร
- 3.3 เขย่าให้เข้ากัน แล้วให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดนาน 10 นาที ทำให้เย็นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร
- 3.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 825 นาโนเมตร
- 3.5 หาปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลาย (m_1) จากกราฟมาตรฐาน (รูปที่ ก.2) ดังนี้

$$\text{ปริมาณฟอสฟอรัส (\%)} = \frac{m_1 V_0 \times 100}{m_0 V_1 \times 10^6}$$

ก.9 ปริมาณสตาร์ช ตามวิธีของ AOAC 32.1.28-2000

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดดัชนีการหักเหของแสง (ยี่ห้อ polarimeter, ATAGO รุ่น POLAX-D, Japan)
2. เตาให้ความร้อน (hot plate)

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 33%

เตรียมโดยชั่ง $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (AR grade) 437 gm ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ 1.30) ปรับสารละลายให้เป็นด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 N โดยเมื่อแบ่งมาทดสอบกับฟีนอล์ฟทาลีนจะได้เป็นสีชมพูอ่อน

2. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH , AR grade) ความเข้มข้น 0.8% (w/v)

วิธีการทดลอง

1. บดตัวอย่างแบ่งให้มีขนาดเล็กและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2.0-2.5 gm ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml จดน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างไว้
2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 ml ละลายตัวอย่างแล้วเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 33% ปริมาตร 58 ml และสารละลายกรดอะซิติก 0.8% ปริมาตร 2 ml แล้วผสมให้เข้ากัน
3. นำสารละลายมาทำให้เดือดอย่างรวดเร็ว โดยต้มบนตะแกรงลวดของเตาให้ความร้อน ใส่เม็ดลูกแก้วลงไปแล้วเขย่าตลอดเวลา ทำการต้มให้เดือดนาน 15 นาที
4. ทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว โดยแช่ขวดรูปชมพู่ในน้ำที่มีน้ำแข็ง
5. เทสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml โดยล้างขวดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 100 ml
6. ดูดตัวอย่างประมาณ 10 ml กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 ส่วนแรกที่กรองได้ให้ทิ้งไป หลังจากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปเพิ่มแล้วกรอง เก็บส่วนที่กรองได้ประมาณ 40-50 ml.
7. นำส่วนที่กรองได้ไปวัดค่า rotation ด้วยเครื่อง polarimeter โดยใช้หลอดขนาด 20 cm
8. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณสตาร์ช โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณสตาร์ช (\% starch)} = \frac{100 \times R \times 100}{2 \times 203 \times W}$$

- เมื่อ
- R = observed angular rotation
 - W = น้ำหนักตัวอย่าง (gm)
 - 203 = specific rotation ของสตาร์ช
 - 2 = ความยาวของหลอดเท่ากับ 20 cm

ก.10 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer และวิเคราะห์ pattern ตามวิธีของ Zobel (1964)

อุปกรณ์

X-ray diffractometer (JEOL รุ่น JDX-8030, USA)

วิธีทดลอง

1. เปิดเครื่อง X-ray diffractometer ทิ้งไว้นานอย่างน้อย 15 นาที เพื่ออุ่นเครื่อง
2. นำตัวอย่างสตาร์ชโรยบน sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสตาร์ชเรียงตัวกันอัดแน่น
3. นำ sample plate ใส่เข้าเครื่อง X-ray diffractometer ที่ช่อง sample holder

4. วัดค่าช่วงมุมที่ต้องการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสถานะ ดังนี้

Target	:	Cu
kV	:	40.0 kV
mA	:	35.0 mA
Start angle	:	5.00 deg.
Stop angle	:	45 deg.
Step angle	:	0.040 deg.
M. time	:	1.00

5. วิเคราะห์ค่า X-ray diffraction pattern โดยเทียบค่า 2θ , d-spacing และ Intensity ที่ได้กับลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เป็น pattern มาตรฐานดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A, B และ C

starch X-ray diffraction								
A-type			B-type			C-type		
d-spacing A°	Intensit y*	2θ	d-spacing A°	Intensit y*	2θ	d-spacing A°	Intensit y*	2θ
8.72	w-	10.1	<u>15.8</u>	m	5.59	<u>15.4</u>	w	5.73
7.70	w-	11.5	8.9	w-	9.93	8.82	w-	10.0
<u>5.78</u>	s	15.3	7.94	w-	11.1	7.65	w-	11.5
<u>5.17</u>	s	17.1	6.14	m	14.1	<u>5.78</u>	s	15.3
<u>4.86</u>	s-	18.2	<u>5.16</u>	s	17.2	<u>5.12</u>	s	17.3
4.37	m	20.3	4.54	w+	19.5	<u>4.85</u>	m	18.3
3.78	s	23.5	<u>4.00</u>	m	22.2	4.35	w-	20.4
3.30	w+	27.0	<u>3.70</u>	m-	24.0	3.78	m+	23.5
2.88	w	31.0	3.38	w	26.3	3.32	w	26.8
			2.60	w	34.4			

* Intensity scale : strong (s), medium (m), weak (w), less than (-), more than (+)

ที่มา : Zobel (1964)

ก.11 กำล้างการฟองตัว และการละลาย ตามวิธีของ Schoch (1964)

อุปกรณ์

1. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
2. เครื่องเหวี่ยงแยก (ยี่ห้อ Centrifugal Thermo IEC รุ่น IEC MultiRF, USA)
3. ตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น Modell 600, Germany)

วิธีทดลอง

1. นำขวด centrifuge ขนาด 50 ml. อบให้แห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
2. ชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง 1.000 กรัม ใส่ในขวด centrifuge ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
3. เติมน้ำกลั่นลงในขวด centrifuge 36 กรัม คนให้เข้ากัน
4. นำขวด centrifuge ที่บรรจุตัวอย่างแล้วแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ $55 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $65 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $75 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $85 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 30 นาที เพื่อศึกษาการฟองตัวและการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ
5. ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที โดยมีแท่งแก้ววนทุกๆ 5 นาที
6. นำขวด centrifuge มาเช็ดด้านนอกที่เปียกน้ำให้แห้งสนิท
7. ชั่งน้ำหนักขวด centrifuge ปรับให้ขวด centrifuge มีน้ำหนักรวม 60 กรัมด้วยน้ำกลั่น
8. นำขวด ไปเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 10,000g นาน 30 นาที
9. แยกส่วนใสออกจากตะกอน โดยใช้ปิเปตดูดส่วนใสออกมาใส่ชามกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแล้ว พยายามดูดส่วนใสออกให้มากที่สุด (ระวังอย่าให้ตะกอนแป็งติดมาด้วย)
10. นำขวด centrifuge ที่บรรจุสตาร์ชไปชั่งน้ำหนัก
11. นำส่วนใสในชามกระเบื้องไปอบที่อุณหภูมิ 130°C เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำหนักคงที่
12. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักชามกระเบื้องเพื่อหาน้ำหนักสตาร์ชที่ละลายน้ำ
13. คำนวณหาค่ากำล้างการฟองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชโดยใช้สูตร

$$\text{กำล้างการฟองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอนแป็ง(g)} \times 100}{\text{น้ำหนักแป็งแห้ง(g)} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักแป็งที่ละลายน้ำ(g)} \times 100}{\text{น้ำหนักแป็งแห้ง(g)}}$$

ก.12 การเกิดเจลลิตีไนเซชัน และสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA ตามวิธีของ Norbert, Mintus, และ Detmold (1995)

อุปกรณ์

1. เครื่อง RVA (ยี่ห้อ Newport Scientific รุ่น 4D, Australia) พร้อมด้วย can อะลูมิเนียมที่มีใบพัดปิด

2. เครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับควบคุมเครื่อง RVA

วิธีทดลอง

1. เปิดเครื่อง RVA ทิ้งไว้ นาน 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่อง

2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ควบคุม RVA โดยเลือกเงื่อนไข profile ป้อนลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ตั้งชื่อไฟล์ แล้วบันทึกไว้ โดยเลือกเงื่อนไข ดังนี้

- Temperature profile
1. ให้ความร้อนที่ 50 °C เป็นเวลา 1.25 นาที
 2. ให้ความร้อนที่ 50 – 95 °C ด้วยอัตราเร็ว 12 °C/ min (เป็นเวลา 3.75 นาที)
 3. ให้ความร้อนที่ 95 °C เป็นเวลา 2.50 นาที
 4. ให้ความร้อนที่ 50 – 95 °C ด้วยอัตราเร็ว 12 °C/ min (เป็นเวลา 3.75 นาที)
 5. ให้ความร้อนที่ 95 °C เป็นเวลา 1.25 นาที

ควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ให้เท่ากับ 160 รอบ/นาที

3. ตวงน้ำปริมาตร 25.00 ± 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงใน can ของ RVA

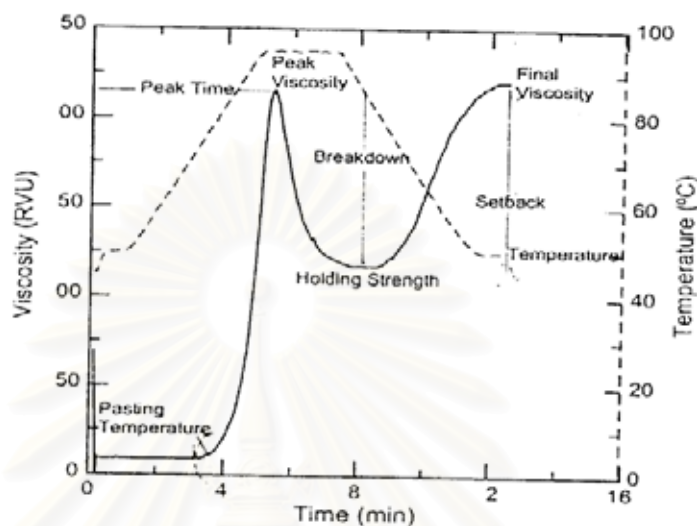
4. ชั่งตัวอย่าง 1.5 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน can ที่มีน้ำอยู่แล้ว

5. ใส่ใบพัดลงใน can หมุนใบพัดกวนไป-มาแรงๆ และดึงขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างแรงๆ ประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับเป็นก้อนที่ผิวหน้า หรือติดที่ใบพัดกวนให้ทำซ้ำอีกครั้ง

6. นำ can ที่ใส่ใบพัดกวนไว้แล้ว สอดเข้าไปในเครื่อง RVA กดมอเตอร์เพื่อให้ RVA ทำงาน หลังจากเครื่องหยุดการทำงานแล้ว นำ can ออกมา เครื่อง RVA จะรายงานการวิเคราะห์เป็นค่าต่างๆ (หน่วย RVU) ดังนี้ รูป ก.3

1. Peak viscosity (ความหนืดสูงสุด) มีหน่วยเป็น RVU
2. Trough (ความหนืดต่ำสุด) มีหน่วยเป็น RVU
3. Breakdown (ความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด) มีหน่วยเป็น RVU
4. Final temperature มีหน่วยเป็น RVU
5. Setback (ผลต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด) มีหน่วยเป็น RVU

6. Pasting temperature (อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ ก.3 ตัวอย่างของสตาร์ชที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วย RVA

ก.13 สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995)

อุปกรณ์

เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Diamond DSC, USA)

วิธีทดลอง

1. ชั่งสตาร์ชที่ทราบน้ำหนัก และค่าความชื้นที่แน่นอนประมาณ 3-4 มิลลิกรัม ใส่ลงใน pan อะลูมิเนียม เติมน้ำกลั่นใน pan ให้ได้อัตราส่วนสตาร์ชแห้งต่อน้ำเท่ากับ 35 : 65 โดยน้ำหนัก โดยคำนวณน้ำหนักสตาร์ชแห้ง และน้ำหนักน้ำกลั่นที่เติมได้จากสูตร

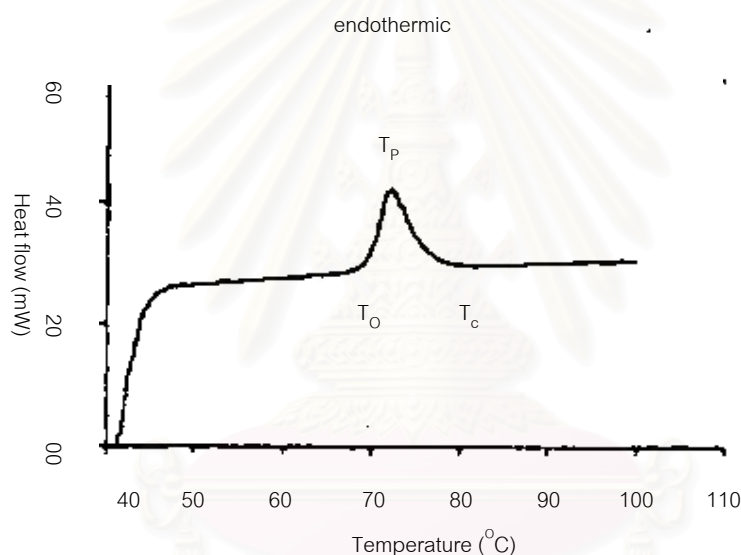
$$1.1 \text{ น้ำหนักสตาร์ชแห้ง} = \frac{(100 - \% \text{ ความชื้น}) \times \text{น้ำหนักสตาร์ชที่ชั่ง (กรัม)}}{100}$$

$$1.2 \text{ ปริมาณน้ำที่ควรเติม} = \left[\frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง} \times 65}{35} \right] - \text{น้ำหนักสตาร์ชที่ชั่ง} + \text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง}$$

2. ปิดฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องมือปิดฝา บ่ม pan ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน เพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่สภาวะสมดุล

3. นำ pan ใส่ในช่อง sample ของเครื่อง DSC และวาง pan เปล่า ในช่อง reference pan ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากอุณหภูมิ 30-120 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min

4. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลิตีในเซชัน (รูปที่ ก.4) ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o °C) อุณหภูมิที่ ΔH สูงสุด (peak temperature, T_p °C) อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (final temperature, T_f °C) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH , หน่วย J/g)



รูปที่ ก.4 ลักษณะ Thermogram ของสตาร์ชที่ได้จากการศึกษาด้วยเครื่อง DSC

ก.14 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ด้วยเครื่อง DSC ดัดแปลงมาจากวิธีของ Baker และ Duarte (1995)

อุปกรณ์

เครื่อง DSC (ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Diamond DSC, USA)

วิธีทดลอง

1. ทดสอบการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชตามวิธีในภาคผนวก ก.13
2. นำ pan ที่ผ่านการทดสอบมาห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ เก็บในตู้เย็นที่ 4 °C เป็นเวลา 7 วัน และเมื่อครบกำหนด นำ pan มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง

3. นำ pan ใส่ในช่อง sample ของเครื่อง DSC และวาง pan เปล่า ในช่อง reference pan ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากอุณหภูมิ 30-120 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min

4. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลิตีโนเซชันอีกครั้ง ได้แก่ T_O , T_p , T_F , ΔH_R (พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการรีเจลลิตีโนเซชัน)

$$\%Retrogradation = (\Delta H_R / \Delta H) \times 100$$

ก.15 เสถียรภาพต่อการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง (Freeze-thaw stability)

ดัดแปลงมาจากวิธีของสุรจักร อุนตุตติกุล (2544)

ดัดแปลงโดยนำหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งต่อที่ -18 °C

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (ยี่ห้อ Centrifugal Thermo IEC รุ่น IEC MultiRF, USA)
2. Magnetic stirrer ที่มี hotplate ในตัว (ยี่ห้อ Framo-Garätetechnik รุ่น M21/1)
3. ตู้แช่แข็ง

วิธีทดลอง

1. นำแป้ง 1.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่น้ำจนมีน้ำหนักรวมเป็น 25 กรัม ใสลงในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว นำไปให้ความร้อนบน magnetic stirrer ที่มีการกวนตลอดเวลา (ที่ความเร็วในการกวนระดับ 5) อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
2. นำหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงไปแช่เยือกแข็งที่ -18 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
3. นำหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงไปละลายใน water bath ที่ 30 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 1,200g เป็นเวลา 15 นาที วัดปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจล นับเป็นการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง 1 รอบ
5. ทำซ้ำข้อ 2-4 ซ้ำ จนครบ 5 รอบ

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณความชื้นในหัวสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
ความชื้น	ชนิด	1	382.077	185.068*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	23.486	11.376*
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.479	0.716
	Error	12	2.065	
โปรตีน	ชนิด	1	3.995	1948.791*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	5.872E-03	2.864
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	5.406E-03	2.637
	Error	12	2.050E-03	
ไขมัน	ชนิด	1	1.250E-003	0.167
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.289E-03	0.305
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.800E-03	1.041
	Error	12	7.494E-03	
เถ้า	ชนิด	1	0.132	6.459*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	3.927E-02	1.925
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.424	20.788*
	Error	12	2.040E-02	
เส้นใย	ชนิด	1	0.190	3.866
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.162	3.286
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.376E-02	0.280
	Error	12	4.918E-02	
คาร์โบไฮเดรต	ชนิด	1	1.525	16.395*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.660E-02	0.286
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.787	8.456*
	Error	12	9.304E-02	

* F_{table}(1, 12) = 4.75 , F_{table}(2, 12) = 3.89 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในสตาร์ชจากพืช
และสาหร่าย ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
ความชื้น	ชนิด	1	33.374	1640.022*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	3.224E-02	1.584
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.050E-03	0.052
	Error	12		
โปรตีน	ชนิด	1	1.176E-02	15.114*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.222E-05	0.029
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	9.556E-04	1.229
	Error	12	7.778E-04	
ไขมัน	ชนิด	1	5.000E-05	0.150
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.056E-04	0.221
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	6.500E-04	1.360
	Error	12	4.778E-04	
เถ้า	ชนิด	1	2.222E-05	0.364
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.056E-04	3.364
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.389E-04	12.091*
	Error	12	6.111E-05	
เส้นใย	ชนิด	1	6.050E-03	0.518
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.004E-02	0.860
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	5.417E-03	0.464
	Error	12	1.167E-02	
คาร์โบไฮเดรต	ชนิด	1	1.365E-02	1.014
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.200E-03	0.535
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	8.167E-04	0.601
	Error	12	1.346E-02	

(ต่อ)

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในสตาร์ชจากข้าว
และสาคุจิ้น ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
สตาร์ช	ชนิด	1	0.123	0.098
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.241	0.192
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.972	2.360
	Error	12	1.260	
อะไมโลส	ชนิด	1	971.229	6570.006*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	3.262E-02	0.221
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	9.974E-02	0.675
	Error	12	0.148	
ฟอสฟอรัส	ชนิด	1	3.556E-03	61547.115*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.172E-07	2.029
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	4.389E-08	0.760
	Error	12	5.778E-08	

* $F_{table}(1, 12) = 4.75$, $F_{table}(2, 12) = 3.89$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชจากพืชไทย และสา쿠จิ้น ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ชนิด	1	0.609	65.371*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.217E-03	0.131
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	3.106E-03	0.334
	Error	12	9.311E-03	
65 °C	ชนิด	1	22.023	569.225*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.113	2.921
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	3.721E-02	0.962
	Error	12	3.869E-02	
75 °C	ชนิด	1	43.152	640.185*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.120	1.778
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.355E-02	1.091
	Error	12	6.741E-02	
85 °C	ชนิด	1	94.348	623.148*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.807E-02	0.185
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	6.927E-02	0.458
	Error	12	0.151	

* F_{table}(1, 12) = 4.75 , F_{table}(2, 12) = 3.89 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากข้าว
และสาหร่าย ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ชนิด	1	6.125E-02	113.660*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.206E-03	2.237
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.117E-03	2.072
	Error	12	5.389E-04	
65 °C	ชนิด	1	46.593	3498.880*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.454E-02	1.843
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.794E-02	1.347
	Error	12	1.332E-02	
75 °C	ชนิด	1	22.267	337.858*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.117	1.773
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.176E-02	1.089
	Error	12	6.591E-02	
85 °C	ชนิด	1	11.440	62.002*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.257	1.393
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.417	2.262
	Error	12	0.185	

* F_{table}(1, 12) = 4.75 , F_{table}(2, 12) = 3.89 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชจากไทย และสตาร์ชจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	ชนิด	1	235.499	159.946*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.099	0.746
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.729	1.175
	Error	6	1.472	
Trough	ชนิด	1	100.052	26.039*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.967	0.251
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.653	0.170
	Error	6	3.844	
Breakdown	ชนิด	1	28.490	9.331*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.448	0.472
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.707	0.232
	Error	6	3.059	
Final viscosity	ชนิด	1	1201.601	479.381*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.686	0.672
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.126	2.843
	Error	6	2.507	
Setback	ชนิด	1	480.194	175.634*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	1.565	0.573
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.584	0.945
	Error	6	2.734	
Pasting temperature	ชนิด	1	76.255	899.324*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.771E-02	0.327
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.646E-02	0.312
	Error	6	8.479E-02	

* F_{table}(1, 6) = 5.99, F_{table}(2, 6) = 5.14 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคูไทย ที่ pH ต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	pH	3	12345.893	6618.894*
	Error	4	1.865	
Trough	pH	3	1726.670	1029.350*
	Error	4	1.677	
Breakdown	pH	3	7778.097	2983.400*
	Error	4	2.607	
Final viscosity	pH	3	39892.991	814.638*
	Error	4	48.970	
Setback	pH	3	28231.645	734.179*
	Error	4	38.453	
Pasting temperature	pH	3	3.819	19.869*
	Error	4	0.192	

* F_{table}(3, 4) = 6.59 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคุจิ้น ที่ pH ต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	pH	3	17285.640	44380.474*
	Error	4	0.389	
Trough	pH	3	1056.941	1029.204*
	Error	4	1.027	
Breakdown	pH	3	11672.145	64980.629*
	Error	4	0.180	
Final viscosity	pH	3	14824.461	17170.362*
	Error	4	0.863	
Setback	pH	3	8708.742	3879.215*
	Error	4	2.245	
Pasting temperature	pH	3	1.259	13.841*
	Error	4	9.094E-02	

* F_{table}(3, 4) = 6.59 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาकुไทย
และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่ผ่านการแช่แข็ง-ละลายน้ำแข็ง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Cycle 1	ชนิด	1	520.128	463.844*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.202	0.180
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	7.910E-02	0.071
	Error	12	1.121	
Cycle 2	ชนิด	1	320.977	2324.844*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	2.463E-03	0.018
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	8.914E-02	0.646
	Error	12	0.138	
Cycle 3	ชนิด	1	134.530	284.532*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.110	0.232
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	4.575E-02	0.097
	Error	12	0.473	
Cycle 4	ชนิด	1	63.563	572.293*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.249	2.241
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.207	1.864
	Error	12	0.111	
Cycle 5	ชนิด	1	54.344	231.230*
	อายุการเก็บเกี่ยว	2	5.970E-02	0.254
	ชนิด x อายุการเก็บเกี่ยว	2	0.110	0.469
	Error	12	0.235	

* F_{table}(1, 12) = 4.75 , F_{table}(2, 12) = 3.89 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในหัวสาकुไทย
และสาकुจิ้น ที่ฤดูการเพาะปลูกต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
ความชื้น	ชนิด	1	421.031	741.664*
	ฤดูการเพาะปลูก	1	8.434	14.856*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	6.720	11.838*
	Error	8		
โปรตีน	ชนิด	1	7.053E-02	34.831*
	ฤดูการเพาะปลูก	1	0.930	459.078*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	1.555	768.000*
	Error	8	2.025E-03	
ไขมัน	ชนิด	1	7.500E-05	0.085
	ฤดูการเพาะปลูก	1	6.750E-04	0.764
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	4.083E-04	0.462
	Error	8	8.833E-04	
เถ้า	ชนิด	1	0.594	22.292*
	ฤดูการเพาะปลูก	1	4.165	156.301*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	0.205	7.708*
	Error	8	2.665E-02	
เส้นใย	ชนิด	1	4.800E-03	0.213
	ฤดูการเพาะปลูก	1	0.555	24.590*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	0.124	5.498*
	Error	8	2.256E-02	
คาร์โบไฮเดรต	ชนิด	1	0.000	0.000
	ฤดูการเพาะปลูก	1	7.648	108.778*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	4.320E-02	0.614
	Error	8	7.034E-02	

* F_{table} (1, 8) = 5.32 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในสตาร์ชจากพืชและ
สาหร่าย ที่ฤดูการเพาะปลูกต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
ความชื้น	ชนิด	1	24.168	4119.615*
	ฤดูการเพาะปลูก	1	1.944	331.376*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	4.688E-02	7.990*
	Error	8	5.867E-03	
โปรตีน	ชนิด	1	6.533E-03	60.308*
	ฤดูการเพาะปลูก	1	1.633E-03	15.077*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	1.333E-04	1.231
	Error	8	1.083E-04	
ไขมัน	ชนิด	1	7.500E-05	0.214
	ฤดูการเพาะปลูก	1	2.083E-04	0.595
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	2.083E-04	0.595
	Error	8	3.500E-04	
เถ้า	ชนิด	1	0.000	0.000
	ฤดูการเพาะปลูก	1	1.633E-03	21.778*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	8.333E-04	11.111*
	Error	8	7.500E-05	
เส้นใย	ชนิด	1	6.750E-04	1.191
	ฤดูการเพาะปลูก	1	0.291	514.250*
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	6.750E-04	1.191
	Error	8	5.667E-04	
สตาร์ช	ชนิด	1	3.287	1.491
	ฤดูการเพาะปลูก	1	0.780	0.354
	ชนิด x ฤดูการเพาะปลูก	1	2.670	1.211
	Error	8	2.205	

(ต่อ)

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีในสตร้าสาคูไทย และสาคูจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
อะไมโลส	ชนิด	1	607.763	2598.112*
	ฤดูกาลเพาะปลูก	1	0.730	3.121
	ชนิด x ฤดูกาลเพาะปลูก	1	8.003E-02	0.342
	Error	8	0.234	
พอสฟอรัส	ชนิด	1	1.815E-03	24.099*
	ฤดูกาลเพาะปลูก	1	8.112E-05	1.077
	ชนิด x ฤดูกาลเพาะปลูก	1	7.533E-05	0.830
	Error	8		

