

สมบัติทางเคมีกายภาพของสสารที่แยกได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงของมะม่วง
(*Mangifera indica* L.) พันธุ์ที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทย

นางสาวขวัญแก้ว แซ่เอ็ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้ทั้งหมดปีการศึกษา 2554 ที่เก็บถาวรในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF STARCH ISOLATED FROM SEED KERNEL OF
MANGO (*Mangifera indica* L.) PRIMARY CULTIVATED IN THAILAND

Miss Kwankeaw Saeaurng

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

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่แยกได้จากเนื้อในเมล็ด
มะม่วงของมะม่วง (*Mangifera indica* L.) พันธุ์ที่ปลูกเป็น
หลักในประเทศไทย
โดย นางสาวขวัญแก้ว แซ่เอ็ง
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.ตรีษ กวัคเพชญ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ตรีษ กวัคเพชญ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิราวัฒน์ ทัตติยกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชนิษฐา ธนานุวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. วรรณมา ตูลยธัญ)

ขวัญแก้ว แซ่เอี๊ยง : สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่แยกได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงของมะม่วงพันธุ์ที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทย (PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF STARCH ISOLATED FROM SEED KERNEL OF MANGO PRIMARY CULTIVATED IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.ตรีช กวัคเพฑูรย์, 143 หน้า.

ในประเทศไทยเมล็ดมะม่วงเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปมะม่วงที่มีปริมาณไม่น้อยกว่า 1 ตันต่อสัปดาห์ และเนื้อในเมล็ดมะม่วงยังคงมีสารอาหารที่มีประโยชน์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ชที่พบเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตามการนำสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์ยังมีไม่มาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของข้อมูลพื้นฐาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาและเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทย ได้แก่ เนื้อในเมล็ดของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ แก้ว และโชคอนันต์ รวมถึงศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ สตาร์ชข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวหอมมะลิ และข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ พบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของสตาร์ชพบว่า สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณไขมัน และปริมาณแอมิโลสสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากแหล่งอื่น แอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเล็กกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น และพบว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และ B2 สูงกว่า แต่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ต่ำกว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากแหล่งอื่น จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชพบว่าเมล็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นวงรี รูปไข่ ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 13.0 – 13.3 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่าเมล็ดสตาร์ชข้าวโพดและมันสำปะหลัง แต่ใหญ่กว่าสตาร์ชข้าวหอมมะลิและข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีรูปแบบผลึกแบบ A โดยจะมีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาตินเซชัน (T_0) สูงกว่า และต้องใช้พลังงานในการหลอมละลายโครงสร้างผลึก (ΔH_{gel}) สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น อย่างไรก็ตามสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงใช้พลังงานในการหลอมละลายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ($\Delta H_{amylose-lipid}$) น้อยกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินที่สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีกำลังการพองตัวและการละลายมากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง RVA ที่พบว่า สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง มีความหนืดสูงสุดสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง มีค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น และยังมีค่าความหนืดลดลงที่ค่อนข้างต่ำ เจลของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าความแข็ง ค่าความยืดหยุ่น และค่าความยากง่ายในการเคี้ยวสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น จากสมบัติทางเคมีกายภาพที่ต่างจากสตาร์ชชนิดอื่นสามารถสรุปได้ว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ เป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงส่งผลให้เกิดการเจลลาตินเซชันได้ยาก นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างโมเลกุลที่เอื้อต่อการเกิดรีโทรเกรดชันส่งผลให้ได้เจลที่มีความแข็งแรงสูง โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีสมบัติดังกล่าวที่ชัดเจนกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์และพันธุ์น้ำดอกไม้ ตามลำดับ

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5272234023 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : Mango seed kernel / starch / amylose / amylopectin

KWANKEAW SAEURNG: PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF STARCH ISOLATED FROM SEED KERNEL OF MANGO PRIMARY CULTIVATED IN THAILAND: ADVISOR: DARIS KUAKPETOON, Ph.D., 143 pp.

In Thailand, mango seeds are disposed from mango processing plants at least 1 metric ton per week and mango seed kernel (MSK) still contain large amount of nutrients, especially starch. However, MSK has not been extensively used. This might be due to the limit of basic information. Therefore, this study aims to investigate and compare chemical compositions of MSK from three mango cultivars (Namdokmai, Kaew, and Chokanun) primary cultivated in Thailand. Furthermore, the physicochemical properties of starch from MSK were also studied and compared with those of other starches mainly used in the industry (corn starch, tapioca starch, rice starch from Hom Mali and Chiang Phatthalung cultivars). From the chemical compositions analysis, carbohydrate was the major component found in MSK. The investigation in starch chemical properties revealed that MSK starches contained lipid and amylose higher than other starches. The weight average molecular weight (\bar{M}_w) of amylose and amylopectin of MSK starches were smaller than those of other starches. The structure of MSK starch amylopectin was higher in B1 and B2 chains but lower in A chain than that of other starch amylopectins. According to the physical properties, most MSK starch granules were in an oval shape and had a size in the range of 13.0 – 13.3 μm which were smaller than corn and tapioca starch granule, but larger than rice starch granule. MSK starch exhibited an A type X-ray pattern and possessed higher in relative crystallinity than other starches. Physicochemical properties of MSK starches were significantly different from those of other starches. In thermal properties study, MSK starches exhibited higher in onset temperature (T_o) and gelatinization enthalpy (ΔH_{gel}) than other starches. However, they required lower amount of energy ($\Delta H_{\text{amylose-lipid}}$) to melt the structure of amylose-lipid complex than other starches, excluding tapioca starch. Amylopectin of MSK starches had a higher degree of retrogradation than other starch, excluding Chiang Phatthalung rice starch. MSK starch granules illustrated a higher in swelling power and solubility than corn starch and rice starch granules. In accordance with swelling power and solubility, MSK starches had a higher pasting temperature (excluding Chiang Phatthalung rice starch) and a higher peak viscosity (excluding tapioca starch) than other starches. However, MSK starch pastes had setback in viscosity lower than other starches and quiet low in breakdown in viscosity. Texture profile analysis showed that MSK starch gels were higher in hardness, springiness and gumminess than other starches. According to the physicochemical properties different from other starches, it could be concluded that all MSK starches from three mango cultivars had a strong granular structure resulting in a difficulty in gelatinization. Furthermore, the MSK starch molecules were likely to retrograde and produced a hard gel. Among three cultivars, Kaew MSK starch clearly exhibited these physicochemical properties more than Chokanun and Namdokmai MSK starches, respectively

Department:..... Food Technology..... Student's Signature.....

Field of Study:..... Food Technology..... Advisor's Signature.....

Academic Year:..... 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.ตรีษ กวัคเพฑูรย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหา ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด รวมถึงกรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิราวัฒน์ ทัตติยกุล อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานนวงศ์ และศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตูลยธัญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้เสียสละเวลามาตรวจสอบ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุน 90 ปี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทโดล ไทยแลนด์ จำกัด บริษัท เฟิร์ส สตาร์ช อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และกลุ่มสตรีแปรรูปผลไม้ จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ น้องและเพื่อน ๆ ปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน สำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนคอยให้กำลังใจเสมอมา จนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยยินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 มะม่วง (Mango).....	3
2.2 เนื้อในเมล็ดมะม่วง (Mango seed kernel).....	4
2.3 แป้งสตาร์ช.....	6
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช.....	6
2.3.2 เม็ดสตาร์ช.....	12
2.3.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน.....	17
2.3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	21
2.3.5 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช.....	23
2.4 การประยุกต์ใช้สตาร์ชในโรงงานอุตสาหกรรม.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 วัตถุประสงค์ และการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2.1 การศึกษาองค์ประกอบทางของเนื้อในเมล็ดมะม่วง.....	32
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	32

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง.....	37
4.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยศึกษา เปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	91
ภาคผนวก ข รายละเอียดรูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม.....	118
ภาคผนวก ค รายละเอียดข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม.....	129
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	13
2.2	ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	19
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง.....	38
4.2	ปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง.....	39
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและสตาร์ชจากแหล่ง อื่นๆ.....	41
4.4	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและสตาร์ช จากแหล่งอื่นๆ.....	44
4.5	การกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	46
4.6	ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	53
4.7	ปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	57
4.8	สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	59
4.9	สมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรดชัน ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	65
4.10	กำลังการพองตัวของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C.....	68
4.11	การละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วง อุณหภูมิ 60 - 90 °C.....	70
4.12	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจาก แหล่งอื่นๆ.....	72

ตารางที่	หน้า	
4.13	ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	76
ก.1	อัตราส่วนของแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง และ Waxy corn starch ที่ใช้ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	98
ก.2	น้ำหนักโมเลกุลของพอลูแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน.....	101
ก.3	ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A B และ C.....	110
ก.4	Temperature profile STD 1.....	114
ก.5	ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA.....	116
ค.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้.....	129
ค.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว.....	130
ค.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์ไซคอนันต์.....	131
ค.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวโพด.....	132
ค.5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	133
ค.6	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวหอมมะลิ.....	133
ค.7	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง.....	134
ง.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง (สำหรับตารางที่ 4.1).....	135
ง.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (สำหรับตารางที่ 4.2).....	136
ง.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.3).....	136
ง.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.4).....	137

ตารางที่	หน้า
ง.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการกระจายตัวตามขนาดและความยาวสายโซ่ กิ่งก้านของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.5).....	137
ง.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.6).....	138
ง.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลิตีโนเซชัน ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.8).....	138
ง.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลิตภัณฑ์ ที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจาก แหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.9).....	139
ง.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C (สำหรับตารางที่ 4.10).....	140
ง.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C (สำหรับตารางที่ 4.11).....	141
ง.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ด มะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.12).....	142
ง.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชของสตาร์ชจาก เนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.13).....	142

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของแอมิโลส.....	7
2.2	โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน.....	8
2.3	โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน.....	9
2.4	แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแบบ cluster model.....	10
2.5	ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C.....	11
2.6	โครงสร้างแบบ backbone model ของแอมิโลเพกทิน.....	12
2.7	โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช.....	15
2.8	รูปแบบ unit cell ของผลึกแบบ A และ แบบ B.....	16
2.9	ลักษณะการหักเหรังสี x-ray ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A B และ C.....	16
2.10	การเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดสตาร์ช.....	18
2.11	ตัวอย่างเส้นกราฟความร้อน (thermogram) ที่ได้จากการเกิดเจลาติโนเซชัน.....	21
2.12	ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วย เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA).....	25
4.1	การกระจายตัวตามขนาดของโมเลกุลของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและ สตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ.....	43
4.2	เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ ส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า.....	46
4.3	เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ กราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า.....	48
4.4	เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ กราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า.....	48

รูปที่	หน้า	
4.5	รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	50
4.6	ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	51
4.7	รูปแบบการหักเหรังสี X-ray (X-ray diffraction pattern) ของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	55
4.8	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (thermogram) ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน.....	58
4.9	กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน (thermogram) ในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการเกิดตรีโพรเกรเดชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่น.....	65
4.10	กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชที่อุณหภูมิ 60 °C, 70°C, 80 °C และ 90°C.....	67
ก.1	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส.....	99
ก.2	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน.....	102
ข.1	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้.....	118
ข.2	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว.....	118
ข.3	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์.....	119
ข.4	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชข้าวโพด.....	119
ข.5	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	120
ข.6	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชข้าวหอมมะลิ.....	120
ข.7	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง.....	121

รูปที่	หน้า
ข.8 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ด มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้.....	121
ข.9 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ด มะม่วงพันธุ์แก้ว.....	122
ข.10 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ด มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์.....	122
ข.10 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวโพด.....	123
ข.11 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	123
ข.12 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวหอมมะลิ.....	124
ข.13 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง.....	124
ข.15 กราฟสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	125
ข.16 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ (6 ซ้ำการทดลอง).....	125
ข.17 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว (6 ซ้ำการทดลอง).....	126
ข.18 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ (6 ซ้ำการทดลอง).....	126
ข.19 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวโพด (6 ซ้ำการทดลอง).....	127
ข.20 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง (6 ซ้ำการทดลอง).....	127
ข.21 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ (6 ซ้ำการทดลอง).....	128
ข.22 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง (6 ซ้ำการทดลอง).....	128

บทที่ 1

บทนำ

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีการปลูกมากชนิดหนึ่งในประเทศไทย มะม่วงสามารถนำมารับประทานได้ตั้งแต่ใบอ่อน ช่อดอกอ่อน และผล นอกจากนี้ส่วนต้นและกิ่งยังใช้เป็นไม้ก่อสร้างและไม้ฟืนได้อีกด้วย แต่โดยทั่วไปแล้วคนไทยจะใช้ประโยชน์จากเนื้อมะม่วงมากที่สุด ซึ่งจะนำมาบริโภคโดยตรงหรือนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น มะม่วงดอง มะม่วงกวน ส่วนที่เหลือจะเป็นของเสียในรูปเปลือกมะม่วงและเมล็ดมะม่วง ซึ่งเปลือกมะม่วงนั้นจัดเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ง่าย โรงงานแปรรูปมะม่วงจึงสามารถนำเปลือกมะม่วงเหลือทิ้งไปผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งสามารถนำไปขายสู่เกษตรกรกลายเป็นรายได้เพิ่มเติมให้กับโรงงานได้ ส่วนเมล็ดมะม่วงนั้นแม้จะมีการนำไปใช้ประโยชน์บ้าง เช่น นำไปต้มเพื่อรับประทาน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะถูกทิ้งเป็นขยะ ซึ่งมีการสำรวจโรงงานจำนวน 103 โรงงานในประเทศไทยพบว่าการแยกเมล็ดมะม่วงทิ้งตามสายพันธุ์ร้อยละ 73.7 และมีโรงงานที่มีความประสงค์จะขายเมล็ดมะม่วงเหล่านี้ในราคา 100 - 500 บาทต่อตัน อยู่ร้อยละ 47.4 และจากการสำรวจยังพบว่าสายพันธุ์ของมะม่วงที่มีเมล็ดมะม่วงเหลือทิ้งจากโรงงานมากที่สุด 5 อันดับแรก คือ มะม่วงแก้ว มะม่วงโชคอนันต์ มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงแสด และมะม่วงอกร่อง ตามลำดับ ทั้งนี้ของเสียที่เป็นเมล็ดมะม่วงอยู่ประมาณ 1,063 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ (พิชญอร ไหมสุทธิสกุล และ ศิริกานต์ ผาสุก, 2551)

จากการสำรวจนี้ชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีปริมาณมาก และราคาถูก นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วง (mango seed kernel) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ดมะม่วงนั้น เป็นแหล่งของสารอาหาร และสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต รวมถึงสารต้านอนุมูลอิสระประเภทสารประกอบฟีนอลิก (phenolic) ที่สำคัญเนื้อในเมล็ดมะม่วงเป็นแหล่งของแป้งสตาร์ชซึ่งมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 58 (Garg and Tandon, 1997) ซึ่งปริมาณของแป้งสตาร์ชอาจแตกต่างกันไปบ้างขึ้นกับพันธุ์ของมะม่วง โดยในปัจจุบันนี้มีนักวิจัยหลายคนสนใจศึกษาสตาร์ช

จากเนื้อในเมล็ดมะม่วง แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่ได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทยยังมีอยู่จำกัด

จากเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษา และเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงของมะม่วงพันธุ์ที่ปลูกเป็นหลักในประเทศไทย 3 สายพันธุ์ คือ มะม่วงแก้ว ไซคอนันต์ และน้ำดอกไม้ รวมทั้งศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชที่แยกได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ทั้ง 3 สายพันธุ์ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม (สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้ายงพัทลุง) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 มะม่วง (Mango)

มะม่วงเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่ประเทศไทยผลิตมากที่สุดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากมะม่วงมีพันธุ์ที่หลายหลายจึงสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปีและปลูกได้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ โดยเชื่อกันว่าประเทศไทยมีการปลูกมะม่วงมาตั้งแต่สมัยสุโขทัย การปลูกมะม่วงในอดีตของไทยนั้นโดยมากเป็นการปลูกเพื่อใช้บริโภคภายในประเทศเท่านั้น แต่ในปัจจุบันมะม่วงได้เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางและชาวต่างชาตินิยมกันมากขึ้น จึงมีการผลิตมะม่วงเป็นการค้าขึ้นประกอบกับความต้องการมะม่วงทั้งตลาดภายในประเทศและต่างประเทศมีปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยชนิดหนึ่ง (ญาณกร ศิวะวัฒน์วงศ์ และอนนต์ อติโรจนานนท์, 2550) โดยสายพันธุ์ที่นิยมปลูกกันในประเทศไทย คือ น้ำดอกไม้ หนังกกลางวัน ทองดำ อกร่องทอง เขียวเสวย พิมเสนมัน มะม่วงแก้ว สามปี โชคอนันต์ และแรด (วิจิตร วังไฉน, 2529) ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตมะม่วงมากเป็นอันดับที่ 4 ของโลกรองจากประเทศอินเดีย เม็กซิโก และปากีสถาน ตามลำดับ โดยมีปริมาณการผลิตรวมประมาณ 1.83 ล้านตันต่อปี (องค์การตลาดเพื่อเกษตร, 2548) มะม่วงทั่วโลกมีอยู่ประมาณ 41 ชนิด (species) ที่พบในประเทศไทยมี 7 species คือ *Mangifera duperrana*, *M. indica*, *M. caloneura*, *M. siamensis*, *M. oblongifolia*, *M. camptosperma* และ *M. lagenifera* (Mukherjee, 1948)

โดยทั่วไปการบริโภคมะม่วงและการแปรรูปมะม่วงในระดับอุตสาหกรรม จะใช้เฉพาะส่วนของเนื้อมะม่วงเท่านั้น ส่วนอื่นๆ ของผลมะม่วงจะถูกทิ้งเป็นขยะสูงถึงร้อยละ 40 - 60 ซึ่งอยู่ในรูปเปลือกประมาณร้อยละ 12 - 14 และเมล็ดประมาณร้อยละ 15 - 20 ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของมะม่วง (Anand and Maini, 1997) โดยจากการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปมะม่วงในประเทศไทยของ พิชญอร ไหมสุทธิสกุล และ ศิริกานต์ ผาสุก (2551) พบว่ามะม่วงสายพันธุ์ที่มีของเสียในรูปเมล็ดมะม่วงมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ สายพันธุ์แก้ว โชคอนันต์ และน้ำดอกไม้ตามลำดับ โดยพบว่าจะมีอยู่ประมาณ 1,063 กิโลกรัมต่อสับดาห์ และจากจำนวน

โรงงานทั้งหมดที่ตอบแบบสอบถามระบุว่ามีการแยกเมล็ดมะม่วงทิ้งตามสายพันธุ์อยู่ร้อยละ 73.7 และมีโรงงานที่มีความประสงค์จะขายของเสียเมล็ดมะม่วงเหล่านี้ในราคา 100 - 500 บาทต่อตัน อยู่ร้อยละ 47.3

2.2 เนื้อในเมล็ดมะม่วง (Mango seed kernel)

เนื้อในเมล็ดมะม่วงเป็นองค์ประกอบหนึ่งของมะม่วงที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากจากกระบวนการแปรรูปมะม่วง ซึ่งเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นมีสารประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายชนิด เนื้อในเมล็ดมะม่วงมีแนวโน้มที่จะเป็นแหล่งของสารประกอบที่สำคัญสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีไขมันและโปรตีนที่มีคุณภาพสูง อีกทั้งยังมีปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่สูง (Soong et al., 2004) ยังมีงานวิจัยพบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีสารประกอบที่สามารถต้านจุลินทรีย์ได้ (Kabuki et al., 2000) นอกจากนี้เนื้อในเมล็ดมะม่วงอาจใช้เป็นอาหารมนุษย์ในยามขาดแคลนได้อีกด้วย เช่น ใช้เผา หรือต้มรับประทาน เป็นต้น (วิจิตร วัจน, 2529)

ผลมะม่วงประกอบด้วยส่วนของเมล็ดประมาณร้อยละ 10 - 25 ของน้ำหนักมะม่วงทั้งผล (Hemavathy et al., 1988) ซึ่งเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 45 - 75 ของเมล็ดมะม่วง และร้อยละ 20 ของมะม่วงทั้งผล (Arogba, 1997) เนื้อในเมล็ดมะม่วงประกอบด้วยสาร น้ำตาลรีดิวิค โปรตีน เพคติน ไขมัน และแทนนิน ประมาณร้อยละ 58 2.9 5.7 0.8 9.3 และ 1.1 ตามลำดับ (Garg and Tandon, 1997) ซึ่งส่วนประกอบและปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้อาจแตกต่างกันไปบ้างขึ้นกับพันธุ์ของมะม่วง

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายคนได้ศึกษาแบ่งจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง เช่น Kaur และคณะ (2004) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดของมะม่วงสายพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย พบว่าสมบัติทางเคมีกายภาพต่างๆ ของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดของมะม่วงแต่ละสายพันธุ์นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณแอมิโลสของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าต่ำกว่าปริมาณแอมิโลสของสารสกัดจากข้าวโพดและมันฝรั่ง โดยปริมาณแอมิโลสของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง สารสกัดข้าวโพด และสารสกัดมันฝรั่ง มีค่าประมาณร้อยละ 9.1 - 16.3 22.1 และ 26.6 - 31.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแกรนูล (granule) ของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ด

มะม่วงมีรูปร่างคล้ายกับแกรนูลของสตาร์ชที่ได้จากพืชตระกูลถั่ว และยังพบว่าเม็ดสตาร์ชบางแกรนูลมีพื้นผิวที่เป็นรูคล้ายกับที่พบในเม็ดสตาร์ชจากข้าวโพด Sandhu และ Lim (2008) ได้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างและความสามารถในการย่อยของสตาร์ชที่ได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพบว่าผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นเป็นชนิด A ซึ่งมักจะพบในสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าต่ำกว่าน้ำหนักโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากข้าวโพด แต่ปริมาณแอมิโลสและความเป็นผลึกมีค่าสูงกว่าสตาร์ชจากข้าวโพด สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) อยู่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากข้าวโพด ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้เสนอแนะว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งของสตาร์ชได้และยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพอีกด้วย

แป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสามารถนำมาใช้ผสมกับแป้งข้าวสาลีเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูงโดยยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค Arogba (1999) ได้นำแป้งฟลาวร์ที่ได้จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมาผสมกับแป้งฟลาวร์จากข้าวสาลีเพื่อทำขนมปัง ซึ่งได้ทดลองทำในอัตราส่วนแป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงต่อแป้งฟลาวร์จากข้าวสาลี ดังนี้ 50:50 60:40 70:30 และ 100:0 พบว่าการใช้แป้งฟลาวร์ในอัตราส่วน 50:50 จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั้งด้านสี เนื้อสัมผัส และกลิ่นรส นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Om El-Saad El-Gammal (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์) ซึ่งได้นำแป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมาผสมกับแป้งฟลาวร์จากข้าวสาลีเพื่อทำผลิตภัณฑ์ขนมอบ โดยแทนที่แป้งฟลาวร์จากข้าวสาลีด้วยแป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงในสัดส่วนต่างๆ คือ ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 (w/w) พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้ง ฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วง จะทำให้การสูญเสีย น้ำของผลิตภัณฑ์ขณะอบเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการอบมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มสัดส่วนแป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทำให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ขนมอบเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อแทนที่แป้งฟลาวร์จากข้าวสาลีด้วยแป้งฟลาวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงในสัดส่วนร้อยละ 25 นั้นทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมอบได้นานถึง 20 วัน ที่อุณหภูมิห้องและ 49 วัน ที่อุณหภูมิตู้เย็น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระและสารยับยั้งจุลินทรีย์ โดย Abdalla และคณะ (2007) พบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีโพลีฟีนอล

(polyphenols) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีอยู่ 112 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้งของผงเนื้อใน เมล็ดมะม่วง

2.3 แป้งสตาร์ช

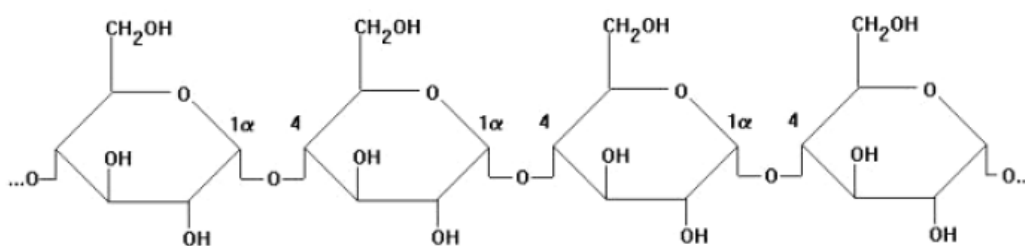
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง ซึ่งแป้งนั้นเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญทางด้านโภชนาการของมนุษย์ และนอกจากนี้แป้งยังมีคุณสมบัติเฉพาะตัวสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอาหารได้อีกด้วย เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว แป้งสตาร์ชจะหมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ แต่จะมีส่วนเจือปนอื่นๆ เช่น ไขมัน โปรตีน แร่ธาตุ และใยอาหาร อยู่เล็กน้อย ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โดยสตาร์ชนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามแหล่งที่พบ คือ สตาร์ชจากธัญพืช สตาร์ชจากรากหรือหัว และสตาร์ชจากลำต้น ซึ่งสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันนั้นจะมีลักษณะทางเคมีกายภาพเฉพาะตัว จึงเป็นเหตุให้สตาร์ชแต่ละแหล่งมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ต่างกัน (ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์, 2546)

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

โดยทั่วไปเมล็ดสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งสตาร์ชโดยธรรมชาติจะมีแอมิโลเพกทินประมาณร้อยละ 70 - 80 และมีแอมิโลสประมาณร้อยละ 20 - 30 โดยสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ช ซึ่งปริมาณและโครงสร้างของโมเลกุลทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช และนอกจากนี้สตาร์ชยังประกอบด้วยไขมัน (ฟอสฟอลิปิดและกรดไขมันอิสระ) โปรตีน และฟอสฟอรัส ซึ่งสารตัวกลางเหล่านี้ก็มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชเช่นกัน แต่จะมีอิทธิพลน้อยกว่า เนื่องจากสารตัวกลางเหล่านี้เป็นเพียงองค์ประกอบส่วนน้อยที่มีอยู่ในสตาร์ช (Jane, 2009)

2.3.1.1 แอมิโลส

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α -1,4) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แอมิโลสยังประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งแขนงที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,6 (α -1,6) บ้างเล็กน้อย โดยจำนวนกิ่งแขนงซึ่งมีกลูโคสประมาณ 2 - 11 หน่วยกลูโคสจะแตกต่างกันไปตามชนิด และแหล่งที่มาของสตาร์ช (Donovan, 1979) น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งแอมิโลสของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งจะมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกันไป (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

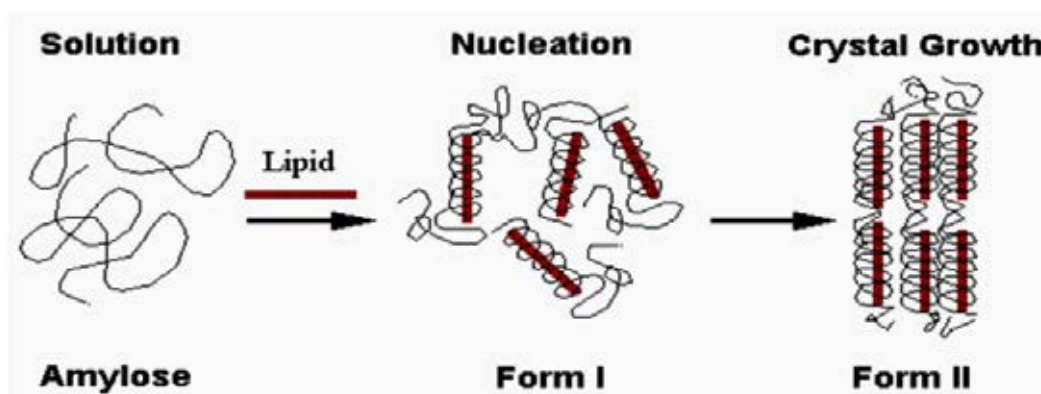


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: ปาริดา ขุนแอ (2550)

แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงทำให้สามารถจับกับโมเลกุลชนิดอื่นของสตาร์ชได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น สามารถจับกับแอมิโลเพกทินเป็นเกลียวคู่ (double helices) (Bower, 1992) นอกจากนี้แอมิโลสยังสามารถจับกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose-lipid complex) ที่มีความเสถียร (รูปที่ 2.2) ซึ่งการทำลายสารประกอบเชิงซ้อนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kugimiya, Donovan and Wong, 1980) และแอมิโลสยังสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ช

จากแหล่งต่างๆ ได้ (Jane, 2009) การที่แอมิโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารเหล่านี้ได้นั้นเนื่องมาจาก เมื่อสายแอมิโลสอยู่ในรูปของเกลียวเดี่ยว (single helices) ด้านในของเกลียวที่มีลักษณะเป็นช่องว่างจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงทำให้แอมิโลสสามารถห่อหุ้มสารประกอบที่มีสมบัติเป็นสารไม่มีขั้วเอาไว้ได้ (Jane, 2009)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน

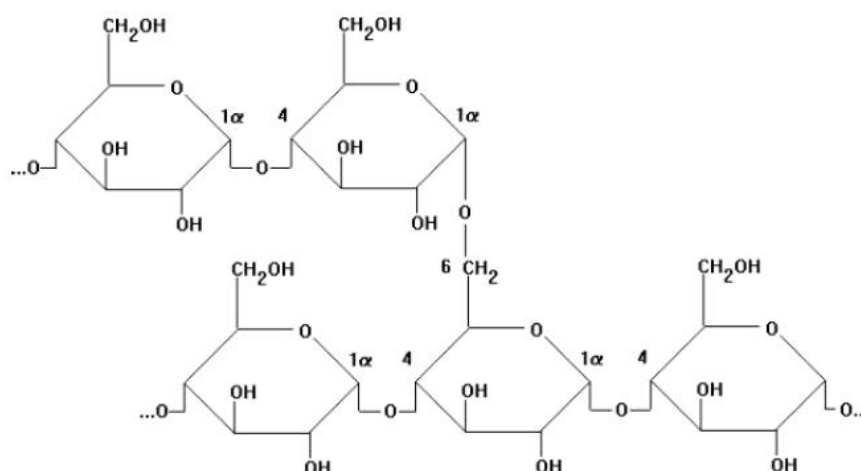
ที่มา: ดัดแปลงจาก Kugimiya และคณะ (1980)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช ซึ่งสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีโครงสร้างและปริมาณของแอมิโลสที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชจากธัญพืช คือ สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชข้าวโพด จะมีแอมิโลสประมาณร้อยละ 25 และ 29.4 ตามลำดับ สตาร์ชจากส่วนรากของพืช คือ สตาร์ชมันสำปะหลัง จะมีแอมิโลสประมาณร้อยละ 23.5 (Jane, 2009) แต่ทั้งนี้ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งอาจแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะปลูกของพืชด้วย

2.3.1.2 แอมิโลเพกทิน

แอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาซึ่งเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น โดยมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ซึ่งจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 5 - 6 ของ

ปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในแอมิโลเพกทินทั้งหมด โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 แอมิโลเพกทินมีน้ำหนักประมาณ 1,000 เท่า ของแอมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งของสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

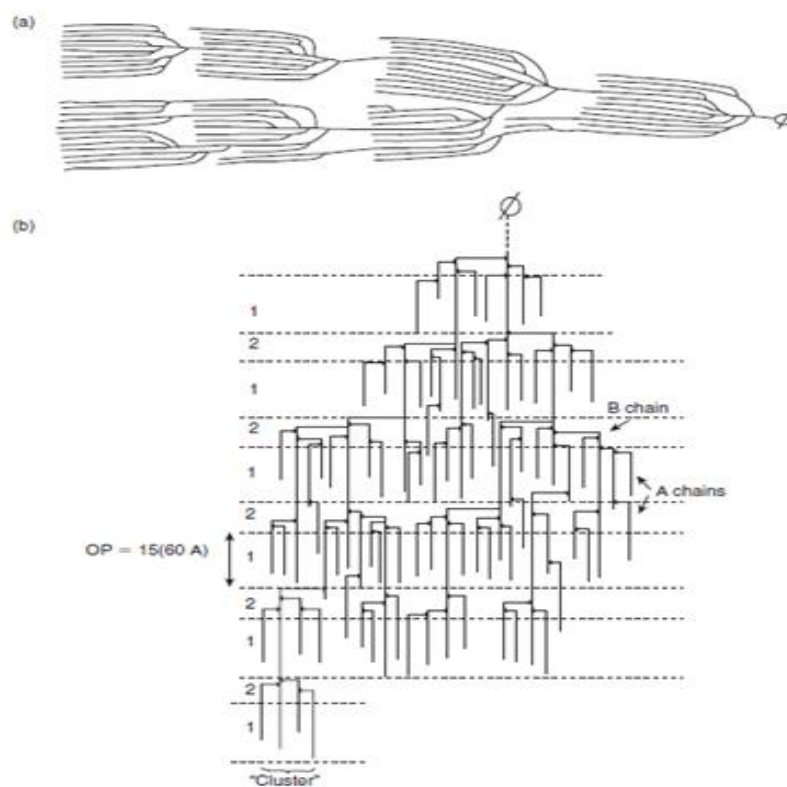


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: ปาริตา ขุนแอ (2005)

French (1972) และ Nikuni (1978) ได้เสนอแบบจำลองการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแบบ cluster ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลที่นักวิจัยให้การยอมรับจนถึงปัจจุบัน โดยสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินจะเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ เรียกแต่ละชั้นว่า cluster และใน cluster 1 ชั้นจะแบ่งเป็นชั้นผลึก (crystalline lamellae) และชั้นอสัณฐาน (amorphous lamellae) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในโครงสร้าง cluster นี้ สายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินจะแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ สาย A (A – chain) สาย B (B – chain) และ สาย C (C – chain) สาย A เป็นสายโซ่ตรง และเชื่อมต่อที่ตำแหน่ง C-6 ของสาย B และ C และจะไม่มีสายโซ่กิ่งเชื่อมต่อออกจากสายโซ่ชนิดนี้ (unbranched structure) ส่วนสาย B เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า สาย C (C – chain) เป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ 1 หมู่ โดยโมเลกุลของแอมิโลเพกทินจะมีสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Hizukuri, 1986) ในปี 1986 Hizukuri ได้ศึกษาโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน และสามารถแยกสายโซ่แอมิโลเพกทิน

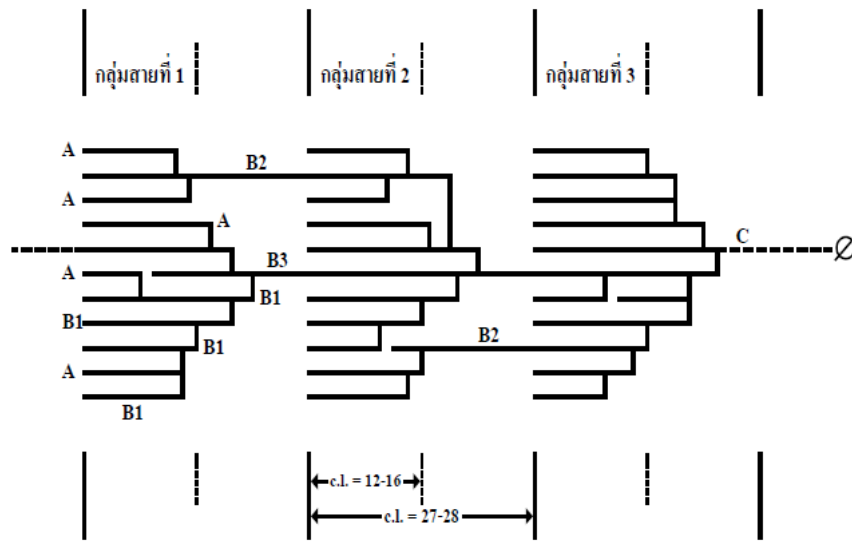
ได้เป็น 4 ชนิดตามขนาดความยาวจากสั้นสุดไปยาวสุดตามลำดับดังนี้ คือ สายโซ่กิ่งก้านชนิด A B1 B2 B3 และ B4 โดยสายโซ่กิ่งก้านสาย A และ B1 อยู่ในชั้น cluster เดียวกัน ส่วนสาย B2 B3 และ B4 จะเป็นสายโซ่ที่มีความยาวแผ่ขยายออกไป 2 3 4 หรือ > 4 cluster โดยความยาวของ 1 cluster เท่ากับ 27 - 28 DP และจากการศึกษาโครงสร้างแอมิโลเพกทินของ Hanashiro และคณะ (1996) พบว่า สายโซ่กิ่งก้านสาย A B1 B2 และ B3+ มีขนาดความยาวเท่ากับ 6 -12 13 - 24 25 - 36 และ ≥ 37 DP ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของสายโซ่แอมิโลเพกทินแต่ละชนิดนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งของสตาร์ช และสภาวะแวดล้อมในการเพาะปลูก



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแบบ cluster

(รูป a): cluster model เสนอโดย French (1972)

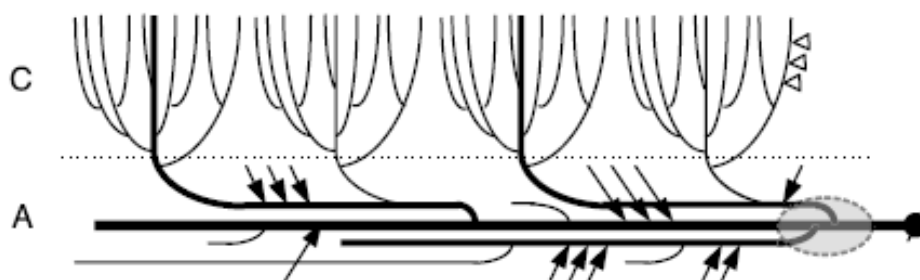
(รูป b): cluster model แสดงถึงบริเวณชั้นผลึก (1) และบริเวณอสัณฐาน (2) (Robin และคณะ, 1974)



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างแอมิไลด์เพกตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C

ที่มา: ดัดแปลงจาก Hizukuri (1986)

นอกจากแบบจำลองแบบ cluster แล้ว Bertoft (2004) ได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลแอมิไลด์เพกตินอีกรูปแบบที่เรียกว่า backbone model แสดงดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าแอมิไลด์เพกติน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยชั้นผลึก และชั้นอสัณฐานเพียงอย่างละ 1 ชั้นเท่านั้น โดยกลุ่มของสายโซ่กิ่งก้านสายสั้น (เส้นบาง) ที่อยู่ในชั้นผลึก จะเชื่อมต่ออยู่กับสายโซ่กิ่งก้านสาย B2 (เส้นหนา) จำนวน 3 สาย และสาย B3 (เส้นหนามาก) จำนวน 1 สายที่อยู่บริเวณชั้นอสัณฐาน โดยสายโซ่กิ่งก้านสาย B2 แต่ละสายมักจะเชื่อมต่ออยู่กับสายโซ่กิ่งก้านสายสั้น 2 กลุ่ม



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบ backbone model ของแอมิโลเพกทิน ; สายโซ่กิ่งก้านสายสั้น (เส้นบาง) สายโซ่กิ่งก้านสาย B2 (เส้นหนา) สายโซ่กิ่งก้านสาย B3 (เส้นหนามาก) บริเวณชั้นผลึก (A) บริเวณชั้นออสัณฐาน (C) และ reducing end (Ø)

ที่มา : Bertoft (2007)

จากข้อมูลโครงสร้างแอมิโลเพกทินข้างต้น จะเห็นว่าแอมิโลเพกทินเป็นโมเลกุลของสตาร์ชที่ขนาดใหญ่กว่าและมีกิ่งสาขามากกว่าแอมิโลส ทำให้มีความสามารถในการคืนตัวต่ำกว่า อย่างไรก็ตามแอมิโลเพกทินสามารถเกิดเกลียวคู่โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งแอมิโลเพกทินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดผลึกได้ระหว่างกิ่งที่อยู่ในชั้น cluster เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Hizukuri, 1986)

2.3.2 เม็ดสตาร์ช

2.3.2.1 ลักษณะทั่วไปของเม็ดสตาร์ช

เมื่อพืชสังเคราะห์แสงได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จะมีกระบวนการลำเลียงน้ำตาลเหล่านั้นมาสู่ส่วนที่เก็บไว้เป็นพลังงาน โดยจะรวมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้นเป็นโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และเก็บไว้ในลักษณะกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่าเม็ดสตาร์ช โดยสตาร์ชส่วนใหญ่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ช (granule) จะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งของสตาร์ชนั้นๆ (Oates, 1997) โดยขนาดและรูปร่างจะ

แปรผันตั้งแต่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก รูปร่างหลายเหลี่ยม เช่น สตาร์ชข้าวเจ้า ไปจนถึงเม็ดสตาร์ชที่มีรูปร่างเป็นรูปไข่มีขนาดใหญ่ เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.1 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

ตารางที่ 2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่าง

แหล่งของสตาร์ช	ชนิดของสตาร์ช	ขนาด (μm)	รูปร่าง
เมล็ดของผลไม้	เนื้อในเมล็ดมะม่วง ^a	7 - 28	รี คล้ายไข่
ธัญพืช	ข้าวโพด ^b	5 - 18	กลม มีหลายเหลี่ยม
	ข้าวเจ้า ^c	3 - 5	รูปร่างคล้ายแท่ง มีหลายเหลี่ยม
	ข้าวสาลี ^d	A type : 18 - 33 B type : 2 - 5	กลม ค่อนข้างรี
หัว	มันฝรั่ง ^b	15 - 45	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
ราก	มันสำปะหลัง ^e	8 - 22	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด

ที่มา : ^a Kaur และคณะ (2004) ^b Singh และ Singh (2003) ^c Maningat และ Seib (1992)

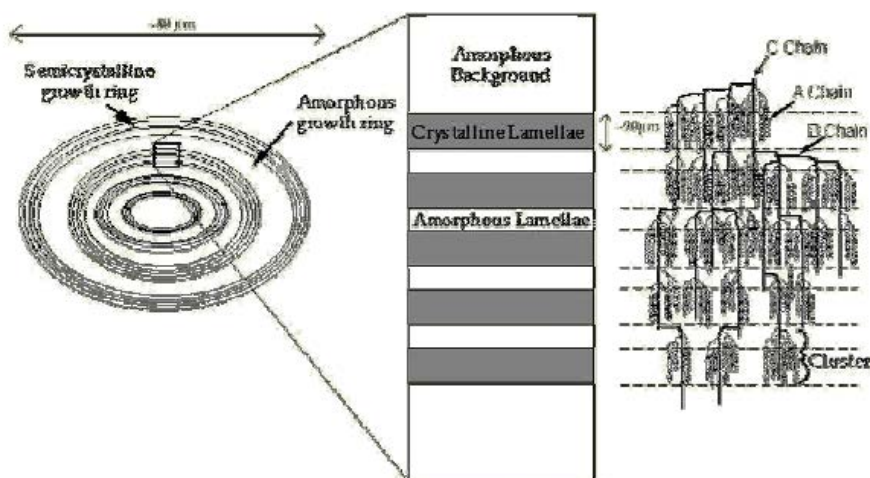
^d Yoo และ Jane (2002) ^e Sriroth และคณะ (1999)

การตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ชสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยสามารถใช้ตรวจสอบถึงรูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดเม็ดสตาร์ช ตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่สภาวะต่างๆ และยังสามารถตรวจสอบการปนเปื้อนจากสตาร์ชชนิดอื่นได้ นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์ยังสามารถใช้ตรวจสอบลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชด้วยการส่องภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชมีสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ เนื่องจากโครงสร้างบางส่วนที่เป็นผลึกในเม็ดสตาร์ช เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ จะเห็นเป็นเงากากบาทเกิดขึ้น (maltese cross) และเรียกลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ว่า birefringence โดยส่วนมืดเป็นเงาของบริเวณที่สายของแอมิโลสกับ

แอมิโลเพกทินตั้งฉากและขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ส่วนพื้นที่ที่สว่างจะเป็นตำแหน่งของสายแอมิโลสกับแอมิโลเพกทินที่ไม่ตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ จุดที่กากบาทตัดกันจะเรียกว่า ไฮลียม (hilium) (Oates, 1997) การที่เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็น birefringence เป็นการยืนยันว่าโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชมีลักษณะกึ่งผลึก (semi-crystalline) การตรวจลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเป็นการตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ช หากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Gallan, Bouchaet and Baldwin, 1997) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเห็นถึงโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากมีกำลังขยายไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เข้ามาช่วยในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากมีกำลังขยายมากกว่าหลายร้อยเท่า จึงทำให้สามารถเห็นถึงพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

2.3.2.2 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช

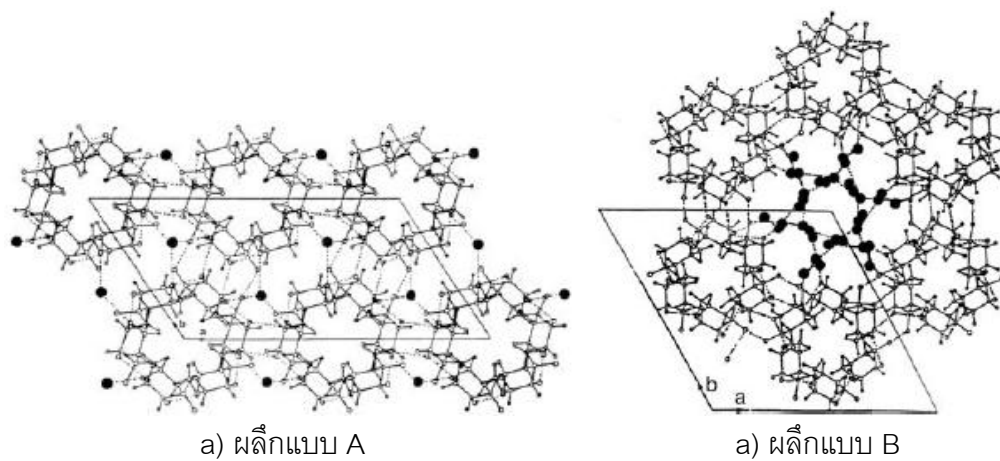
เม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมาจัดเรียงตัวกัน ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นชั้นผลึก และส่วนชั้นอสัณฐาน สตาร์ชแกรนูลจึงมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยส่วนสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 ของแอมิโลเพกทินจะเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) เกิดเป็นชั้นผลึก ส่วนชั้นอสัณฐานของสตาร์ชแกรนูลจะประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลส สายโซ่กิ่งก้านสายยาวของแอมิโลเพกทิน (สายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 และ B3) และบริเวณพันธะ α -1,6 ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของสายกิ่ง (Farhat, Oguntona and Neale, 1999) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสตาร์ชจากแต่ละแหล่งจะมีร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้สตาร์ชมีรูปแบบผลึกและปริมาณผลึกที่แตกต่างกัน โดย Hizukuri (1985) ได้กล่าวว่าปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มีความยาว (13-14 DP) พอดีกับความหนาของผลึก 1 ชั้น ดังนั้นจึงสามารถเกิดผลึกเกลียวอย่างสมบูรณ์มากกว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิดอื่น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

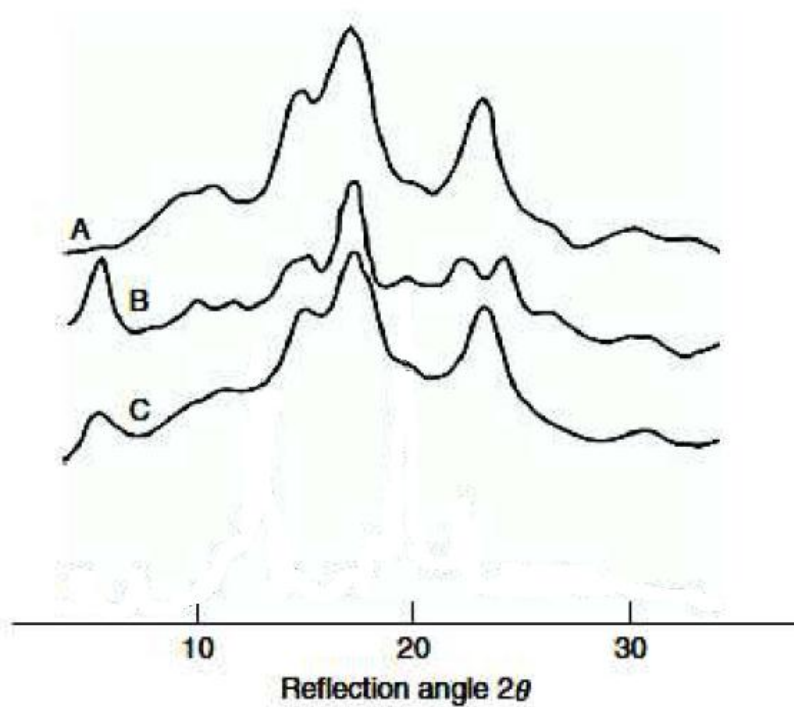
ที่มา: Jenkins และคณะ (1994)

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช พบว่าโดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 3 แบบ คือ A B และ C ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B จะแสดงในรูปของ unit cell ดังรูปที่ 2.8 จากรูปจะเห็นว่าผลึกแบบ A จะมีน้ำแทรกอยู่ 4 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ส่วนผลึกแบบ B มีน้ำแทรกอยู่ถึง 36 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ซึ่งแสดงว่าผลึกแบบ A มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ที่หนาแน่นกว่าผลึกแบบ B ส่วนผลึกแบบ C นั้นจะมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ในลักษณะผสมกันระหว่างแบบ A และ B โดยโครงสร้างผลึกที่ต่างกันจะมีลักษณะการหักเหแสงที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบชนิดของโครงสร้างเม็ดสตาร์ชได้จากลักษณะการหักเหรังสี x-ray โดยใช้เครื่อง x-ray diffractometer (Pérez, Baldwin and Gallant, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยสตาร์ชจากธัญพืชจะมีผลึกแบบ A สตาร์ชที่ได้จากหัวของพืช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลังมีผลึกแบบ B และสตาร์ชที่ได้จากส่วนรากของพืช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลังสามารถตรวจพบลักษณะผลึกได้ทั้งแบบ A และ แบบ C (Rickard et al., 1991)



รูปที่ 2.8 รูปแบบ unit cell ของผลึกแบบ A และ แบบ B

ที่มา : Pérez, Baldwin และ Gallant (2009)

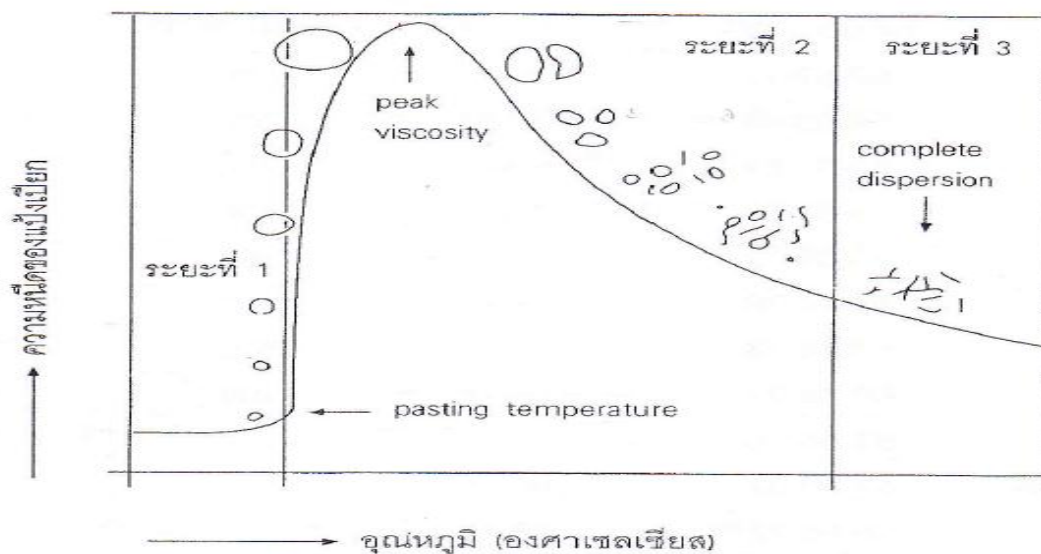


รูปที่ 2.9 ลักษณะการหักเหรังสี x-ray ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A B และ C

ที่มา: Zobel (1988b)

2.3.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช โดยการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ช (รูปที่ 2.10) ซึ่งโดยปกติแล้วเม็ดสตาร์ชจะไม่สามารถละลายได้เมื่ออยู่ในน้ำเย็น แต่สามารถดูดน้ำได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ (reversible swelling) ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นผลึก แต่เมื่อให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสถานะที่มีน้ำเพียงพอจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เม็ดสตาร์ชจะสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชที่เป็นโครงสร้างผลึกถูกทำลาย น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้น และส่งผลให้แอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้ (Hoover, 2001) เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวขึ้นความหนืดของสารละลายสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายสตาร์ชต่อไปเม็ดสตาร์ชจะพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจะแตกออกในที่สุด ทำให้สารละลายสตาร์ชมีความหนืดลดลงและมีการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะกระจายแขวนลอยอยู่ในสารละลายสตาร์ช เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) และเรียกอุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชเริ่มสูญเสียโครงสร้างผลึกจนไม่เห็นลักษณะ birefringence ว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



รูปที่ 2.10 การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช

ที่มา : (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

สตาร์ชจากแต่ละแหล่งจะมีความสามารถในการเกิดเจลาตินในเซชันและมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.2) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

- 1) โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความยาวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน และปริมาณสายโซ่กิ่งก้าน โดยมีผู้วิจัยหลายคนพบว่าสตาร์ชที่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูง และมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ต่ำ จะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาตินในเซชันสูง (Asaoka et al., 1985 ; Jane et al., 1992)
- 2) องค์ประกอบของสตาร์ช ได้แก่ อัตราส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน โดย Sasaki และ Matsuki (1998) พบว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาตินในเซชันได้ยากกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ และในงานวิจัยของ Jane และคณะ (1999) ได้กล่าวว่าโครงสร้างของแอมิโลสที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมันนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเกลียวม้วน ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้โครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายได้ยากกว่า และ
- 3) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช (อัตราส่วนของโครงสร้างส่วนผลึกต่ออสัณฐาน) (Gunaratne and Hoover, 2002) โดย Tester

และคณะ (2001) กล่าวว่า สตาร์ชที่มีส่วนโครงสร้างผลึกมากจะทำให้ส่วนอสัณฐานดูน้ำได้ยากขึ้น เป็นผลให้เมล็ดสตาร์ชพองตัวได้ช้า ซึ่งจะส่งผลให้สตาร์ชเกิดเจลลาคติในเซชันได้ยาก

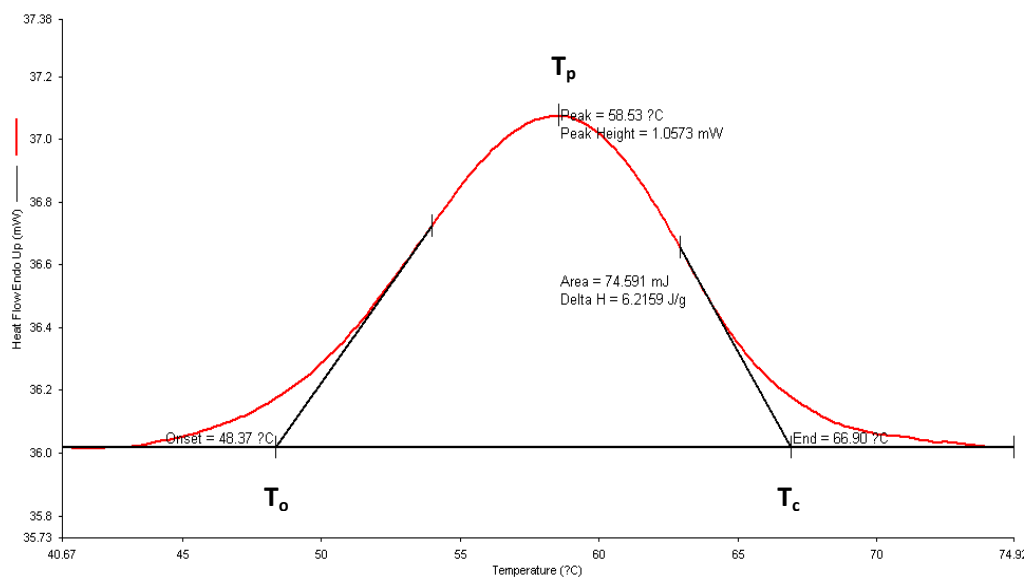
ตารางที่ 2.2 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ

แหล่งของสตาร์ช	ช่วงอุณหภูมิ (°C)
ข้าวโพด	70-89
มันฝรั่ง	57-87
ข้าวสาลี	50-86
มันสำปะหลัง	68-92
ข้าวโพดเหนียว	68-90

ที่มา: Swinkels (1985)

การเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์ชนั้น จะส่งผลให้เมล็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และความสามารถในการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ นอกจากนี้ยังส่งผลให้สารละลายสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปีระจอมขวัญ, 2550) ดังนั้นจึงสามารถใช้สิ่งเหล่านี้ในการติดตาม หรือตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์ช ซึ่งสามารถตรวจสอบได้หลายวิธีดังนี้ คือ ตรวจสอบจากการเปลี่ยนแปลงการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีฐานให้ความร้อน (Kofler hot stage microscope) (Maaruf et al., 2001) ตรวจสอบรูปร่างของเมล็ดสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องภายใต้แสงปกติหรือใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) หรืออาจตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ในการติดตามความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อน และนอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการเกิดเจลลาคติในเซชัน โดยจะวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของวัตถุในรูปของฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยหลักการทำงานของ DSC คือ วัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้กับตัวอย่าง และตัวอย่างอ้างอิง (reference)

ซึ่งตัวอย่างอ้างอิงจะเป็นภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง (pan) เปล่า เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างต้องดูดหรือคายพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งเครื่องจะวัดพลังงานที่ ตัวอย่างดูดหรือคายออกมา (enthalpy; ΔH) ในรูปของเทอร์โมแกรม (thermogram) ซึ่งลักษณะ เทอร์โมแกรมนั้นสามารถใช้บ่งบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาดูด (endothermic) หรือคายความร้อน (exothermic) (Karim, Norziah and Seow, 2000) ตัวอย่าง เทอร์โมแกรมที่ได้จากการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชด้วย DSC แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยค่าที่ได้ จากเทอร์โมแกรมมีดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (onset temperature; T_o) อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลาติไนเซชันมากที่สุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิ สุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน (conclusion temperature; T_c) และพลังงานที่ใช้ในการเกิด เจลาติไนเซชัน (enthalpy; ΔH) โดย ΔH (ส่วนของพื้นที่ใต้กราฟ) จะบ่งบอกถึงปริมาณหรือ คุณภาพของผลึก (Ward et al., 1994) ปริมาณเกลียวคู่ของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน จำนวนพันธะ ไฮโดรเจน (Sasaki and Matsuki, 1998) นอกจากนี้ยังใช้บอกการสูญเสียความเป็นผลึกของเม็ด สตาร์ช และพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจนและอาจมีแรงแวนเดอร์วาลส์ร่วมด้วย เล็กน้อย (Singh et al., 2003) ส่วนค่า T_o และ T_p บ่งบอกถึงความเสถียร ความสมบูรณ์ และขนาด ของโครงร่างผลึก (Shi and Seib, 1992)



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเส้นกราฟความร้อน (thermogram) ที่ได้จากการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชด้วย DSC

ที่มา : เส้นกราฟความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์

2.3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อสตาร์ชเกิดเจลลาคีโนเซชันอย่างสมบูรณ์แล้ว โมเลกุลสตาร์ชจะแขวนลอยอยู่กันอย่างอิสระในสารละลายสตาร์ช และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลของสตาร์ชเหล่านี้จะพยายามจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Sasaki et al., 2000) เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ ทำให้สารละลายสตาร์ชมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นลักษณะเจลเหนียว เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) (Smith, 1979) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก หรือเก็บเจลสตาร์ชไว้ในระยะเวลาที่นานขึ้น การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างจะถูกบีบออกมา ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis

โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสตาร์ชทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินสามารถทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Putaux et al., 2000) แต่จะมีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ต่างกัน โดยแอมิโลสสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็ว และมักจะเกิดในระยะแรกของการเก็บรักษา เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรง โมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้

อย่างรวดเร็ว (Miles et al., 1985) ส่วนแอมิโลเพกทินมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะยาว (Lii et al., 2004) โดยอาจใช้เวลาหลายวันหรือเป็นสัปดาห์ (Alonso and Escriing, 1990) เนื่องจากโครงสร้างของแอมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นกึ่งก้านจึงทำให้เกิดการรวมตัวได้ง่ายกว่า

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เป็นต้น (ปาริตา ขุนแอม, 2550) ดังที่ได้กล่าวมานั้นจะเห็นว่าชนิดของสตาร์ชเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน เนื่องจากสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีปริมาณและโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน โดย Shi และ Seib (1992) พบว่าสายโซ่กึ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 และ A มีอิทธิพลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน โดยสตาร์ชที่มีสัดส่วนของสายโซ่กึ่งก้านชนิด B1 สูง แต่มีสัดส่วนของสายโซ่กึ่งก้านชนิด A ต่ำ จะส่งผลให้โมเลกุลแอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกรเดชันได้สูง และจากผลการวิจัยของ Chung และคณะ (2011) ที่ได้พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวซึ่งเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่น้อยมาก จะมีค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดอาจพิจารณาได้จากค่าการคืนตัว (setback) ของสตาร์ช ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชยังสามารถวัดได้โดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่จากขบวนการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (ΔH_{regel}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยถ้าสตาร์ชสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก ค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกจะมีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งพีคของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชด้วย DSC นั้นจะมีลักษณะกว้างกว่า และเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าพีคของการหลอมละลายผลึกเริ่มต้นระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องมาจากผลึกที่เกิดขึ้นใหม่มีขนาดและความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างผลึกที่เคยมีอยู่ในเม็ดสตาร์ช (López and Pérez, 1994)

2.3.5 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

2.3.5.1 กำลังการพองตัว (swelling power) และความสามารถในการละลาย (Solubility)

กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายเป็นสมบัติเฉพาะตัวอย่างหนึ่งของสตาร์ช โดยปกติแล้วโมเลกุลของสตาร์ชนั้นจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชสามารถยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง จึงทำให้สตาร์ชไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น แต่สามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach et al., 1959) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชยังประกอบด้วยชั้นของออสติฐานซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชที่มีน้ำล้อมรอบจนถึงอุณหภูมิเจลาตีไนเซชัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชจะถูกทำลาย ส่งผลให้สายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชคลายตัวออกจากกัน จึงทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้น และส่งผลให้แอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (กล้าณรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โดยกำลังการพองตัว และความสามารถในการละลายของสตาร์ชนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชจะถูกทำลายมากขึ้น น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปได้มากขึ้น ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวและมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น (Hoover, 2001)

กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ช ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ แหล่งของสตาร์ช ปริมาณและโครงสร้างของแอมิโลสและแอมิเพกทินของสตาร์ช ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช และสิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัส เป็นต้น (Leach, McCowen and Schoch, 1959) จากที่ได้กล่าวมานั้นจะเห็นว่าแหล่งของสตาร์ชเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีปริมาณและโครงสร้างของ แอมิโลสและแอมิเพกทินที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังอาจจะมีสิ่งเจือปน

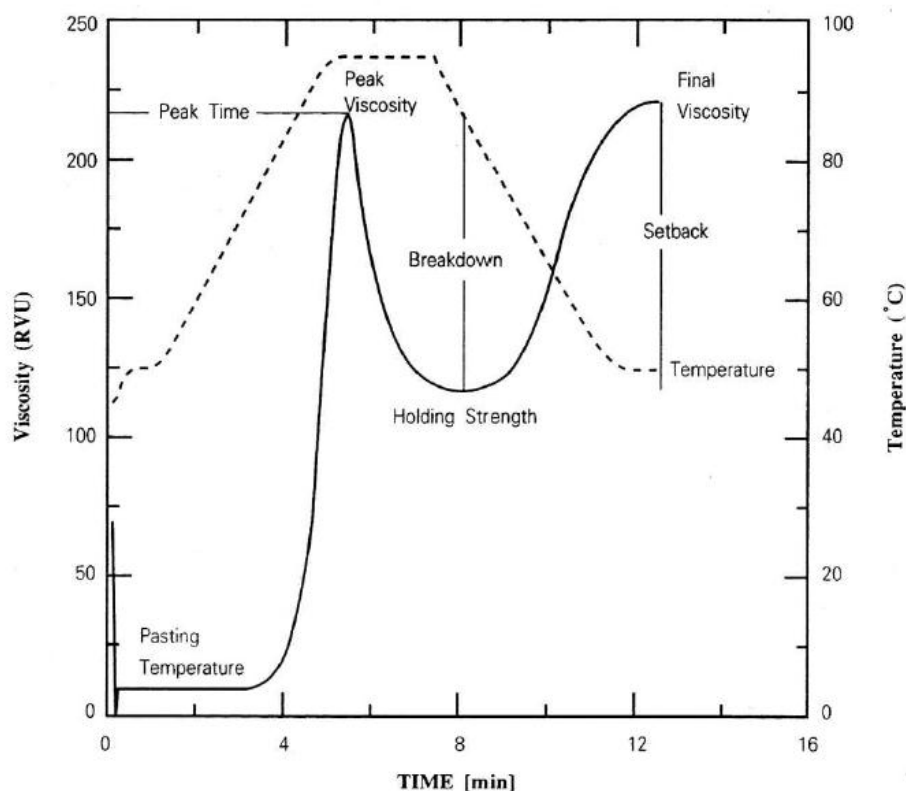
ภายในเมล็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยมีงานวิจัยพบว่ากำลังการพองตัวที่ 95 °C ของสตาร์ชมันฝรั่ง (สตาร์ชจากส่วนหัวของพืช) มีค่ามากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ซึ่งรองลงมาคือ สตาร์ชมันสำปะหลัง (สตาร์ชจากส่วนรากของพืช) และสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวต่ำที่สุด คือสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวเจ้า และสตาร์ชข้าวสาลี (สตาร์ชจากธัญพืช) (Biliaderis, 2009) การที่สตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีกำลังการพองตัวและการละลายแตกต่างกันนั้นอาจเป็นผลมาจากสตาร์ชต่างชนิดกันมีปริมาณแอมิโลสและปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันที่ต่างกัน โดยมีงานวิจัยพบว่าแอมิโลสและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันนั้นจะสามารถยับยั้งการพองตัวของสตาร์ชได้ (Singh et al., 2003) หรืออาจเนื่องจากสตาร์ชจากแต่มีมีความแข็งแรงของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงนั้นจะมีผลในการยับยั้งกำลังการพองตัวของสตาร์ช (Chung et al., 2001)