* F_{table}(1, 8) = 5.32 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณพอสฟอรัส ของสตร้าสาคูไทย และสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
สาคูไทย	ความเข้มข้น	2	1.006E-02	385198.043*
	เวลา	2	2.421E-06	92.702*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.106E-07	4.234*
	Error	9	2.611E-08	
สาคูจีน	ความเข้มข้น	2	6.440E-02	626561.746*
	เวลา	2	1.710E-03	16634.600*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.678E-04	3578.535*
	Error	9	1.028E-07	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการฟองตัวของสตาโรซซาอูไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	51.740	549.563*
	เวลา	2	0.196	2.078
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.173	1.837
	Error	27	9.415E-02	
65 °C	ความเข้มข้น	2	89.930	78.401*
	เวลา	2	13.086	11.409*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	12.661	11.038*
	Error	27	1.147	
75 °C	ความเข้มข้น	2	16053.115	1875.027*
	เวลา	2	1398.584	163.357*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1211.128	141.462*
	Error	27	8.562	
85 °C	ความเข้มข้น	2	10974.232	11588.951*
	เวลา	2	600.560	634.200*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	518.587	547.636*
	Error	27	0.947	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากพืช
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	19.462	13.972*
	เวลา	2	2.427	1.743
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.492	0.353
	Error	27	1.393	
65 °C	ความเข้มข้น	2	157.956	273.270*
	เวลา	2	133.535	231.021*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	5.969	10.326*
	Error	27	0.578	
75 °C	ความเข้มข้น	2	657.476	1097.588*
	เวลา	2	337.828	563.968*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.922	8.216*
	Error	27	0.599	
85 °C	ความเข้มข้น	2	821.313	2352.231*
	เวลา	2	782.733	2241.739*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	9.762	27.958*
	Error	27	0.349	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการฟองตัวของสตาร์ชสาคุจิ้น
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	37.650	116.471*
	เวลา	2	5.803	17.953*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.058	9.461*
	Error	27	0.323	
65 °C	ความเข้มข้น	2	23.623	56.526*
	เวลา	2	1.877	4.490*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.017	4.825*
	Error	27	0.418	
75 °C	ความเข้มข้น	2	5718.813	2849.199*
	เวลา	2	139.716	69.609*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	155.420	77.433*
	Error	27	2.007	
85 °C	ความเข้มข้น	2	10296.191	14099.982*
	เวลา	2	318.142	435.675*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	447.166	612.365*
	Error	27	0.730	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาโรซาคูจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
 ปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	9.771	55.216*
	เวลา	2	1.306	7.377*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.758	4.281*
	Error	27	0.17	
65 °C	ความเข้มข้น	2	12.435	9.262*
	เวลา	2	24.443	18.205*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.976	2.961*
	Error	27	1.343	
75 °C	ความเข้มข้น	2	120.493	143.660*
	เวลา	2	59.634	71.099*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.831	5.759*
	Error	27	0.839	
85 °C	ความเข้มข้น	2	83.217	153.827*
	เวลา	2	63.818	117.968*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.533	8.379*
	Error	27	0.541	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 -3 ชั่วโมง และ pH 7

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	ความเข้มข้น	2	833.699	65.960*
	เวลา	2	3625.429	286.832*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	63.321	5.010*
	Error	9	12.640	
Trough	ความเข้มข้น	2	590.727	67.669*
	เวลา	2	3519.581	403.174*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	40.500	4.639*
	Error	9	8.730	
Breakdown	ความเข้มข้น	2	22.047	10.561*
	เวลา	2	10.873	5.207*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.778	0.852*
	Error	9	2.088	
Final viscosity	ความเข้มข้น	2	1352.635	62.220*
	เวลา	2	8624.248	396.710*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	87.645	4.032*
	Error	9	21.739	
Setback	ความเข้มข้น	2	162.215	44.012*
	เวลา	2	1125.882	305.472*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	15.304	4.152*
	Error	9	3.686	
Pasting temperature	ความเข้มข้น	2	9.331	47.080*
	เวลา	2	4.847E-02	0.245
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.202	1.019
	Error	9	0.198	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคุจินัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง และ pH 7

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	ความเข้มข้น	2	162.831	10.763*
	เวลา	2	1930.414	127.599*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	33.683	2.226
	Error	9	15.129	
Trough	ความเข้มข้น	2	124.908	29.892*
	เวลา	2	516.076	123.501*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	26.700	6.390*
	Error	9	4.179	
Breakdown	ความเข้มข้น	2	36.487	8.013*
	เวลา	2	31.218	6.856*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.930	1.083*
	Error	9	4.553	
Final viscosity	ความเข้มข้น	2	271.342	17.476*
	เวลา	2	2241.707	144.378*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	30.586	1.970
	Error	9	15.527	
Setback	ความเข้มข้น	2	57.694	7.765*
	เวลา	2	622.857	83.831*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	42.232	5.684*
	Error	9	7.430	
Pasting temperature	ความเข้มข้น	2	2.296	10.142*
	เวลา	2	5.556E-02	0.245
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.013	4.477*
	Error	9	0.226	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชจากไทย ดัดแปร
ด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
ปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
pH 3	ความเข้มข้น	2	205.582	97.441*
	เวลา	2	429.300	203.478*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	17.646	8.364*
	Error	9	2.110	
pH 5	ความเข้มข้น	2	5.799	11.422*
	เวลา	2	0.778	1.532
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.188	0.370
	Error	9	0.508	
pH 7	ความเข้มข้น	2	22.047	10.561*
	เวลา	2	6.873	3.292
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.778	0.852
	Error	9	2.088	
pH 9	ความเข้มข้น	2	4751.113	618.189*
	เวลา	2	2385.088	310.335*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	334.950	43.582*
	Error	9	7.686	

* $F_{table}(2, 9) = 4.26$, $F_{table}(4, 9) = 3.63$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาคุฉิน ดัดแปร
ด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำ
ปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
pH 3	ความเข้มข้น	2	2.911E-02	0.072
	เวลา	2	163.895	403.523*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.756	6.786*
	Error	9	0.406	
pH 5	ความเข้มข้น	2	0.446	0.073
	เวลา	2	105.054	17.254*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.402	0.395
	Error	9	6.089	
pH 7	ความเข้มข้น	2	36.487	8.013*
	เวลา	2	31.218	6.856*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.930	1.083
	Error	9	4.553	
pH 9	ความเข้มข้น	2	51.179	7.354*
	เวลา	2	2640.292	379.402*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	78.647	11.301*
	Error	9	6.959	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าวไทย
ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน
การทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Onset temperature	ความเข้มข้น	2	141.144	1824.609*
	เวลา	2	8.525	110.211*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.785	23.070*
	Error	18	7.736E-02	
Peak temperature	ความเข้มข้น	2	2.211	11.787*
	เวลา	2	0.840	4.477*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.258	6.705*
	Error	18	0.188	
Final temperarure	ความเข้มข้น	2	38.985	25.746*
	เวลา	2	0.468	0.309
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.290	1.512
	Error	18	1.514	
$\Delta H_{\text{gelatinization}}$	ความเข้มข้น	2	9.874	22.726*
	เวลา	2	0.296	0.680
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.658	1.514
	Error	18	0.435	
% Retrogradation	ความเข้มข้น	2	218.814	15.311*
	เวลา	2	229.755	16.077*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	214.091	14.981*
	Error	18	14.291	

* F_{table}(2, 18) = 3.55, F_{table}(4, 18) = 2.93 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาคุจิ้น
ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน
การทำปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Onset temperature	ความเข้มข้น	2	16.491	949.198*
	เวลา	2	1.445	83.153*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.136	7.817*
	Error	18	1.737E-02	
Peak temperature	ความเข้มข้น	2	6.722	114.972*
	เวลา	2	0.231	3.951*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.245	4.189*
	Error	18	5.847E-02	
Final temperarure	ความเข้มข้น	2	0.528	0.518
	เวลา	2	0.312	0.306
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.847	2.795
	Error	18	1.019	
$\Delta H_{\text{gelatinization}}$	ความเข้มข้น	2	2.082	6.379*
	เวลา	2	0.223	0.683
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.786	2.408
	Error	18	0.326	
% Retrogradation	ความเข้มข้น	2	3423.254	1324.255*
	เวลา	2	108.601	42.011*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	15.340	5.934*
	Error	18	2.585	

* F_{table}(2, 18) = 3.55, F_{table}(4, 18) = 2.93 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน
 การทำปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Cycle 1	ความเข้มข้น	2	1.967E-02	98.011*
	เวลา	2	2.246E-03	11.191*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.575E-03	12.829*
	Error	27	2.007E-04	
Cycle 2	ความเข้มข้น	2	17.911	506.428*
	เวลา	2	5.239	148.132*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.631	17.855*
	Error	27	3.537E-02	
Cycle 3	ความเข้มข้น	2	24.056	503.535*
	เวลา	2	9.966	208.615*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.637	34.272*
	Error	27	4.777E-02	
Cycle 4	ความเข้มข้น	2	33.858	771.084*
	เวลา	2	11.318	257.766*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.351	53.535*
	Error	27	4.391E-05	
Cycle 5	ความเข้มข้น	2	31.339	366.180*
	เวลา	2	11.913	139.194*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.292	15.096*
	Error	27	8.558E-02	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุจิ้น
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาใน
 การทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Cycle 1	ความเข้มข้น	2	221.122	665.467*
	เวลา	2	4.152	12.494*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.259	3.792*
	Error	27	0.332	
Cycle 2	ความเข้มข้น	2	221.865	794.795*
	เวลา	2	8.156	29.217*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.759	6.301*
	Error	27	0.279	
Cycle 3	ความเข้มข้น	2	243.734	648.547*
	เวลา	2	13.831	36.801*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.916	5.099*
	Error	27	0.376	
Cycle 4	ความเข้มข้น	2	251.715	729.452*
	เวลา	2	17.237	49.950*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.794	8.097*
	Error	27	0.345	
Cycle 5	ความเข้มข้น	2	260.538	1030.974*
	เวลา	2	17.639	69.799*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.465	9.756*
	Error	27	0.253	

* $F_{table}(2, 27) = 4.23$, $F_{table}(4, 27) = 2.74$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปริมาณฟอสฟอรัส ของสตาร์ชสาकुไทย และ
 สาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลา
 ในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
สาकुไทย	ความเข้มข้น	2	3.039E-07	15.629*
	เวลา	2	1.134E-06	58.314*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	6.472E-08	3.329*
	Error	9	1.944E-08	
สาकुจีน	ความเข้มข้น	2	7.695E-06	238.810*
	เวลา	2	7.182E-06	222.879*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.479E-06	45.905*
	Error	9	3.222E-08	

* F_{table}(2,9) = 4.26, F_{table}(4,9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชจากไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	3.153E-02	1.544
	เวลา	2	6.140E-02	3.007
	ความเข้มข้น x เวลา	4	8.903E-03	1.544
	Error	27	2.042E-02	0.436
65 °C	ความเข้มข้น	2	5.705E-02	3.277
	เวลา	2	7.875E-02	5.672*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	6.474E-02	3.719*
	Error	27	1.741E-02	
75 °C	ความเข้มข้น	2	2.967	32.002*
	เวลา	2	10.427	112.461*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.280	3.002*
	Error	27	9.272	
85 °C	ความเข้มข้น	2	16.333	47.824*
	เวลา	2	51.598	151.086*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.189	3.481*
	Error	27	0.342	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสสารซัสคาอูไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	3.135E-02	5.978*
	เวลา	2	2.019E-03	0.385
	ความเข้มข้น x เวลา	4	6.298E-04	0.120
	Error	27	5.244E-03	
65 °C	ความเข้มข้น	2	6.684E-02	20.944*
	เวลา	2	9.494E-02	29.747*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.168E-03	0.993
	Error	27	3.192E-03	
75 °C	ความเข้มข้น	2	1.328	96.726*
	เวลา	2	4.902	356.968*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.798E-02	2.766*
	Error	27	1.373E-02	
85 °C	ความเข้มข้น	2	2.580	49.012*
	เวลา	2	9.235	175.432*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.722	13.720*
	Error	27	5.264E-02	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุจิ้น
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	1.099E-04	0.008
	เวลา	2	3.285E-02	2.331
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.172E-03	0.154
	Error	27	1.409E-02	
65 °C	ความเข้มข้น	2	0.191	1.172
	เวลา	2	0.352	2.161
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.441	2.712
	Error	27	0.163	
75 °C	ความเข้มข้น	2	8.151	22.654*
	เวลา	2	35.699	99.212*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.390	3.861*
	Error	27	0.360	
85 °C	ความเข้มข้น	2	15.836	43.590*
	เวลา	2	50.452	138.875*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.614	4.443*
	Error	27	0.363	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากคูจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
55 °C	ความเข้มข้น	2	1.316E-02	1.604
	เวลา	2	2.582E-02	3.147
	ความเข้มข้น x เวลา	4	9.833E-03	1.198
	Error	27	8.206E-03	
65 °C	ความเข้มข้น	2	0.590	2.670
	เวลา	2	0.711	3.218
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.203E-02	0.190
	Error	27	0.221	
75 °C	ความเข้มข้น	2	4.241	17.395*
	เวลา	2	18.679	76.609*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.743	3.048*
	Error	27	0.244	
85 °C	ความเข้มข้น	2	6.980	13.593*
	เวลา	2	22.707	44.220*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.117	6.076*
	Error	27	0.513	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชจากข้าวไทย ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง และ pH 7

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	ความเข้มข้น	2	6205.340	240.175*
	เวลา	2	15556.019	602.088*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1399.961	54.185*
	Error	9	25.837	
Trough	ความเข้มข้น	2	5720.295	208.306*
	เวลา	2	13797.840	502.451*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1581.664	57.597*
	Error	9	27.461	
Breakdown	ความเข้มข้น	2	8.686	7.115*
	เวลา	2	42.044	34.441*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	8.686	7.115*
	Error	9	1.221	
Final viscosity	ความเข้มข้น	2	15900.812	169.734*
	เวลา	2	39157.885	417.993*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4897.489	52.278*
	Error	9	93.681	
Setback	ความเข้มข้น	2	2563.327	109.184*
	เวลา	2	6479.858	276.007*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	276.007	39.283*
	Error	9	922.260	
Pasting temperature	ความเข้มข้น	2	0.311	1.736
	เวลา	2	0.973	5.442*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.318	1.779
	Error	9	0.179	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ของสตาร์ชสาคุจิน ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง และ pH 7

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Peak viscosity	ความเข้มข้น	2	6930.675	516.022*
	เวลา	2	7752.184	577.187*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	902.527	67.197*
	Error	9	13.431	
Trough	ความเข้มข้น	2	6764.064	528.495*
	เวลา	2	6936.446	541.964*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	769.144	60.095*
	Error	9	12.799	
Breakdown	ความเข้มข้น	2	11.645	7.204
	เวลา	2	24.629	15.236
	ความเข้มข้น x เวลา	4	12.144	7.512
	Error	9	1.616	
Final viscosity	ความเข้มข้น	2	13242.550	661.245*
	เวลา	2	17253.541	861.527*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1693.434	84.559*
	Error	9	20.027	
Setback	ความเข้มข้น	2	1110.435	263.651*
	เวลา	2	2362.746	560.987*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	231.494	54.964*
	Error	9	4.212	
Pasting temperature	ความเข้มข้น	2	1.212	21.131*
	เวลา	2	2.359	41.120*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.682	11.895*
	Error	9	5.736E-02	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.31 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชจากข้าวไทย ดัดแปร ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
pH 3	ความเข้มข้น	2	342.460	100.919*
	เวลา	2	1712.500	504.654*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	57.591	16.971*
	Error	9	3.393	
pH 5	ความเข้มข้น	2	1.740	6.078*
	เวลา	2	7.775	27.154*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.740	6.078*
	Error	9	0.286	
pH 7	ความเข้มข้น	2	8.686	7.115*
	เวลา	2	42.044	34.441*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	8.686	7.115*
	Error	9	1.221	
pH 9	ความเข้มข้น	2	4024.509	98.855*
	เวลา	2	27619.934	678.420*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1006.718	24.728*
	Error	9	40.711	

* $F_{table}(2, 9) = 4.26$, $F_{table}(4, 9) = 3.63$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.32 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า breakdown ของสตาร์ชสาคุจิ้น ดัดแปร
ด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ
ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
pH 3	ความเข้มข้น	2	62.395	93.663*
	เวลา	2	154.170	231.431*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	50.075	75.169*
	Error	9	0.666	
pH 5	ความเข้มข้น	2	3.556E-04	1.000
	เวลา	2	3.556E-04	1.000
	ความเข้มข้น x เวลา	4	3.556E-04	1.000
	Error	9	3.556E-04	1.000
pH 7	ความเข้มข้น	2	11.645	7.204*
	เวลา	2	24.629	15.236*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	12.144	7.512*
	Error	9	1.666	
pH 9	ความเข้มข้น	2	1177.957	29.906*
	เวลา	2	3377.960	85.760*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1055.137	26.788*
	Error	9	39.388	

* F_{table}(2, 9) = 4.26, F_{table}(4, 9) = 3.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าวไทย
ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน
การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Onset temperature	ความเข้มข้น	2	4.125E-02	1.229
	เวลา	2	0.013	0.388
	ความเข้มข้น x เวลา	4	4.780E-02	1.424
	Error	18	3.357E-02	
Peak temperature	ความเข้มข้น	2	1.898E-02	0.336
	เวลา	2	0.195	3.468
	ความเข้มข้น x เวลา	4	9.066E-02	1.607
	Error	18	5.640E-02	
Final temperarure	ความเข้มข้น	2	1.756	2.140
	เวลา	2	1.756	2.140
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.433	0.528
	Error	18	0.820	
$\Delta H_{\text{gelatinization}}$	ความเข้มข้น	2	0.438	0.183
	เวลา	2	39.968	16.675*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	1.236	0.516
	Error	18	2.397	
% Retrogradation	ความเข้มข้น	2	79.557	3.962*
	เวลา	2	846.483	42.159*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	70.156	3.494*
	Error	18	20.079	

* F_{table}(2, 18) = 3.55, F_{table}(4, 18) = 2.93 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชสาขาคูจิ้น
ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน
การทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Onset temperature	ความเข้มข้น	2	0.0143	0.836
	เวลา	2	3.912	228.576*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	8.266E-03	0.483
	Error	18	1.711E-02	
Peak temperature	ความเข้มข้น	2	9.341E-02	1.738
	เวลา	2	3.072	57.145*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	0.141	2.623
	Error	18	5.376E-02	
Final temperarure	ความเข้มข้น	2	6.174E-02	0.497
	เวลา	2	2.538	20.412*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.622	21.091*
	Error	18	0.124	
$\Delta H_{\text{gelatinization}}$	ความเข้มข้น	2	4.681	1.465
	เวลา	2	2.268	0.710
	ความเข้มข้น x เวลา	4	2.991	0.936
	Error	18	3.195	
% Retrogradation	ความเข้มข้น	2	649.910	5.171*
	เวลา	2	1214.123	9.661*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	884.394	7.0237*
	Error	18	125.679	

* F_{table}(2, 18) = 3.55, F_{table}(4, 18) = 2.93 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิบัติการการแทนที่ด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน
 การทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Cycle 1	ความเข้มข้น	2	254.192	68.489*
	เวลา	2	643.931	173.500*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	17.832	4.805*
	Error	27	3.711	
Cycle 2	ความเข้มข้น	2	300.922	120.483*
	เวลา	2	529.919	212.169*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	21.958	8.972*
	Error	27	2.498	
Cycle 3	ความเข้มข้น	2	284.029	65.405*
	เวลา	2	505.519	116.410*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	32.076	7.386*
	Error	27	4.343	
Cycle 4	ความเข้มข้น	2	312.320	101.291*
	เวลา	2	557.981	187.450*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	40.040	12.986*
	Error	27	3.083	
Cycle 5	ความเข้มข้น	2	305.424	77.360*
	เวลา	2	614.078	155.538*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	40.403	10.234*
	Error	27	3.948	

* F_{table}(2, 27) = 4.23, F_{table}(4, 27) = 2.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ข.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า % syneresis ของสตาร์ชสาคุจิ้น ดัดแปร
ด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาใน
การทำปฏิบัติการ 1 - 3 ชั่วโมง

	Source	df	Mean Square	F _{calculate}
Cycle 1	ความเข้มข้น	2	481.566	54.149*
	เวลา	2	849.680	95.542*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	58.875	6.620*
	Error	27	8.893	
Cycle 2	ความเข้มข้น	2	445.490	35.031*
	เวลา	2	812.614	63.900*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	52.960	4.165*
	Error	27	12.717	
Cycle 3	ความเข้มข้น	2	429.997	39.668*
	เวลา	2	777.555	71.731*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	48.259	4.452*
	Error	27	10.840	
Cycle 4	ความเข้มข้น	2	397.279	36.958*
	เวลา	2	781.309	72.683*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	37.795	3.516*
	Error	27	10.750	
Cycle 5	ความเข้มข้น	2	417.496	39.765*
	เวลา	2	725.613	69.112*
	ความเข้มข้น x เวลา	4	42.304	4.029*
	Error	27	10.499	

* $F_{table}(2, 27) = 4.23$, $F_{table}(4, 27) = 2.74$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 กำลังการพองตัวของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 55-85 °C

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละกำลังการพองตัว					
	สาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}			สาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}		
	225	270	315	225	270	315
55	0.88 ± 0.03a	0.89 ± 0.10a	0.83 ± 0.03a	1.22 ± 0.04b	1.23 ± 0.19b	1.21 ± 0.10b
65	1.34 ± 0.04a	1.50 ± 0.10a	1.36 ± 0.08a	2.38 ± 0.27b	2.77 ± 0.30b	2.68 ± 0.21b
75	12.91 ± 0.17b	13.27 ± 0.26b	13.03 ± 0.51b	10.06 ± 0.04a	10.08 ± 0.16a	9.77 ± 0.06a
85	23.38 ± 0.06b	23.32 ± 0.39b	23.29 ± 0.11b	16.63 ± 0.03a	16.67 ± 0.75a	16.95 ± 0.15a

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของชนิดต่างๆ ที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.2 ร้อยละการละลายของสตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆในช่วงอุณหภูมิ 55-85 °C

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละการละลาย					
	สาकुไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}			สาकुจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}		
	225	270	315	225	270	315
55	0.41 ± 0.03a	0.42 ± 0.09a	0.41 ± 0.09a	0.55 ± 0.15b	0.54 ± 0.04b	0.55 ± 0.06b
65	0.55 ± 0.03a	0.54 ± 0.17a	0.55 ± 0.10a	3.89 ± 0.41b	3.89 ± 0.21b	3.69 ± 0.22b
75	13.21 ± 0.40b	13.61 ± 0.39b	13.37 ± 0.14b	11.23 ± 0.11a	11.28 ± 0.16a	11.00 ± 0.18a
85	13.87 ± 0.07b	13.99 ± 0.05b	13.45 ± 0.29b	12.00 ± 0.42a	12.05 ± 0.16a	12.13 ± 0.22a

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในบรรทัดเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของชนิดต่างๆ ที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.3 Syneresis ของสตาร์ชสาคุไทย และสาคุจีน ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่ผ่านการแช่แข็ง และละลายน้ำแข็ง cycle ต่างๆ *

Freeze-thaw cycle	%Syneresis					
	สาคุไทยที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}			สาคุจีนที่อายุการเก็บเกี่ยว (วัน) ^{ns}		
	225	270	315	225	270	315
Cycle 1	0.71 ±	0.88 ±	0.80 ±	11.41 ±	11.89 ±	11.35 ±
	0.12a	0.12a	0.04a	2.38b	0.90b	0.42b
Cycle 2	6.29 ±	6.08 ±	6.12 ±	14.46 ±	14.67 ±	14.70 ±
	0.33a	0.47a	0.50a	0.34b	0.31b	0.13b
Cycle 3	9.76 ±	9.49 ±	9.93 ±	14.50 ±	14.49 ±	15.26 ±
	0.68a	1.00a	0.76a	0.34b	0.82b	0.10b
Cycle 4	11.50 ±	11.48 ±	11.51 ±	15.10 ±	14.81 ±	15.52 ±
	0.35a	0.42a	0.06a	0.44b	0.50b	0.14b
Cycle 5	12.51 ±	12.41 ±	12.17 ±	15.58 ±	15.65 ±	15.95 ±
	0.59a	0.55a	0.58a	0.90b	0.29b	0.21b

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยของชนิดต่างๆ ที่อายุการเก็บเกี่ยวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* เจลของสตาร์ชสาคุจีน และสาคุไทย ในทุกอายุการเก็บเกี่ยวเป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง และการละลายน้ำแข็ง

ตารางที่ ค.4 ค่ากำลังการพองตัวของสสารขสาคูไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55	65	75	85
2%	1	1.22 ± 0.07Aa	2.75 ± 0.15Aa	56.15 ± 1.48Aa	80.61 ± 0.19Aa
4%		3.11 ± 0.12Ba	9.98 ± 0.27Bb	122.01 ± 0.64Bb	140.43 ± 0.83Bc
6%		5.23 ± 0.27Ca	10.52 ± 0.44Bc	152.15 ± 0.83Cc	156.10 ± 0.53Cc
2%	2	1.24 ± 0.02Aa	3.70 ± 0.33Aa	58.63 ± 0.39Aa	84.23 ± 1.50Ab
4%		3.29 ± 0.25Ba	8.61 ± 0.76Bb	115.50 ± 3.51Ba	133.28 ± 0.81Bb
6%		5.31 ± 0.16Ca	9.01 ± 0.77Cb	131.42 ± 5.79Cb	144.83 ± 1.23Cb
2%	3	1.33 ± 0.17Ab	5.78 ± 0.51Ab	59.92 ± 2.05Aa	89.44 ± 0.36Ac
4%		3.29 ± 0.17Ba	6.52 ± 0.23ABa	114.19 ± 0.27Ca	125.49 ± 0.20Ca
6%		5.30 ± 0.11Ca	7.95 ± 0.79Ba	91.99 ± 1.42Ba	120.36 ± 1.70Ba
สสารธรรมชาติ		0.93 ± 0.08	1.29 ± 0.05	14.82 ± 0.53	23.94 ± 1.01