2.3.5.2 สมบัติทางความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช โดยสมบัตินี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับองค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียงโครงสร้างภายในของเมล็ดสตาร์ช ซึ่งความหนืดของสตาร์ชนั้นเกิดจากการที่น้ำแป้งได้รับความร้อน เม็ดสตาร์ชจึงสามารถดูดน้ำและพองตัวมากขึ้น ส่งผลให้น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ชมีปริมาณน้อยลง เม็ดสตาร์ชจึงเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงทำให้สารละลายสตาร์ชเกิดความหนืดขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชระหว่างให้ความร้อนสามารถติดตามได้ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งจะทำโดยการให้ความร้อนกับน้ำแป้งพร้อมกับใช้ใบพัดกวนเพื่อเพิ่มแรงเฉือน โดยเครื่องจะเริ่มให้ความร้อนกับน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วจะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 95 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงเป็น 50 °C (Newport scientific, 2007) ซึ่งการติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA นั้นจะแสดงผลออกมาในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting curve) แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยระยะแรกของการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมิ 50 °C เม็ดสตาร์ชจะพองตัวได้เพียงเล็กน้อย จึงยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดขึ้น แต่เมื่อ

เพิ่มขึ้นอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชัน ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเรียกอุณหภูมิที่น้ำแป้งเริ่มเกิดความหนืดว่า Pasting



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

ที่มา : Newport scientific (2007)

temperature (PT) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนถึงอุณหภูมิที่สตาร์ชสามารถเกิดความหนืดได้สูงสุด (Peak temperature) ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้สตาร์ชจะมีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity; PV) ค่า PV นั้นสามารถบอกถึงความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตกออก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) และเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งต่อไปอีกจะทำให้เม็ดสตาร์ชแตก โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกทินจะแขวนลอยอย่างอิสระในน้ำซึ่งเรียกของผสมนี้ว่าสารละลายสตาร์ช ระหว่างที่สารละลายสตาร์ชถูกใบพัดกวน

อย่างต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิคงที่ที่ 95 °C ความหนืดของสารละลายจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่มีความหนืดต่ำสุด (Trough) ซึ่งการลดลงของความหนืดเกิดขึ้นจากแรงเฉือน (shear thinning) และเมื่อค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น สารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity; FV) ซึ่งการที่สารละลายสตาร์ชสามารถกลับมาที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้งได้นั้น เนื่องจากโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายสตาร์ชสามารถกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) นอกจากนี้ยังมีค่าที่สามารถพิจารณาได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืด คือ ค่าความหนืดลดลง (Breakdown; BD) และค่าการคืนตัว (Setback from trough; SB) โดยค่า BD เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความทนต่อแรงเฉือน และความร้อนของเม็ดสตาร์ช (Dengate, 1984) ส่วนค่า SB เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกสตาร์ชให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสตาร์ช สมบัติเคมีและกายภาพของเม็ดสตาร์ช เช่น ขนาดเม็ดสตาร์ช การกระจายตัวตามขนาดของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Singh et al., 2003) อันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช (Chung, Jeong and Lim, 2003) ขนาดแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดสตาร์ช เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) สมบัติทางเคมีและกายภาพของเม็ดสตาร์ชนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งของสตาร์ช ดังนั้นจึงทำให้สตาร์ชแต่ละแหล่งมีสมบัติทางความหนืดที่ต่างกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Chung และคณะ (2011) พบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลงที่ต่ำ งานวิจัยของ Srichuwong และ Jane (2007) พบว่าสตาร์ชที่มีสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด A สูง จะมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำ และมีค่าความหนืดลดลงสูง Jane และคณะ (1999) ได้กล่าวว่า ปริมาณแอมิโลส ปริมาณไขมัน และการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินนั้นมีผลต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช

2.3.5.3 สมบัติการเกิดเจล

การเกิดเจลของสตาร์ชนั้นเป็นสมบัติเฉพาะตัวอย่างหนึ่งของสตาร์ช โดยเมื่อสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันจะเป็นผลให้สตาร์ชมีความหนืดมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว (Smith, 1979) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ชจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมา ซึ่งเรียกว่า syneresis

โดยปกติแล้วเมื่อเก็บโมเลกุลแอมิโลสที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายไว้ที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้อง จะทำให้สารละลายสตาร์ชเกิดความข้นและในที่สุดอาจจะตกตะกอนหรือเกิดเป็นเจล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและขนาดโมเลกุลของสตาร์ช Gidley และ Bulpin (1989) ได้ศึกษาพฤติกรรมมารวมตัวกันของโมเลกุลแอมิโลสในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.2 - 5.0% ซึ่งศึกษาโดยใช้โมเลกุลแอมิโลสที่มี degree of polymerization (DP) แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า แอมิโลสที่มีสายโซ่สั้น ($DP < 100$) จะตกตะกอนในสารละลายทุกความเข้มข้น และพบว่าแอมิโลสที่มีสายโซ่ $> 1,100$ DP จะสามารถเกิดเจลได้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1% นอกจากนี้ยังพบว่าแอมิโลสที่มีสายโซ่ยาวมากกว่า 250 DP แต่น้อยกว่า 660 DP จะเกิดการตกตะกอนหรือเกิดเป็นเจลนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและอัตราในการลดอุณหภูมิ โดยนอกจากแอมิโลสแล้ว แอมิโลเพกทินก็สามารถเกิดเจลได้แต่จะมีอัตราเร็วในการเกิดเจลได้ช้ากว่า เนื่องจากแอมิโลเพกทินเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่กึ่งก้านจำนวนมาก

การเกิดเจลของสตาร์ชมีความสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยสตาร์ชจากแต่แหล่งจะมีลักษณะของเจลที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะนำไปใช้พิจารณาเพื่อเลือกแหล่งของสตาร์ชให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่จะไปประยุกต์ใช้ ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ในการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชคือ Texture Analyzer ซึ่งค่าที่ได้จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชโดยใช้หัวเจาะ คือ ค่าความแข็ง (Hardness) โดยค่าความแข็งของเจลสตาร์ชเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้จนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเจลสตาร์ชขณะที่มีการกดลงบนเจลในครั้งแรก ซึ่งจะบอกถึงความแข็งแรงของเจลที่ทำการวัด ซึ่งความแข็งแรงของเจลที่แตกต่างกันมักเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่างแต่ละชนิด (Sandhu and Singh, 2007) โดย Mue และ Jackson (1997) กล่าวว่าสตาร์ชที่มีเจลที่แข็งแรงนั้น มักจะมีปริมาณแอมิโลสสูง

นอกจากนี้ความสามารถในการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ก็มีผลต่อค่าความแข็งของสตาร์ช โดยสตาร์ชที่เกิด syneresis สูง จะส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงของเจลสูงด้วย (Tziotis et al., 2004)

2.4 การประยุกต์ใช้สตาร์ชในโรงงานอุตสาหกรรม

สตาร์ชนอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญทางด้านโภชนาการของมนุษย์แล้ว สตาร์ชยังมีสมบัติเฉพาะตัวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ ซึ่งการใช้สตาร์ชในอุตสาหกรรมอาหารนั้นมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยทั่วไปสตาร์ชที่เติมลงในอาหารอาจจะทำหน้าที่ต่างๆ ดังนี้ เพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ (thickening agent) เพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ (colloid stabilizer) รักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture retention) สร้างโครงสร้างเจล (gel-forming agent) เชื่อมส่วนผสมต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ (binder) และเป็นสารเคลือบและให้ความเป็นมันเงา (coat และ glazing agent) (Mason, 2009) และนอกจากอุตสาหกรรมอาหารแล้ว สตาร์ชยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเส้นใยผ้า เป็นสารจับฝุ่น ละอองในการผลิตถ่านหิน เซรามิก และโลหะต่างๆ ใช้เป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์สารโพลีเมอร์เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก ใช้เป็นกาวในอุตสาหกรรมทอพิมพ์ ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้ในอุตสาหกรรมยา เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปการจะนำไปสตาร์ชไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะทางเคมีกายภาพของสตาร์ช เนื่องจากสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันนั้นจะมีลักษณะทางเคมีกายภาพที่ต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้สตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกสตาร์ชให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง

สตาร์ชมันสำปะหลังจัดเป็นสตาร์ชที่ได้จากส่วนรากและหัวของพืช เป็นสตาร์ชที่มีความหนืดสูง และมีความหนืดลดลงสูงเมื่อผ่านการปรุงอาหาร สตาร์ชจากมันสำปะหลังเมื่อให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงจะค่อนข้างหนืดและใส ทั้งๆที่เป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชจากมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสที่ใหญ่กว่าสตาร์ชข้าวโพดรวมทั้งอาจจะมีสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินที่ยาวกว่า ซึ่งปัจจัยทั้งสองอย่างนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน และเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (Mason, 2009) โดยทั่วไปสตาร์ชมัน

ลำปะหลังมักถูกนำไปใช้เป็นสารให้ความหนืดกับผลิตภัณฑ์บางชนิด แต่เนื่องจากแป้งเปียกของสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นไม่ค่อยคงตัวมากนัก จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้งเพื่อเพิ่มความคงตัวให้กับแป้งเปียกก่อนที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ (Moore et al., 1984) นอกจากนี้สตาร์ชมันสำปะหลังอาจจะถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเด็กเนื่องจากมีรูปลักษณะที่บริสุทธิ์ (Mason, 2009)

สตาร์ชข้าวโพดเป็นสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช ซึ่งมีปริมาณมากและถูกนำมาใช้มากที่สุด สตาร์ชข้าวโพดเมื่อได้รับความร้อนจะเป็นแป้งเปียกที่มีลักษณะหนืดและข้น และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะได้เจลสตาร์ชที่มีลักษณะที่ใส มีความยืดหยุ่น และได้เจลที่มีลักษณะเป็น short gel สตาร์ชข้าวโพดนั้นสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในรูปแบบของแป้งดิบ (native starch) และสตาร์ชดัดแปร (modified starch) โดยสตาร์ชข้าวโพดมักถูกนำมาใช้ในแป้งฝุ่น ใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) หรืออาจใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารให้ความหวาน (corn syrup) (Mason, 2009) และนอกจากนี้ยังอาจนำไปใช้เพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ โดยใช้ในซอส ใ้พายหรือใ้พุดดิ้ง ที่มีอายุการเก็บสั้น (Moore et al., 1984)

สตาร์ชข้าวเจ้าเป็นสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งจะมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ เนื่องจากสตาร์ชข้าวเจ้าจากข้าวสายพันธุ์ที่ต่างกันนั้นจะมีปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำนั้น เมื่อเติมลงไปในผลิตภัณฑ์จะให้ความรู้สึกเนียน และให้ความรู้สึกคล้ายครีมเมื่อรับประทาน ซึ่งอาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม และเนื่องจากสตาร์ชข้าวเจ้าเป็นสตาร์ชที่มีขนาดแกรนูลที่เล็กจึงอาจนำไปใช้ในแป้งฝุ่นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอาจใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ หรือเป็นอาจใช้เป็นองค์ประกอบของลูกกวาด และสำหรับสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงนั้น นิยมใช้ประกอบอาหารประเภททอด เนื่องจากจะให้น้ำมันที่กรอบ หรือหากนำไปนึ่งเมื่อเย็นลงจะเกิดแผ่นฟิล์มเป็นมันดูสวยงาม (Mason, 2009) นอกจากนี้ฟลาวร์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักถูกนำไปเป็นผลิตภัณฑ์เป็นเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นขนมจีน เป็นต้น

สตาร์ชที่ได้กล่าวมานั้นเป็นสตาร์ชที่ใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรม โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นยังไม่ได้มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่เนื่องจากเป็นสตาร์ชที่ได้จากวัสดุ

เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีองค์ประกอบของสสารอยู่สูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งของสสารเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้แก้ว และไซคอนันต์ สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดทั้ง 3 สายพันธุ์ สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้าขี้เหล็ก

เมล็ดมะม่วงที่ใช้เป็นเมล็ดมะม่วงของมะม่วงสุกที่ผ่านการบ่ม 4 วัน โดยเมล็ดมะม่วงพันธุ์ไซคอนันต์ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทโดล ไทยแลนด์ จำกัด เมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว และน้ำดอกไม้ได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มสตรีแปรรูปผลไม้ จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบดังนี้ นำเมล็ดมะม่วง มาทำความสะอาด และทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Heraeus รุ่น ST 5042, Germany) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นปอกส่วนเปลือกแข็งที่หุ้มเมล็ดออกเพื่อนำส่วนของเนื้อในเมล็ดมะม่วงออกมา นำเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่ได้มาหั่นให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ต่อไป

สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงได้จากการนำเนื้อในเมล็ดมะม่วงมาแยกสตาร์ชตามวิธีที่ดัดแปลงจากมนทกานต์ เบญจพลากร (2549) โดยนำเมล็ดมะม่วงที่หั่นเป็นขนาดเล็กแล้วไปบดผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5% w/v ด้วยเครื่องบดผสม ในอัตราส่วนเนื้อในเมล็ดมะม่วง : สารละลาย เท่ากับ 1:1 (w/v) แล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงแยกสารละลายออกด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ (Hettich zentrifugen รุ่น Rotanta 460 R) ความเร็ว 5,400 x g เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ชูดชิ้นโปรตีนของส่วนตะกอนด้านล่างทิ้ง แล้วนำตะกอนไปล้างด้วยน้ำในอัตราส่วนเนื้อในเมล็ดมะม่วง : น้ำกลั่น เท่ากับ 1:1 (w/v) แล้วนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ ความเร็ว 5,400 x g เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง ชูดชิ้นโปรตีนของส่วนตะกอนด้านล่างทิ้ง แล้วนำตะกอนไปล้างด้วยน้ำในอัตราส่วนเนื้อในเมล็ดมะม่วง : น้ำกลั่น เท่ากับ 1:1 (w/v) วัดค่า pH ทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวจนกว่าจะวัดค่า pH ได้เป็น

กลาง จากนั้นนำไปเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็ว 5,400 x g เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง นำตะกอนสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40°C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยโกร่งบดแป้ง (mortar and pestle) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh แล้วเก็บสตาร์ชที่ได้ใส่ถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์มันสำปะหลัง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เฟิร์ส สตาร์ช อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ส่วนสตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุง ได้จากการนำข้าวพันธุ์หอมมะลิ และข้าวพันธุ์เหนียวพัทลุง มาแยกสตาร์ชโดยใช้วิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Wang and Wang (2001) โดยนำข้าวทั้ง 2 พันธุ์มาล้างทำความสะอาดเพื่อแยกสิ่งเจือปนออก แล้วแช่ข้าวในน้ำโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 นาน 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปโม่ให้ละเอียดด้วยเครื่องโม่หิน ลดขนาดก้อนแป้งให้เล็กลง นำไปใส่ถาดแล้วอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการอบแห้ง 50 กรัม มาเติมสารละลายไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1% นาน 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปเหวี่ยงแยกน้ำออกที่ความเร็วรอบ 3000 x g นาน 15 นาที เติมน้ำและปรับให้เป็นกลาง (pH 6.5) เหวี่ยงแยกน้ำออก ชูดมิด้านบนที่มีสีเหลืองหรือสีน้ำตาลออก จากนั้นล้างแป้งด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ โดยเติมน้ำกลั่น กวนให้เข้ากันแล้วเหวี่ยงแยกน้ำออก นำแป้งข้าวเจ้าที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 24 ชั่วโมง บดสตาร์ชให้ละเอียดด้วยโกร่งบดแป้ง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh แล้วเก็บสตาร์ชข้าวเจ้าที่ได้ใส่ถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง

นำเนื้อในเมล็ดมะม่วง มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังนี้

3.2.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.1.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.1.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.4 ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.1.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต คำนวณจากผลต่าง โดยนำองค์ประกอบอื่นๆ หักออกจาก 100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม (สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง)

3.2.2.1 ปริมาณผลผลิต (% yield)

จากการนำเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มาแยกสตาร์ชด้วยสารละลายต่างความเข้มข้น 0.5% w/v แล้วผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh สามารถนำมาคำนวณเป็นปริมาณผลผลิต (%) ในรูปของร้อยละโดยน้ำหนักแห้งจากสมการ (3.1)

$$\text{ปริมาณผลผลิต (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งแห้งที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักแห้งของเนื้อในเมล็ดมะม่วงเริ่มต้น}} \quad (3.1)$$

3.2.2.2 สมบัติทางเคมีของสตาร์ช

3.2.2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

3.2.2.2.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.2.2.1.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.2.2.1.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.2.2.1.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.2.2.1.5 ปริมาณแอมิโลส ตัดแปลงจากวิธี Julino (1981) และ Julino (1971) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

3.2.2.2.2 การกระจายตัวตามขนาดและขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินของสตาร์ช โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High performance size exclusion chromatography (HPSEC) (Waters Corporation, Milford, MA) ตัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8)

3.2.2.2.3 การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่กิ่งก้าน แอมิโลเพกทิน โดยแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช โดยวิธีที่ตัดแปลงจาก Takeda และ คณะ (1968) จากนั้นนำมาย่อยตัดขั้วกิ่งด้วยเอนไซม์ isoamylase แล้ววิเคราะห์ขนาดของสายโซ่ โดยใช้เทคนิค Ion exchange chromatography ด้วยเครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD, Dionex, BioLC, USA) ตัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

3.2.2.3 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

3.2.2.3.1 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ด มะม่วง โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) (JEOL รุ่น JSM S410LV, Japan) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

3.2.2.3.2 ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น CH30RF200, Japan) และแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์บิตระนาบแสง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

3.2.2.3.3 ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ช ด้วยเครื่อง Laser particle analyzer (Mastersizer S long bed Ver. 2.11) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12)

3.2.2.3.4 รูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany) ดัดแปลงจากวิธีของ Zobel (1964a) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13)

3.2.2.4 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

3.2.2.4.1 สมบัติทางความร้อนระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin-Elmer, USA) ตามวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.14)

3.2.2.4.2 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่เกิดรีโทเกรเดชันแล้ว ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin-Elmer, USA) โดยนำตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชันมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 14 วัน มาใช้ในการวิเคราะห์ ตามวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.15)

3.2.2.4.3 กำลังการพองตัว และการละลายน้ำของสตาร์ช ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch (1964) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.16)

3.2.2.4.4 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (New Scientific รุ่น 4D, Australia) โดยวิเคราะห์ตามวิธี AACC method 76-71 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.17)

3.2.2.4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA-XT. Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK) โดยจะนำเจลสตาร์ชที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วย RVA ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาใช้ในการวิเคราะห์ ศึกษาโดยดัดแปลงวิธีจาก Sandhu และ Singh (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.18)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ยกเว้นการศึกษารูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ช (ทำการทดลอง 1 ซ้ำ) การศึกษาการกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน (ทำการทดลอง 2 ซ้ำ) และการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช (ทำการทดลอง 6 ซ้ำ) สำหรับการทดลองที่ทำ 2 3 และ 6 ซ้ำ จะวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (license software version 16)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง

จากการศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ (ตารางที่ 4.1) พบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ แก้ว และโชคอนันต์มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 85.21 82.20 และ 82.92 ตามลำดับ โดยเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่า เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว และพันธุ์โชคอนันต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลองที่ได้นั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zein, El-Bagoury และ Kassab (2005) ที่พบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีคาร์โบไฮเดรตมากถึงร้อยละ 77 ดังนั้นเนื้อในเมล็ดมะม่วงจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งของสตาร์ช

เนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์นั้นมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีปริมาณความชื้น ไขมัน และเส้นใยหยาบมากที่สุด คือ ร้อยละ 61.36 5.30 และ 2.62 ตามลำดับ ส่วนปริมาณโปรตีน และเถ้า นั้นพบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีมากที่สุด คือ ร้อยละ 8.14 และ 3.37 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้มีปริมาณความชื้น โปรตีน และเถ้า น้อยที่สุด คือร้อยละ 50.33 5.97 และ 2.36 ตามลำดับ และพบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีปริมาณไขมัน และเส้นใยหยาบน้อยที่สุด คือ 3.78 และ 1.80 ตามลำดับ โดยปริมาณเส้นใยหยาบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของเนื้อในเมล็ดมะม่วง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zein, El-Bagoury และ Kassab (2005) ที่พบว่าเนื้อในเมล็ดมะม่วงจากมะม่วงต่างสายพันธุ์กันจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง*

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เนื้อในเมล็ดมะม่วง		
	น้ำดอกไม้	แก้ว	ไซคอนันต์
ความชื้น (%wb)	50.33a ± 0.11**	61.36c ± 0.16	58.66b ± 0.17
โปรตีน (%db)	5.97a ± 0.27	6.68b ± 0.01	8.14c ± 0.11
ไขมัน (%db)	4.61b ± 0.29	5.30c ± 0.34	3.78a ± 0.17
เถ้า (%db)	2.36a ± 0.15	3.20b ± 0.08	3.37c ± 0.12
เส้นใยหยาบ (%db)	1.85a ± 0.08	2.62b ± 0.60	1.80a ± 0.17
คาร์โบไฮเดรต (%db)	85.21b ± 0.39	82.20a ± 0.73	82.92a ± 0.30

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ใช้ในอุตสาหกรรม (สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจียฟัทลุง)

4.2.1 ปริมาณผลผลิตของเนื้อในเมล็ดมะม่วง

จากการนำเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มาแยกสตาร์ชด้วยสารละลายต่าง แล้วมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh พบว่าปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.2) ซึ่งเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วให้ปริมาณผลผลิตมากที่สุด ส่วนพันธุ์ไซคอนันต์ และพันธุ์น้ำดอกไม้ จะให้ปริมาณผลผลิตของสตาร์ชใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าค่อนข้างต่ำ ในขณะที่เนื้อในเมล็ดมะม่วงมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้อาจเนื่องจาก

มีสตาร์ชที่สูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนการแยกสตาร์ช โดยอาจสูญเสียไปขณะที่ชุดชั้นโปรตีนออก ซึ่งการชุดชั้นโปรตีนนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญ จำเป็นต้องชุดชั้นโปรตีนออกให้ได้มากที่สุด เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ได้สตาร์ชที่บริสุทธิ์ โดยในระหว่างที่ชุดชั้นโปรตีนออกนั้นอาจจะชุดส่วนของสตาร์ชออกไปด้วย เนื่องจากชั้นของโปรตีนและชั้นของสตาร์ชแยกกัน得不ชัดเจน ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้มีค่าค่อนข้างน้อย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง*

แหล่งสตาร์ช	ปริมาณผลผลิต (%db)
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้	23.53a ± 0.80 **
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว	37.31c ± 0.46
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์	27.31b ± 0.02

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 สมบัติทางเคมีของสตาร์ช

4.2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง) (ตารางที่ 4.3) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีความชื้นหลังอบแห้งด้วย tray dry ไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากแหล่งอื่นพบว่าสตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุงมีค่าปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกับสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ส่วนสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังพบว่าปริมาณความชื้นสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุง ผ่านการอบแห้งที่สภาวะเดียวกัน (อบแห้งด้วย tray dry ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ส่วนสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังเป็น สตาร์ชที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากทางโรงงานซึ่งอาจใช้สภาวะในการอบแห้งสตาร์ชที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีปริมาณไขมัน และปริมาณ แอมิโลสค่อนข้างสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น โดยเมื่อพิจารณาถึงปริมาณไขมันพบว่าสตาร์ชจาก เนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณไขมันมากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชข้าวโพดซึ่งเป็น สตาร์ชที่มีปริมาณไขมันสูงสุด และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณแอมิโลสพบว่าสตาร์ชจากเนื้อใน เมล็ดมะม่วงมีปริมาณแอมิโลสมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวหอมมะลิ แต่มีปริมาณใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุง ซึ่งข้าวเจ้าเชิงพัทลุงนั้นเป็นข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณ แอมิโลสสูง (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546) นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อใน เมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ มีปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน โดยพบว่าสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วง พันธุ์น้ำดอกไม้ มีปริมาณแอมิโลส มากกว่าพันธุ์โชคอนันต์ และพันธุ์แก้ว อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) และงานวิจัยของ Kaur และคณะ (2004) ซึ่งนักวิจัยเหล่านี้พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงต่างสายพันธุ์กันจะมี ปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	องค์ประกอบทางเคมี / ปริมาณ				
	ความชื้น (%wb)	โปรตีน (%db)	ไขมัน (%db)	เถ้า (%db)	แอมิโลส (%db)
น้ำดอกไม้***	7.06a±0.23**	0.21a±0.02	0.55b±0.17	0.23b±0.02	33.12d±2.03
แก้ว***	7.08a±0.07	0.26b±0.01	0.55b±0.12	0.29c±0.01	31.63bc±1.89
ไซคอนันต์***	7.07a±0.04	0.31c±0.03	0.53b±0.03	0.32d±0.01	31.50bc±2.33
ข้าวโพด	10.28b±0.60	0.41d±0.02	0.81c±0.14	0.18a±0.01	29.99c±2.82
มันสำปะหลัง	10.47b±0.29	0.27b±0.02	0.26a±0.06	0.20a±0.1	23.02b±1.98
ข้าวหอมมะลิ	7.12a±0.27	0.84e±0.03	0.13a±0.01	0.37e±0.02	16.45a±1.14
ข้าวเจียงพัทลุง	7.03a±0.28	0.83e±0.03	0.12a±0.01	0.37e±0.03	33.09d±0.79

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

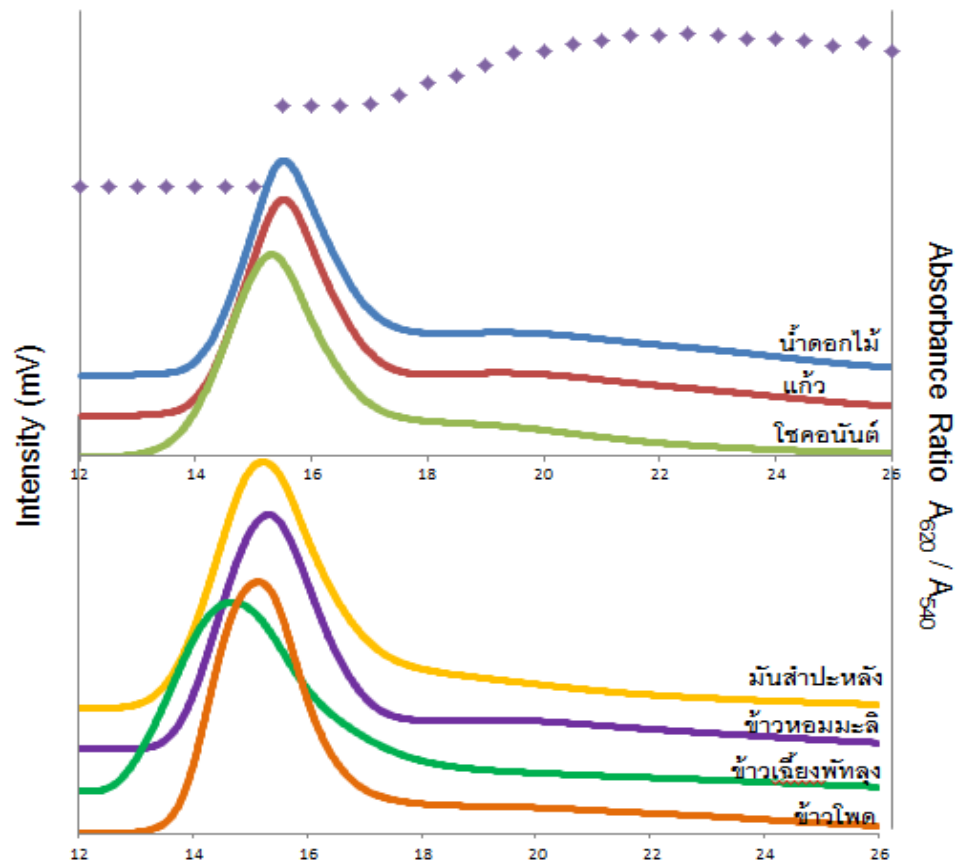
*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

4.2.2.2 การกระจายตัวตามขนาดและขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช

โครมาโตกราฟีแบบ size exclusion chromatography (SEC) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการการแยกสารตามขนาดโมเลกุล โดยเมื่อให้สารผ่านไปในคอลัมน์ที่บรรจุด้วยของแข็งที่มีรูพรุน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถที่จะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุน และถูกกักไว้ ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้า ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมาจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ ดังนั้นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกชะออกมาจากคอลัมน์ด้วยเวลา (retention time) ที่เร็วกว่าโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่า จากหลักการนี้จึงทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่มีขนาดต่างกันออกจากกันได้ และสามารถหาขนาดเฉลี่ยของโมเลกุลโดยเทียบ retention time ของโมเลกุลสตาร์ชกับ

retention time ของโมเลกุลมาตรฐานที่ทราบขนาดด้วยการสร้างกราฟมาตรฐานมาคำนวณ (Hanai, 1999)

เมื่อฉีดสารละลายสตาร์ชเข้าสู่ SEC คอลัมน์ จะพบการกระจายตัวตามขนาดโมเลกุลเป็นลักษณะ 2 พีค (รูปที่ 4.1) ซึ่งแสดงว่าสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุล 2 กลุ่มที่มีขนาดต่างกัน โดยพีคแรกน่าจะเป็นพีคของแอมิโลเพกทิน เนื่องจากแอมิโลเพกทินมีขนาดใหญ่กว่า จึงหลุดออกมาจากคอลัมน์ก่อน ส่วนพีคที่สองคือแอมิโลส ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า จึงหลุดออกจากคอลัมน์ช้ากว่า เพื่อเป็นการยืนยันตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานเอาไว้จึงทดลองนำตัวอย่างสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วที่หลุดออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ ไปทดสอบด้วยการหยดไอโอดีน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 nm และ 540 nm พบว่าพีคหลังมีสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 nm ต่อ 540 nm มากกว่าพีคแรก ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าพีคหลังเป็นแอมิโลส ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไอโอดีนจะมีสีน้ำเงิน และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 620 nm ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลเพกทินกับไอโอดีนจะมีสีม่วงแดง ซึ่งมีค่าการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 nm (Shannon, Garwood and Boyer, 2009) อย่างไรก็ตามโครมาโตแกรมของสตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุงนั้นไม่มีพีคที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ชจากข้าวเหนียวพัทลุงมีแอมิโลสที่มีขนาดใหญ่มาก จึงไม่สามารถแยกออกจากแอมิโลเพกทินได้สมบูรณ์



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวตามขนาดของโมเลกุลของสสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและสสารจากแหล่งอื่นๆ (เส้นทึบ) และกราฟแสดงสัดส่วนค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างสสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วที่ความยาวคลื่น 620 nm. ต่อ 540 nm. ณ เวลาต่างๆ (เส้นจุด)

จากการเปรียบเทียบโครมาโตแกรมของสสารจากแหล่งต่างๆ พบว่า แอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสสารจากแต่ละแหล่งนั้นมี retention time ที่ไม่เท่ากัน แสดงว่าสสารจากแต่ละแหล่งนั้นมีแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่มีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) แตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.4 โดยพบว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมี \bar{M}_w เล็กกว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสสารจากแหล่งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ที่ศึกษาขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของโมเลกุลสสารเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ Chausa และ Kuppi ซึ่งเป็นมะม่วงสายพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย เปรียบเทียบกับขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของ

สตาร์ชข้าวโพด พบว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวโพดมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักใหญ่กว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์พบว่า สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้วัดจะมีแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่ใหญ่กว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วและไซคอนันต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้จะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.4 ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งของสตาร์ช	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก		ความยาวสายไซ
	$(M_w \times 10^5)$		$(DP \times 10^3)$
	แอมิโลส	แอมิโลเพกทิน	แอมิโลส
น้ำดอกไม้วัด***	3.79b \pm 0.11**	12.46ab \pm 0.19	2.34b \pm 0.65
แก้ว***	2.79a \pm 0.08	11.44a \pm 0.51	17.22a \pm 0.48
ไซคอนันต์***	2.89a \pm 0.04	11.83a \pm 0.33	17.85a \pm 0.25
ข้าวโพด	4.08c \pm 0.08	13.50b \pm 0.24	25.19c \pm 0.47
มันสำปะหลัง	4.97d \pm 0.05	14.08cd \pm 0.12	30.66d \pm 0.28
ข้าวหอมมะลิ	4.89d \pm 0.06	14.63cd \pm 0.10	30.21d \pm 35.40
ข้าวเจียงพัทลุง	7.24e \pm 0.00	14.92d \pm 0.53	44.69e \pm 0.00

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

4.2.2.3 การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโล-เพกทินของสตาร์ช

สายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มตามความยาว คือ สายโซ่กิ่งก้านชนิด A B1 B2 และ B3+ โดยสายโซ่กิ่งก้านแต่ละกลุ่มมีความยาวสายโซ่ (degree of polymerization; DP) เท่ากับ 6 - 12 13 - 24 25 - 36 และ ≥ 37 ตามลำดับ (Hanashiro, Abe and Hizukuri, 1996) จากการพิจารณาค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (ตารางที่ 4.5 และ รูปที่ ข.7 - ข.13) โดยเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 ซึ่งเป็นสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบหลักของชั้นผลึก (crystalline lamellae) (Hizukuri, 1986) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว และไซคอนันต์มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A น้อยกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชข้าวหอมมะลิมีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A มากที่สุด ในทางตรงกันข้ามสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชข้าวหอมมะลิมีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 และ B3+ ซึ่งเป็นสายโซ่กิ่งก้านที่อยู่ภายในชั้นอสัณฐาน (amorphous lamellae) (Hizukuri, 1986 ; Bertoft , 2004) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วและไซคอนันต์มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 ใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลัง แต่จะมีค่ามากกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง และสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วและไซคอนันต์มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B3+ ใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง ในขณะที่สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ และสตาร์ชข้าวหอมมะลิมีค่าน้อยที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ มีลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิดต่างๆ แตกต่างจากแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากแหล่งอื่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลเพกทินจากสตาร์ชข้าวหอมมะลิ โดยแอมิโลเพกทินจากสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูง

ซึ่งความแตกต่างนี้จะส่งผลให้สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณและความแข็งแรงของผลึกแตกต่างจากสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ อีกด้วย และสามารถส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชได้ (Stevenson, Domoto and Jane, 2006)

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	ความยาวเฉลี่ย ของสายโซ่กิ่ง ก้าน (DP)	% ร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิดต่างๆ (Molar base)			
		A	B1	B2	B3+
		(DP 6-12)	(DP 13-24)	(DP 25-36)	(DP ≥ 37)
น้ำตาลอ้อย***	15.60b±0.05**	39.19b±0.98	50.09c±0.28	8.36b±0.92	2.35a±0.20
แก้ว***	17.86e±0.10	28.48a±0.44	53.24d±0.11	13.74d±0.34	4.54b±0.58
ไซคอนันต์***	18.12e±0.37	29.69a±1.78	51.21cd±0.90	13.19d±0.01	5.88c±0.86
ข้าวโพด	17.20d±0.38	37.76b±2.19	44.17b±1.53	13.04d±0.67	5.01bc±0.02
มันสำปะหลัง	17.21d±0.13	37.01b±1.19	45.54b±1.22	12.49d±0.38	4.97bc±0.35
ข้าวหอมมะลิ	14.01a±0.16	52.02c±1.09	40.46a±0.86	5.96a±0.03	1.56a±0.21
ข้าวเจียฟัทลุง	16.45c±0.05	40.00b±1.25	44.99b±1.44	10.34c±0.47	4.65b±0.30

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

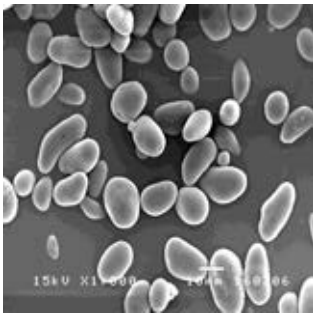
** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

4.2.3 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

4.2.3.1 รูปร่าง ขนาด และลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช

จากการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 2,000 เท่า (รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4) พบว่าขนาดเกรนูลของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 พันธุ์มีหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ และพบว่าเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 พันธุ์ มีรูปร่างที่คล้ายคลึงกัน โดยจะมีรูปร่างเป็นวงรีรูปไข่ สภาพพื้นผิวส่วนใหญ่เรียบ ไม่มีรอยแตก ร้าว แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้มีความสมบูรณ์ และไม่ถูกทำลายในระหว่างขั้นตอนการสกัดหรือการบดร่อน ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaur และคณะ (2004) ที่พบว่าเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย 5 สายพันธุ์มีรูปร่างเป็นวงรีรูปไข่ และมีพื้นผิวเรียบเช่นกัน



กำลังขยาย 1000x



กำลังขยาย 2000x

รูปที่ 4.2 เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพินธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า

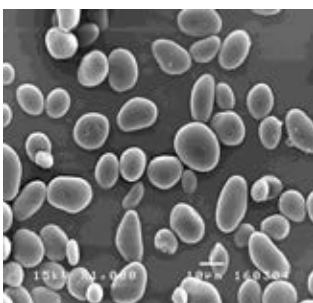


กำลังขยาย 1000x



กำลังขยาย 2000x

รูปที่ 4.3 เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพินธุ์แก้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า



กำลังขยาย 1000x



กำลังขยาย 2000x

รูปที่ 4.4 เม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพินธุ์ไซคอนันต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า

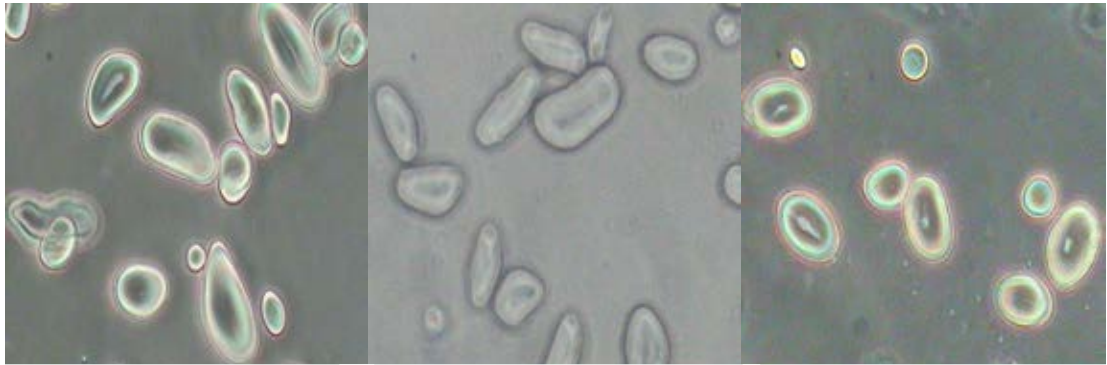
4.2.3.2 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช

จากการศึกษารูปร่างเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า (รูปที่ 4.5) พบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของเม็ดสตาร์ชนั้นๆ โดยเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นวงรีคล้ายไข่ ส่วนรูปร่างของสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆนั้นพบว่า สตาร์ชข้าวโพด มีทั้งรูปร่างกลม รูปร่างหลายเหลี่ยม และรูปร่างคล้ายแท่ง สตาร์ชมันสำปะหลังมีทั้งรูปร่างกลม และรูปร่างคล้ายไข่ที่มีรอยตัด ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าทั้ง 2 สายพันธุ์มีรูปร่างหลายเหลี่ยม

กล้องจุลทรรศน์นอกจากจะใช้ในการศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชแล้ว ยังสามารถใช้ตรวจสอบลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชด้วยการส่องภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) ได้อีกด้วย โดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชจะแสดงสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งสังเกตได้จากเมื่อส่องเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์จะเห็นเงาดำรอยกากบาท ซึ่งเรียกว่า maltese cross พาดอยู่บนเม็ดสตาร์ชโดยจุดที่กากบาทมาตัดกันจะเรียกว่า hilum ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการสังเคราะห์เม็ดสตาร์ช ลักษณะหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า birefringence ซึ่งการที่เม็ดสตาร์ชสามารถบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้นั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างบางส่วนของเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ หรือเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นผลึกบางส่วน (semi-crystalline) เมื่อแสงโพลาไรซ์ผ่านผลึกบางส่วนที่มีโครงสร้างขนานหรือตั้งฉากกับระนาบของแสง ก็จะทำให้เกิดการบิดระนาบขึ้น (Oates, 1997)

การตรวจลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเป็นการตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ช หากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Gallant, Bouchet and Baldwin, 1997) จากการทดลองพบว่าเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ และเม็ดสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ มี birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่ง hilum อยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช (รูปที่ 4.6) แสดงว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหาย หรือไม่เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินภายในเม็ดสตาร์ชจากขั้นตอนการแยกสตาร์ชโดยใช้ต่างอ่อนในการสกัดโปรตีนออก และการสร้างสายพอลิเมอร์ของแอมิโลสและ

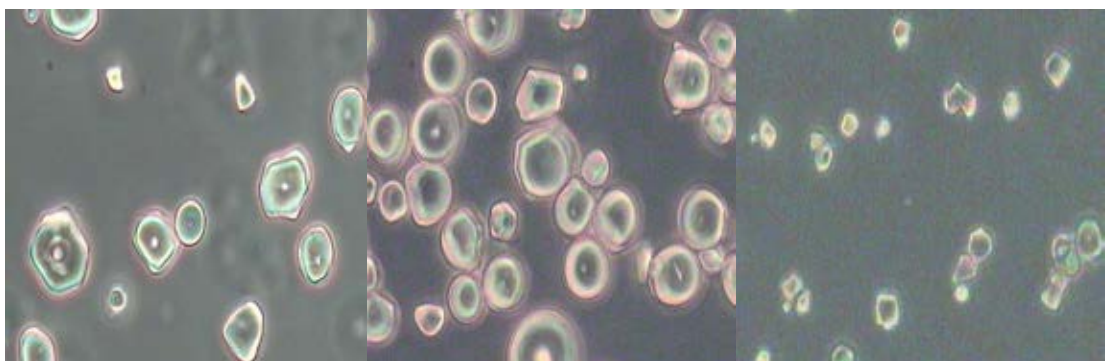
แอมิโลเพกทินเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช ขยายออกตามแนวรัศมีของสตาร์ช (Jane, 2009)



สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์
น้ำดอกไม้

สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์แก้ว

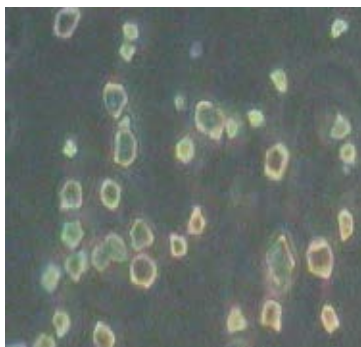
สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์
โชคอนันต์



สตาร์ชข้าวโพด

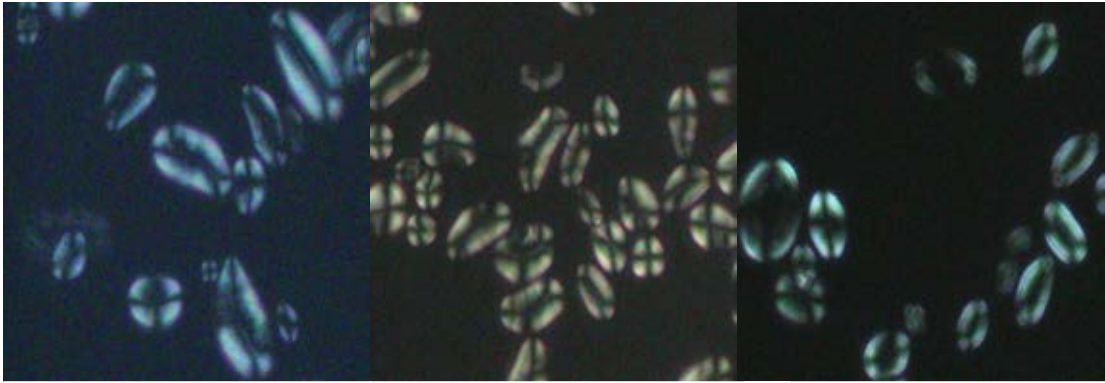
สตาร์ชมันสำปะหลัง

สตาร์ชข้าวหอมมะลิ



สตาร์ชข้าวเลี้ยงพัทลุง

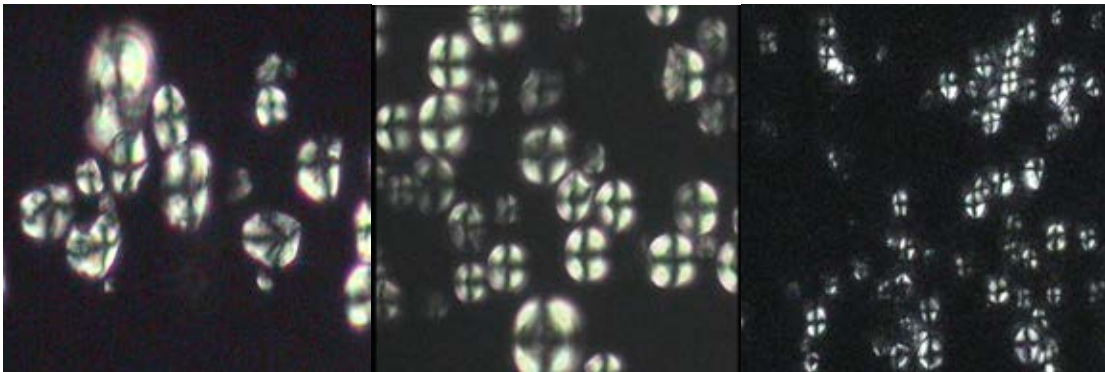
รูปที่ 4.5 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า



สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์
น้ำคอกไม้

สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์แก้ว

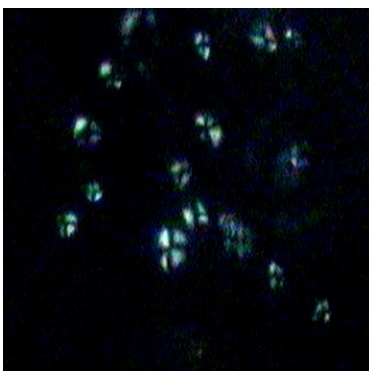
สตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์
ไซคอนันต์



สตาร์ชข้าวโพด

สตาร์ชมันสำปะหลัง

สตาร์ชข้าวหอมมะลิ



สตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง

รูปที่ 4.6 ลักษณะ birefringence ของเมล็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 40 เท่า

4.2.3.3 การกระจายตัวตามขนาดของเม็ดสตาร์ช

จากการวิเคราะห์ขนาดเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ด้วย laser particle size analyzer (ตารางที่ 4.6) โดยเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของขนาด (mean) ของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ พบว่า สตาร์ชจากข้าวเจ้าทั้งสองสายพันธุ์มีขนาดใหญ่เกินความเป็นจริงทั้งนี้อาจเนื่องจากเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้า มีขนาดเล็ก รูปทรงหลายเหลี่ยม ทำให้จับกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย จึงทำให้บางค่าที่นำมาคำนวณเป็นขนาดของกลุ่มก้อนเม็ดสตาร์ชไม่ใช่ขนาดของเม็ดสตาร์ชเพียงหนึ่งเม็ด ทำให้ขนาดเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าสูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกที่จะใช้ค่าฐานนิยม (mode) เป็นค่าของขนาดเม็ดสตาร์ชที่มีจำนวนมากที่สุดในตัวอย่าง โดยพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีขนาดเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่เล็กกว่าสตาร์ชจากข้าวโพดและสตาร์ชจากมันสำปะหลัง แต่มีขนาดใหญ่กว่าสตาร์ชข้าวหอมมะลิและสตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุง นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีขนาดส่วนใหญ่ของเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 13.3 ไมครอน รองลงมา คือ สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ และแก้ว โดยมีขนาด 13.1 และ 13.0 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าขนาดเม็ดสตาร์ชนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งของสตาร์ช

ตารางที่ 4.6 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งของสตาร์ช	ขนาดเม็ดสตาร์ช	
	ค่าเฉลี่ย (μm)	ค่าฐานนิยม (μm)
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้	13.2a \pm 0.0**	13.3e \pm 0.0
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว	13.2a \pm 0.0	13.0c \pm 0.0
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์	12.9a \pm 0.0	13.1d \pm 0.0
ข้าวโพด	14.2b \pm 0.0	13.9f \pm 0.0
มันสำปะหลัง	14.4b \pm 0.0	14.8g \pm 0.0
ข้าวหอมมะลิ	19.4c \pm 0.2	6.2b \pm 0.0
ข้าวเจ้าพันธุ์พัทลุง	14.25b \pm 0.8	5.9a \pm 0.0

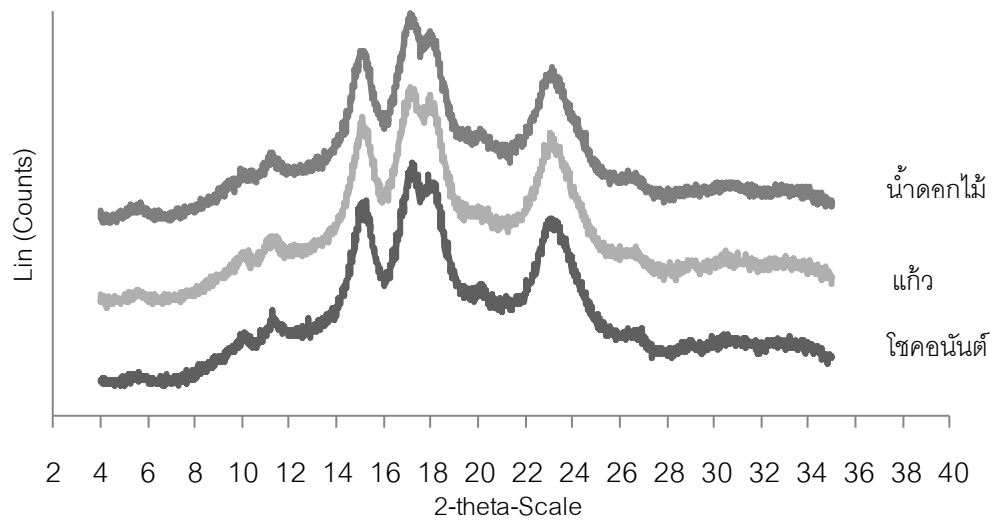
* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

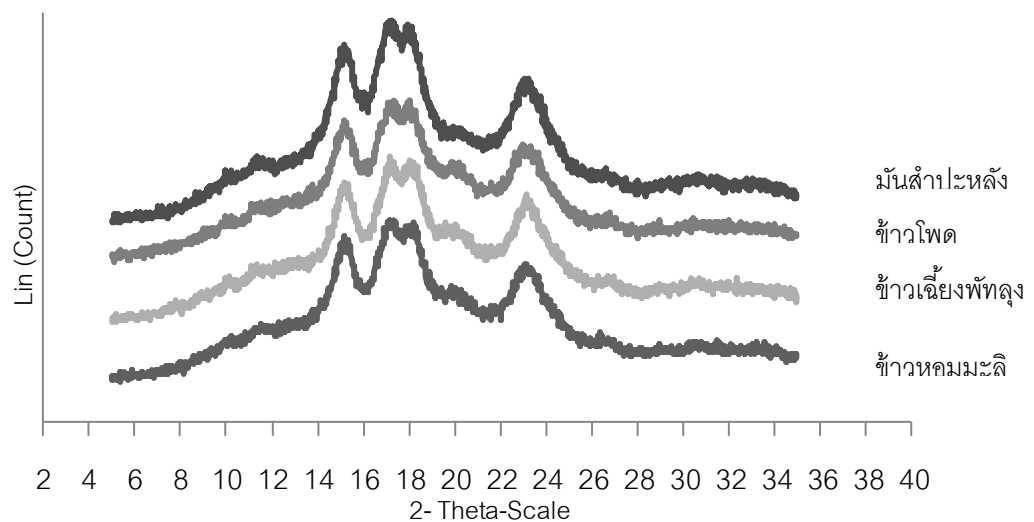
ทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.3.4 รูปแบบและปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช

จากการตรวจสอบรูปแบบผลึกของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ด้วยเครื่อง Wide angle X-ray diffractometer (XRD) พบว่าผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นมีการหักเหของแสงที่เด่นชัด คือ มีพีคเกิดขึ้นที่มุมประมาณ 15 และ 23 องศา (2θ) และเห็นเป็นพีคคู่ที่มุมประมาณ 17 และ 18 (2θ) (รูปที่ 4.7) ซึ่งการหักเหแสงในลักษณะนี้เป็นการหักเหแสงของโครงสร้างผลึกแบบ A (Cheetham and Tao, 1998) ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งการที่สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีโครงสร้างผลึกแบบ A นั้นแสดงว่าบริเวณผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทิน (double helices) อย่างหนาแน่น คือ มีปริมาณของน้ำแทรกตัวอยู่น้อย (Imbert et al., 1988) ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ที่ศึกษาสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย 2 สายพันธุ์ ส่วนโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ พบว่า สตาร์ชข้าวหอมมะลิ สตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุง สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลัง มีพีคเกิดขึ้นในรูปแบบเดียวกับสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ดังนั้นจึงมีรูปแบบผลึกแบบ A เช่นเดียวกัน โดยสตาร์ชข้าวหอมมะลิ สตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุง และสตาร์ชข้าวโพด จัดเป็นสตาร์ชในกลุ่มที่สกัดได้จากธัญพืช ซึ่งสตาร์ชในกลุ่มนี้จะมีรูปแบบผลึกแบบ A ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นเป็นสตาร์ชในกลุ่มที่แยกได้จากส่วนรากของพืช ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สตาร์ชมันสำปะหลังสามารถตรวจพบลักษณะผลึกได้ทั้งแบบ A และ แบบ C (Rickard et al., 1991)



a. สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว ไซคอนันต์ และน้ำดอกไม้



b. สตาร์ชข้าวหอมมะลิ สตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์มน้ำมันปลา

รูปที่ 4.7 รูปแบบการหักเหรังสี X-ray (X-ray diffraction pattern) ของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ

a. สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว ไซคอนันต์ และน้ำดอกไม้ b. สตาร์ชข้าวหอมมะลิ
สตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์มน้ำมันปลา

จากการวิเคราะห์หาปริมาณผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงและสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังตารางที่ 4.7 โดยพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณผลึกมากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย 2 สายพันธุ์ มีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ พันธุ์แก้ว และพันธุ์โชคอนันต์ มีปริมาณความเป็นผลึกร้อยละ 40.32 41.27 และ 40.18 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว มีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 2 สายพันธุ์ ส่วนปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ พบว่า สตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง โดยสตาร์ชจากทั้ง 3 แหล่งนี้มีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีค่าที่แตกต่างกันไป ซึ่งอาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน โดย Hizukuri (1985) ได้กล่าวว่าปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มีความยาว (13 - 24 DP) พอดีกับความหนาของผลึก 1 ชั้น (crystalline lamella) ดังนั้นจึงสามารถเกิดผลึกเกลียวอย่างสมบูรณ์มากกว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิดอื่นที่อาจมีความยาวที่สั้นเกินไปหรือยาวเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 4.5) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ จึงเป็นผลให้มีปริมาณผลึกมากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ และนอกจากนี้ยังพบว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีปริมาณร้อยละของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากที่สุดจึงมีปริมาณผลึกมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 4.7 ปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ

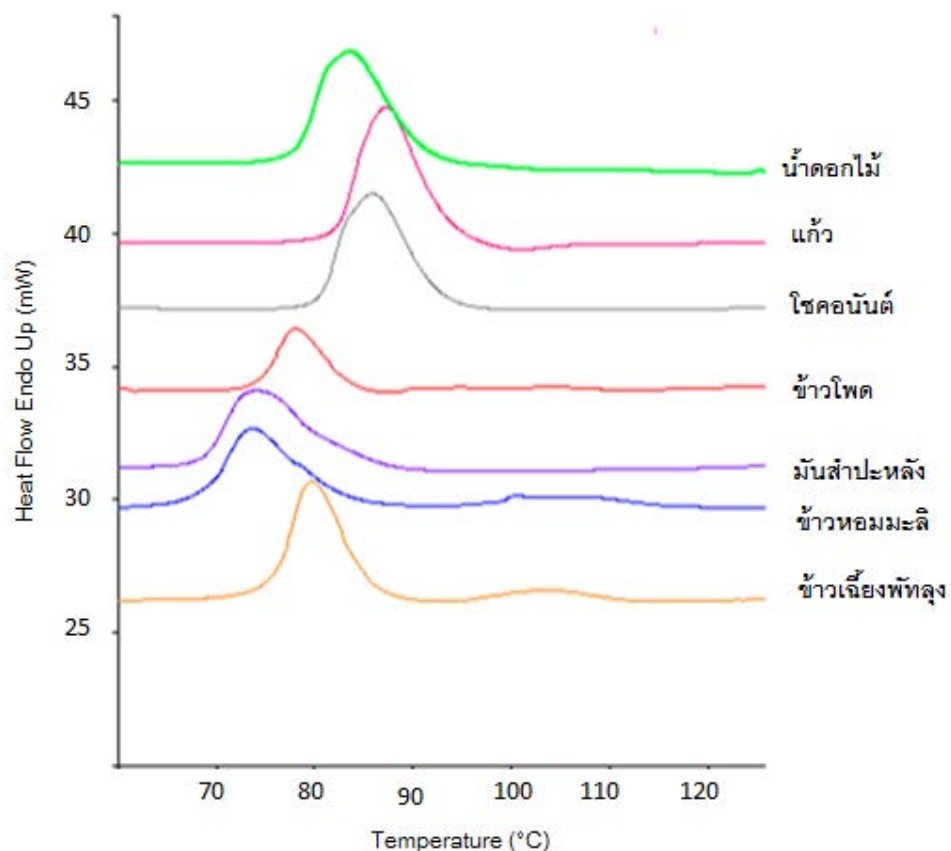
แหล่งของสตาร์ช	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้	40.3
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว	41.3
เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์	40.2
ข้าวโพด	19.3
มันสำปะหลัง	22.5
ข้าวหอมมะลิ	19.2
ข้าวเหนียวพัทลุง	19.1

4.1.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

4.1.1.1 สมบัติการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) พบว่าสตาร์ชทุกชนิดยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง จะให้เทอร์โมแกรม (thermogram) ที่มีลักษณะ 2 พีค (รูปที่ 4.8) ซึ่งแสดงว่าภายในเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 2 ชนิด โดยพีคที่ 1 เป็นพีคที่แสดงพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกหรือเจลาตินในเซชันของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเกลียวคู่ของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน ซึ่งจัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบเกิดเป็นชั้นผลึก (crystalline lamellae) (Morrison และคณะ, 1993) โดยสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาตินในเซชัน (T_o) อยู่ในช่วง 67.97 - 82.39 °C (ตารางที่ 4.8) ส่วนพีคที่ 2 เป็นพีคที่แสดงพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) (Kugimiya, Donovan and Wong, 1980) ซึ่งจะเห็นว่าเริ่มเกิดการ

สลายตัวที่อุณหภูมิ (T_0) สูงกว่าการเกิดเจลตาติในเซชันของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสกับไขมันมีความเสถียรหรือแข็งแรงกว่าโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทิน สำหรับพลังงานในการเกิดเจลตาติในเซชัน (ΔH_{gel}) ของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 13.15 - 19.45 J/g ซึ่งสูงกว่าพลังงานในการสลายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมัน ($\Delta H_{amylose-lipid}$) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.23 - 1.63 J/g ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกของโมเลกุลแอมิโลเพกทินในเม็ดสตาร์ชซึ่งมีจำนวนพันธะมากกว่าโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสกับไขมัน ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานมากกว่า (บุญทิวา นิลจันทร์, 2548)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (thermogram) ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ระหว่างการเกิดเจลตาติในเซชัน

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	สมบัติทางความร้อน							
	พีคที่ 1 (การสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทิน)				พีคที่ 2 (การสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน)			
	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH _{gel} (J/g)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH _{amylose-lipid} (J/g)
น้ำตาลอ้อย***	78.13d±0.20**	83.37d±0.24	91.11c±0.24	18.78d±0.51	101.87bc±3.45	107.61c±2.38	117.90b±4.15	0.23ab±0.01
แก้ว***	82.39f±0.18	87.41f±0.23	93.84d±0.06	19.45d±1.14	101.16bc±3.30	107.14bc±2.10	118.81b±1.48	0.68b±0.11
ไซคอนันต์***	80.30e±0.49	85.19e±0.91	92.27cd±0.55	17.32c±0.15	103.08c±1.08	108.29c±0.97	113.44ab±2.35	0.07a±0.01
ข้าวโพด	74.53b±0.01	78.18b±0.00	85.52b±0.01	14.25ab±0.06	92.66a±0.024	103.76ab±0.00	113.94ab±0.03	1.32c±0.00
มันสำปะหลัง	68.50a±0.30	73.68a±0.61	84.22b±2.09	15.21b±0.02	ND****	ND	ND	ND
ข้าวหอมมะลิ	67.97a±0.32	73.11a±0.03	80.44a±0.25	13.15a±0.67	92.54a±1.03	102.44a±1.16	111.28a±0.92	1.63c±0.07
ข้าวแข็งพัทลุง	75.90c±0.05	79.80c±0.20	85.96b±0.41	14.65b±0.58	96.26ab±2.16	103.53ab±0.21	110.88a±0.44	1.63c±0.45

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

**** ND คือ Not detected

อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (Onset temperature; T_0) เป็นอุณหภูมิที่บอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างผลึก (Kuakpetoon และ Wang, 2007) จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมี T_0 สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ และยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มี T_0 ของการเกิดเจลลิตีในเซชันที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมี T_0 สูงที่สุด รองลงมาคือ พันธุ์ไซคอนันต์ และน้ำดอกไม้ ตามลำดับ โดยทั่วไปการที่ T_0 มีค่าสูงนั้น มักจะเป็นผลมาจากการที่แอมิโลเพกทินมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 (13-24 DP) สูงแต่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A (6-12 DP) ต่ำ (Asaoka และคณะ, 1985; Shi and Seib, 1992) ซึ่งสายโซ่กิ่งก้านทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีการเรียงตัวอยู่ในชั้นผลึกเดียวกัน (Cluster) (Hizukuri, 1986) โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 จะมีความยาวใกล้เคียงกับความหนาของ 1 ชั้นผลึก ซึ่งหนาประมาณ 18 – 21 DP (Cameron and Donald, 1992) ดังนั้นถ้าแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านสาย B1 สูง จะทำให้เกิดเกลียวยาวตลอดทั้งชั้นผลึก ส่งผลให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์และแข็งแรง ดังนั้นจึงทำให้มี T_0 ของการเกิดเจลลิตีในเซชันสูง ในทางตรงกันข้ามหากแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ในชั้นผลึกมาก จะทำให้ความสมบูรณ์และความแข็งแรงของผลึกต่ำ (Jane et al., 1999) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธุ์แก้วมีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากกว่าและชนิด A น้อยกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (ตารางที่ 4.5) ดังนั้นจึงทำให้มี T_0 สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นด้วย

นอกจาก T_0 ของการเกิดเจลลิตีในเซชัน จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชั้นผลึกแล้ว T_g ยังขึ้นอยู่กับ T_g (glass transition) ของบริเวณอสัณฐาน (amorphous lamellae) ระหว่างชั้นผลึก (crystalline lamellae) อีกด้วย เนื่องจากผลึกจะเริ่มหลอมละลายก็ต่อเมื่อบริเวณอสัณฐานละลายหรือเคลื่อนตัวก่อน (Donovan, 1979 : Donovan and Mapes, 1980) ดังนั้นหากบริเวณอสัณฐานมีค่า T_g สูง จะส่งผลให้ T_0 สูงตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติแล้ว T_g ของบริเวณอสัณฐานจะขึ้นอยู่กับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 ของแอมิโลเพกทิน (Slade และ Levine, 1988) หากพิจารณาตามโครงสร้างแบบ backbone (รูปที่ 2.6) ที่เสนอโดย Bertoft ในปี 2004 จะพบว่าถ้าแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มาก บริเวณอสัณฐานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น

เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 อยู่ในลักษณะที่ขนานกัน จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มาก ส่งผลให้บริเวณออสถฐานเกิดการเคลื่อนตัวได้ยาก หรือมีค่า T_g ที่สูงขึ้น ซึ่งสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น (ตารางที่ 4.5) จึงทำให้สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมี T_g สูง โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมี T_g สูงที่สุด เพราะมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มากที่สุด

อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุด (peak temperature; T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature; T_c) มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน คือ สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมี T_p และ T_c สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมี T_p และ T_c สูงที่สุด รองลงมา คือพันธุ์ไซคอนันต์และน้ำดอกไม้ตามลำดับ

ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_{gel}) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณ หรือคุณภาพของโครงสร้างผลึกที่เกิดจากเกลียวคู่ของสายโซ่แอมิโลเพกทิน และยังบอกถึงพลังงานรวมที่ใช้ในการทำละลายพันธะไฮโดรเจน (Singh et al., 2003) จากผลการทดลองพบว่า สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มี ΔH_{gel} สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ดังนั้นสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงน่าจะมีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง เสถียร และมีปริมาณมากที่สุด จึงทำให้ต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 ต่อการเกิดผลึกที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ปริมาณการเป็นผลึกด้วย XRD ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณการผลึกมากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น (ตารางที่ 4.7)