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.5 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP
ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55	65	75	85
2%	1	0.48 ± 0.01Aa	1.46 ± 0.03Aa	15.93 ± 0.38Aa	19.06 ± 0.50Aa
4%		1.25 ± 0.03Ba	5.66 ± 0.01Ba	19.97 ± 0.81Ba	23.52 ± 1.39Ba
6%		2.25 ± 0.05Ca	5.82 ± 0.42Ba	30.40 ± 0.57Ca	32.34 ± 0.24Ca
2%	2	0.48 ± .014Aa	1.75 ± 0.01Ab	22.38 ± 0.75Ab	24.49 ± 0.34Ab
4%		1.88 ± 0.04Ba	7.67 ± 0.16Bb	24.74 ± 0.56Bb	32.28 ± 0.21Bb
6%		3.24 ± 0.10Ca	8.32 ± 0.69Cb	36.58 ± 1.50Cb	41.35 ± 0.31Cb
2%	3	0.72 ± 0.01Aa	5.29 ± 0.21Ac	28.60 ± 0.65Ac	32.08 ± 0.31Ac
4%		2.12 ± 0.19Ba	12.41 ± 0.08Bc	29.33 ± 0.26Ac	39.98 ± 0.65Bc
6%		3.82 ± 0.26Ca	14.48 ± 0.72Cc	41.12 ± 0.80Bc	51.31 ± 0.27Cc
สตาร์ชธรรมชาติ		0.48 ± 0.02	0.52 ± 0.01	13.58 ± 0.27	14.22 ± 0.43

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.6 ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP
ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55	65	75	85
2%	1	2.31 ± 0.10Aa	6.77 ± 0.46Aa	22.71 ± 1.26Aa	31.51 ± 1.30Aa
4%		3.12 ± 0.28Ba	7.94 ± 0.50Ba	27.87 ± 0.72Ba	59.54 ± 0.98Ba
6%		4.64 ± 0.11Ba	10.65 ± 0.74Cb	66.86 ± 0.70Cb	98.18 ± 0.29Cb
2%	2	2.58 ± 0.17Aa	7.28 ± 0.68Aa	24.99 ± 0.32Ab	33.82 ± 0.72Ab
4%		3.78 ± 0.26Bb	8.60 ± 0.51Ba	27.99 ± 1.57Ba	67.25 ± 0.16Bb
6%		7.72 ± 0.67Cc	10.75 ± 0.43Cb	72.42 ± 1.90Cc	104.41 ± 0.08Cc
2%	3	2.75 ± 0.17Aa	7.79 ± 0.48Aa	25.14 ± 0.81Ab	34.46 ± 1.77Ab
4%		4.53 ± 0.11Bb	8.87 ± 0.27Ba	27.89 ± 1.86Ba	67.35 ± 0.24Bb
6%		5.77 ± 0.24Cb	8.84 ± 0.63Ba	52.05 ± 0.61Ca	72.79 ± 0.24Ca
สตาร์ชธรรมชาติ		1.23 ± 0.07	2.78 ± 0.16	11.65 ± 0.42	16.88 ± 0.50

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.7 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากคิงคิงดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2 - 6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STPP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55	65	75	85
2%	1	0.68 ± 0.02Aa	8.34 ± 0.42Aa	12.84 ± 1.24Aa	15.45 ± 0.23Aa
4%		0.83 ± 0.01Aa	9.45 ± 0.38Aa	14.62 ± 0.27Ba	20.16 ± 0.75Ba
6%		2.17 ± 0.05Ba	11.92 ± 1.10Ba	17.30 ± 0.23Ca	20.72 ± 0.67Ba
2%	2	0.72 ± 0.01Aa	10.69 ± 0.87Ab	14.41 ± 0.41Ab	17.85 ± 0.37Ab
4%		1.41 ± 0.03Bb	11.65 ± 0.10Ab	16.75 ± 0.89Bb	23.75 ± 0.34Bb
6%		2.83 ± 0.06Cb	12.26 ± 1.19Aa	22.70 ± 0.55Cb	24.15 ± 1.63Bb
2%	3	0.85 ± 0.04Aa	11.92 ± 0.15Ab	17.14 ± 1.58Ac	21.55 ± 0.35Ac
4%		2.21 ± 0.0Bc	12.45 ± 0.19Bb	17.91 ± 1.10Ab	24.30 ± 0.50Bb
6%		2.99 ± 0.17Cb	12.67 ± 0.68Bb	22.74 ± 0.92Bb	23.97 ± 0.68Bb
สตาร์ชธรรมชาติ		0.46 ± 0.02	3.35 ± 0.05	10.59 ± 0.20	12.52 ± 0.81

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.8 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสากลไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	97.75 ± 1.30Cb	52.67 ± 0.83Cb	45.08 ± 2.12Cb	69.42 ± 1.53Cb	16.75 ± 0.71Cc	78.63 ± 0.60Ca
4%		88.55 ± 3.13Bc	47.38 ± 1.35Bc	41.17 ± 3.77Bc	61.17 ± 2.00Bc	13.79 ± 0.65Bc	77.43 ± 0.11Ba
6%		80.96 ± 0.18Ac	44.84 ± 0.23Ac	36.13 ± 0.06Ac	57.63 ± 0.64Ac	12.79 ± 0.41Ac	75.70 ± 0.28Aa
2%	2	98.84 ± 0.23Cb	54.05 ± 0.53Cc	44.79 ± 0.30Cb	72.50 ± 0.47Cc	18.46 ± 0.06Cb	78.78 ± 0.60Ca
4%		62.75 ± 0.00Bb	30.75 ± 0.24Bb	32.00 ± 0.24Bb	40.55 ± 0.18Bb	9.79 ± 0.06Bb	76.73 ± 0.04Ba
6%		53.46 ± 0.30Ab	26.30 ± 0.18Ab	27.17 ± 0.12Ab	33.54 ± 0.06Ab	7.25 ± 0.11Ab	75.90 ± 0.00Aa
2%	3	55.25 ± 0.47Ca	27.04 ± 0.30Ca	28.21 ± 0.18Ca	35.83 ± 0.35Ca	8.79 ± 0.06Ca	77.93 ± 0.53Ca
4%		46.21 ± 0.65Ba	22.08 ± 0.35Ba	24.13 ± 0.29Ba	29.59 ± 0.47Ba	7.50 ± 0.11Ba	76.63 ± 0.18Ba
6%		35.00 ± 0.00Aa	15.13 ± 0.06Aa	19.88 ± 0.06Aa	21.09 ± 0.12Aa	5.96 ± 0.18Aa	75.93 ± 0.11Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		114.46 ± 0.06	59.71 ± 0.06	54.75 ± 0.00	80.63 ± 0.06	20.92 ± 0.12	79.18 ± 0.11

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.9 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสากลไทย

ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ

ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 5

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	101.63 ± 1.12Cb	86.25 ± 0.82Cb	15.38 ± 0.29Aa	131.63 ± 2.06Bb	45.38 ± 2.89Bb	80.65 ± 0.14Cb
4%		89.88 ± 4.31Bc	74.46 ± 3.71Bc	15.42 ± 0.59Aa	112.25 ± 5.54Ac	37.79 ± 1.82Ac	78.78 ± 0.11Ba
6%		83.17 ± 0.59Ac	69.04 ± 0.06Ab	14.13 ± 0.64Aa	107.88 ± 0.64Ac	38.84 ± 0.59Ac	77.95 ± 0.57Aa
2%	2	101.67 ± 0.12Cb	85.58 ± 0.35Cb	16.09 ± 0.23Aa	134.13 ± 0.77Cb	48.54 ± 0.41Cc	80.73 ± 0.04Cb
4%		65.29 ± 0.76Bb	47.54 ± 1.12Bb	15.75 ± 0.35Aa	68.54 ± 0.76Bb	21.00 ± 0.35Bb	79.15 ± 0.00Ba
6%		54.00 ± 0.35Ab	39.38 ± 0.06Aa	14.63 ± 0.29Aa	57.25 ± 0.11Ab	17.88 ± 0.18Ab	77.73 ± 0.18Aa
2%	3	57.63 ± 1.12Ca	41.7 ± 0.65Ca	15.84 ± 0.47Ba	58.25 ± 1.06Ca	16.46 ± 0.41Ca	79.93 ± 0.04Ca
4%		48.46 ± 0.06Ba	32.54 ± 0.41Ba	15.92 ± 0.47Ba	46.25 ± 0.35Ba	13.71 ± 0.06Ba	79.13 ± 0.04Ba
6%		36.13 ± 0.29Aa	22.55 ± 0.18Aa	13.59 ± 0.12Aa	32.17 ± 0.23Aa	9.63 ± 0.42Aa	78.33 ± 0.04Ab
สตาร์ชธรรมชาติ		122.30 ± 0.18	104.84 ± 1.53	17.46 ± 0.71	157.09 ± 1.18	52.25 ± 0.35	81.65 ± 0.07

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ

ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ

STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.10 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากข้าวไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 9

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	221.80 ± 0.18Cc	111.04 ± 0.06Bc	110.75 ± 0.11Cc	348.80 ± 3.01Bb	237.75 ± 3.07Bb	77.90 ± 0.57Ca
4%		163.63 ± 6.85Bc	93.46 ± 4.89Ac	70.17 ± 3.95Bc	267.54 ± 5.21Ac	174.09 ± 4.31Ac	73.90 ± 0.57Ba
6%		131.34 ± 0.23Ac	91.21 ± 0.14Ac	40.13 ± 0.18Ac	241.21 ± 0.29Ac	150.00 ± 0.11Ac	70.15 ± 0.64Aa
2%	2	203.58 ± 6.36Cb	106.63 ± 1.94Cb	96.96 ± 4.42Cb	341.08 ± 5.66Cb	234.46 ± 3.71Bb	77.08 ± 0.53Ca
4%		97.71 ± 0.76Bb	52.71 ± 0.53Bb	45.00 ± 0.24Bb	104.79 ± 1.36Bb	52.09 ± 0.83Ab	73.08 ± 0.46Ba
6%		73.04 ± 0.06Ab	44.04 ± 0.30Ab	29.00 ± 0.24Ab	79.30 ± 0.18Ab	35.25 ± 0.27Ab	70.93 ± 0.04Aa
2%	3	89.67 ± 1.65Ca	40.88 ± 0.64Ca	48.79 ± 1.00Ca	74.58 ± 1.06Ca	33.71 ± 0.41Aa	76.88 ± 0.25Ca
4%		62.42 ± 0.59Ba	30.63 ± 0.42Ba	31.80 ± 0.18Ba	52.38 ± 0.29Ba	21.75 ± 0.11Aa	73.10 ± 0.64Ba
6%		41.21 ± 0.88Aa	19.88 ± 0.53Aa	21.33 ± 0.35Aa	32.84 ± 0.59Aa	12.96 ± 0.06Aa	71.05 ± 1.20Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		270.21 ± 1.12	123.46 ± 1.00	146.75 ± 2.12	417.79 ± 7.79	294.33 ± 6.79	79.10 ± 0.00

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.11 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคุณจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6%, pH 3

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	98.08 ± 1.06Bc	71.75 ± 1.65Cc	26.34 ± 0.59Ac	93.50 ± 0.71Bc	21.75 ± 0.95Bc	72.70 ± 0.07Ba
4%		91.55 ± 1.59Ac	66.21 ± 1.71Bc	25.34 ± 0.12Ac	84.33 ± 2.12Ac	18.13 ± 0.42Ac	72.65 ± 0.07Ba
6%		90.34 ± 0.23Ac	63.04 ± 0.06Ac	27.30 ± 0.18Ac	84.00 ± 0.00Ac	20.96 ± 0.06Bc	71.38 ± 0.67Aa
2%	2	80.05 ± 0.88Cb	60.21 ± 0.76Cb	19.84 ± 0.12Ab	77.29 ± 0.76Cb	17.08 ± 0.00Bb	72.60 ± 0.14Ba
4%		76.59 ± 1.29Bb	55.92 ± 0.47Bb	20.67 ± 1.77Ab	71.04 ± 0.65Bb	15.13 ± 0.12Ab	71.88 ± 0.51Aa
6%		74.21 ± 1.00Ab	53.59 ± 0.83Ab	20.63 ± 0.18Ab	68.13 ± 1.24Ab	14.54 ± 0.41Ab	71.55 ± 0.57Aa
2%	3	72.96 ± 0.06Ba	56.50 ± 0.35Ba	16.46 ± 0.30Ba	72.00 ± 0.11Ba	15.50 ± 0.24Ca	72.58 ± 0.07Ba
4%		64.09 ± 0.59Aa	47.29 ± 2.65Aa	16.79 ± 0.06Ba	60.96 ± 0.53Aa	13.67 ± 0.12Ba	71.89 ± 0.51Aa
6%		64.46 ± 0.41Aa	50.00 ± 0.47Aa	14.46 ± 0.06Aa	62.46 ± 0.41Aa	12.46 ± 0.06Aa	72.15 ± 0.78Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		109.54 ± 0.05	77.13 ± 0.17	32.42 ± 0.12	106.59 ± 0.47	29.46 ± 0.29	74.63 ± 0.45

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.12 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคุณจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง6% และ pH 5