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการการสลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน ($\Delta H_{amylose-lipid}$) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้บอกถึงปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันของสตาร์ช พบว่าสตาร์ชจากทุกแหล่งยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง มีสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันเป็นองค์ประกอบ โดยพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการทำละลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน ($\Delta H_{amylose-lipid}$) ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าต่ำกว่า สตาร์ชข้าวโพด ข้าวหอมมะลิ และข้าวเจ้าซึ่งพืชรู้อย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.8) ซึ่งการที่สตาร์ชข้าวมี $\Delta H_{\text{amylose-lipid}}$ ที่สูงนั้น อาจเนื่องมาจาก สตาร์ชข้าวมีไขมันชนิดฟอสโฟลิปิดในปริมาณมาก (Jane, 2009) ซึ่งฟอสโฟลิปิดนั้นสามารถเกิด สารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลสได้อย่างแข็งแรง (Morrison และคณะ, 1993) และเมื่อพิจารณา ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ร่วมกับปริมาณ แอมิโลสและปริมาณไขมัน พบว่าปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันของ สตาร์ชจากแหล่งต่างๆ นั้นไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลสเนื่องจากปริมาณแอมิโลสที่ได้ จากการทดลองในครั้งนี้เป็นปริมาณแอมิโลสที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการเกิดสารประกอบ เชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไอโอดีน ซึ่งไอโอดีนจะไม่สามารถเข้าไปจับกับแอมิโลสที่เกิด สารประกอบเชิงซ้อนอยู่กับไขมันได้ ดังนั้นปริมาณแอมิโลสที่ได้จึงไม่ได้เกี่ยวข้องกับแอมิโลสที่ เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอยู่กับไขมัน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง แอมิโลสกับไขมันไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณไขมันที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไขมันภายในเมล็ดสตาร์ชนอกจากจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง แอมิโลสกับไขมันแล้ว ยังอาจจะอยู่รูปของไขมันอิสระ (free lipid) ได้อีกด้วย (Tang and Copeland, 2007) โดยปริมาณไขมันที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นเป็นเพียงส่วนของไขมันอิสระ เนื่องจากวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไขมันนั้นมีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้สตาร์ชเกิด เจลาตีในเซชัน จึงทำให้ไม่สามารถทำลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไขมันกับแอมิโลส ได้ ดังนั้นตัวทำลายอินทรีย์จึงไม่สามารถชะไขมันส่วนนี้ออกมาได้

เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง แอมิโลสกับไขมันเริ่มหลอมละลาย (ตารางที่ 4.8) พบว่าสตาร์ชจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง แอมิโลสกับไขมันของเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะเริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้ายังพัทลุง เริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไขมันกับแอมิโลสของสตาร์ชจาก เนื้อในเมล็ดมะม่วงนั้นอยู่บริเวณผลึกของเมล็ดสตาร์ช ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิประมาณ $100 - 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการหลอมละลาย โดยมีงานวิจัยกล่าวว่าไขมันที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลสซึ่งอยู่ บริเวณผลึกของเมล็ดสตาร์ชนั้นเป็นไขมันชนิดโมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides) ที่มีกรดไขมัน สายสั้น เช่น กรดคาปริค (Capric acid) และ กรดลอริก (Lauric acid) (Jane, 2009) ส่วนการที่

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และ สตาร์ชข้าวเหนียวพัทลุงนั้นเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ อาจเนื่องมาจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันของสตาร์ชดังกล่าวนี้ได้อยู่บริเวณอสังฐานของเม็ดสตาร์ช ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิประมาณ $94\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกดังกล่าว โดยมีงานวิจัยกล่าวว่าไขมันที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลสซึ่งอยู่บริเวณอสังฐานของเม็ดสตาร์ชนั้น เป็นไขมันชนิดโมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides) ที่มีกรดไขมันสายยาว (C-14 หรือ มากกว่า) ซึ่งไขมันชนิดนี้จะสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลสได้อย่างรวดเร็ว (Jane, 2009)

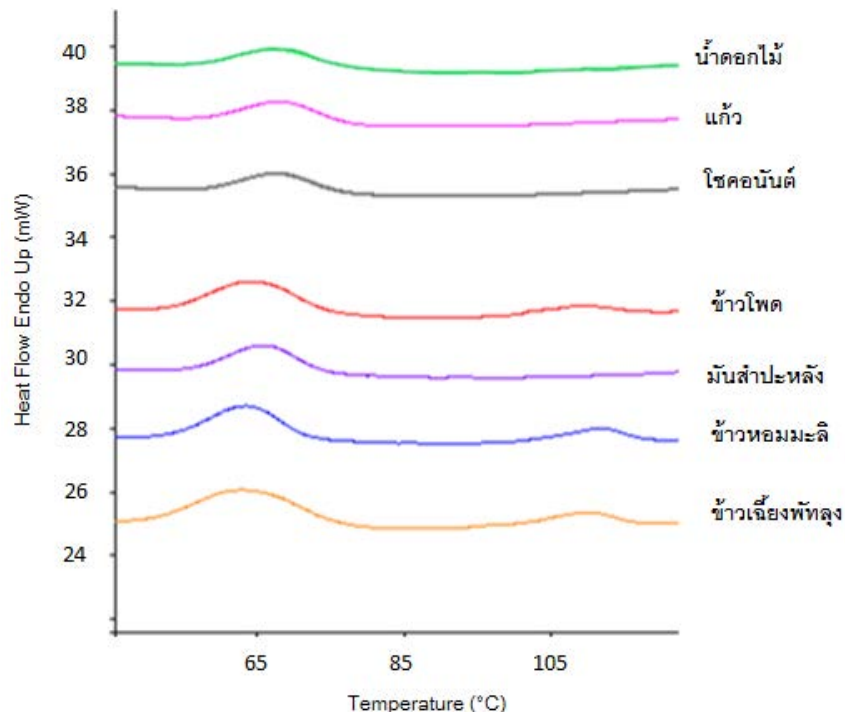
4.2.3.5 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสตาร์ช ได้แก่ แอมิโลสและแอมิโลเพกทินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ จากการศึกษาของ Brower (1992) พบว่าแอมิโลสของสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันจะเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างรวดเร็วระหว่างการลดลงของอุณหภูมิ ส่วนแอมิโลเพกทินก็สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้เช่นเดียวกันแต่จะเกิดในอัตราที่ช้ากว่ามาก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างเกาะกะ โดยกิ่งก้านแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้กัน จะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นเกลียวคู่และเกิดผลึกขึ้นใหม่ ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถติดตามได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ด้วยเครื่อง DSC

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าสตาร์ชเกือบทุกแหล่งยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง จะให้เทอร์โมแกรมในลักษณะ 2 พีค (รูปที่ 4.9, ตารางที่ 4.9) เช่นเดียวกับกราฟที่ได้จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยพีคที่ 1 เป็นพีคที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน โดยจะเป็นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (Shi and Seib, 1992) จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นในสตาร์ชทุกชนิดจะเริ่มหลอมละลายในช่วงอุณหภูมิ (T_0) ประมาณ $45\text{ - }54\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่า T_0 ของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินที่อยู่ในช่วงประมาณ $67\text{ - }82\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (ΔH_{regel}) ของสตาร์ชทุกแหล่งจะมีค่าประมาณ $3\text{ - }8\text{ J/g}$

(ตารางที่ 4.9) ซึ่งต่ำกว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินระหว่างการเกิดเจลาตีโนเซชัน (ΔH_{gel}) ที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 13 -19 J/g (ตารางที่ 4.8) ซึ่งความแตกต่างของ T_0 และ ΔH ระหว่างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่และผลึกเริ่มต้นบ่งบอกว่า ผลึกที่เกิดจากกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นผลึกที่มีปริมาณและความแข็งแรงน้อยกว่าผลึกของแอมิโลเพกทินเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม พีคที่ 2 ซึ่งเป็นพีคของการหลอมละลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน ยังคงมีค่า T_0 , T_p , T_c และ ΔH (ตารางที่ 4.9) ใกล้เคียงกับค่าเหล่านั้นของพีคที่ 2 ระหว่างการเกิดเจลาตีโนเซชัน (ตารางที่ 4.8) แสดงให้เห็นว่าแอมิโลสและไขมันสามารถกลับเข้ามาสร้างโครงสร้างผลึกที่มีปริมาณและความแข็งแรงใกล้เคียงโครงสร้างผลึกเดิม เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) และค่าพลังงาน (ΔH_{regel}) ที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมี T_0 และ ΔH_{regel} ที่สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจียซึ่งมี ΔH_{regel} สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชข้าวหอมมะลิมี ΔH_{regel} น้อยที่สุด การที่สตาร์ชจากแต่ละแหล่งนั้นมี T_0 และ ΔH_{regel} แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากสตาร์ชแต่ละแหล่งมีโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน โดย Shi และ Seib (1992) พบว่าสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 และ A มีอิทธิพลต่อการรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน โดยสตาร์ชที่มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูง แต่มีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ต่ำ จะส่งผลให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกรเดชันได้สูง ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มีความยาวใกล้เคียงกับความหนา 1 ชั้นของชั้นผลึก (crystalline lamella) หรือ cluster (Jane et al., 1999) จึงทำให้สายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์กว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิดอื่น ส่วนสายโซ่กิ่งก้านชนิด A นั้นจะเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 ในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชัน ทำให้โครงสร้างผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์ (Levine and Slade, 1986) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 4.5) จึงทำให้โครงสร้างผลึกที่ได้จากการรีโทรเกรเดชันมีความสมบูรณ์ แข็งแรง และมีปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานในการทำละลายโครงสร้างผลึกสูง นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากข้าวหอมมะลีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกที่ได้นั้นไม่สมบูรณ์ จึงต้องการพลังงานในการทำละลายโครงสร้างผลึกต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น

นอกจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 ของแอมิโลเพกทินแล้ว หากพิจารณาโครงสร้างแอมิโลเพกทินแบบ backbone (รูปที่ 2.6) ที่เสนอโดย Bertof (2004) จะเห็นว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 ก็น่าจะส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรดชันได้ โดยเมื่อแอมิโลเพกทิน 2 โมเลกุลมาขนานกันโดยหันให้ด้านของสาย backbone มาอยู่ด้านเดียวกันจะทำให้สายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่กันได้ จากข้อมูลร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของสตาร์ช (ตารางที่ 4.5) จะเห็นว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะมีแอมิโลเพกทินที่มีปริมาณของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ชข้าวหอมมะลิที่มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B2 น้อยที่สุด จึงส่งผลให้แอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสามารถเกิดรีโทรเกรดชันได้มากกว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวหอมมะลิที่มี ΔH_{regel} ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน (thermogram) ในการหลอมละลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่น

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	สมบัติทางความร้อน							
	พีคที่ 1				พีคที่ 2			
	(การสลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน)				(การสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน)			
	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH _{regel} (J/g)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH _{amylose-lipid} (J/g)
น้ำดอกไม้***	53.30d±0.12**	63.73c±0.11	73.94d±0.09	7.38cd±0.13	102.87b±1.41	109.20b±0.01	112.84bc±0.76	0.16a±0.03
แก้ว***	53.80d±0.33	63.52c±0.66	74.94d±0.31	7.99d±0.80	97.39ab±6.33	107.09ab±2.97	114.51c±1.61	0.18a±0.00
ไซคอนันต์***	51.99cd±0.40	63.19c±0.30	74.27d±0.11	7.69cd±0.13	102.37b±0.87	108.48b±0.89	112.17bc±0.52	0.14a±0.01
ข้าวโพด	49.22ab±1.46	59.50a±0.35	70.64c±0.97	6.52c±0.28	94.77a±0.69	104.43a±1.51	111.50ab±1.04	1.31b±0.18
มันสำปะหลัง	51.23bcd±0.31	61.09b±0.16	69.00b±0.21	4.86b±0.07	ND****	ND	ND	ND
ข้าวหอมมะลิ	48.21ab±3.63	58.95a±1.05	66.84a±0.78	2.89a±0.69	95.19a±0.72	103.41a±1.05	108.91a±0.94	1.48b±0.11
ข้าวแข็งพัทลุง	45.58a±0.21	58.28a±0.07	70.82c±0.86	8.16d±0.81	95.48a±0.4	104.17a±0.91	110.31ab±1.23	1.97c±0.25

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

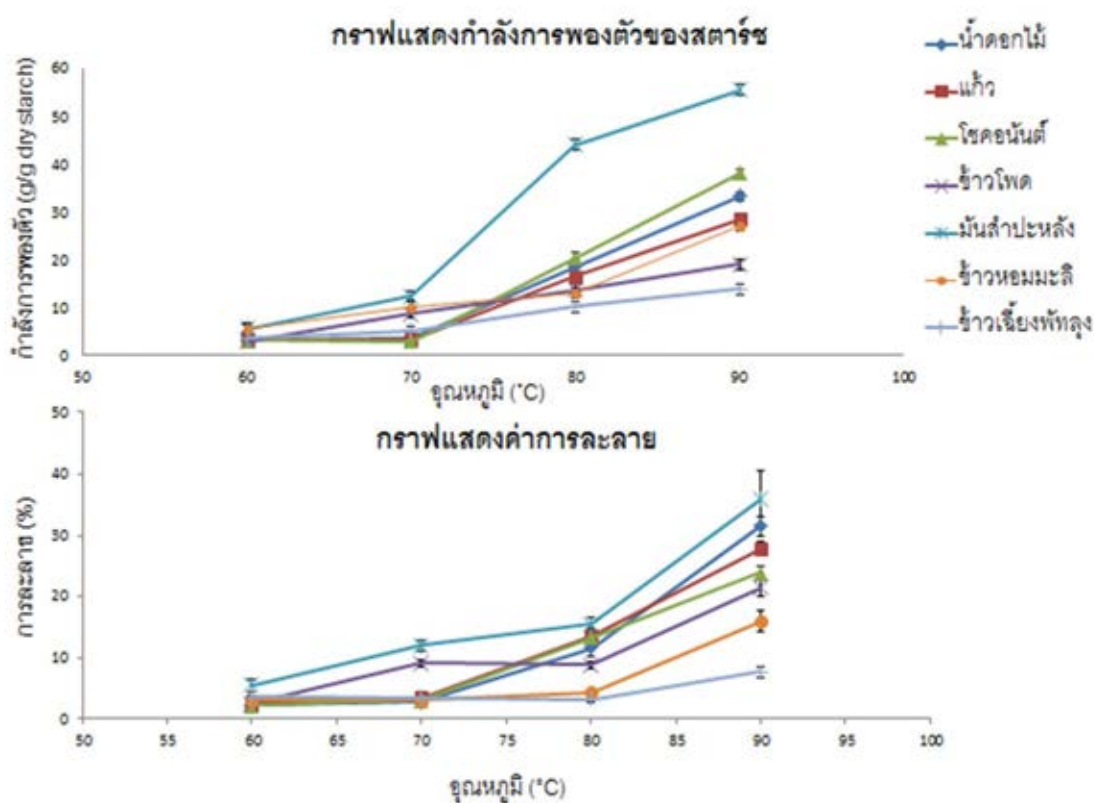
** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

**** ND คือ Not detected

4.2.4.3 กำลังการพองตัวและการละลายน้ำของสตาร์ช

จากการวัดกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดดมะม่วงและสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 °C พบว่ากำลังการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูปที่ 4.10) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชจะถูกทำลายมากขึ้น น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้น ส่งผลให้อัมมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (Hoover, 2001)



รูปที่ 4.10 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.10) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ทั้ง 3 สายพันธุ์ และสตาร์ชข้าวเจ้ายังพื้ปลูกมีการพองตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 80 °C ในขณะที่สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชข้าวหอมมะลิจะเริ่มพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 70 °C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.7) และความแข็งแรงของผลึก โดยดูจากค่า ΔH_{gel} และ T_0 (ตารางที่ 4.8) ที่มากกว่า ทำให้สตาร์ชเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้ายังพื้ปลูกนั้นมีปริมาณแอมิโลสและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันในปริมาณที่สูง ซึ่งโมเลกุลทั้งสองชนิดนี้สามารถชะลอการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้ (Tester and Morrison, 1990) จึงเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ชของข้าวโพด ข้าวหอมมะลิ และมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.10 กำลังการพองตัวของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C*

แหล่งสตาร์ช	กำลังการพองตัว (g/g dry starch)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
น้ำดอกไม้***	3.31ab ± 0.33**	3.70b ± 0.34	18.65d ± 1.20	33.31d ± 1.89
แก้ว***	3.40ab ± 0.25	3.49ab ± 0.16	16.50c ± 1.37	28.61c ± 0.81
ไซคอนันต์ ***	3.24ab ± 0.43	3.07a ± 0.57	20.49e ± 0.34	38.09e ± 2.31
ข้าวโพด	3.07a ± 0.46	8.84d ± 0.49	13.82b ± 0.37	19.04b ± 0.91
มันสำปะหลัง	5.62c ± 0.44	12.45f ± 0.65	44.12f ± 1.27	55.58f ± 1.73
ข้าวหอมมะลิ	5.81c ± 0.27	10.33e ± 0.41	13.08b ± 0.23	27.18c ± 1.87
ข้าวเจ้ายังพื้ปลูก	3.66ab ± 0.22	5.24c ± 0.28	10.17a ± 0.31	13.90a ± 0.25

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีกำลังการพองตัวที่ 90 °C อยู่ในช่วง 28.61 - 38.09 g/g dry starch ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชของข้าวโพด ข้าวหอมมะลิ และข้าวเจ้าเชิงพัทลุง ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ชของข้าวโพด ข้าวหอมมะลิ และข้าวเจ้าเชิงพัทลุง มีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันสูงกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันนั้นสามารถพิจารณาได้จากค่า $\Delta H_{\text{amylose-lipid}}$ ของสตาร์ช โดยสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันนี้จะพบบริเวณรอบนอกของเม็ดสตาร์ชมากกว่าด้านใน (Kuaketon and Wang, 2007) และมีส่วนไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Tester และ Morrison, 1990) ส่วนกำลังการพองตัวที่ 90 °C ของสตาร์ชมันสำปะหลังนั้น พบว่ามีค่าสูงกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นไม่มี amylose-lipid complex ประกอบกับมีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จึงทำให้สามารถพองตัวได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวที่ 90 °C ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ (ตารางที่ 4.10) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีกำลังการพองตัวสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำดอกไม้ และแก้ว ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้สอดคล้องกับปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน ซึ่งมีส่วนยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Tester and Morrison, 1990) ตามที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น โดยพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ มีค่า $\Delta H_{\text{amylose-lipid}}$ ต่ำกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ และแก้ว ดังนั้นจึงมีกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชสูงที่สุด

จากการศึกษาการละลายของสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 90 °C (ตารางที่ 4.11) พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ มีค่าการละลายที่อุณหภูมิ 90 °C แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าค่าการละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่ามากกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุง แต่จะมีค่าน้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งการละลายนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ความยาวสายโซ่แอมิโลส และปริมาณ amylose-lipid complex นั้นยังมีผลต่อค่าการละลาย คือ สตาร์ชที่มีสายโซ่แอมิโลสขนาดใหญ่ จะไหลออกจากเม็ดสตาร์ชได้ยาก เนื่องจากแอมิโลสอาจจะเกิดเกลียวคู่กับ

แอมิโลเพกทินภายในเม็ดสตาร์ชได้ (Pérez, Baldwin and Gallant, 2009) Chung และคณะ (2011) ได้กล่าวว่า amylose-lipid complex จะไม่ละลายและไม่แยกออกจากกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 °C นอกจากนี้มันยังไปกีดขวางไม่ให้แอมิโลสไหลออกมาจากเม็ดสตาร์ชในขณะที่เม็ดสตาร์ชพองตัวอีกด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าสตาร์ชข้าวเจียฟัทลุง ถึงแม้จะมีปริมาณแอมิโลสสูง (ตารางที่ 4.3) แต่ก็มีขนาดที่ยาวมาก (ตารางที่ 4.4) และมีปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันที่สูงด้วย ซึ่งจะเห็นได้จากค่า $\Delta H_{\text{amylose-lipid}}$ (ตารางที่ 4.8) ดังนั้นสตาร์ชข้าวเจียฟัทลุงจึงมีค่าการละลายที่ต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.11) ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังนั้นกำลังการพองตัวที่สูงที่สุด (ตารางที่ 4.10) ประกอบกับมีสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันที่น้อยมาก (ตารางที่ 4.8) จึงมีการละลายที่มากที่สุด

ตารางที่ 4.11 การละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60-90 °C*

แหล่งสตาร์ช	การละลาย (%)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
น้ำดอกไม้ ***	2.16a±0.80**	2.75a±0.43	11.55c±1.28	31.57e±1.60
แก้ว ***	2.54ab±0.13	3.56b±0.36	13.66d±1.17	27.85d±1.24
ไซคอนันต์ ***	2.23a±0.32	3.14ab±0.53	13.37d±0.98	23.94c±2.33
ข้าวโพด	2.50ab±0.65	9.10c±0.45	8.86b±0.50	21.42c±1.44
มันสำปะหลัง	5.51d±0.99	12.00d±0.78	15.58e±1.14	35.93f±4.79
ข้าวหอมมะลิ	3.16bc±0.40	3.08ab±0.21	4.40a±0.21	15.96b±1.67
ข้าวเจียฟัทลุง	3.61c±0.40	3.54b±0.42	3.25a±0.39	7.67a±0.96

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

4.2.4.4 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง โดยสมบัตินี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับองค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียงโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) สามารถใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (ตารางที่ 4.12) พบว่า สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature; PT) สูงกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวหอมมะลิ และสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับกำลังการพองตัวของสตาร์ช (ตารางที่ 4.10) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง จะเริ่มเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบ PT ของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงแต่ละสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วเริ่มเกิดความหนืดที่อุณหภูมิ 84.35 °C ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงอีก 2 สายพันธุ์ ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีปริมาณ amylose-lipid complex ที่สูงกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงอีกสองสายพันธุ์ ซึ่ง amylose-lipid complex จะไปส่งเสริมให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Jane และคณะ, 1999) และยังไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โดยการป้องกันไม่ให้น้ำเข้าเม็ดสตาร์ชได้ง่าย (Tester และ Morrison, 1990) จึงทำให้สารละลายสตาร์ชเริ่มเกิดความหนืดที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุงมี PT ที่สูงกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ ซึ่งผลการทดลองนี้ก็สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง PT และปริมาณ amylose-lipid complex ที่กล่าวไว้แล้ว

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	สมบัติทางความหนืด					
	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)
น้ำดอกไม้***	81.6c±0.7**	423.8f±0.8	298.4f±4.8	126.5d±1.9	370.3e±7.2	76.3a±1.0
แก้ว***	84.4e±0.3	356.2c±1.0	284.1e±1.9	72.1b±1.2	380.7f±4.0	96.6b±4.0
ไซคอนันต์***	83.1d±0.7	375.7d±2.4	264.0d±2.8	112.2c±1.3	362.6d±2.6	99.1b±2.2
ข้าวโพด	80.1b±0.1	328.1b±1.6	210.2c±1.9	117.9c±1.5	349.1c±3.2	139.1d±1.4
มันสำปะหลัง	72.7a±0.4	415.6e±3.7	167.6b±5.7	248.0f±9.2	295.8b±5.5	125.8c±3.9
ข้าวหอมมะลิ	72.9a±0.4	323.3a±3.4	125.7a±1.4	197.5e±3.0	226.5a±3.9	100.8b±2.7
ข้าวเจี๋ยงพัทลุง	87.9f±0.4	327.5b±2.4	263.8d±5.3	63.7a±5.3	394.0f±7.1	133.1d±9.1

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity; PV) เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการพองตัวของอิสรระของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ, 2543) จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่า PV สูงกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุง และสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับกำลังการพองตัวของสตาร์ช (ตารางที่ 4.10) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีกำลังการพองตัวที่ 90 °C มากกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ มีค่า PV แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีค่าความหนืดสูงสุดน้อยกว่า พันธุ์น้ำดอกไม้ และพันธุ์โชคอนันต์ ซึ่งสอดคล้องกับกำลังการพองตัว (ตารางที่ 4.10) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีกำลังการพองตัวน้อยกว่า พันธุ์น้ำดอกไม้ และพันธุ์โชคอนันต์ ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้วมีปริมาณ amylose-lipid complex มากกว่า และมีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงอีก 2 สายพันธุ์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ทำให้สตาร์ชพองตัวได้ต่ำและมีค่า PV ต่ำ

ค่าความหนืดลดลง (Breakdown; BD) เป็นค่าที่ใช้บอกความทนต่อแรงเฉือนและความร้อนของโมเลกุลสตาร์ช (Dengate, 1984) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุงมีค่า BD ต่ำที่สุด รองลงมา คือ สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุง และสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว สามารถต้านแรงเฉือนและความร้อนได้ดีกว่าโมเลกุลของสตาร์ชจากแหล่งอื่น ในขณะที่โมเลกุลของสตาร์ชมันสำปะหลังมีความสามารถในการต้านแรงเฉือนได้น้อยที่สุดเมื่อดูจากค่า BD ที่สูงสุด โดยทั่วไปแล้วสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักจะมีค่า BD ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสายโซ่เส้นตรงและยาวของแอมิโลสสามารถต้านทานแรงเฉือนและความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงโดยเฉพาะสายพันธุ์น้ำดอกไม้ และโชคอนันต์ มีค่า BD ที่สูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุงค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดนั้น มีปริมาณแอมิโลสที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.3) ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากแอมิโลสของสตาร์ชแต่ละชนิดนั้น มีความยาวที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.4) โดยแอมิโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุงมีขนาดที่ยาวกว่าแอมิโลสของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง จึงอาจจะทำให้มีความสามารถในการต้านแรงเฉือนที่ดีกว่า

ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity; FV) เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของ โครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช (retrogradation) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โดยค่าที่ใช้บอกแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช คือค่าการคืนตัว (Setback) จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของสตาร์ชนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยที่สำคัญ คือ ปริมาณของแอมิโลส สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) แต่ผลการทดลองที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีปริมาณแอมิโลสที่สูงใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุงแต่กลับมีการคืนตัวต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจาก สตาร์ชจากทั้ง 2 แหล่งมีแอมิโลสที่มีความยาวแตกต่างกัน โดยสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงพัทลุงมีขนาดแอมิโลสที่ยาวกว่าแอมิโลสของสตาร์ชจากอื่นๆ (ตารางที่ 4.4) ในขณะที่แอมิโลสของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์มีขนาดความยาวที่สั้นกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดความยาวสายโซ่แอมิโลส มีอิทธิพลต่อความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสมากกว่าปริมาณแอมิโลส โดยความยาวที่สั้นของแอมิโลสของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงอาจจะอยู่ในช่วงความยาวที่ไม่เหมาะสมในการเกิดรีโทรเกรเดชันแบบทันทีเมื่อเทียบกับสตาร์ชจากแหล่งอื่น

4.2.4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช

จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Texture analyzer (ตารางที่ 4.13) พบว่าเจลสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าความแข็ง (Hardness) สูงกว่าเจลสตาร์ชจากแหล่งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่าความแข็งเป็นค่าของแรงที่ใช้กดลงบนเจลจนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่าง ซึ่งค่านี้จะสะท้อนถึงความแข็งแรงของเจลสตาร์ชที่ทำการวัด โดยทั่วไปความแข็งแรงของเจลที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่างแต่ละชนิด (Sandhu and Singh, 2007) โดย Mua และ Jackson (1997) กล่าวว่าสตาร์ชที่มีเจลที่แข็งแรงนั้น มักจะมีปริมาณแอมิโลสสูง แต่จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงซึ่งมีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวเจ้าเชิง

พัทลุงกลับมีค่าความแข็งของเจลสูงกว่ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากแอมิโลสของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีขนาดความยาวที่สั้นกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น (ตารางที่ 4.4) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลสของสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุงซึ่งมีขนาดยาวที่สุด ขนาดที่ไม่ยาวจนเกินไปของแอมิโลสของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงอาจจะเหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในลักษณะที่เกิดช้าๆ เช่น การเก็บเจลสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน (20 ชั่วโมง) ซึ่งจะแตกต่างจากการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยทันทีเหมือนกับที่เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืด (setback) ระหว่างการลดอุณหภูมิของการศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง RVA (ตารางที่ 4.12) ที่พบว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะมีค่า setback ต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น นอกจากแอมิโลสแล้วแอมิโลเพกทินก็สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้อีกด้วย แต่จะต้องใช้ระยะเวลาานกว่าแอมิโลสเนื่องจากโครงสร้างเกาะกะกว่า (Lii, Lai and Shen, 2004) ซึ่งจากการศึกษาสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยติดตามด้วยเครื่อง DSC พบว่า แอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่า ΔH_{regel} (ตารางที่ 4.9) สูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นแอมิโลเพกทินของข้าวเจียงพัทลุง ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงเอื้อต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การเกิดรีโทรเกรเดชันที่สูงของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสามารถสังเกตได้จากปรากฏการณ์การแยกตัวของน้ำออกจากเจลสตาร์ช (syneresis) เมื่อเก็บเจลสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จะพบหยดน้ำเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของเจล แสดงว่าโมเลกุลสตาร์ชเนื้อในเมล็ดมะม่วงเกิดรีโทรเกรเดชันในอัตราที่สูงขึ้น คือ โมเลกุลสตาร์ชเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันมากขึ้นจนโมเลกุลน้ำที่อยู่ระหว่างโมเลกุลสตาร์ชถูกบีบให้หลุดออกมา ส่งผลให้ช่องว่างภายในโครงสร้างเจลมีขนาดเล็กลง เจลมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงต้องใช้แรงในการกดให้ได้ระยะที่กำหนดไว้มากขึ้น (Tziotis et al.,2004)

ตารางที่ 4.13 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ*

แหล่งสตาร์ช	Hardness (g)
น้ำตาลดอกไม้***	116.36e ± 8.46**
แก้ว***	110.17e ± 8.06
ไซคอนันต์***	115.25e ± 8.42
ข้าวโพด	68.95d ± 6.92
มันสำปะหลัง	22.71b ± 1.38
ข้าวหอมมะลิ	7.45a ± 0.59
ข้าวเหนียวพัทลุง	49.94c ± 1.59

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 6 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

*** เนื้อในเมล็ดมะม่วง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ (พันธุ์น้ำดอกไม้ พันธุ์แก้ว และพันธุ์โชคอนันต์) มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา คือ โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ ตามลำดับ สตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ มีปริมาณไขมันและปริมาณแอมิโลสสูงกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตวรรษข้าวเจ้าซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกัน แต่มีสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันต่ำกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตวรรษมันสำปะหลัง สตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของแอมิโลสและแอมิเพกทินเล็กกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น และเมื่อศึกษาการกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินพบว่าสตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และ B2 มากกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น แต่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A น้อยกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น เม็ดสตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่ สภาพพื้นผิวส่วนใหญ่เรียบ มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน มีขนาดส่วนใหญ่ของเม็ดสตวรรษเล็กกว่าสตวรรษข้าวโพด และสตวรรษมันสำปะหลัง แต่มีขนาดใหญ่กว่าสตวรรษข้าวหอมมะลิและสตวรรษข้าวเจ้าซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A เช่นเดียวกับสตวรรษจากธัญพืช และมีปริมาณผลึกสูงกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่นมาก

จากสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกับสตวรรษจากแหล่งอื่น ส่งผลให้สตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกับสตวรรษจากแหล่งอื่นอย่างชัดเจน โดยพบว่าสตวรรษจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนเซชัน และต้องการพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น และยังพบว่ามีค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของสตวรรษที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชันแล้วสูงใกล้เคียงกับสตวรรษข้าวเจ้าซึ่งมีกำลังการพองตัวและการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีกำลังการพองตัวและการละลายที่ 90 °C สูงกว่าสตวรรษจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตวรรษมันสำปะหลัง มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการ

เปลี่ยนแปลงความหนืดสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น มีค่าความหนืดสูงสุดค่อนข้างสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ยกเว้นสตาร์ชมันสำปะหลัง มีค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์แก้วสามารถทนต่อแรงเฉือนได้ดีใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวเจียงพัทลุง และพบว่าเจลของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น และความยากง่ายในการเคี้ยวสูงกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น แต่มีค่าการเกาะตัวกันใกล้เคียงกับสตาร์ชจากแหล่งอื่น

จากสมบัติทางเคมีกายภาพที่ต่างจากสตาร์ชชนิดอื่นสามารถสรุปได้ว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงทั้ง 3 สายพันธุ์ เป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงส่งผลให้เกิดการเจลาติไนเซชันได้ยาก นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างโมเลกุลที่เอื้อต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันส่งผลให้ได้เจลที่มีความแข็งแรงสูง โดยสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์แก้วมีสมบัติดังกล่าวที่ชัดเจนกว่าสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์ไซคอนันต์และพันธ์น้ำดอกไม้ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

สตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงน่าจะเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 (Resistant starch; RS III) สูง เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ดังนั้นจึงควรนำไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำแป้งฟลาวัวร์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงไปผสมกับแป้งฟลาวัวร์จากแหล่งอื่น เพื่อช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีแปรง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- ญาณกร ศิวะวัฒน์วงศ์ และอนนต์ อติโรจนานนท์. การลดปริมาณของเสียเหลือทิ้งที่ถูกย่อยสลายได้ยากของโรงงานมะม่วงแปรรูปโดยนำเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมาสกัดน้ำมันและสารประกอบฟีนอลิก. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์. สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชทำายายม่อม *Tacca leontopetaloides* Ktze. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- บุญทิศา นิลจันทร์. การศึกษาสมบัติเคมีฟิสิกส์ของฟลาวและสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์ต่างๆในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- ปาริดา ชุนแอ. ผลการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- พิชญอร ไหมสุทธิสกุล และศิริกานต์ ผาสุก. 2551. การสำรวจการจัดการของเสียจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงของอุตสาหกรรมอาหารของไทย. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 28: 158–166.
- มนทกานต์ เบญจพลาการ. สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชจากเถาวัลดี *Sterculia monosperma* Vent. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาภูวัฒน์, รุ่งทิวา วันสุขศรี และบุญทิวา นิลจันทร์. 2546. การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆในประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์. การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าโดยการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2550.
- วิจิตร วังโน. มะม่วง. กรุงเทพมหานคร : ศรีสมบัติการพิมพ์, 2529.
- สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- องค์การตลาดเพื่อเกษตรกร. มะม่วง [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา:
<http://www.mof.or.th/web/agriculture.php?id=58&cat=25> [4 เมษายน 2554]

ภาษาอังกฤษ

- AACC. Approved Methods of the AACC. 10th ed. st. Paul, Minnesota, USA : The American Association of Cereal Chemists, 2000.
- Abdalla, A. M. A., Darwish, S. M., Ayad, E. H. E., and El-Hamahmy, R. M. 2007. Egyptian mango by-product 1. Compositional quality of mango seed kernel. Food Chemistry 103 : 1134-1140.
- Alonsoa, A. G., Escriga, A. J., Carrónb, N. M., Bravoa L., and Calixtoa F. S. 1999. Assessment of some parameters involved in the gelatinization and retrogradation of starch. Food Chemistry 66 : 181-187.
- Anand, J. C. and Maini, S. B. 1997. Utilisation of fruit and vegetable wastes. Indian Food Packer 45 : 45-63.
- AOAC. Official Methods of Analysis. 17th ed. Washington : Association of Official Analytical Chemists, 2005.