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	113.50 ± 1.41Bb	97.17 ± 2.83Bb	16.33 ± 1.41Ab	137.88 ± 2.06Bb	40.71 ± 0.76Ab	73.40 ± 0.14Ba
4%		110.71 ± 5.13ABb	95.55 ± 0.53Bb	15.17 ± 0.60Ab	130.17 ± 6.84ABb	34.63 ± 1.30Ab	73.88 ± 0.53Ba
6%		102.46 ± 5.71Ac	87.34 ± 2.35Ac	15.13 ± 0.36Ab	124.04 ± 6.07Ac	36.71 ± 0.71Ab	72.78 ± 0.11Aa
2%	2	89.09 ± 3.01Aa	81.55 ± 2.83Aa	7.54 ± 0.18Aa	105.80 ± 4.43Aa	24.25 ± 1.60Aa	73.53 ± 0.04Ba
4%		90.25 0.24Aa	80.63 2.65Aa	9.63 ± 2.89Aa	104.63 ± 0.42Aa	24.00 0.23Aa	73.13 ± 0.53Ba
6%		88.42 ± 0.83Ab	79.58 ± 1.41Ab	8.84 ± 0.59Aa	102.79 ± 0.76Ab	23.21 ± 0.65Aa	72.70 ± 0.07Aa
2%	3	86.75 ± 0.95Ba	79.13 ± 1.12Ba	7.63 ± 0.18Aa	104.54 ± 0.30Ca	25.42 ± 0.83Aa	73.38 ± 0.11Ba
4%		83.71 ± 3.25Ba	76.54 ± 2.65Ba	7.17 ± 0.60Aa	98.21 ± 4.37Ba	21.67 ± 0.72Aa	73.50 ± 0.07Ba
6%		76.34 ± 0.94Aa	67.21 ± 0.53Aa	9.13 ± 0.42Aa	88.75 ± 0.82Aa	21.54 ± 0.30Aa	72.60 ± 0.07Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		119.71 ± 0.06	105.46 ± 0.30	14.25 ± 0.24	151.75 ± 0.24	46.29 ± 0.06	76.45 ± 0.82

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.13 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคุณจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 9

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
2%	1	292.00 ± 1.65Ac	116.75 ± 1.65Bc	175.25 ± 3.30Ac	246.25 ± 6.01Bb	129.50 ± 7.67Bb	70.55 ± 0.64Ba
4%		295.92 ± 5.84Ac	109.67 ± 4.24Ac	186.25 ± 6.60Bc	217.79 ± 5.16Ac	108.13 ± 4.92Ab	69.33 ± 0.11Aa
6%		303.84 ± 0.47Bc	112.29 ± 0.41Bc	191.55 ± 0.88Bc	254.67 ± 1.53Bc	142.38 ± 6.76Bb	67.70 ± 0.14Aa
2%	2	254.63 ± 1.24Ab	94.50 ± 1.17Bb	160.13 ± 0.06Ab	174.96 ± 1.59Ba	80.40 ± 2.77Ba	70.10 ± 0.00Ba
4%		250.09 ± 3.42Ab	87.79 ± 1.71Ab	162.29 ± 1.71Ab	150.42 ± 8.25Ab	62.63 ± 3.96Aa	69.75 ± 0.57Ba
6%		258.42 ± 0.00Ab	92.83 ± 0.71Bb	165.58 ± 0.71Ab	153.34 ± 0.47Ab	60.50 ± 1.17Aa	67.28 ± 0.53Aa
2%	3	236.38 ± 2.06Ca	88.67 ± 0.23Ba	147.71 ± 1.82Ca	156.25 ± 2.36Ba	67.59 ± 2.60Ba	70.18 ± 0.11Ba
4%		227.42 ± 0.59Ba	85.13 ± 0.18Ba	142.29 ± 0.76Ba	128.46 ± 0.18Aa	43.33 ± 0.35Aa	69.40 ± 0.14Aa
6%		211.75 ± 0.59fAa	74.54 ± 0.76Aa	137.21 ± 0.18Aa	124.34 ± 1.53Aa	49.79 ± 0.76Aa	68.48 ± 0.04Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		308.13 ± 0.06	130.04 ± 0.06	178.08 ± 0.00	311.38 ± 0.42	181.34 ± 0.47	73.83 ± 0.60

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.14 Syneresis ของสตาร์ชสาคุไทยดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกริยา (ชั่วโมง)	%Syneresis ที่ freeze-thaw cycle ต่างๆ *				
		Cycle1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
2%	1	0.15 ± 0.00Bb	3.53 ± 0.10Cc	4.67 ± 0.08Cc	6.30 ± 0.11Cb	6.36 ± 0.11Cb
		0.05 ± 0.00Aa	2.42 ± 0.06Bc	3.78 ± 0.08Bc	5.13 ± 0.01Bc	5.30 ± 0.18Bb
4%		0.03 ± 0.00Aa	0.42 ± 0.02Ac	0.98 ± 0.05Aa	1.84 ± 0.07Aa	2.38 ± 0.07Aa
		0.08 ± 0.00Ba	2.67 ± 0.03Cb	3.51 ± 0.08Cb	4.47 ± 0.09Ca	4.74 ± 0.10Ca
4%		0.04 ± 0.00Aa	1.33 ± 0.11Bb	2.33 ± 0.06Bb	2.69 ± 0.07Bb	2.89 ± 0.05Ba
		0.04 ± 0.00Aa	0.25 ± 0.00Ab	0.87 ± 0.06Aa	1.57 ± 0.03Aa	1.76 ± 0.03Aa
2%	3	0.08 ± 0.00Ca	1.83 ± 0.08Ca	2.67 ± 0.03Ba	4.30 ± 0.02Ca	4.36 ± 0.17Ca
		0.06 ± 0.00Ba	0.57 ± 0.03Ba	0.79 ± 0.02Aa	1.96 ± 0.01Ba	2.45 ± 0.01Ba
6%		0.02 ± 0.00Aa	0.02 ± 0.00Aa	0.51 ± 0.01Aa	1.58 ± 0.03Aa	1.63 ± 0.01Aa
		สตาร์ชธรรมชาติ		1.15 ± 0.03	7.69 ± 0.68	8.68 ± 0.73

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* เจลของสตาร์ชสาคุไทยที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ เป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง และการละลายน้ำแข็ง ส่วนสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ STPP ความเข้มข้น 2% และ 4% จะเป็น spongy ตั้งแต่รอบที่สามของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง ส่วนที่ STPP 6% จะเป็น spongy ในรอบที่สี่ของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

ตารางที่ ค.15 Syneresis ของสตาร์ชสาคุจิ้นดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และเวลาในการทำปฏิกริยา 1 - 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ STPP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกริยา (ชั่วโมง)	%Syneresis ที่ freeze-thaw cycle ต่างๆ *				
		Cycle1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
2%	1	9.41 ± 0.31Bb	10.70 ± 0.44Cb	12.75 ± 0.39Cc	12.97 ± 0.38Cb	13.02 ± 0.37Cb
		8.79 ± 0.13Bc	8.89 ± 0.67Ba	9.03 ± 0.05Bb	9.65 ± 0.73Bb	10.08 ± 0.14Bb
4%		0.90 ± 0.02Aa	3.21 ± 0.13Ab	4.04 ± 0.01Ab	4.36 ± 0.01Ab	4.62 ± 0.01Ab
		2%	2	8.31 ± 0.19Ba	10.15 ± 0.14Cb	11.90 ± 0.16Cb
4%		7.68 ± 0.10Bb	8.20 ± 0.10Ba	8.28 ± 0.10Ba	8.52 ± 0.09Ba	8.57 ± 0.09Ba
		6%		0.83 ± 0.02Aa	1.27 ± 0.02Aa	1.66 ± 0.04Aa
2%	3	8.15 ± 0.32Ca	8.67 ± 0.42Ba	9.19 ± 0.20Ca	9.44 ± 0.18Ca	10.27 ± 0.15Ca
		4%		6.82 ± 0.08Ba	8.12 ± 0.32Ba	8.18 ± 0.74Ba
6%		0.66 ± 0.20Aa	1.35 ± 0.02Aa	1.70 ± 0.07Aa	1.89 ± 0.03Aa	1.93 ± 0.02Aa
		สตาร์ชธรรมชาติ		11.48 ± 0.43	12.98 ± 0.56	13.58 ± 0.64

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STPP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STPP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* เจลของสตาร์ชสาคุจิ้นที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกริยาการแทนที่ เป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง และการละลายน้ำแข็ง ส่วนสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะเป็น spongy ตั้งแต่รอบที่สามของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

ตารางที่ ค.16 ค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP
ความเข้มข้น 0.05 - 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55 ^{ns}	65 ^{ns}	75	85
0.05%	1	0.94 ± 0.08	1.28 ± 0.09	11.37 ± 0.21Bb	15.68 ± 0.42Bc
0.10%		0.94 ± 0.08	1.31 ± 0.09	11.32 ± 0.53Bb	15.35 ± 0.43Bb
0.15%		0.94 ± 0.05	1.30 ± 0.08	10.69 ± 0.23Ac	14.20 ± 0.98Ac
0.05%	2.5	0.93 ± 0.01	1.26 ± 0.09	10.35 ± 0.34Ba	14.11 ± 0.81Bb
0.10%		0.92 ± 0.05	1.24 ± 0.06	9.47 ± 0.31Aa	11.68 ± 0.22Aa
0.15%		0.92 ± 0.01	1.24 ± 0.07	9.40 ± 0.14Ab	11.14 ± 0.43Ab
0.05%	4	0.89 ± 0.05	1.25 ± 0.10	10.09 ± 0.30Ba	12.34 ± 0.72Ca
0.10%		0.92 ± 0.08	1.23 ± 0.07	9.20 ± 0.23Aa	10.85 ± 0.37Ba
0.15%		0.91 ± 0.07	1.24 ± 0.10	8.76 ± 0.20Aa	9.85 ± 0.41Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		0.93 ± 0.08	1.29 ± 0.05	14.82 ± 0.53	23.94 ± 1.01

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.17 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากข้าวไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP
ความเข้มข้น 0.05 - 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55	65	75	85
0.05%	1	0.46 ± 0.02Ba	0.48 ± 0.04Bc	6.58 ± 0.05Bb	8.30 ± 0.31Bc
0.10%		0.32 ± 0.01Aa	0.44 ± 0.03Ab	6.44 ± 0.14Bc	8.02 ± 0.27Bc
0.15%		0.28 ± 0.01Aa	0.35 ± 0.02Ab	6.04 ± 0.12Ac	7.72 ± 0.31Ac
0.05%	2.5	0.38 ± 0.01Ba	0.40 ± 0.01Cb	5.72 ± 0.10Ca	7.31 ± 0.19Cb
0.10%		0.30 ± 0.01Aa	0.28 ± 0.01Ba	5.37 ± 0.13Bb	6.82 ± 0.18Bb
0.15%		0.26 ± 0.01Aa	0.20 ± 0.01Ab	5.11 ± 0.07Ab	6.38 ± 0.27Ab
0.05%	4	0.35 ± 0.02Ba	0.31 ± 0.02Ba	5.56 ± 0.09Ca	6.93 ± 0.14Ca
0.10%		0.28 ± 0.01Aa	0.27 ± 0.01Ba	5.13 ± 0.05Ba	6.32 ± 0.10Ba
0.15%		0.24 ± 0.01Aa	0.1 ± 0.01Aa	4.72 ± 0.19Aa	5.65 ± 0.13Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		0.48 ± 0.02	0.52 ± 0.01	13.58 ± 0.27	14.22 ± 0.43

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.18 ค่ากำลังการพองตัวของสสารพืชสาคุจีนัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP
ความเข้มข้น 0.05 - 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55 ^{ns}	65 ^{ns}	75	85
0.05%	1	1.26 ± 0.01	2.66 ± 0.19	10.42 ± 0.51Bc	14.16 ± 0.83Bc
0.10%		1.26 ± 0.01	2.68 ± 0.18	9.65 ± 0.84Bc	13.83 ± 0.41Bc
0.15%		1.20 ± 0.07	2.47 ± 0.17	8.54 ± 0.64Ac	11.25 ± 0.55Ab
0.05%	2.5	1.21 ± 0.04	2.67 ± 0.10	8.52 ± 0.47Bb	11.97 ± 0.18Bb
0.10%		1.21 ± 0.01	2.63 ± 0.13	7.83 ± 0.57ABb	11.36 ± 0.75Bb
0.15%		1.20 ± 0.02	2.49 ± 0.10	7.45 ± 0.64Ab	10.37 ± 0.57Ab
0.05%	4	1.20 ± 0.01	2.44 ± 0.12	7.23 ± 0.45Ba	10.42 ± 0.88Ba
0.10%		1.20 ± 0.01	2.47 ± 0.17	5.76 ± 0.43Aa	8.48 ± 0.41Aa
0.15%		1.19 ± 0.03	2.52 ± 0.20	5.27 ± 0.27Aa	8.06 ± 0.46Aa
สสารธรรมชาติ		1.23 ± 0.07	2.78 ± 0.16	11.65 ± 0.42	16.88 ± 0.50

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.19 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชจากคิงินต์ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP
ความเข้มข้น 0.05 - 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)			
		55 ^{ns}	65 ^{ns}	75	85
0.05%	1	0.39 ± 0.10	2.13 ± 0.80	8.75 ± 0.17Bc	10.64 ± 0.45Bc
0.10%		0.31 ± 0.02	1.98 ± 0.69	8.28 ± 0.51Bc	10.48 ± 0.34Bc
0.15%		0.28 ± 0.07	1.64 ± 0.59	7.20 ± 0.60Ac	9.10 ± 0.24Ab
0.05%	2.5	0.38 ± 0.09	2.07 ± 0.26	6.85 ± 0.11Ab	9.65 ± 0.23Bb
0.10%		0.28 ± 0.03	1.68 ± 0.13	6.44 ± 0.46Ab	9.38 ± 0.92Bb
0.15%		0.26 ± 0.14	1.52 ± 0.19	6.30 ± 0.06Ab	8.67 ± 0.16Ab
0.05%	4	0.22 ± 0.12	1.54 ± 0.05	6.58 ± 0.25Ba	8.71 ± 0.62Ba
0.10%		0.20 ± 0.10	1.52 ± 0.17	5.93 ± 0.09Aa	6.78 ± 0.17Aa
0.15%		0.17 ± 0.06	1.26 ± 0.25	5.21 ± 0.14Aa	6.66 ± 0.17Aa
สตาร์ชธรรมชาติ		0.46 ± 0.02	3.35 ± 0.57	10.59 ± 0.20	12.52 ± 0.81

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.20 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 3

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	141.13 ± 2.54Ab	102.38 ± 1.70Aa	38.75 ± 0.82Bc	147.88 ± 3.47Aa	45.50 ± 1.77Aa	79.68 ± 0.18Aa
0.10%		144.29 ± 1.36Ab	107.17 ± 1.89Aa	37.13 ± 0.53Bb	163.92 ± 2.60Ba	56.75 ± 0.71Ba	79.40 ± 0.49Aa
0.15%		143.79 ± 3.13Ac	114.88 ± 1.59Bb	28.92 ± 4.72Ab	182.17 ± 3.66Cb	67.29 ± 2.06Ba	79.93 ± 0.04Aa
0.05%	2.5	136.25 ± 2.47Bb	112.75 ± 1.41Ab	23.50 ± 1.06Bb	175.00 ± 3.65Ab	62.25 ± 2.23Ab	80.30 ± 0.64Ab
0.10%		116.96 ± 1.00Aa	114.46 ± 0.18Ab	2.50 ± 0.82Aa	174.29 ± 0.30Ab	59.84 ± 0.12Aa	80.73 ± 0.11Ab
0.15%		113.71 ± 2.18Ab	114.29 ± 1.82Ab	0.00 ± 0.00Aa	173.46 ± 2.18Aab	59.17 ± 0.35Aa	81.10 ± 0.64Ab
0.05%	4	124.13 ± 5.13Ca	113.96 ± 2.77Bb	10.17 ± 2.35Ba	173.80 ± 6.19Ab	59.84 ± 3.42Ab	80.78 ± 0.04Ab
0.10%		112.13 ± 5.72Ba	112.42 ± 5.54Bab	0.00 ± 0.00Aa	170.79 ± 7.72Ab	58.38 ± 2.18Aa	80.78 ± 0.11Ab
0.15%		104.38 ± 2.41Aa	106.00 ± 2.47Aa	0.00 ± 0.00Aa	165.04 ± 2.18Aa	59.04 ± 0.30Aa	80.78 ± 0.04Ab
สตาร์ชธรรมชาติ		114.46 ± 0.06	59.71 ± 0.06	54.75 ± 0.00	80.63 ± 0.06	20.92 ± 0.12	79.18 ± 0.11

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.21 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชสากลุไทย
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 5

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C) ^{ns}
0.05%	1	147.80 ± 6.19Bc	145.13 ± 6.07Ac	2.67 ± 0.12Bb	239.17 ± 6.48Ab	94.04 ± 0.41Ab	81.98 ± 0.46
0.10%		150.21 ± 0.76Bc	147.09 ± 0.83Ac	3.13 ± 0.29Bb	246.50 ± 0.59Ac	99.42 ± 0.23Ab	82.00 ± 0.57
0.15%		141.50 ± 4.13Ac	141.46 ± 3.83Ac	0.13 ± 0.00Aa	235.71 ± 7.55Ac	94.25 ± 6.72Ab	81.90 ± 0.49
0.05%	2.5	131.96 ± 4.07Cb	132.38 ± 4.31Cb	0.00 ± 0.00Aa	221.63 ± 7.25Cb	89.25 ± 2.94Bb	82.48 ± 0.11
0.10%		67.83 ± 2.47Bb	69.09 ± 2.71Bb	0.00 ± 0.00Aa	106.17 ± 3.77Bb	37.08 ± 1.06Aa	82.73 ± 0.46
0.15%		47.88 ± 3.07Ab	48.84 ± 3.01Ab	0.00 ± 0.00Aa	78.17 ± 4.06Ab	29.34 ± 2.95Aa	82.75 ± 0.57
0.05%	4	98.17 ± 4.01Ca	99.88 ± 4.18Ca	0.00 ± 0.00Aa	154.13 ± 5.24Ca	54.25 ± 1.06Ba	82.75 ± 0.57
0.10%		51.05 ± 2.95Ba	52.38 ± 3.20Ba	0.00 ± 0.00Aa	83.17 ± 5.61Ba	30.79 ± 2.42Aa	83.20 ± 0.00
0.15%		27.92 ± 0.47Aa	28.63 ± 0.64Aa	0.00 ± 0.00Aa	50.83 ± 0.35Aa	22.21 ± 0.30Aa	83.55 ± 1.77
สตาร์ชธรรมชาติ		122.30 ± 0.18	104.84 ± 1.53	17.46 ± 0.71	157.09 ± 1.18	52.25 ± 0.35	81.65 ± 0.07

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.22 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากไทย

ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลา

ในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 9

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	352.67 ± 5.89Ac	202.58 ± 4.95Aa	150.09 ± 0.94Bc	450.67 ± 6.27Ba	248.08 ± 7.32Cb	80.00 ± 0.07Aa
0.10%		357.50 ± 1.06Ac	214.04 ± 3.13Aa	143.46 ± 2.06Bb	484.25 ± 4.13Cc	270.21 ± 1.00Bb	79.83 ± 0.04Aa
0.15%		345.96 ± 8.15Ac	236.96 ± 3.24Bc	109.00 ± 5.38Ab	466.67 ± 0.59ABc	229.71 ± 2.65Ac	79.90 ± 0.07Aa
0.05%	2.5	318.79 ± 10.20Cb	234.50 ± 6.48Bb	84.30 ± 3.71Bb	454.79 ± 10.66Ba	220.29 ± 4.19Ba	79.83 ± 0.04Aa
0.10%		236.38 ± 1.12Bb	235.80 ± 0.88Bb	0.59 ± 0.23Aa	445.67 ± 5.56Bb	209.88 ± 4.77Ba	80.33 ± 0.67Aab
0.15%		201.96 ± 6.72Ab	202.29 ± 6.61Ab	0.00 ± 0.00Aa	391.50 ± 8.02Ab	189.21 ± 4.42Ab	80.75 ± 0.07Aab
0.05%	4	269.71 ± 7.91Ca	246.46 ± 5.84Cb	23.25 ± 1.07Ba	469.09 ± 6.79Ca	222.63 ± 0.06Ba	80.30 ± 0.64Ab
0.10%		203.38 ± 8.09Bb	203.75 ± 6.91Ba	0.00 ± 0.00Aa	397.21 ± 5.45Ba	193.46 ± 4.57Aa	80.78 ± 0.04Ab
0.15%		146.71 ± 1.00Aa	147.34 ± 0.94Aa	0.00 ± 0.00Aa	304.21 ± 2.42Aa	156.88 ± 1.48Aa	80.40 ± 0.49Ab
สตาร์ชธรรมชาติ		270.21 ± 1.12	123.46 ± 1.00	146.75 ± 2.12	417.79 ± 7.79	294.33 ± 6.79	79.10 ± 0.00

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ

ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ

STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ ค.23 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคูนจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 3

ความ เข้มข้นของ STMP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	116.83 ± 1.76Bc	98.88 ± 3.95Aa	17.96 ± 2.17Cb	132.13 ± 4.77Ba	33.25 ± 0.82Aa	75.83 ± 0.03Aa
0.10%		117.38 ± 3.82Bc	108.34 ± 2.70Bc	9.04 ± 1.11Bb	148.50 ± 3.18Cc	40.17 ± 0.47Bc	75.85 ± 0.00Aa
0.15%		90.08 ± 6.36Ac	90.84 ± 6.59Ac	0.00 ± 0.00Aa	119.88 ± 7.84Ac	29.05 ± 1.23Ab	76.33 ± 0.60Ab
0.05%	2.5	100.75 ± 0.59Cb	99.38 ± 0.53Ba	1.38 ± 0.06Aa	139.75 ± 1.17Ba	40.38 ± 0.64Bb	76.18 ± 0.53Ab
0.10%		81.17 ± 0.35Bb	81.38 ± 0.42Ab	0.00 ± 0.00Aa	111.54 ± 1.36Ab	30.17 ± 0.94Ab	77.10 ± 0.64Ab
0.15%		73.13 ± 4.53Ab	73.88 ± 3.71Ab	0.00 ± 0.00Aa	101.96 ± 5.36Ab	28.09 ± 1.65Ab	77.53 ± 0.04Ab
0.05%	4	96.50 ± 0.71fCa	99.50 ± 2.59Ca	0.00 ± 0.00Aa	132.59 ± 8.37 Ca	33.09 ± 5.78Ba	77.03 ± 0.53 Ac
0.10%		27.04 ± 3.24Ba	28.38 ± 3.47Ba	0.00 ± 0.00Aa	49.80 ± 3.71 Ba	21.42 ± 0.23Aa	78.75 ± 12.87 Ac
0.15%		16.46 ± 5.83Aa	17.17 ± 6.01Aa	0.00 ± 0.00Aa	35.50 ± 9.19Aa	18.33 ± 3.18Aa	80.18 ± 0.18Ac
สตาร์ชธรรมชาติ		109.54 ± 0.05	77.13 ± 0.17	32.42 ± 0.12	106.59 ± 0.47	29.46 ± 0.29	74.63 ± 0.45

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.24 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคุณจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 5

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown ^{ns} (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	113.54 ± 1.36Bc	113.75 ± 1.30Bc	0.00 ± 0.00	162.50 ± 2.01Bc	48.75 ± 0.71Cc	77.63 ± 0.32Aa
0.10%		107.71 ± 2.18Bc	107.96 ± 2.42Bc	0.00 ± 0.00	152.34 ± 3.66Bc	44.38 ± 1.24Bc	77.38 ± 0.04Aa
0.15%		45.00 ± 4.00Ac	45.63 ± 4.07Ac	0.00 ± 0.00	65.08 ± 4.60Ac	19.46 ± 0.53Ac	77.88 ± 0.60Aa
0.05%	2.5	81.04 ± 2.77Cb	82.21 ± 2.77Cb	0.00 ± 0.00	106.92 ± 3.18Cb	24.71 ± 0.41Cb	77.30 ± 0.14Aa
0.10%		46.71 ± 8.19Bb	47.67 ± 8.61Bb	0.00 ± 0.00	66.84 ± 10.02Bb	19.17 ± 1.41Bb	77.80 ± 0.57ABa
0.15%		29.38 ± 2.18Ab	30.09 ± 2.24Ab	0.00 ± 0.00	46.25 ± 2.83Ab	16.17 ± 0.59Ab	78.33 ± 0.04Bb
0.05%	4	64.84 ± 8.72Ba	66.04 ± 8.90Ba	0.00 ± 0.00	88.17 ± 10.84Ba	22.13 ± 1.94Ba	78.28 ± 0.1cAb
0.10%		6.84 ± 0.59Aa	6.92 ± 0.59Aa	0.00 ± 0.00	13.59 ± 0.83Aa	6.67 ± 0.23Aa	79.90 ± 0.00Bb
0.15%		5.17 ± 1.18Aa	5.13 ± 1.24Aa	0.04 ± 0.06	9.55 ± 2.65Aa	4.42 ± 1.41Aa	82.01 ± 0.01Cc
สตาร์ชธรรมชาติ		119.71 ± 0.06	105.46 ± 0.30	14.25 ± 0.24	151.75 ± 0.24	46.29 ± 0.06	76.45 ± 0.82

ns หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.25 ความหนืดระหว่าง heating – cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ชจากคุณจีน
 ดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้ง 6% และ pH 9