- Arogba, S.S. 1997. Physical, chemical and functional properties of Nigerian mango kernel and its process flour. Journal of the Science of Food and Agriculture 73 : 321-328.
- Arogba, S.S. 1999. The performance of processed mango (*Mangifera indica*) kernel flour in a model food system. Bioresource Technology 70 : 277-281.
- Asaoka, M., Okuno, K., and Fuwa, H. 1985. Effect of environmental temperature at the milky stage on amylose content and fine structure of amylopectin of waxy and nonwaxy endosperm starches of rice. Agricultural and Biological Chemistry 49 : 373-379.
- Bertoft, E. 2004. On the nature of categories of chains in amylopectin and their connection to the super helix model. Carbohydrate Polymers 57 : 211-224.
- Bertoft, E. 2007. Composition of clusters and their arrangement in potato amylopectin. Carbohydrate Polymers 68 : 433-446.
- Biliaderis, C. G. Structural transitions and related physical properties of starch. In R. L. Whistler, and J. N. BeMiller and. Starch Chemistry and Technology, pp. 293-373 New York : Academic Press, 2009.
- Bourne, M. C. Concept and measure. In Food technology and viscosity, New York : Academic Press, 1982.
- Bowers, J. 1992. Food Theory and Application. New York : Macmillian Publishing Company.
- Cameron, R. E., and Donald, A. M. 1992. A small-angle X-ray scattering study of the annealing and gelatinization of starch. Polymer 33 : 2628-2635.
- Cheetham, N. W. H., and Tao, L. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. Carbohydrate Polymers 36 : 277-284.
- Chung, H.-J., Liu, Q., Lee, L., Wei, D. 2011. Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents. Food Hydrocolloids 25 : 968-975.

- Chung, J. H., Jeong, H. Y., and Lim S. T. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch. Carbohydrate polymers 54 : 449-455.
- Dengate, H. N. Swelling, pasting, and gelling of wheat starch. In Y. Pomeranz (ed.). Advances in cereal science and technology, pp.49-82. USA : American Association of Cereal Chemists, 1984.
- Donovan, J. W. 1979. Phase transition of the starch-water system. Biopolymers 18 : 263-275.
- Donovan, J. W., and Mapes C. J. 1980. Multiple phase transitions of starches and năgeli amyloextrins. Starch - Stärke 32 : 190-193.
- El-Gammal O. E.-S. Chemical and technological studies on mango seed kernels for enhancing the organoleptic and keeping quality of one bakery products. Food Science and technology department, Faculty of Home Economics, Al-Azhar University.
- Farhat, I. A., Oguntona, T., and Neale, R. J. 1999. Characterisation of starches from west Africa yam. Journal Science food Agricultural 79 : 2105-2112.
- French, D. 1972. Fine structure of starch and its relationship to the organization of starch granules. Journal of the Japanese Society of Starch Science 19 : 8-25.
- Gallant, D. J., Bouchaet B., and Baldwin, P. M. 1997. Microscopy of starch: Evidence of a new level of granule organization. Carbohydrate Polymer 32 : 177-191.
- Garg, N., and Tandon, D. K. 1997. Amylase activity of *A. oryzae* grown on mango kernel after certain pretreatment and aeration. Indian Food Packer 51 : 26 - 29.
- Gidley, M. J., and Bulpin, P.V. 1989. Aggregation of amylose in aqueous systems: the effect of chain length on phase behavior and aggregation kinetics. Macromolecules 22 : 341-346
- Gunaratne, A., and Hoover R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymers 49 : 425-437.
- Hanai, T. HPLC A Practical Guide. Cambridge, UK : Bookcraft., 1999.

- Hanashiro, I., Abe, J.-I., and Hizukuri, S. 1996. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high performance anion exchange chromatography. Carbohydrate Research 283 : 151-159.
- Hemavathy, J., Prabhakar, J. V., and Sen, D. P. 1987. Composition of polar lipids of Alphonso mango (*Mangifera indica*) kernel. Journal of food science 52 : 833-834.
- Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. Carbohydrate Research 141 : 295-306.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. Carbohydrate Research 147 : 342-347.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. Carbohydrate Polymers 45 : 253-267.
- Imberty, A., Chanzy, H., Perez, s., Buleon, A. and Tran, V. 1988. The double helical nature of the crystalline part of A-starch. Journal Molecular Biology 201 : 365-378.
- Jane, J., Shen, L., Chen, J., Lim, S., Kasemsuwan, T., and Nip, W. K. 1992. Physical and Chemical Studies of Taro Starches and Flours. Cereal Chemistry 69 : 528-535
- Jane, J., Chen, Y. Y., Lee, L. F., McPherson, A. E., Wong, K. S., Radosavljevic, M., and Kasemsuwan, T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chemistry 76: 629-637.
- Jane, J.-I. Structural features of starch granules II. In R. L. Whistler, and J. N. BeMiller. Starch Chemistry and Technology, pp. 193-227. New York : Academic Press, 2009.

- Jenkins, P. J., Cameron, R. E., Donald, A. M., Bras, W., Derbyshire, G. E., Mant, G. R., and Ryan, A. J. 1994. In situ simultaneous small and wide angle x-ray scattering: A new technique to study starch gelatinization. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 32 : 1579-1583.
- Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Science Today 16 : 334-360.
- Juliano, B.O., Perez, C.M., Blakeney, A.B., Castillo, D.T., Kongseree, N., Laignelet, B., Lapis, E.T., Murty, V.V.S., Paule C.M., and Webb, B.D. 1981. International comparative testing on the amylose content. Starch/Starke. 33 : 157-162.
- Karim, A. A., Norziah, M. H., and Seow, C. C. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. Food Chemistry 71: 9-36.
- Kaur, M., Singh, N., Sandhu, K. S., and Guraya, H. S. 2004. Physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of starches separated from kernels of some Indian mango cultivars (*Mangifera indica* L.). Food Chemistry 85 : 131 -140.
- Kuakpetoon, D., and Wang, Y-J. 2007. Internal structure and physicochemical properties of corn starches as revealed by chemical surface gelatinization. Carbohydrate Research 342 : 2253-2263.
- Kubuki, T., Nakajima, H., Arai, M., Ueda, S., Kuwabara, Y., and Dosako, S. 2000. Characterization of novel antimicrobial compounds from mango (*Mangifera indica* L.) kernel seeds. Food Chemistry 71 : 61-66.
- Kugimiya, M., Donovan, J. W., and Wong, R. Y. 1980. Phase transitions in amylose-lipid complexes in starch: a calorimetric study. Starch/Staerke 32 : 265-270.
- Leach, H. W., McCowen, L. D., and Schoch, T. G. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. Cereal Chemistry 36 : 534-544.
- Levine, H., and Slade, L. 1986. A polymer physico-chemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). Carbohydrate Polymers 6 : 213-244.

- Lii, C.-Y., Lai, V. M. F., and Shen, M.-C. 2004. Changes in retrogradation properties of rice starches with amylose content and molecular properties. Cereal Chemistry Journal 81 : 392-398.
- López, O. P., Pérez, L. A. B., and López, M. G. 1994. Amylopectin: Structural, gelatinisation and retrogradation studies. Food Chemistry 50 : 411-417.
- Maaruf, A. G., Man, Y. B. C., Asbi, B. A., Junainah, A. H., and Kennedy, J. F. 2001. Effect of water content on the gelatinisation temperature of sago starch. Carbohydrate Polymers 46 : 331-337.
- Manningat, C. C., and Seib, P. A. 1992. Starch: Occurrence, isolation, and properties of starch granules, cited in AACC Short Course- Starch: Structure, Properties, and Food Uses. 1992. Chicago.
- Mason, W. R. Starch use in foods. In R. L. Whistler, and J. N. BeMiller. Starch Chemistry and Technology, pp. 746-795. New York : Academic Press, 2009.
- Miles, M. J., Morris, V. J., Orford, P. D., and Ring, S. G. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. Carbohydrate Research 135 : 271-281.
- Moore, C. O., Tuschhoff, J. V., Hastings, C. W., and Schanefelt, R. V. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, and E. F. Paschall. Starch Chemistry and Technology, pp. 575-591. New York : Academic Press, 1984.
- Morrison, W. R., Tester, R. F., Snape, C. E., Law, R., and Gidley, M. J. 1993. Swelling and gelatinization of cereal starch IV. Some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy and normal barley starches. Cereal Chemistry 70 : 385-391.
- Mua, J. P., Jackson, D. S. 1997. Relationships between functional attributes and molecular structure of amylose and amylopectin fractions of corn starch. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 : 3848-3854.
- Mukherjee, S. K. 1948. Comparative morphology of the species of *Mangifera Linn.* Bulletin of Botanical Society of Bengal 2 : 15-21.

- Newport scientific. 2007. Rapid visco analyzer series 4 (RVA-4) installation and operation manual. (n.p.).
- Nikuni, Z. 1978. Studies on Starch Granules. Starch/Stärke 30 : 105-111.
- Oates, C. G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. Trends in Food Science and Technology 8 : 375-382.
- Pérez, S., Baldwin, P. M., and Gallant, D. J. Structural features of starch granules I. In R. L. Whistler, and J. N. BeMiller. Starch Chemistry and Technology, pp. 149-188. New York : Academic Press, 2009.
- Putaux, J.-L., Buléon, A., and Chanzy, H. 2000. Network formation in dilute amylose and amylopectin studied by TEM. Macromolecules 33 : 6416-6422.
- Rickard, J. E., Asaoka, M., Blanshard, J. M. V. 1991. Review-the physicochemical properties of cassava starch. Tropical Science 31 : 189-207.
- Robin, J. P., Mercier, C., Charbonniere, R., and Guilbot, A. 1974. Lintnerized starches. gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. Cereal Chemists 51 : 389-405.
- Sandhu, K. S. and Singh, N. 2007. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. Food Chemistry 101 : 1499-1507.
- Sandhu, K. S., and Lim, S-T. 2008. Structural characteristics and in vitro digestibility of Mango kernel starches (*Mangifera indica* L.). Food Chemistry 107 : 92-97.
- Sasaki, T., Yasui, T., and Matsuki, J. 2000. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of starches from waxy and non-waxy wheat and their F1 seeds. Cereal Chemistry 77 : 58-63.
- Sasaki, T., and Matsuki, J. 1998. Effect of wheat starch structure on swelling power. Cereal Chemistry 75 : 525-529.

- Schoch, T.J. Swelling power and solubility of granular starches In R.L. Whistler, R.J. Smith, and J.N.BeMiller (eds.). Method in Carbohydrates Chemistry, Vol. VI. New York : Academic Press, 1964.
- Shannon, J. C., Garwood D. L., and Boyer C. D. Genetics and physiology of starch development. In R. L. Whistler, and J. N. BeMiller. Starch Chemistry and Technology, pp. 193-227. New York : Academic Press, 2009.
- Shi, Y. C., and Seib, P. A. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. Carbohydrate Research 227 : 131-145.
- Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., and Gill, B. S. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Food Chemistry 81 : 219-231.
- Singh, J., and Singh, N. 2003. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. Food Hydrocolloids 17 : 63-72.
- Slade, L., and Levine, H. 1988. Non-equilibrium melting of native granular starch: Part I. Temperature location of the glass transition associated with gelatinization of A-type cereal starches. Carbohydrate Polymer 8 : 183-208.
- Sriroth, K., Santisopasri, V., Petchalanuwat, C., Kurotjanawong, K., Piyachomkwan, K., and Oates, C.G. 1999. Cassava starch granule structure-function properties: influence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. Carbohydrate Polymer 38 : 161–170.
- Srichuwong, S., and Jane, J. 2007. Physicochemical properties of starch affected by molecular composition and structure: a review. Food Science and Biotechnology 16 : 663-674.
- Smith, R. J. 1979. Food Carbohydrate. Wesport, Connecticut : The AVI Publishing Co.
- Sodhi, S. N. and Singh, N. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. Food Chemistry 80 : 90-108.

- Soong, Y. Y., Barlow, P. J., and Perera, C. O. 2004. A cocktail of phytonutrients: Identification of polyphenols, phytosterols and tocopherols from mango (*Mangifera indica* L.) seed kernel. IFT Annual Meeting, Cited in Abdalla, A. M. A., Darwish, S. M., Ayad, E. H. E., and El-Hamahmy, R. M. 2007. Egyptian mango by-product 1. Compositional quality of mango seed kernel. Food Chemistry 103 : 1134-1140.
- Stevenson, D. G., Domoto, P. A. and Jane J.-L. 2006. Structures and functional properties of apple (*Malus domestica* Borkh) fruit starch. Carbohydrate Polymers 63 : 432-441.
- Swinkels, J. J. M. Sources of starch, its chemistry and physics. In G. M. A. van Beynum, and J. A. Roels (eds.). Starch Conversion Technology, pp.15-45. New York : Marcel Dekker, 1985.
- Takeda, Y., Hizukuri, S., and Juliano, B.O. 1986. Purification and structure of amylose from rice starch. Carbohydrate Research 148 : 299-308.
- Tang, M. C., and Copeland, L. 2007. Analysis of complexes between lipids and wheat starch. Carbohydrate Polymers 67 : 80-85.
- Tester, R. F., and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipid. Cereal Chemistry 67 : 551-557.
- Tester, R. F., Debon, J. J. S., Qi, X., Sommerville, X., Yousuf, M. D., and Yusuph, M. Amylopectin crystallization in starch. In L. T. Barsby, M. A. Donald and Frazier, J. P. Starch: Advances in structure and Function, pp. 97-102. Cambridge : MPG Book, 2001.
- Tziotis, A., Seetharaman, K., Wong, K.-S., Klucinec, J. D., Jane, J.-I., White, P. J. 2004. Structural properties of starch fractions isolated from normal and mutant corn genotypes by using different methods. Cereal Chemistry 81 : 611-620.
- Yoo, S.-H., and Jane, J.-I. 2002. Structural and physical characteristics of waxy and other wheat starches. Carbohydrate Polymers 49 : 297-305.
- Ward, K. E. J., Hoskeney, R. C., and Seib, P. A. 1994. Retrogradation of Amylopectin from Maize and Wheat Starches. Cereal Chemistry 71 : 150-155.

- Wang, L., and Wang, Y. J. 2001. Comparison of protease digestion at neutral pH with alkaline steep method for starch isolation. Cereal Chemistry 78 : 690-692.
- Zein, R. E., El-Bagoury, A. A., and Kassab, H. E. 2005. Chemical and nutritional studies on mango seed kernels. Journal of Agricultural Science, Mansoura University 30 : 3285-3299.
- Zobel, H. F. X-ray analysis of granule starches. In R. L. Whistler, R. L. Smith, J. N. Bemiller, and M. L. Wolform (eds.). Methods in Carbohydrate Chemistry, pp. 109 New York : Academic Press, 1964a.
- Zobel, H. F. 1988b. Starch crystal transformations and their industrial importance. Starch/Stärke 40 : 1-7.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น W350, Germany)
2. ถ้วยอลูมิเนียม
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
4. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีทดลอง

1. นำถ้วยอลูมิเนียมและฝาไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 – 102 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
2. นำไปใส่โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก (ก่อนชั่งน้ำหนักได้ปรับลูกน้ำของเครื่องชั่ง)
3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียมซึ่งอบแห้ง และทราบน้ำหนักแน่นอน
4. นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาไว้เป็นเวลาประมาณ 16 - 18 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ (น้ำหนักคงที่ คือน้ำหนักบวกลบไม่เกิน 0.02 กรัม)
5. ปิดฝาถ้วยอลูมิเนียม แล้วนำออกจากตู้อบไปใส่ในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก
6. คำนวณหาค่าความชื้นจากสมการ

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

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22

อุปกรณ์

1. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
2. Buchi scrubber (รุ่น B-414, Switzerland)
3. เครื่องกลั่นหาปริมาณไนโตรเจน (VELP scientific รุ่น UDK 127, USA)
4. เครื่องซึ่งละเอียดทัศนียม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (A.R. grade)
2. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.5 M
3. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.1 M
4. สารละลายกรดบอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 4% (w/v)
5. สารเร่งปฏิกิริยา (selenium reagent mixture) (A.R. grade)
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 45% (w/v)
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลายเมธิลเรด (A.R. grade) 1 กรัม

ในเมธานอล (A.R. grade) 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.25 – 1.00 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ใน Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างไปย่อยด้วยเครื่อง Buchi Digestion Unit โดยใช้ความร้อนเบอร์ 8 และปิดฝาด้านบนที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดไอน้ำ (scrubber) ย่อยตัวอย่างจนส่วนผสมในหลอดย่อยกลายเป็นสีน้ำตาลใส และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เทสารละลายกรดบอริกปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ต่อเข้ากับปลาย condenser ของเครื่องกลั่น (distillation unit)

5. นำหลอดตัวอย่างที่ผ่านการย่อยต่อเข้ากับเครื่องกลั่น แล้วนำสารสีดำของเครื่องกลั่น จุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำกลั่น ส่วนสายสีขาวจุ่มลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วตั้ง โปรแกรม distillation ดังนี้

NaOH (aq)	70	มิลลิลิตร
Boric acid (aq)	50	มิลลิลิตร
H ₂ O	50	มิลลิลิตร
Time	6	นาที

6. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนียขึ้น แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกจับไว้ด้วย สารละลายกรดบอริก จะได้สารละลายสีเขียวเมื่อกลั่นครบตามกำหนดเวลา

7. ล้างส่วนปลายของ condenser ด้วยน้ำกลั่นใส่ลงพลาสติกที่รองรับสิ่งที่กลั่นได้

8. นำสารละลายที่กลั่นได้ในพลาสติกทั้งหมดมาไตเตรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน ความเข้มข้น 0.1 N จนถึงจุดยุติเป็นสีม่วงแดง

9. ทำ blank แต่ไม่ต้องใส่ตัวอย่าง และวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

10. คำนวณหาปริมาณโปรตีน

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} \times 6.25$$

เมื่อ V_a คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_b คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรต blank (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรต มีหน่วยเป็น Normal

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13

อุปกรณ์

1. Soxhlet (Gerhardt รุ่น HC61, Germany)
2. เครื่อง evaporator (Eyela รุ่น SB-651, Japan)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน 2 กรัม ห่อด้วยกระดาษ Whatman No.1 ใส่ใน thimble
2. ใส่ thimble ซึ่งมีตัวอย่างบรรจุอยู่ในขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักแน่นอน
3. เติม petroleum ether ซึ่งใช้เป็นตัวสกัด 250 มิลลิลิตร ลงในขวดสกัด
4. สกัดไขมันเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง โดยปรับความร้อนให้หยดของตัวทำละลายกลับจากคอนเดนเซอร์มีอัตรา 300-360 หยดต่อนาที
5. ระเหยส่วนของ petroleum ether ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้ แล้วอบขวดสกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
6. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักขวดสกัด

$$\text{ไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง(กรัม)}}$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15

อุปกรณ์

1. คุชชีเบิล
2. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น W350, Germany)
3. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดพิเศษ 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (A.R. Grade) ความเข้มข้น 1.25% (v/v)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. Grade) ความเข้มข้น 1.25% (w/v)
3. เอทิลแอลกอฮอล์ 95% (A.R. grade)

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วทั้งหมดใส่ในปิ๊กเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในปิ๊กเกอร์ ต้มเดือดนาน 30 นาที สังเกตไม่ให้เกิดฟองของสารละลายลดลง หากลดลงปรับปริมาตรโดยใช้น้ำร้อน
3. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Buchner funnel ที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์กรด ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส
4. นำกากมาละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยควบคุมปริมาตรของสารละลายเช่นเดียวกับข้อ 2
5. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Bucher funnel ที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิเมตรปรอท ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์ต่าง
6. ล้างกากที่ได้ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร 2 ครั้ง
7. นำกากที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือน้ำหนักคงที่
8. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักจะได้น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา
9. นำตัวอย่างใส่ในครุชีเบิ้ลที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
10. เผาตัวอย่างบน hot plate จนหมดควัน ก่อนนำเข้าเตาเผาที่ 550 องศาเซลเซียส จนได้เป็นเถ้าสีขาว

11. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตัวอย่าง หลังเผา นำมาคำนวณหาปริมาณเส้นใย

$$\text{ปริมาณเส้นใยหยาบ (\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)}]}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการหาไขมัน (กรัม)}}$$

ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05

อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
2. ครุชีเบิล (Crusible)
3. เตาให้ความร้อน (Hot plate)
4. เครื่องชั่งละเอียดชนิด 4 ตำแหน่ง (Denver instrument รุ่น SI-234, Germany)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 3-5 กรัม ใส่ในครุชีเบิลที่เผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
2. นำตัวอย่างไปเผาโดยใช้ hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งตัวอย่างหมดควัน
3. นำตัวอย่างไปเผาต่อในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว
4. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักเถ้าที่ได้และคำนวณหาปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

ก.6 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีการคำนวณ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (% db) = $100 - (\%โปรตีน + \%ไขมัน + \%เส้นใยหยาบ + \%ไขมัน)$

ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1971) และ Juliano (1981)

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer, Thermo Spectronic รุ่น Genesys 10 UV, USA)
2. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)
3. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
4. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate stirrer รุ่น Gerattetechnik M 21/1)

สารเคมี

1. แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (บริษัท Sigma-ALDRICH, Germany) โดยแอมิโลสที่นำมาใช้ต้องอบแห้งไล่ความชื้นออกก่อน
2. Waxy corn starch (Amylopectin)
3. เอทิลแอลกอฮอล์ 95% (A.R. grade)
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
5. สารละลายกรดแอสติก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
6. สารละลายไอโอดีน เตรียมสารละลายไอโอดีน 0.20 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (A.R. grade) 2.00 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

วิธีการทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐาน

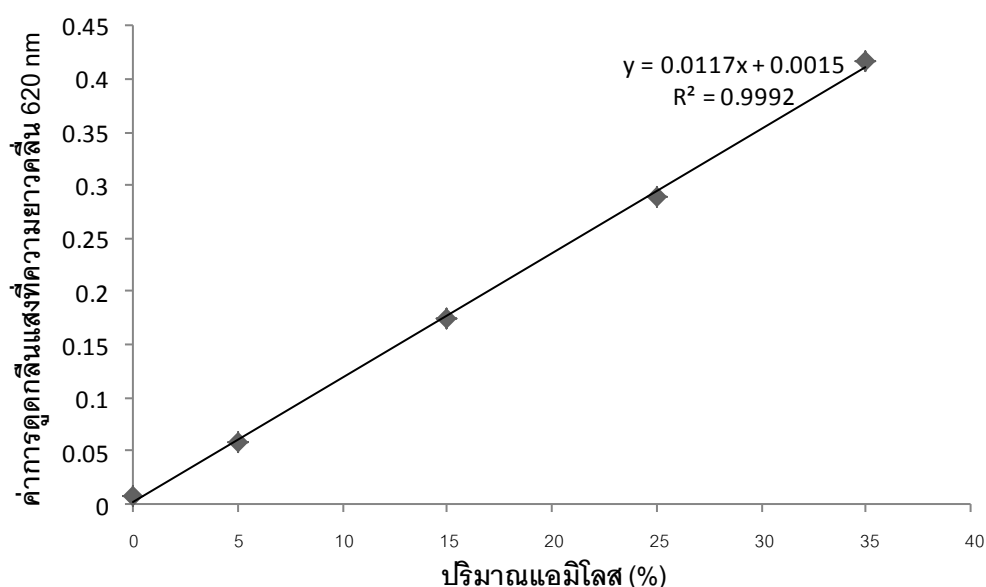
1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง และ Waxy corn starch ตามอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ ก.1 ใส่ในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนของแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง และ Waxy corn starch ที่ใช้ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน

หลอดที่	แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง		แอมิโลเพกทิน (Waxy corn starch)	
	ร้อยละ	ปริมาณ (mg/db)	ร้อยละ	ปริมาณ (mg/db)
1	0	0	100	100
2	5	5	95	95
3	15	15	85	85
4	25	25	75	75
5	35	35	65	65
6 (blank)	0	0	0	0

2. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารขนาดเล็ก ลงในหลอดทดลอง
3. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เทสารที่อยู่ในหลอดทดลองลงไปในช่วงวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตรชะสารที่อยู่ในหลอดทดลองประมาณ 3-5 ครั้ง) แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน และเขย่าให้เข้ากัน
5. ปิเปตสารปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จากขวดวัดปริมาตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร
6. ปิเปตน้ำกลั่นปริมาตร 5.0 มิลลิเมตร และปิเปตสารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง

7. ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และปิเปตน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 4.2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วเขย่าให้เข้ากัน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
8. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
9. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับร้อยละแอมิโลเพกทิน ดังรูปที่ ก.1



รูป ก.1 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างสตาร์ชซึ่งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh แล้ว ประมาณ 100 มิลลิกรัม ลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร
2. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารขนาดเล็ก ลงในหลอดทดลอง
3. ปิเปตเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
4. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. เทสสารที่อยู่ในหลอดทดลองลงไปในช่วงวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตรชะสารที่อยู่ในหลอดทดลองประมาณ 3-5 ครั้ง) แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน และเขย่าให้เข้ากัน
6. ปิเปตสารปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จากขวดวัดปริมาตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร
7. ปิเปตน้ำกลั่นปริมาตร 5.0 มิลลิเมตร และปิเปตสารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
8. ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และปิเปตน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 4.2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วเขย่าให้เข้ากัน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
9. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
10. จากค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ นำไปอ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณแอมิโลสเป็นร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง

ก.8 วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High performance size exclusion chromatography (HPSEC)

อุปกรณ์

1. เครื่อง High performance Size Exclusion Chromatography (Waters Corporation, Milford, MA) ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ refractive index detector (water 2414) (HPSEC-RI)
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Muti-RF, U)
3. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
4. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate stirrer รุ่น Gerattetechnik M 21/1)

สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
2. เอทิลแอลกอฮอล์ 95% (A.R. grade)

3. สารละลายกรดแอสซีติก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
4. สารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) (A.R. grade) ความเข้มข้น 90% (v/v)
5. สารละลายโซเดียมเฮกซะไซเตรต (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.02% (w/v)
6. Shodex Standard P-82 kit, Japan

วิธีการทดลอง

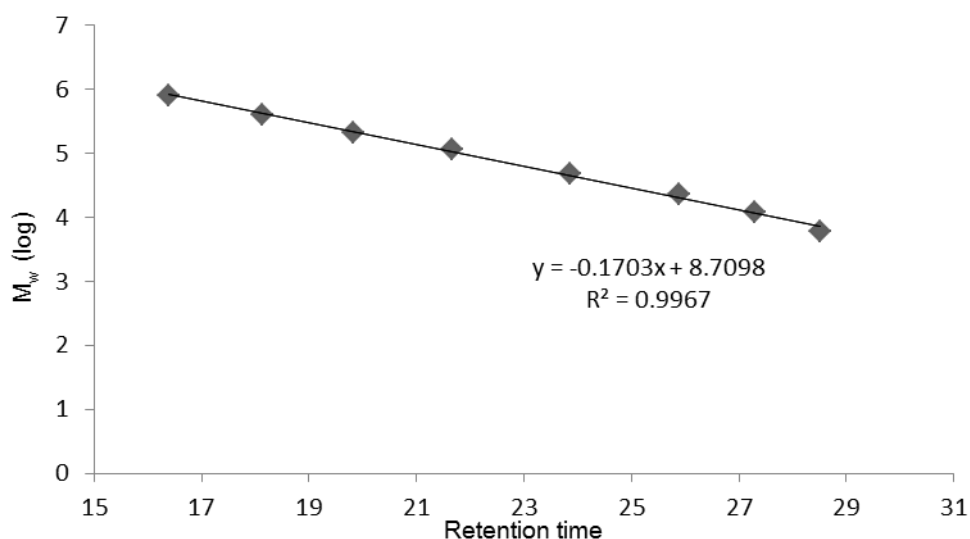
การสร้างกราฟมาตรฐาน (Shodex Standard P-82 kit, japan)

1. ชั่งพอลลูแลน (pullulan) ที่น้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ (ดังตารางที่ ก.2) จำนวน 1 มิลลิกรัม และปิเปตน้ำปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.2 น้ำหนักโมเลกุลของพอลลูแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน

Grade	$\bar{M}_w \times 10^4$
P-800	78.8
P-400	40.4
P-200	21.2
P-100	11.2
P-50	4.73
P-20	2.28
P-10	1.18
P-5	0.59

2. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงไปในห้องทดลอง แล้ววางบนเครื่องกวนสาร โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่าน membrane (nylon filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วฉีดเข้าเครื่อง HPLC



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

1. ชั่งแป้งประมาณ 0.03 กรัม และ ปิเปตสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 2.7 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารขนาดเล็กลงไป
2. นำไปให้วางบน เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสาร โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสาร ให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 N โดยใช้กระดาษทดสอบกรด-เบส (pH paper) ในการวัดค่าความเป็นกรดเบสของสาร
4. ตกตะกอนด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% โดยเติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 7 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
5. ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 x g เป็นเวลา 10 นาที
6. เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านล่างนำไปละลายด้วย สารละลายไดเมทิลซัลโฟลค์ ความเข้มข้น 90% ปริมาตร 6 มิลลิลิตร

7. นำไปให้วางบน เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสาร โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นกวนสารที่อุณหภูมิต่ำลง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และกวนสารที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPSEC

8. นำตัวอย่างที่ได้มากรองผ่าน membrane (nylon filter) ขนาด 5 ไมโครเมตร

9. ตัวอย่างที่กรองได้ นำมาฉีดเข้าเครื่อง HPSEC โดยใช้คอลัมน์ TOSHO TSK G4000 PWXL analytical column ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 40 องศาเซลเซียส โดยปริมาตรตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 400 ไมโครลิตร และใช้ deionized water ที่ผสมกับสารละลายโซเดียมเฮไซด ความเข้มข้น 0.02% (w/v) โดยผ่านแผ่นกรองของ Millipore ขนาด 0.45 ไมครอน และ degassed แล้วเป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) และใช้อัตราการไหล (flow rate) 3 มิลลิลิตร/นาที ตรวจสอบสารที่แยกด้วย refractive index detector

10. นำโครมาโตแกรมที่ได้มาวิเคราะห์หาเวลาที่แอมิโลสและแอมิโลเพกทินหลุดออกจากคอลัมน์ แล้วนำเวลาที่ได้อ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน

ก.9 วิเคราะห์การกระจายตามขนาดความยาวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน โดยแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช โดยวิธีที่ดัดแปลงจาก Takeda และคณะ (1968) จากนั้นนำมาย่อยตัดขั้วกิ่งด้วยเอนไซม์ isoamylase แล้ววิเคราะห์ขนาดของสายโซ่โดยใช้เทคนิค Ion exchange chromatography เครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) ดัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon และ Wang (2007)

อุปกรณ์

1. เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) (Freeze dry/Shell Freeze System, Labconco, USA)

2. เครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD)

3. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RF, USA)

4. อ่างน้ำพร้อมส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Bath circutor with water bath, Thermo Scientific รุ่น NESLAB EX 10, USA)
5. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
6. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate stirrer รุ่น Gerattetechnik M 21/1)

สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
2. แก๊สไนโตรเจน
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 โมลาร์
4. บิวทานอล (A.R. grade)
5. เอทิลแอลกอฮอล์ (A.R. grade)
6. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
7. เอนไซม์ isoamylase (บริษัท Hayashibara, Japan)
8. บัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (พีเอช 3.5)
9. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) 0.15 โมลาร์
10. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) 0.20 โมลาร์
11. สารละลายโซเดียมอะซิเตท (HPLC grade) 0.5 โมลาร์ ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) 0.15 โมลาร์

วิธีการทดลอง

การแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช

1. ชั่งสตาร์ชที่ผ่านการเอาไขมันออกแล้ว 0.1 กรัม และบีบเปิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง แล้วนำไปอัดแก๊สไนโตรเจน 30 วินาที จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร
2. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
3. ปรับค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้น บีบเปิดบิวทานอลปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรลงไป

4. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. นำไปทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ โดยใส่ไว้ในกระตักน้ำควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
7. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ $12,100 \times g$ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที แยกส่วนตะกอนด้านล่างทิ้ง นำส่วนใสด้านบนไปใช้ในขั้นตอนต่อไป
8. ปิเปตบิวทานอลปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรลงไปในหลอดทดลองที่มีส่วนใสด้านบนอยู่
9. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 – 7
10. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 40 มิลลิลิตร ลงในส่วนใสด้านบนที่ได้จากการปั่นเหวี่ยง แล้ววางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิต่ำ 24 ชั่วโมง
11. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ $1520 \times g$ นาน 15 นาที แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านล่างนำไปล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 30 มิลลิลิตร แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ $1520 \times g$ เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านบนนำไปละลายในน้ำ ปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
12. นำตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยแช่ลงในกล่องที่บรรจุน้ำแข็งแห้ง
13. นำตัวอย่างไปทำให้อยู่ในรูปผง โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบเยือกแห้ง
14. เก็บตัวอย่างที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปผงไว้ในขวดสีชาที่ปิดสนิท

การวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน

1. ชั่งตัวอย่างแอมิโลเพกทินของสตาร์ชที่แยกได้ 0.009 กรัม และน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 3.2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงไป แล้วนำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสาร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ
2. เติมบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (พีเอช 3.5) ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร

3. เติมเอนไซม์ isoamylase (1770 unit) ปริมาตร 30 ไมโครลิตร แล้วบ่มสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พร้อมกับเขย่าตลอดเวลาที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที

4. หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นกรองผ่าน membrane (nylon filter) ขนาด 5 ไมโครเมตร

5. นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน (chain length distribution) ด้วยเครื่องโดยใช้เครื่อง HPAEC-PAD โดยใช้คอลัมน์ Carbobac PA1 (250 x 4 mm) แปรผลในรูปของโครมาโตแกรม แล้วคำนวณในรูปร้อยละของ การกระจายตัวของกิ่งของแอมิโลเพกทิน ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 25 ไมโครลิตร สำหรับเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่ใช้ประกอบด้วย Eluent A คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 โมลาร์ Eluent B คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.20 โมลาร์ Eluent C คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท 0.5 โมลาร์ ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 โมลาร์ และ Eluent D คือ น้ำปราศจากไอออน โดยควบคุมโปรแกรมให้เป็นแบบ gradient และมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตรต่อนาที

ก.10 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) (ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL รุ่น JSM S410 LV, Japan)
2. เครื่องด้วยทองคำ 20-30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง ion sputter โดยใช้เทคนิค Hammer V Sputter Coater
3. บันทึกภาพโครงสร้างของตัวอย่างด้วย SEM ควบคุมที่ 20 kV ใช้กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า
4. วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากภาพที่บันทึกได้

ก.11 ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (microscope)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น CH30RF200, Japan)
2. แผ่นฟิล์มโพลาไรซ์
3. อุปกรณ์ถ่ายภาพแบบดิจิทัล

วิธีทดลอง

1. เตรียมสารละลายกลีเซอรินและน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วหยดลงบนสไลด์ 1-2 หยด
2. นำตัวอย่างสตาร์ชมาละลายกับสารละลายข้อ 1 บนสไลด์ให้ได้ความหนาของเม็ดสตาร์ชพอดีกับการถ่ายภาพ
3. ปรับระยะโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำที่สุด แล้วเห็นภาพชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 40 เท่า
4. ปรับเลนส์สไลด์ให้ได้องค์ประกอบของภาพที่ต้องการ และปรับความคมชัดของภาพโดยดูที่กล้องถ่ายภาพ
5. ตั้งระบบการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายภาพเป็นแบบอัตโนมัติ และปรับเป็นแบบไม่ใช้ Flash
6. ทำการถ่ายภาพเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงปกติ
7. นำฟิล์มโพลาไรซ์วางบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ และนำแผ่นฟิล์มอีก 1 แผ่น วางปิดบนสไลด์หรือกั้นระหว่างสไลด์กับอุปกรณ์ถ่ายภาพ
8. หมุนแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์ที่วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงให้ได้สีของพื้นภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช
9. ปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์

ก.12 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ช ด้วยเครื่อง Laser particle analyzer (ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์

1. Laser partical size analyzer (Masterizer S long bed ver. 2.11)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายตัวอย่างสตาร์ชความเข้มข้น 0.0320 – 0.0550% (w/v)
2. ประกอบเครื่องโดยใส่เลนส์ (300RF) และเซลล์ใส่ตัวอย่างเข้ากับตัวเครื่อง
3. เปิดเครื่องทิ้งไว้ 15 นาที (warming) เพื่อให้แสงเลเซอร์เข้าสู่สมดุล
4. ใช้น้ำกลั่นในการปรับค่า background ของเครื่องก่อนวิเคราะห์ตัวอย่าง
5. นำสารละลายสตาร์ชใส่ในเซลล์สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง รอจนกว่าค่า obscuration อยู่ระหว่าง 10 – 30%
6. ประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ หาขนาดอนุภาคสตาร์ชที่มีมากที่สุดและสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดสตาร์ช

ก.13 รูปแบบและปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ดัดแปลงจากวิธีของ Zobel (1964a)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany)

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างสตาร์ชโรยบน sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสตาร์ชเรียงตัวอัดกันแน่น
2. นำ sample plate ใส่เข้าเครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ที่ช่อง sample holder แล้วเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาที

3. วัดค่าในช่วงมุมที่ต้องการ โดยใช้คอมพิวเตอรืควบคุมสภาวะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

Target	:	Cu
Voltage	:	40 kV
Current	:	40 mA
Start Angle	:	4 degree
Stop Angle	:	35 degree
Increment	:	0.02 degree /step
Scan speed	:	0.3 sec /step
Detector	:	VANTEC-1 Detector (Super speed detector)

4. วิเคราะห์ X-ray Diffractometer pattern โดยเทียบค่า 2θ , d-spacing และ Intensity ที่ได้ลักษณะโครงสร้างผลึกของสารที่เป็น pattern มาตรฐาน ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก. 3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบ A, B และ C

Starch X-ray diffraction								
A type			B type			C type		
d-spacing A°	Intensity*	2θ	d-spacing A°	Intensity*	2θ	d-spacing A°	Intensity*	2θ
8.72	w-	10.10	15.80	m	5.59	15.4	w	5.73
7.70	w-	11.50	8.90	w-	9.93	8.82	w-	10
5.78	s	15.30	7.84	w-	11.10	7.65	w-	11.5
5.17	s	17.10	6.14	m	14.40	5.78	s	15.3
4.86	s-	18.20	5.16	s	17.20	5.12	s	17.3
4.37	m	20.30	4.54	w+	19.50	4.85	m	18.3
3.78	s	23.50	4.00	m	22.20	4.35	w-	20.4
3.30	w+	27.00	3.70	m-	24.00	3.78	m+	23.5
2.88	w	31.00	3.38	w	26.30	3.32	w	26.8
			2.60	w	34.40			

หมายเหตุ: *Intensity scale: strong (s), medium (m), weak (w), less than (-), and more than (+) ที่มา: Zobel (1964)

5. คำนวณหาค่า degree of crystallinity (คำนวณโดยใช้โปรแกรม Topas ,Version 3, ของบริษัท Bruker AXS) ดังนี้

$$\text{Degree of crystallinity (\%)} = \frac{A_c}{A_t} \times 100$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่ใต้กราฟของส่วนผลึก (พื้นที่ใต้พีค)

A_t คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดที่วัดจาก baseline

ก.14 สมบัติทางความร้อนระหว่างการเกิดเจลลิตีไนเซชัน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon and Wang (2007)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin–Elmer, USA) Intracooler (Perkin Elmer, Model 2P, USA)
2. Stainless Steel DSC Sample Pans
3. เครื่องมือสำหรับปิดผนึก DSC pan
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (OHAUS รุ่น Explorer, Switzerland)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่ทราบค่าความชื้นประมาณ 12 มิลลิกรัม ใส่ลงใน pan เติมน้ำกลั่นลงไปใน pan ประมาณ 24 ไมโครลิตร
2. ปิดผนึกฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก บ่ม pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืนเพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่สภาวะสมดุล
3. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (panเปล่า) ให้ เครื่อง scan ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 140 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature; T_o หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดพีค (peak temperature; T_p หน่วย °C) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature; T_c หน่วย °C) ในการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (conclusion temperature; T_c หน่วย °C) และ ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (enthalpy of gelatinization; ΔH หน่วย J/g)

ก.15 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้ว ด้วยเครื่อง Differential Scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon and Wang (2007)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin-Elmer, USA) Intracooler (Perkin Elmer, Model 2P, USA)
2. เครื่องมือสำหรับปิดผนึก DSC pan
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (OHAUS รุ่น Explorer, Switzerland)

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการศึกษาศสมบัติทางความร้อนระหว่างการเกิดเจลาตินในเซชัน (ก. 14) ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน เมื่อเก็บ pan จนครบตามระยะเวลาแล้วนำ pan ออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (panเปล่า) ให้เครื่อง scan ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 5 ถึง 135 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที
3. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature; T_o หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; T_p หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature; T_c หน่วย °C) ในการหลอมละลายผลึกของโมเลกุลสตาร์ชที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชัน และ ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการหลอมละลายผลึก (enthalpy of gelatinization; ΔH หน่วย J/g)

ก.16 กำลังการพองตัวและการละลายน้ำของสตาร์ช ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch (1964)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RF, USA)
2. อ่างน้ำพร้อมส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Bath circutor with water bath, Thermo Scientific รุ่น NESLAB EX 10, USA)
3. ตู้อบลมร้อน (Mettmert รุ่น W 350, Germany)

4. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีการทดลอง

1. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร อบอุ่นให้แห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักแห้งของสตาร์ช 0.50 กรัม ใส่ในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำกลั่นลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง 15 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
3. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่บรรจุตัวอย่างแล้ว แผลงในอ่างพร้อมส่วนควบคุมอุณหภูมิ โดยจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส
4. ให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แท่งแก้วกวนทุกๆ 5 นาที
5. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงมาเช็ดด้านนอกที่เปียกน้ำให้แห้งสนิท
6. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 6,000 x g อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
7. แยกส่วนใสออกจากตะกอน โดยใช้ปิเปตดูดส่วนใสออกมาใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว พยายามดูดส่วนใสออกให้มากที่สุด (ระวังอย่าให้ตะกอนสตาร์ชติดมาด้วย)
8. นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่บรรจุตะกอนสตาร์ชไปชั่งน้ำหนัก
9. นำส่วนใสในภาชนะไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออก จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักสตาร์ชที่ละลายน้ำ
10. คำนวณหาค่าล้างการพองตัว และการละลายของสตาร์ชตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย (\% solubility)} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่ละลายน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว (swelling power)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนสตาร์ช (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง (กรัม)} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

ก.17 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer โดยวิเคราะห์ตามวิธี AACC method 76-71

อุปกรณ์

1. เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (New Scientific รุ่น 4D, Australia) พร้อมถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can) และใบพัด (paddle)
2. คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่อง RVA
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น AB204, Switzerland)

วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่อง RVA ให้นาน 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่อง
2. ปรับสภาวะการทำงานของเครื่อง RVA โดยใช้ temperature profile: STD 1 ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.4 Temperature profile STD 1

เวลา (นาที.วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)
0.00	50	960
0.10	50	160
1.00	50	160
4.42	95	160
7.12	95	160
11.00	50	160
13.00	50	160

ที่มา: AACC Method 76-21

3. ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 25.00 ± 0.1 มิลลิลิตร (สำหรับแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 14) ใส่ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can)
4. ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 3.00 ± 0.01 กรัม ใส่ลงใน can ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว นำหนักตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง โดยทั่วไปแนะนำตามตารางที่ ก.4

5. ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมา และตั้งขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับกันเป็นก้อนที่ผิวน้ำหรือติดที่ใบพัดกวน ให้ทำซ้ำอีกครั้ง

6. นำภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ใส่ใบพัดแล้วสอดเข้าไปในเครื่อง RVA กดมอเตอร์เพื่อให้เครื่อง RVA ทำงาน เสร็จแล้วนำถ้วยตัวอย่างออกมา เครื่อง RVA จะรายงานการวิเคราะห์เป็นค่าต่างๆ ดังนี้

6.1 เวลาที่เกิด peak ของความหนืด (peak time) มีหน่วยเป็นนาที

6.2 อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) มีหน่วยเป็น °C

6.3 อุณหภูมิที่เกิด peak (peak temperature) มีหน่วยเป็น °C

6.4 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีหน่วยเป็น RVU

6.5 ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) มีหน่วย RVU

6.6 ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (final viscosity) มีหน่วยเป็น RVU

6.7 ความหนืดต่ำสุด (trough) มีหน่วยเป็น RVU

6.8 ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) มีหน่วยเป็น RVU

ตารางที่ ก.5 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความเหนียวด้วยเครื่อง RVA

ชนิดตัวอย่าง	จำนวน (กรัม)
เมล็ดพืชทั้งหมด (บดรวมเปลือก)	4.00
แป้ง (flour)	3.50
สตาร์ชปกติ (native starch)	
จากธรรมชาติชนิดไม่มียาง (non-waxy cereal)	3.00
จากธรรมชาติชนิดมียาง (waxy cereal)	3.00
มันฝรั่ง	2.00 ¹
มันสำปะหลัง	2.50
สตาร์ชดัดแปร (modified starch)	
Acid modified	2.00 - 4.00 ²
Oxidised	2.00 - 4.00 ²
Substituted	2.50
Cross-linked	2.50

¹ใช้ 1.2 กรัม ถ้าเป็นสตาร์ชที่ไม่ได้ผลิตมาเพื่อวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์

² จำนวนที่ใช้ขึ้นอยู่กับ degree of modification

ก.18 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Texture Analyser
ดัดแปลงวิธีจาก Sandhu และ Singh (2007)

อุปกรณ์

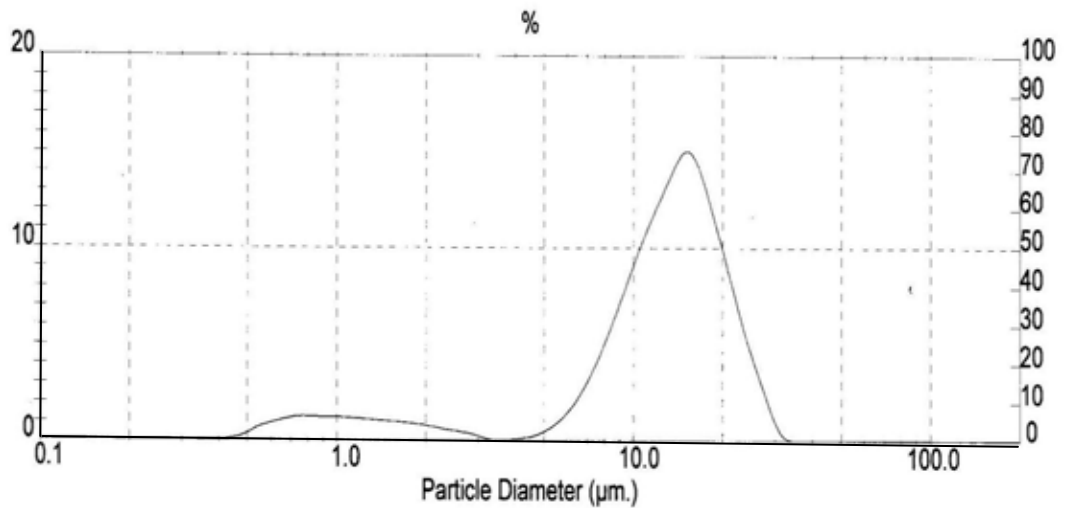
1. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) TA-XT. Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK
2. หัววัดอะลูมิเนียมทรงกระบอก (cylinder probe) P/6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) 6 มิลลิเมตร

วิธีการทดลอง

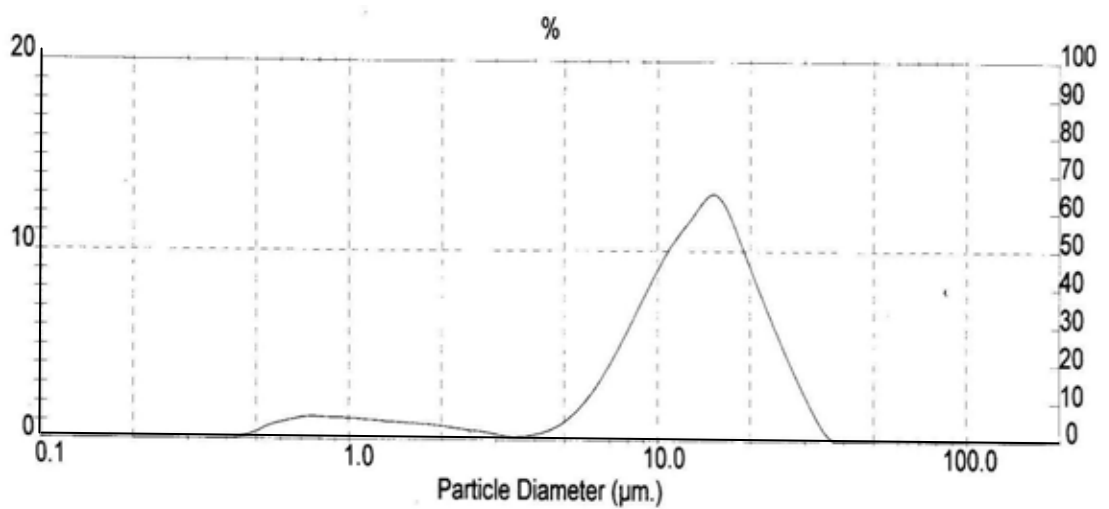
1. เจลตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือเจลตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความเหนียวด้วย RVA โดยจะนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมงก่อนจะนำมาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส
2. ประกอบหัววัดรูปทรงกระบอก (P/6) เข้ากับเครื่อง Texture analyzer
3. ทำการ calibrate force โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 5,000 กรัม
4. calibrate probe โดยตั้งระยะหัววัดให้ห่างจากแท่นวางตัวอย่าง 50 มิลลิเมตร
5. เลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ TPA แล้วสั่งให้เครื่องทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมโดยจะสั่งเจาะตัวอย่างด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และกำหนดให้เจาะตัวอย่างลึกลงไป 10 มิลลิเมตร
6. วางเจลสตาร์ชบนแท่นวางตัวอย่าง โดยให้แนวหัววัดอยู่พอดีตรงกลางของเจลสตาร์ช
7. ควบคุมสถานะและการทำงานของเครื่องด้วยคอมพิวเตอร์ เสร็จแล้วทำการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส
8. บันทึกค่าที่ประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความแข็งของเจล (Hardness, หน่วยเป็น กรัม)

ภาคผนวก ข

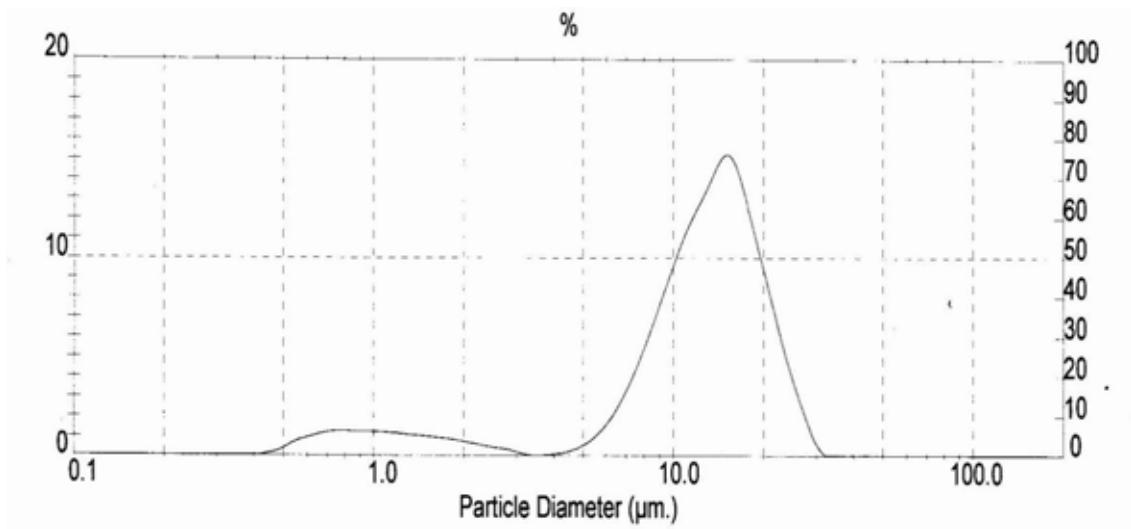
รายละเอียดรูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม



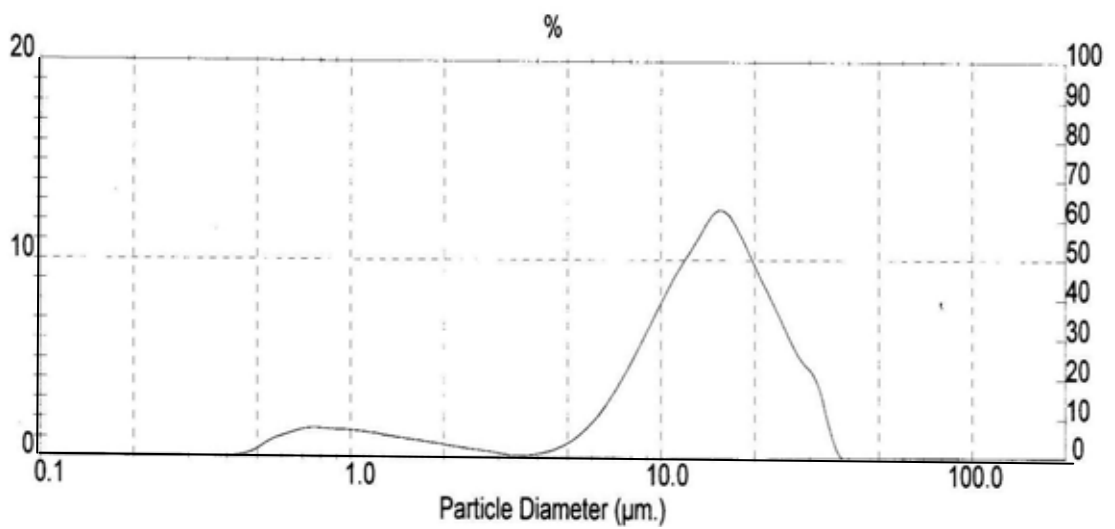
รูปที่ ข.1 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสสารในสสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้



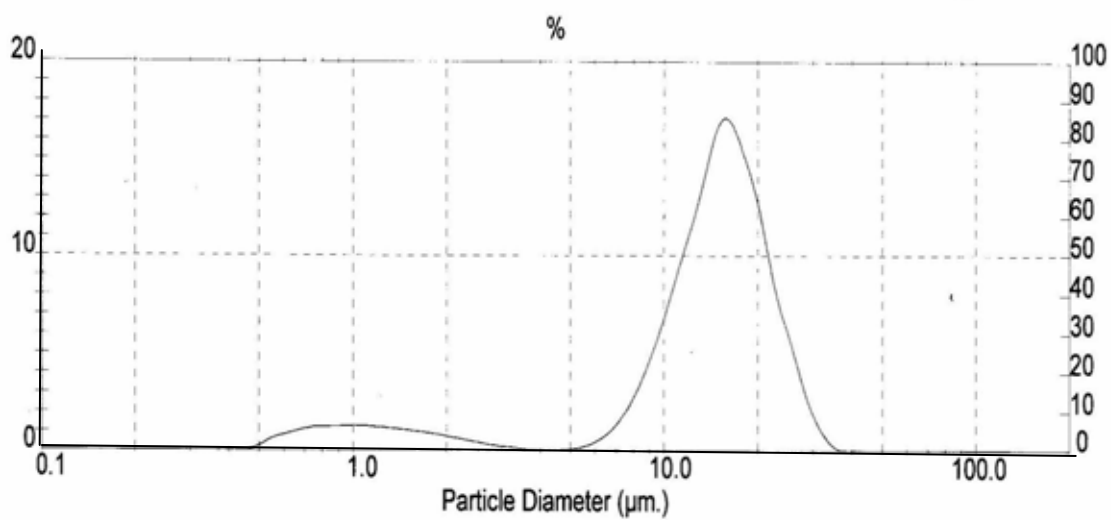
รูปที่ ข.2 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสสารในสสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว



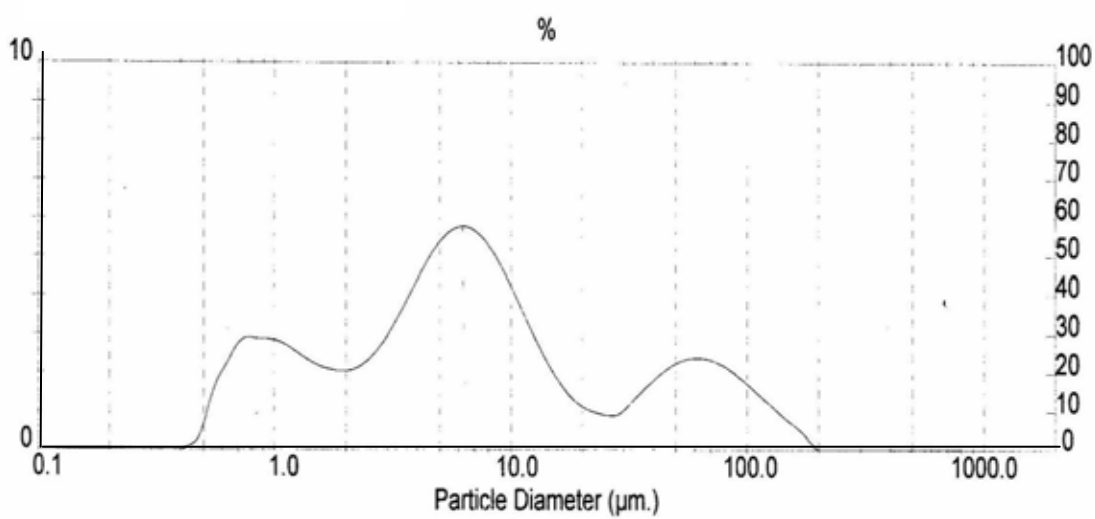
รูปที่ ข.3 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพังก์โซค
อนันต์



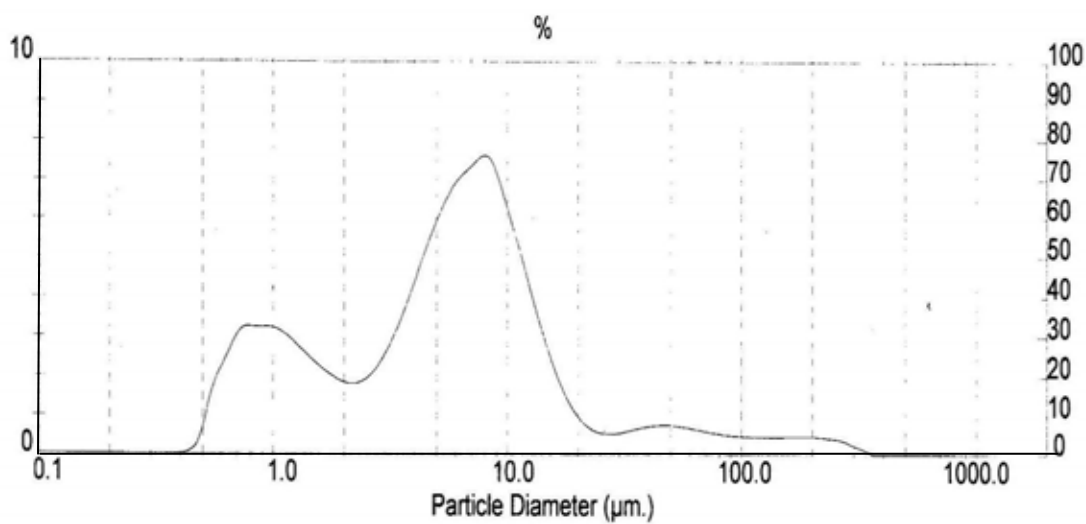
รูปที่ ข.4 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชในสตาร์ชข้าวโพด



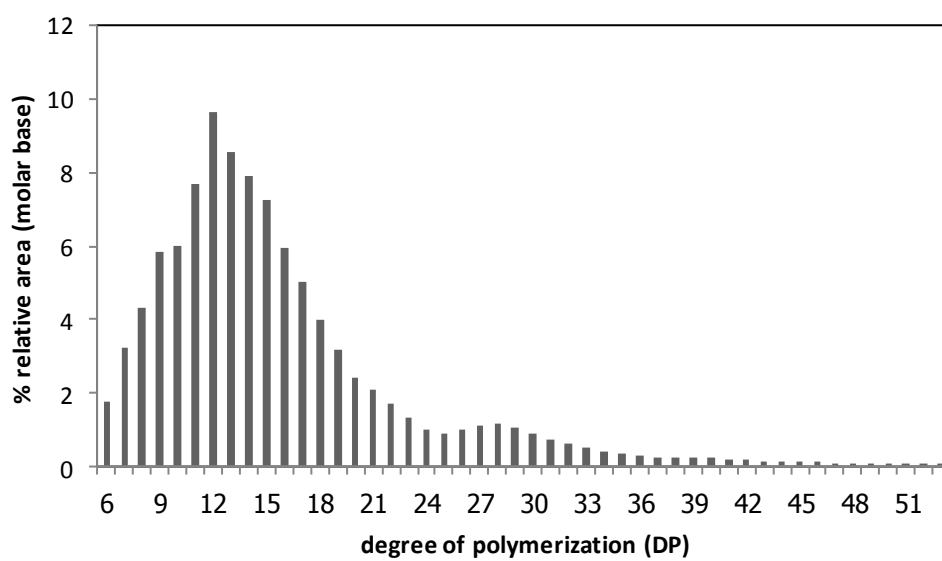
รูปที่ ข.5 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชีในสตาร์ชีมันสำปะหลัง



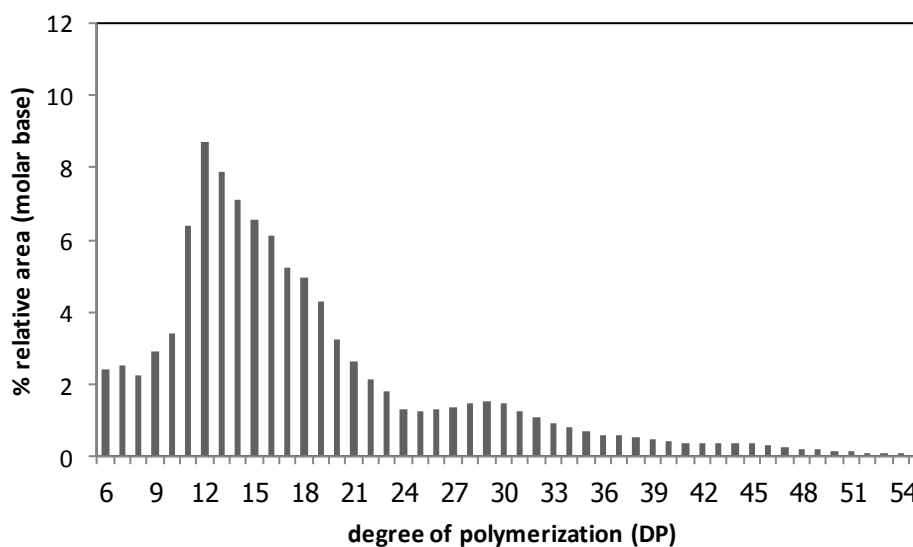
รูปที่ ข.6 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชีในสตาร์ชีข้าวหอมมะลิ



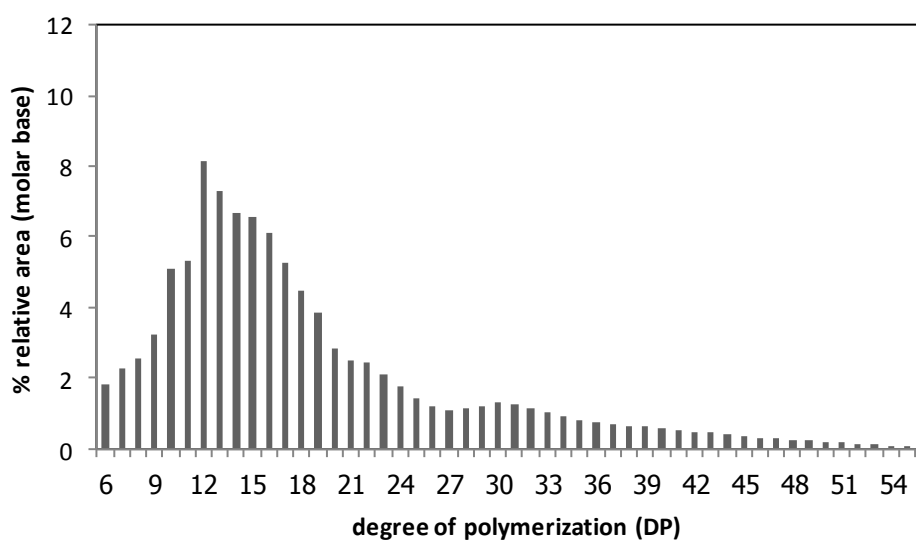
รูปที่ ๗.7 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาเร็กซ์ในสตาเร็กซ์ข้าวเจียงพัทลุง



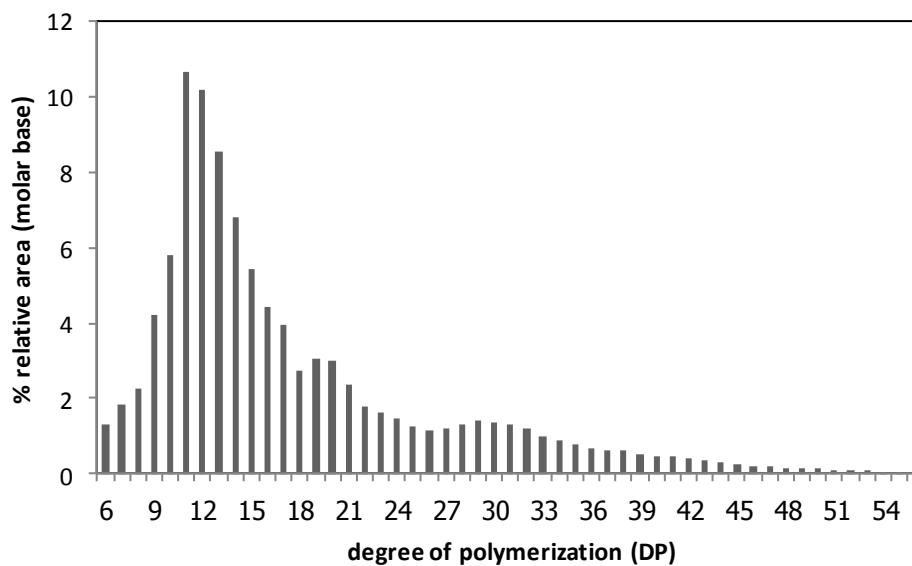
รูปที่ ๗.8 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาเร็กซ์จากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้



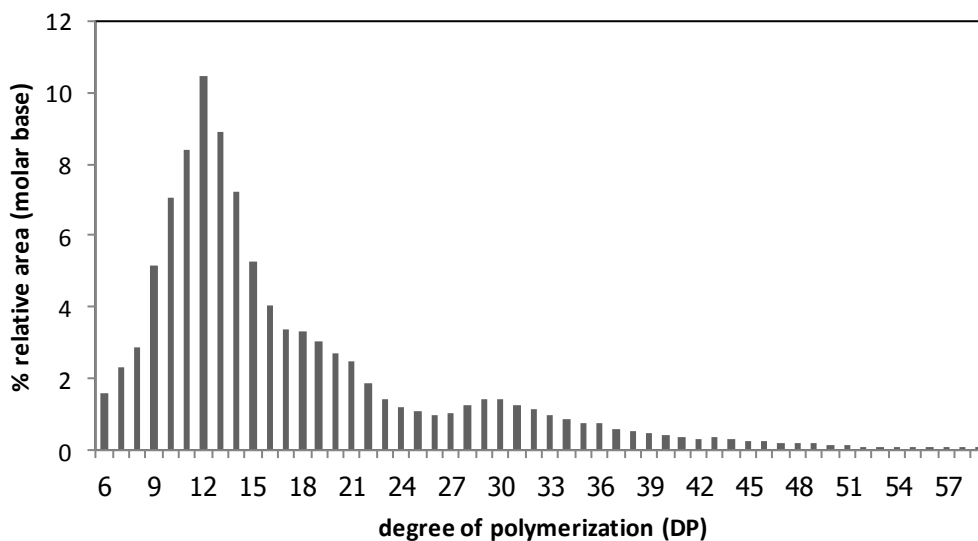
รูปที่ ข.9 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง
พันธุ์แก้ว



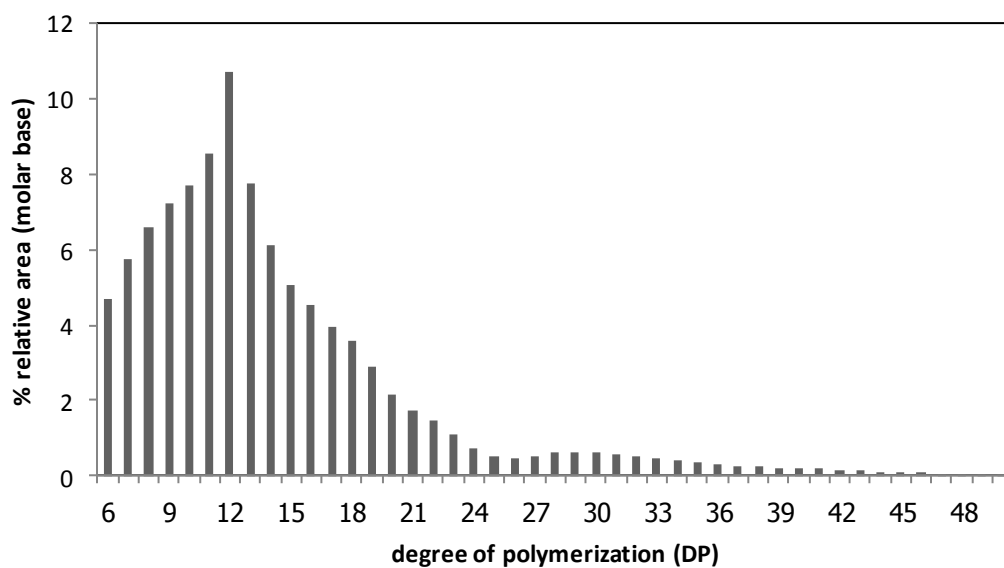
รูปที่ ข.10 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง
พันธุ์โชคอนันต์



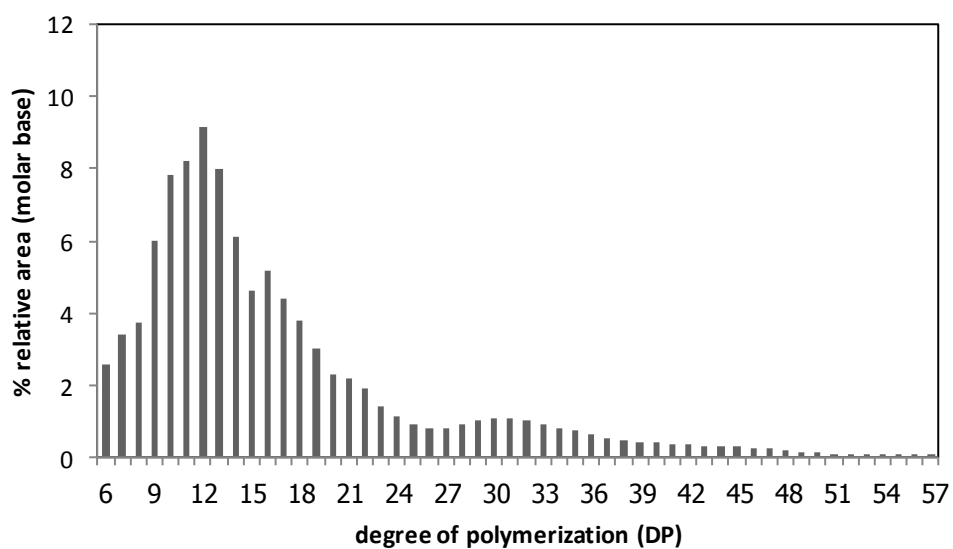
รูปที่ ข.11 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโดเพกทินของสตาร์สีขาวโพด



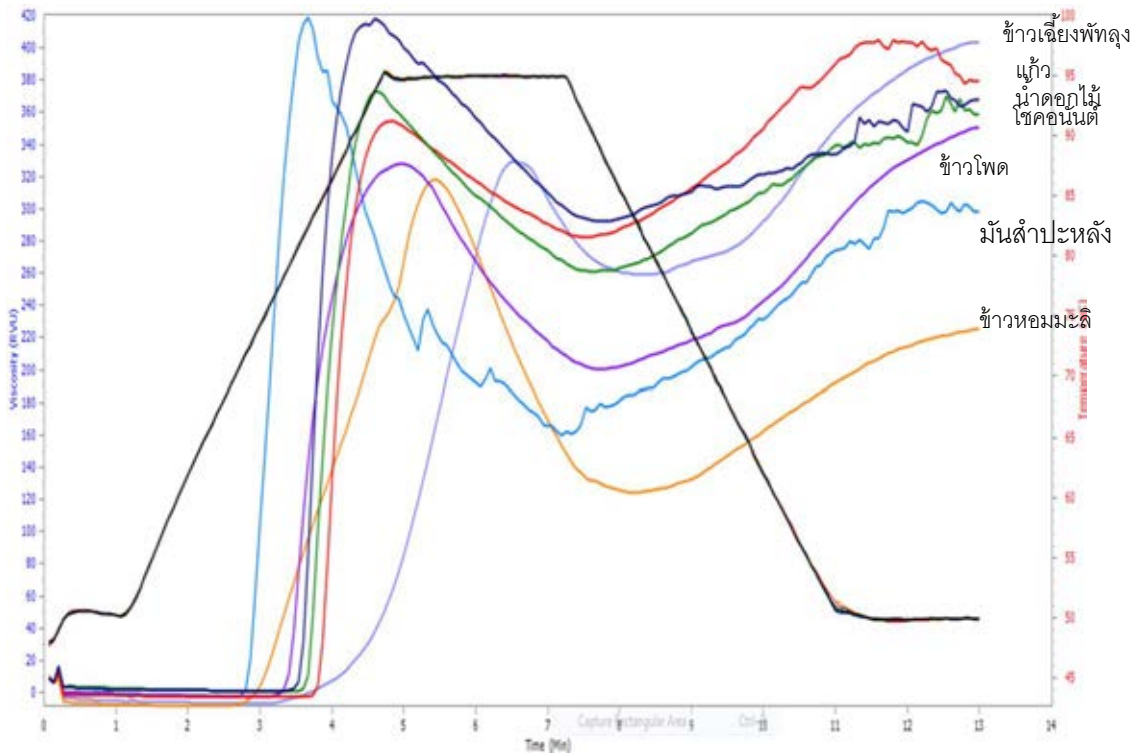
รูปที่ ข.12 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโดเพกทินของสตาร์ไขมันสำปะหลัง



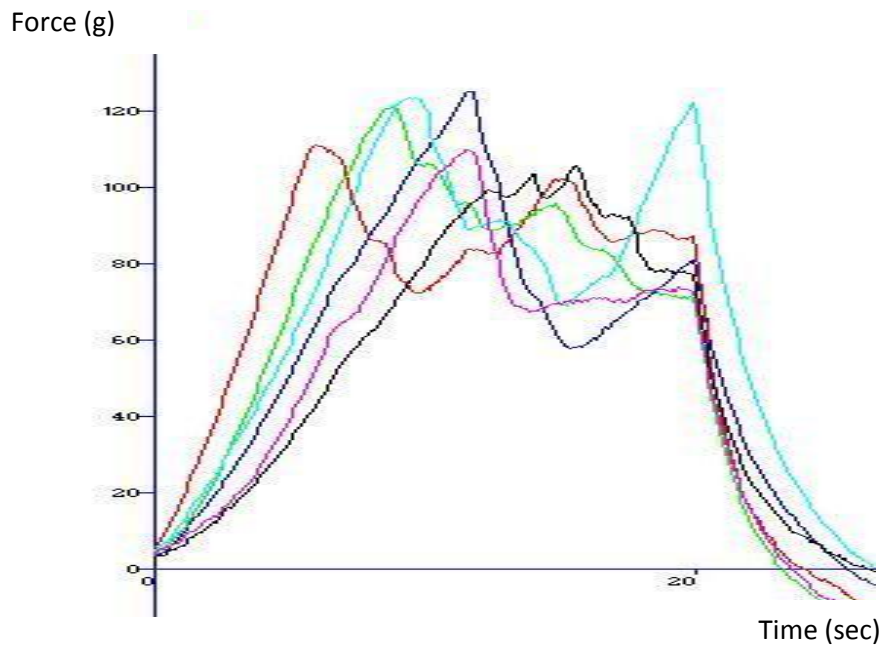
รูปที่ ข.13 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวหอมมะลิ



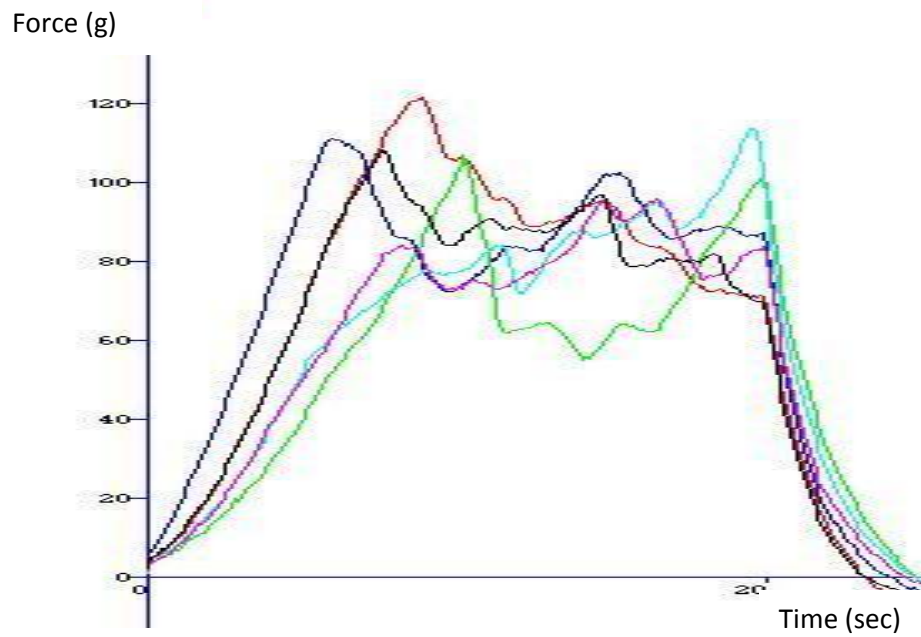
รูปที่ ข.14 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์พัลลึง



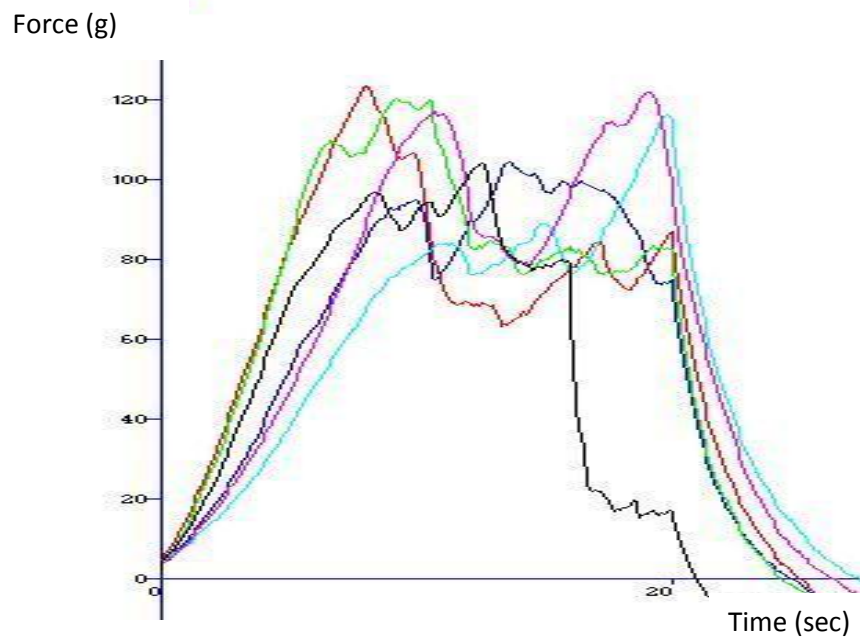
รูปที่ ข.15 กราฟสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ



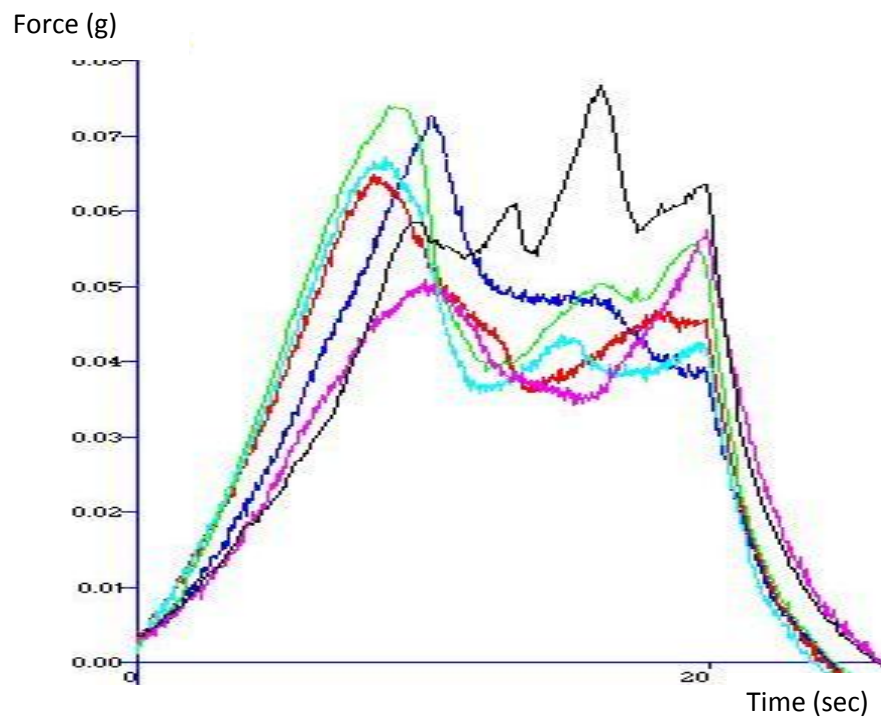
รูปที่ ข.16 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธ์น้ำดอกไม้ (6 ข้า การทดลอง)



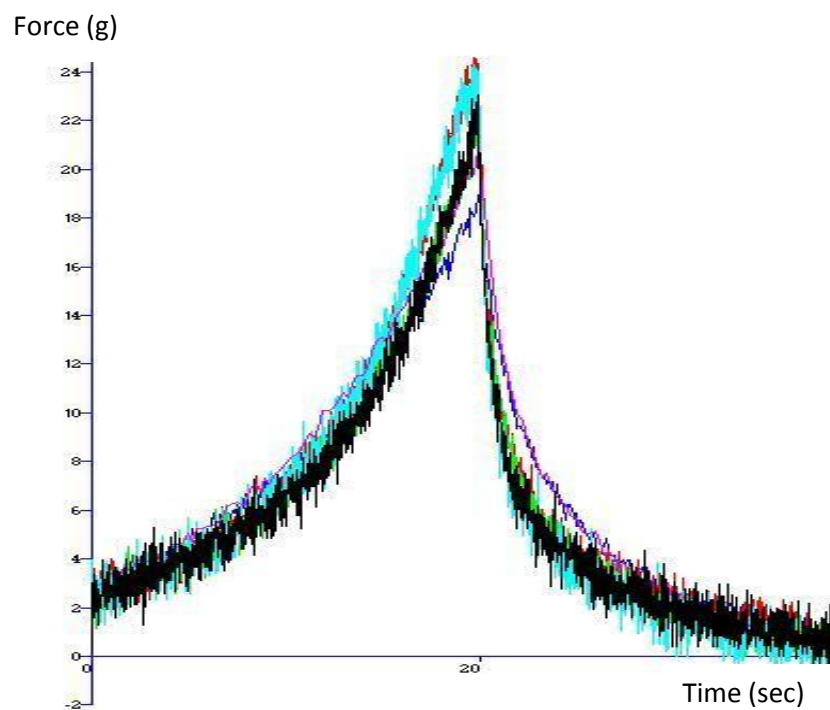
รูปที่ ข.17 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว (6 ซ้ำการทดลอง)



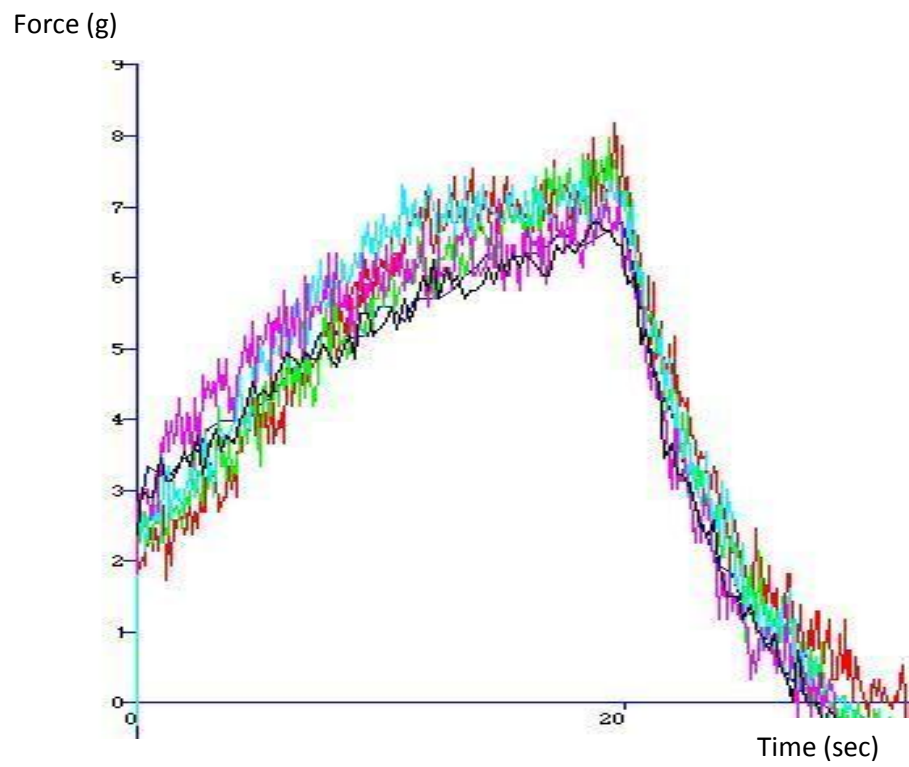
รูปที่ ข.18 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ (6 ซ้ำการทดลอง)



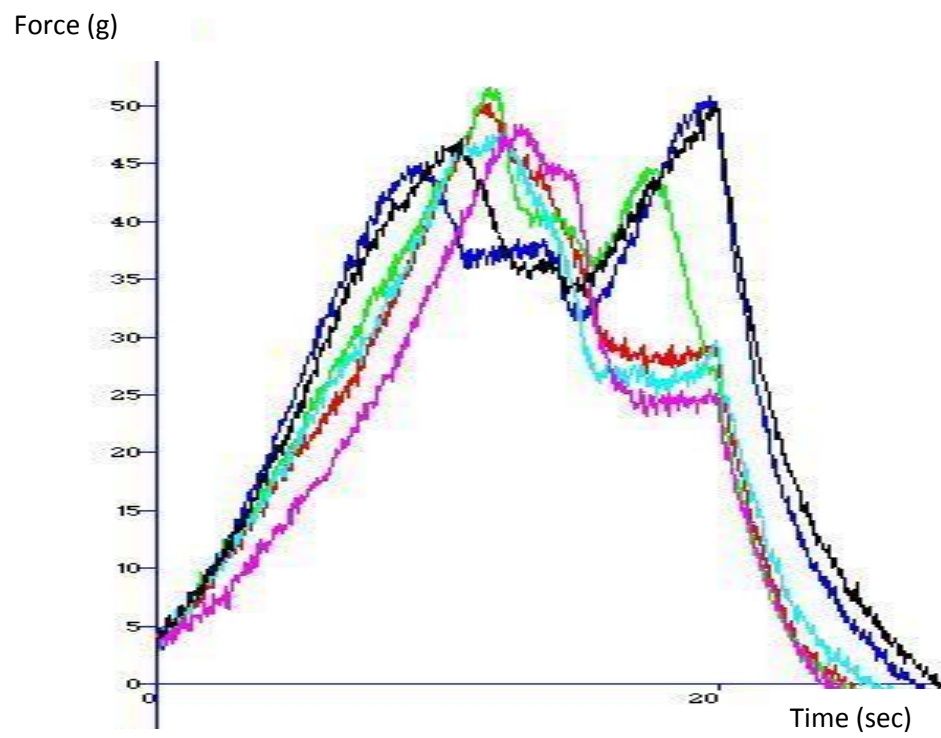
รูปที่ ข.19 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวโพด (6 ซ้ำการทดลอง)



รูปที่ ข.20 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง (6 ซ้ำการทดลอง)



รูปที่ ข.21 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ฟิชหัวหอมมะลิ (6 ซ้ำการทดลอง)



รูปที่ ข.22 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ฟิชหัวเจียงพัทลุง (6 ซ้ำการทดลอง)

ภาคผนวก ค

รายละเอียดข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
9.9325	8.8981	1519	44.7
11.1622	7.9204	1689	49.8
11.3261	7.8062	1685	49.6
15.1088	5.8593	2988	88.0
17.1983	5.1518	3395	100.0
17.9820	4.9290	3209	94.5
20.1763	4.3976	2007	59.1
23.1725	3.8353	2713	79.9
26.3517	3.3794	1470	43.3
30.5998	2.9192	1376	40.5

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์แก้ว

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.0603	8.7854	1508	42.8
11.0696	7.9865	1663	47.1
11.2834	7.8356	1696	48.1
11.4796	7.7022	1688	47.8
15.0381	5.8866	3130	88.7
15.2830	5.7929	3026	85.8
17.1378	5.1699	5327	100.0
17.9513	4.9373	3434	97.4
20.0626	4.4223	2041	57.9
22.8578	3.8874	2776	78.7
23.0700	3.8521	2906	82.4
26.6613	3.3409	1525	43.2
29.0965	3.0665	1389	39.4
30.4635	2.9320	1510	42.8

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.1318	8.7235	1489	41.8
11.3031	7.8220	1717	48.2
15.0705	5.8740	3101	87.1
15.2407	5.8088	3079	86.5
17.2675	5.1313	3561	100.0
17.9153	4.9472	3407	95.7
18.1507	4.8836	3360	94.4
20.1989	4.3927	2079	58.4
20.6269	4.3026	1951	54.8
23.1292	3.8424	2898	81.4
25.6282	3.4731	1550	43.5
26.3701	3.3771	1532	43.0
26.9023	3.3115	1532	43.0
28.6692	3.1113	1377	38.7
26.2293	3.0656	1390	39.0
30.4508	2.9332	1475	41.4

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวโพด

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.1888	8.6749	792	41.2
11.4783	7.7030	942	49.2
15.1425	5.8463	1736	90.3
17.1640	5.1620	1923	100.0
17.3800	5.0984	1900	98.8
17.9267	4.9441	1890	98.3
18.0489	4.9109	1877	97.6
18.2435	4.8589	1818	94.5
19.8467	4.4699	1331	69.2
20.1691	4.3992	1319	68.6
23.1183	3.8442	1480	76.9
26.7527	3.3296	820	42.6
28.9274	3.0841	738	38.4

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ซมันสำปะหลัง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.0580	8.7874	921	38.5
11.3594	7.7834	1071	44.7
11.5875	7.6307	1077	45.0
15.1337	5.8497	2126	88.8
17.1276	5.1729	2394	100.0
17.3749	5.0998	2363	98.7
17.9388	4.9408	2333	97.4
20.1647	4.4001	1366	57.0
23.1185	3.8442	1827	76.3
26.6320	3.3445	953	39.8

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ข้าวหอมมะลิ

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.2203	8.6482	821	41.6
11.5283	7.6697	934	47.3
15.1669	5.8369	1801	91.2
15.5406	5.7712	1756	89.0
17.1277	5.1729	1962	99.4
17.3102	5.1187	1974	100.0
17.9523	4.9371	1925	97.5
18.1574	4.8818	1899	96.2
20.0535	4.4243	1311	66.4
23.0939	3.8482	1524	77.2
26.4329	3.3692	846	42.9
26.8682	3.3156	806	40.8

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ข้าวเหนียวพัทลุง

Angle 2-Theta	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
10.0804	8.7679	796	41.1
11.3127	7.8154	938	48.4
15.2018	5.8236	1724	89.0
17.3050	5.1203	1937	100.0
17.8307	4.9704	1863	96.2
18.0224	4.6180	1916	98.9
18.1558	4.8822	1917	99.0
18.3607	4.8282	1873	96.7
20.0802	4.4185	1300	67.1
23.1269	3.8428	1580	81.5
26.7076	3.3352	803	41.5
30.4406	2.9341	784	40.5
30.7327	2.9069	784	40.5

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วง
(สำหรับตารางที่ 4.1)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
องค์ประกอบทางเคมี	ความชื้น	2	99.20*
	Error	6	0.22
โปรตีน		2	3.67*
	Error	6	0.03
ไขมัน		2	1.73*
	Error	6	0.08
เถ้า		2	0.87*
	Error	6	0.01
เส้นใยหยาบ		2	0.64*
	Error	6	0.01
คาร์โบไฮเดรต		2	7.42*
	Error	6	0.26

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (สำหรับตารางที่ 4.2)

SOV	df	MS
ปริมาณผลผลิต	2	151.96*
Error	6	0.42

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.3)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
องค์ประกอบทางเคมี	ความชื้น	6	6.85*
	Error	14	0.16
โปรตีน		6	0.22*
	Error	14	0.00
ไขมัน		6	0.13*
	Error	14	0.01
เถ้า		6	0.02*
	Error	14	0.00
แอมิโลส		6	238.50*
	Error	14	3.85

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.4)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยน้ำหนัก	แอมิโลส	6	$9.22 \times 10^{10*}$
	Error	14	4.50×10^7
	แอมิโลเพกทิน	6	$0.22 \times 10^{10*}$
	Error	14	2.67×10^9
ความยาวสายโซ่	แอมิโลส	6	$1.44 \times 10^{6*}$
	Error	14	$0.10 \times 10^{6*}$

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการกระจายตัวตามขนาดและความยาวสายโซ่กิ่งก้านของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.5)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
การกระจายตัวตาม ขนาดและความยาว สายโซ่กิ่งก้าน	ความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้าน	6	4.11*
	Error	7	0.05
สายโซ่กิ่งก้านชนิด A	สายโซ่กิ่งก้านชนิด A	6	120.76*
	Error	7	1.88
สายโซ่กิ่งก้านชนิด B1	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B1	6	41.00*
	Error	7	1.08
สายโซ่กิ่งก้านชนิด B2	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B2	6	17.16*
	Error	7	0.25
สายโซ่กิ่งก้านชนิด B3+	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B3+	6	4.91*
	Error	7	0.20*

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.6)

SOV	df	MS
ขนาดเฉลี่ย	6	15.28*
Error	14	0.09
ค่าฐานนิยม	6	42.06*
Error	14	0.00

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.8)

พีค 1 (การสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทิน)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	6	61.37*
	Error	14	0.71
	Peak temperature	6	61.30*
	Error	14	0.19
	Conclusion temperature	6	47.58*
	Error	14	0.71
	Enthalpy	6	11.65*
	Error	14	0.34

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

พีค 2 (การสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	5	42.57*
	Error	12	4.96
	Peak temperature	5	12.47*
	Error	12	2.06
	Conclusion temperature	5	21.98*
	Error	12	4.34
	Enthalpy	5	1.17*
	Error	12	0.37

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ๓.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.9)

พีค 1 (การสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทิน)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	6	17.51*
	Error	14	2.24
	Peak temperature	6	10.75*
	Error	14	0.25
	Conclusion temperature	6	18.18*
	Error	14	0.35
	Enthalpy	6	7.62*
	Error	14	0.27

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

พีค 2 (การสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	5	27.14*
	Error	12	7.33
	Peak temperature	5	12.01*
	Error	12	2.30
	Conclusion temperature	5	7.67*
	Error	12	1.16
	Enthalpy	5	1.32*
	Error	12	0.18

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C (สำหรับตารางที่ 4.10)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
กำลังการพองตัว	60 °C	6	6.28*
	Error	14	0.13
	70 °C	6	63.97*
	Error	14	0.19
	80 °C	6	543.12*
	Error	14	0.69
	90 °C	6	823.85*
	Error	14	2.46

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 °C (สำหรับตารางที่ 4.11)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
การละลาย	60 °C	6	5.95*
	Error	14	0.34
	70 °C	6	59.83*
	Error	14	0.22
	80 °C	6	106.10*
	Error	14	0.78
	90 °C	6	428.21*
	Error	14	4.94

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.12)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
สมบัติทางความหนืด	Pasting temperature	6	131.08*
	Error	14	0.23
	Peak Viscosity	6	7140.53*
	Error	14	7.79
	Trough	6	16708.25*
	Error	14	14.33
	Breakdown	6	17724.09*
	Error	14	18.61
	Final viscosity	6	13945.21*
	Error	14	25.78
	Setback	6	2099.77*
	Error	14	18.47

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ง.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชของสตาร์ชจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง และสตาร์ชจากแหล่งอื่นๆ (สำหรับตารางที่ 4.13)

ลักษณะการทดสอบ	SOV	df	MS
ลักษณะเนื้อสัมผัส	Hardness	6	12,361.58*
	Error	35	37.14

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวขวัญแก้ว แซ่เอ็ง เกิดวันที่ 19 มกราคม 2530 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จ การศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาอาหารและโภชนาการ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

ผลงานวิจัย

เสนอผลงานระดับนานาชาติเรื่อง PASTING PROPERTIES AND GEL TEXTURE OF STARCH BLEND BETWEEN MANGO SEED KERNEL STARCHES AND THAI RICE STARCH (CHIANG PHATTHALUNG CULTIVAR) ในงานประชุมทางวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (Paccon 2012) ระหว่างวันที่ 11-13 มกราคม 2555 ณ The Empress Convention Center จังหวัดเชียงใหม่