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	Peak viscosity (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
0.05%	1	267.92 ± 1.89Bb	187.05 ± 8.66Aa	80.88 ± 6.78Cb	308.83 ± 1.06Aa	121.80 ± 7.60Aa	75.10 ± 0.07Aa
0.10%		251.84 ± 20.63Bc	207.29 ± 3.13Ba	44.55 ± 17.50Bb	332.96 ± 21.27Aa	125.67 ± 18.15Ab	74.98 ± 0.04Aa
0.15%		187.92 ± 16.26Ab	188.59 ± 16.03Aa	0.00 ± 0.00Aa	322.67 ± 24.52Ac	134.08 ± 8.49Ab	75.23 ± 0.04Aa
0.05%	2.5	227.84 ± 0.47Bb	224.46 ± 1.59Cb	3.38 ± 1.12Aa	361.50 ± 6.25Cb	137.04 ± 4.65Ba	75.90 ± 0.00Ab
0.10%		193.17 ± 7.30Ab	193.50 7.18Ba	0.00 ± 0.00Aa	325.92 ± 22.15Ba	132.42 ±14.97ABb	75.75 ± 0.21Ab
0.15%		172.88 ± 9.61Ab	172.67 ± 10.96Aa	0.00 ± 0.00Aa	286.21 ± 13.61Ab	113.55 ± 2.65Ab	75.38 ± 0.46Ab
0.05%	4	223.08 ± 8.84Ca	222.92 ± 8.01Ab	0.38 ± 0.53Aa	350.71 ± 14.91 Cb	127.80 ± 6.89Ba	75.78 ± 0.11Ab
0.10%		164.45 ± 3.95Ba	221.50 ± 3.95Ab	0.00 ± 0.00Aa	334.66 ± 3.36 Bb	113.16 ± 0.59Aa	76.21 ± 0.14Ac
0.15%		150.09 ± 0.94Aa	228.31 ± 1.18Ab	0.00 ± 0.00Aa	336.80 ± 1.65Aa	108.49 ± 0.47Aa	76.42 ± 0.00Ac
สตาร์ชธรรมชาติ		308.13 ± 0.06	130.04 ± 0.06	178.08 ± 0.00	311.38 ± 0.42	181.34 ± 0.47	73.83 ± 0.60

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำ
 ปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ
 STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.26 Syneresis ของสตาร์ชสาकुไทยดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	%Syneresis ที่ freeze-thaw cycle ต่างๆ *				
		Cycle1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
0.05%	1	0.87 ±	4.62 ±	5.97 ±	7.53 ±	7.96 ±
		0.07Aa	0.01Aa	0.14Aa	0.12Aa	0.12Aa
0.10%		0.98 ±	6.12 ±	7.87 ±	8.41 ±	9.01 ±
		0.04Aa	0.13Aa	0.16Aa	0.15Aa	0.14Aa
0.15%		7.66 ±	11.33 ±	11.95 ±	12.74 ±	13.23 ±
		0.29Ba	0.16Ba	0.21Ba	0.13Ba	0.18Ba
0.05%	2.5	4.53 ±	6.27 ±	8.83 ±	9.10 ±	9.81 ±
		0.16Ab	0.23Aa	0.39Aa	0.38Aa	0.43Aa
0.10%		6.48 ±	10.07 ±	13.52 ±	15.18 ±	15.77 ±
		0.54Ab	0.48Bb	0.42Bb	0.43Bb	0.45Bb
0.15%		10.89 ±	14.07 ±	15.96 ±	18.12 ±	18.71 ±
		0.44Bb	0.51Cb	0.53Bb	0.57Cb	0.57Bb
0.05%	4	11.18 ±	13.05 ±	14.46 ±	16.44 ±	17.53 ±
		1.01Ac	1.03Ab	0.19Ab	0.12Ab	0.20Ab
0.10%		16.32 ±	18.83 ±	19.60 ±	20.66 ±	21.56 ±
		0.72Bc	0.64Bc	0.63Bc	0.63Bc	0.60Bc
0.15%		24.72 ±	28.33 ±	30.12 ±	32.49 ±	33.36 ±
		0.50Cc	0.46Cc	0.46Cc	0.43Cc	0.44Cc
สตาร์ชธรรมชาติ		1.15 ± 0.03	7.69 ± 0.68	8.68 ± 0.73	8.71 ± 0.14	8.75 ± 0.60

A, B, C ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* เจลของสตาร์ชสาकुไทยทั้งที่ผ่าน และไม่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง เป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

ตารางที่ ค.27 Syneresis ของสตาร์ชสาคุจินดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ STMP (%)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	%Syneresis ที่ freeze-thaw cycle ต่างๆ*				
		Cycle1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
0.05%	1	17.17 ±	20.84 ±	21.82 ±	22.07 ±	22.21 ±
		0.98Aa	0.30Aa	1.83Aa	1.59Aa	1.50Aa
0.10%		21.12 ±	23.84 ±	24.87 ±	25.77 ±	26.39 ±
		0.47Aa	0.33Aa	1.03Aa	1.47Aa	1.37Aa
0.15%		29.10 ±	31.46 ±	32.63 ±	33.16 ±	33.42 ±
		0.99Ba	1.37Ba	1.01Ba	1.36Ba	1.17Ba
0.05%	2.5	26.95 ±	29.70 ±	30.49 ±	31.19 ±	31.76 ±
		0.45Ab	1.67Ab	0.21Ab	1.37Ab	1.10Ab
0.10%		32.20 ±	33.51 ±	34.28 ±	34.84 ±	35.20 ±
		1.83Bb	1.03Ab	0.86Ab	1.76Ab	1.80Ab
0.15%		35.60 ±	38.47 ±	39.14 ±	39.39 ±	39.84 ±
		1.96Bb	1.60Bb	1.60Bb	1.78Bb	1.78Bb
0.05%	4	28.09 ±	30.98 ±	32.11 ±	33.53 ±	33.77 ±
		1.08Ab	1.23Ab	0.22Ab	1.51Ab	1.20Ab
0.10%		45.33 ±	46.72 ±	47.26 ±	47.46 ±	47.46 ±
		1.78Bc	2.33Bc	1.89Bc	2.07Bc	2.07Bc
0.15%		44.38 ±	47.79 ±	48.24 ±	48.41 ±	48.41 ±
		1.03Bc	2.38Bc	2.41Bc	1.45Bc	1.45Bc
สตาร์ชธรรมชาติ		11.48 ±	12.98 ±	13.58 ±	13.98 ±	14.36 ±
		0.43	0.56	0.64	0.91	0.83

A, B ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของ STMP ต่างกัน ในแต่ละเวลาในการทำปฏิกิริยา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้นของ STMP มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

* เจลของสตาร์ชสาคุจินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง เป็น spongy ตั้งแต่รอบแรกของการแช่แข็ง-การละลายน้ำแข็ง

ภาคผนวก ง.

สมการความสัมพันธ์

ตารางที่ ง.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และกำลังการพองตัว (y) ของสตาร์ช
 สาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และ
 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง

กำลังการพองตัว ที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)	สตาร์ชสาकुไทย			สตาร์ชสาकुจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
55	$y = 5.1171x^2 + 3.806x + 0.5841$	0.97	111.76*	$y = 2.5985x^2 + 5.5208x + 1.2329$	0.82	15.75*
65	$y = -17.588x^2 + 25.096x + 0.4167$	0.79	13.15*	$y = -15.672x^2 + 20.664x + 3.1561$	0.91	33.50*
75	$y = -281.17x^2 + 373.26x + 3.3268$	0.83	17.14*	$y = 110.16x^2 - 2.0126x + 15.478$	0.90	30.70*
85	$y = -343.33x^2 + 413.47x + 18.146$	0.93	46.13*	$y = -4.0418x^2 + 124.27x + 11.928$	0.90	30.53*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่าร้อยละการละลาย (y) ของ
 สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น
 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง

ร้อยละการละลาย ที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)	สตาร์ชสาकुไทย			สตาร์ชสาकुจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
55	$y = 4.4184x^2 + 1.4328x + 0.2725$	0.86	20.69*	$y = 3.2973x^2 + 1.2708x + 0.3936$	0.84	18.58*
65	$y = -15.483x^2 + 26.415x - 0.7662$	0.56	5.48*	$y = -28.93x^2 + 31.262x + 4.1079$	0.79	13.11*
75	$y = 11.819x^2 + 23.328x + 15.061$	0.72	9.13*	$y = -0.1044x^2 + 14.776x + 11.076$	0.74	10.18*
85	$y = -13.521x^2 + 49.856x + 14.616$	0.66	6.72*	$y = -34.33x^2 + 39.621x + 11.928$	0.75	10.72*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่า Pasting properties (y) ของ
 สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น
 2-6% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง

Pasting properties	สตาร์ชสาकुไทย			สตาร์ชสาकुจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
Peak viscosity	$y = 195.95x^2 - 229.7x + 132.8$	0.52	3.73	$y = 108x^2 - 124.27x + 139.02$	0.35	1.88
breakdown	$y = 30.81x^2 - 38.655x + 25.981$	0.91	33.83*	$y = -7.0828x^2 - 2.3172x + 22.994$	0.06	0.22
Setback	$y = 109.61x^2 - 118.33x + 55.351$	0.42	2.58	$y = 112.17x^2 - 107.8x + 54.807$	0.43	2.64
Pasting temperature	$y = 1.9309x^2 - 7.1916x + 81.609$	0.98	139.32*	$y = 8.6527x^2 - 10.82x + 75.202$	0.72	8.80*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่า Breakdown (y) ของสตาร์ช
 สาคูไทย และสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิบัติการแทนที่ด้วย STPP ความเข้มข้น 2-6% และ
 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง ที่ pH ต่างๆ

Breakdown	สตาร์ชสาคูไทย			สตาร์ชสาคูจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
pH 3	$y = 60.726x^2 - 80.671x + 54.443$	0.59	4.99*	$y = 52.316x^2 - 49.457x + 30.827$	0.35	1.89
pH 5	$y = 0.0108x^2 - 4.3655x + 17.087$	0.83	16.69*	$y = 19.078x^2 - 16.717x + 13.788$	0.08	0.31
pH 7	$y = 30.81x^2 - 38.655x + 25.981$	0.91	33.83*	$y = -7.0828x^2 - 2.3172x + 22.994$	0.06	0.22
pH 9	$y = 263.01x^2 - 353.24x + 148.28$	0.82	15.57*	$y = 75.345x^2 - 65.275x + 175.04$	0.05	0.18

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และกำลังการพองตัว (y) ของสตาร์ช
 สาคูไทย และสาคูจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น 0.05-
 0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

กำลังการพองตัว ที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)	สตาร์ชสาคูไทย			สตาร์ชสาคูจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
55	-	-	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	-
75	$y = 15.035x^2 - 16.866x + 13.697$	0.87	23.17*	$y = 0.8905x^2 - 4.4094x + 10.48$	0.80	13.82*
85	$y = 34.802x^2 - 38.983x + 21.186$	0.86	21.26*	$y = 1.442x^2 - 6.6038x + 14.892$	0.82	15.62*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่าร้อยละการละลาย (y) ของ
 สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น
 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

ร้อยละการละลาย ที่อุณหภูมิต่างๆ (°C)	สตาร์ชสาकुไทย			สตาร์ชสาकुจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
55	-	-	-	-	-	-
65	$y = -0.0492x^2 - 0.4378x + 0.4977$	0.90	13.11*	-	-	-
75	$y = 29.123x^2 - 28.286x + 10.988$	0.71	10.18*	$y = 0.7864x^2 - 3.5786x + 8.9475$	0.68	8.42*
85	$y = 23.842x^2 - 24.65x + 12.026$	0.76	10.72*	$y = 1.009x^2 - 4.503x + 11.114$	0.66	10.80*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่า Pasting properties (y) ของ
 สตาร์ชสาकुไทย และสาकुจีนดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วย STMP ความเข้มข้น
 0.05-0.15% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-4 ชั่วโมง

Pasting properties	สตาร์ชสาकुไทย			สตาร์ชสาकुจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
Peak viscosity	$y = -1.7233x^2 + 3.4128x + 81.82$	0.85	19.80*	$y = -0.4647x^2 + 2.3704x + 76.5$	0.81	14.72*
breakdown	$y = 110.75x^2 - 103.56x + 20.005$	0.78	12.32*	$y = 4.2156x^2 - 15.828x + 9.9408$	0.41	2.47
Setback	$y = -222.12x^2 - 27.779x + 156.29$	0.94	51.45*	$y = 27.892x^2 - 128.92x + 138.77$	0.97	102.57*
Pasting temperature	$y = -282.64x^2 + 105.57x + 84.676$	0.76	10.82*	$y = 11.022x^2 - 51.321x + 60.905$	0.82	16.21*

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ ง.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการแทนที่ (x) และค่า Breakdown (y) ของสตาร์ช
 สาคูไทย และสาคูจีนที่ pH ต่างๆ

Breakdown	สตาร์ชสาคูไทย			สตาร์ชสาคูจีน		
	สมการ	R ²	F _{calculate}	สมการ	R ²	F _{calculate}
pH 3	$y = 123.49x^2 - 165.13x + 54.783$	1.00	824.52*	$y = 7.1718x^2 - 27.197x + 17.591$	0.53	3.92
pH 5	$y = 71.33x^2 - 65.67x + 12.248$	0.72	8.98*	$y = 2.1785x^2 - 8.0176x + 4.7287$	0.26	1.21
pH 7	$y = 110.75x^2 - 103.56x + 20.005$	0.78	12.32*	$y = 4.2156x^2 - 15.828x + 9.9408$	0.41	2.47
pH 9	$y = 309.37x^2 - 476.19x + 175.89$	0.94	53.80*	$y = 4.2403x^2 - 15.936x + 10.038$	0.42	2.57

* F_{table}(2, 7) = 4.74 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนพร แซ่เบ๊ เกิดวันที่ 1 มิถุนายน 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย