

สมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวอร์ และสตาร์ชจากมันเทศ *Ipomoea batatas* L.
และมันฝรั่ง *Solanum tuberosum* L. ที่ปลูกในประเทศไทย

นางสาวเบญจพร พวงมาลี

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (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 FLOUR AND STARCH ISOLATED FROM SWEET
POTATO *Ipomoea batatas* L. AND POTATO *Solanum tuberosum* L. GROWN IN
THAILAND

Miss Benjaporn Pongmalee

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวอร์ และสแตร์ชจาก
มันเทศ *Ipomoea batatas* L. และมันฝรั่ง
Solanum tuberosum L. ที่ปลูกในประเทศไทย

โดย

นางสาวเบญจพร พวงมาลี

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ตรีษ กวัคเพชญ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ตันตระเชียว)

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์)

เบญจพร พวงมาลี : สมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์ และสตาร์ชจากมันเทศ *Ipomoea batatas* L. และมันฝรั่ง *Solanum tuberosum* L. ที่ปลูกในประเทศไทย

(PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF FLOUR AND STARCH ISOLATED FROM SWEET POTATO *Ipomoea batatas* L. AND POTATO *Solanum tuberosum* L. GROWN IN THAILAND)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ตรีษ กวัคเพฑูรย์, 175 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์และสตาร์ชมันเทศ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ 0106-1 (เนื้ สีขาว) พจ.265-1 (เนื้ สีเหลืองเข้ม) T101 (เนื้ สีส้ม) และ พจ.65-3 (เนื้ สีม่วงเข้ม) ที่ปลูกมากในประเทศไทย เปรียบเทียบกับฟลาวัวร์และสตาร์ชมันฝรั่ง (พันธุ์แอตแลนติก) เม็ดสตาร์ชของมันเทศทุกสายพันธุ์มีรูปร่างที่หลากหลาย ได้แก่ วงกลม วงรี หลายเหลี่ยม และรูปร่างอื่น ในขณะที่เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายรูปไข่เป็นส่วนใหญ่ โดยเม็ดสตาร์ชมันเทศจะมีขนาด (1.51 – 28.5 μm) ซึ่งเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง (5.88- 40.0 μm) เม็ดสตาร์ชทั้งสองชนิดมีพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก ร้าว สตาร์ชมันเทศมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ X ในขณะที่สตาร์ชมันฝรั่งมีรูปแบบผลึกแบบ B เม็ดสตาร์ชทั้งสองแหล่งแสดงลักษณะ birefringence ภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่ชัดเจน นอกจากนี้ ยังพบว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งและมันเทศต่างสายพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในปริมาณไขมัน แอมิโลส ฟอสฟอรัส ขนาดโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และสัดส่วนตามขนาดของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ทางเคมีกายภาพของสตาร์ชทั้งสองแหล่ง โดยพบว่าสตาร์ชมันเทศมีอุณหภูมิ (T_0 , T_p และ T_c) ของการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ในขณะที่ใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_{Gel}) ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามผลึกที่เกิดจากการเรียงตัวขึ้นใหม่จากขบวนการรีโทรเลเดชันของสตาร์ชมันเทศ เริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิ ($T_{0, Retro}$, $T_{p, Retro}$ และ $T_{c, Retro}$) ต่ำกว่า แต่ใช้พลังงานในการหลอมละลาย (ΔH_{Retro}) ที่สูงกว่าผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ของสตาร์ชมันฝรั่ง เม็ดสตาร์ชมันเทศมีกำลังการพองตัวและการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสที่ต่ำกว่าเม็ดสตาร์ช มันฝรั่ง สอดคล้องกับอุณหภูมิเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ของสตาร์ชมันเทศที่สูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเฉพาะสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้ สีขาว) สตาร์ชมันเทศมีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ค่อนข้างต่ำกว่า แต่มีค่าการคืนตัว (Setback) สูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเฉพาะสตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้ สีส้ม) เจลสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ สีเหลืองเข้ม) มีค่าความแข็งของเจลสูงที่สุด ฟลาวัวร์มันฝรั่งและฟลาวัวร์มันเทศต่างสายพันธุ์มีความแตกต่างในสมบัติทางความหนืด และความแข็งของเจล ไปในแนวทางเดียวกันกับที่พบในสตาร์ชมันเทศ แต่จะมีความแตกต่างอยู่บ้าง ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณ โปรตีน ไขมัน และเส้นใยอาหารของฟลาวัวร์สกัดจากฟลาวัวร์มันเทศทุกสายพันธุ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้ สีม่วงเข้ม) มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าฟลาวัวร์มันฝรั่ง

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

5372275823 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : SWEET POTATO / POTATO / FLOUR / STARCH / PHYSICOCHEMICAL

BENJAPORN POUNGMALEE : PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF FLOUR AND STARCH ISOLATED FROM SWEET POTATO *Ipomoea batatas* L. AND POTATO *Solanum tuberosum* L. GROWN IN THAILAND. ADVISOR : DARIS KUAKPETOON, Ph.D., 175 pp.

The objective of this research was to investigate the physicochemical properties of flour and starch of four sweet potato species including 0106-1 (white), PJ.265-1 (deep-yellow), T101 (orange) and PJ.65-3 (deep-purple) mainly grown in Thailand by comparing to those of potato (Atlantic cultivar). The granules of all four sweet potato starch varieties were in many shapes: circle, oval, polyhedron and cup-like shapes; while, potato starch granules were mostly in oval shape. The size of all sweet potato starch granules (1.51 – 28.5 μm) was smaller than those of potato starch granules (5.88- 40.0 μm). Starch granules from both sources had smooth surface and no cracks. According to X-ray diffraction patterns, all sweet potato starch granules exhibited type-C crystalline structure; while, potato starch granules exhibited type-B crystalline structure. Under polarized light, starch granules from both sources clearly shown birefringence characteristic. Potato and sweet potato starches were significantly different ($p \leq 0.05$) in their fat, amylose, and phosphorus contents and also in their average molecular weight of amylose and amylopectin and chain-length distribution of amylopectin. These differences influenced on physicochemical properties of both starches. All sweet potato starches had higher gelatinization temperatures (T_o , T_p , and T_c) but lower gelatinization enthalpy (ΔH_{Gel}) than potato starch. However, their retrograded crystals melted at lower temperatures ($T_{o, \text{Retro}}$, $T_{p, \text{Retro}}$, and $T_{c, \text{Retro}}$) but required higher melting enthalpy (ΔH_{Retro}) than those of potato starch. The granules of all sweet potato starches were lower in swelling power and solubility at 85 °C than those of potato starch. Likewise, the pasting temperatures of sweet potato starch; especially 0106-1 (white), was higher than that of potato starch. All sweet potato starches had lower peak viscosity and breakdown than potato starch. However, they had higher setback; especially T101 (orange), than potato starch. The starch gel of sweet potato; PJ. 265-1 (deep-yellow), had the highest hardness among all starch gels. Sweet potato flours from different varieties were different in their pasting property and gel hardness in the same trend as found in their starches. However, there were some irrelevances depending on protein, fat and crude fiber content in the flours. The extracts from all sweet potato flours; especially PJ. 65-3 (deep-purple), were higher in total phenolic content and antioxidant activities than that of potato flour.

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

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

Academic Year :2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ตรีษ กวัคเพฑูรย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไข ปัญหา ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลและให้ความช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด รวมถึงกรุณา ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ตันตระเธียร ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน ลำดับ วงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลามาดูตรวจสอบ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางใน การปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุน สนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรพิจิตร และศูนย์วิจัยเกษตรหลวงเชียงใหม่ กรม วิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในการทำวิจัย

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ทั้งทางด้านวิชาการและ จริยธรรม ซึ่งเป็นรากฐานอย่างดียิ่งในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนๆ ปริญญาโท-เอก ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และพี่ๆ ปริญญาโท-เอก คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยี ทางอาหารทุกท่าน สำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้การสนับสนุนด้าน การศึกษาและคอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ตลอดจนคอยให้กำลังใจเสมอมา จนผู้วิจัย สำเร็จการศึกษา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยยินดีรับข้อเสนอแนะและ ขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 มันเทศ (<i>Ipomoea batatas</i> L.).....	3
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของมันเทศ.....	4
2.3 ฟลาวัวร์และสตาร์ช.....	6
2.4 อนุมูลิอิสระและวิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน.....	6
2.5 สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ.....	14
2.6 สตาร์ช.....	19
2.7 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 วัตถุประสงค์ และการเตรียมวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.2 ขั้ว นตอน และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	49
3.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศและมันฝรั่ง.....	54
4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันเทศ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันฝรั่ง.....	55
4.3 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์มันเทศ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์มันฝรั่ง.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	100

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	119
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม.....	152
ภาคผนวก ค รูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม.....	158
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	28
2.2	คุณสมบัติในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ.....	33
2.3	การประยุกต์ใช้ฟลาวร์มันเทศต่างสายพันธุ์.....	42
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และหัวมันฝรั่ง.....	55
4.2	ปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่งสด.....	56
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	57
4.4	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	60
4.5	การกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	61
4.6	ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และมันฝรั่ง.....	66
4.7	ปริมาณผลึกและปริมาณสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินชนิด B1 ของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง.....	69
4.8	สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	70
4.9	สมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	74
4.10	ปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	76
4.11	กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	77
4.12	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	80
4.13	ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	84
4.14	องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง.....	87
4.15	ค่าสีของฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง.....	89

ตารางที่	หน้า
4.16 สมบัติทางความเหนียวของฟลาวัวร์จากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง.....	90
4.17 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจากฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง...	94
4.18 ปริมาณพีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง.....	95
4.19 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง.....	97
ก.1 อัตราส่วนของแอมิโลสบริสุทธิ์ จากมันฝรั่ง และWaxy corn starch ที่ใช้ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน.....	127
ก. 2 หนักรีดน้ำโมเลกุลของพอลิแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน.....	130
ก. 3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชที่เป็นแบบA, B และ C.....	137
ก. 4 Temperature profile STD1.....	141
ก. 5 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความเหนียวด้วยเครื่องRVA.....	142
ก. 6 วิธีการเตรียมสารละลาย BHA และ Vitamin C.....	147
ก. 7 วิธีการเตรียมสารสกัดฟลาวัวร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	148
ก. 8 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox.....	150
ข. 1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์0106-1 (เนื้อ อสีขาว).....	152
ข. 2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม).....	153
ข. 3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์T101 (เนื้อ อสีส้ม).....	154
ข. 4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม).....	155
ข. 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์Atlantic (เนื้อ อสีครีม).....	156
ง. 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และหัวมันฝรั่ง.....	165
ง. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่งสด.....	165
ง. 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	166

ตารางที่	หน้า
ง. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	166
ง. 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำ หนักของสตาร์ช จากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	167
ง. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ย ของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และ สตาร์ชมันฝรั่ง.....	167
ง. 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ ต่างๆ และมันฝรั่ง.....	168
ง. 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	168
ง. 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึก ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และ สตาร์ชมันฝรั่ง.....	169
ง. 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจาก มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	169
ง. 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 55 – 85 °C.....	170
ง. 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 55 – 85 °C.....	170
ง. 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากมันเทศ สายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	171
ง. 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อ อสัมผัสของเจลสตาร์ชจกสตาร์ช มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	171
ง. 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันเทศสาย พันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง.....	172
ง. 16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของฟลาวอร์มันเทศ สายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง.....	172

ตารางที่	หน้า
ง. 17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความเหนียวของฟลาวร์จากมันเทศ สายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง.....	173
ง. 18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อ อสัมผัสของเจลจากฟลาวร์มันเทศ สายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง.....	173
ง. 19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวร์ มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง.....	174
ง. 20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและ กำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง...	174

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หัวมันเทศ และต้นมันเทศ..... 3
2.2	กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน..... 8
2.3	สูตรโครงสร้างของ Trolox..... 10
2.4	ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้น ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power..... 11
2.5	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl..... 13
2.6	สูตรโครงสร้างของกรดฟีนอลิก..... 14
2.7	สูตรโครงสร้างแกนของฟลาโวนอยด์..... 15
2.8	สูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่พบมากในมันเทศเนื้อ อสีม่วงแดง..... 16
2.9	สูตรโครงสร้างของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์..... 17
2.10	โครงสร้างของแอมิโลส..... 20
2.11	โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสกับไขมัน..... 21
2.12	โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน..... 22
2.13	แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแบบ cluster..... 23
2.14	ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C..... 24
2.15	โครงสร้างแบบ backbone ของแอมิโลเพกทิน..... 25
2.16	โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช..... 29
2.17	รูปแบบผลึกของเม็ดสตาร์ชแบบ A และแบบ B..... 30
2.18	การเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดสตาร์ช..... 31
2.19	ตัวอย่างเส้นกราฟความร้อนที่ได้จากการเกิดเจลาติโนเซชัน..... 36
2.20	ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA..... 38
3.1	หัวมันฝรั่งและมันเทศที่ใช้ในงานวิจัย..... 46
3.2	ฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งที่ใช้ในงานวิจัย..... 48
4.1	การกระจายตัวตามขนาดของโมเลกุลสตาร์ชจากมันเทศต่างสายพันธุ์ และสตาร์ชมันฝรั่ง..... 59

รูปที่	หน้า
4.2	ลักษณะเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 63
4.3	รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ภายใต้งแสงปกติ และภายใต้งแสงโพลาไรซ์..... 65
4.4	รูปแบบการหักเหรังสี X-ray ของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง..... 68
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันของค่าEC ₅₀ และ ความสามารถในการรีดิวซ์ของสารสกัดพลาวาร์..... 98
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันของค่าEC ₅₀ และ ค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดพลาวาร์..... 99
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันตรงของความสามารถ ในการรีดิวซ์ ด้วยวิธี FRAP และค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดพลาวาร์..... 99
ก. 1	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส..... 128
ก. 2	กราฟมาตรฐานที่ใช้การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน..... 131
ก. 3	ตัวอย่างลักษณะกราฟจากเครื่องTexture Analyser ซึ่งวัดด้วยวิธี texture profile analysis..... 144
ก. 4	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด..... 146
ก. 5	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธีFRAP..... 151
ค. 1	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์0106-1 (เนื้อ อสีขาว)..... 158
ค. 2	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม)..... 158
ค. 3	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์T101 (เนื้อ อสีส้ม)..... 159
ค. 4	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม)..... 159
ค. 5	ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันฝรั่งพันธุ์Atlantic..... 160

รูปที่	หน้า
ค. 6 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว).....	160
ค. 7 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม).....	161
ค. 8 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม).....	161
ค. 9 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม).....	162
ค. 10 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์ Atlantic.....	162
ค. 11 กราฟสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเทศต่าง สายพันธุ์และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	163
ค. 12 กราฟสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการรีโทรเกรดชัน ของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	163
ค. 13 กราฟสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์และสตาร์ชมันฝรั่ง.....	164
ค. 14 กราฟสมบัติทางความหนืดของฟลาวัวร์เทศต่างสายพันธุ์และฟลาวัวร์มันฝรั่ง.....	164

บทที่ 1

บทนำ

มันเทศ (*Ipomoea batatas* L.) จัดเป็นพืชหัวที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง เนื่องจากสามารถปลูกได้ทุกภาคในประเทศไทย ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศแบบร้อนชื้น มีอัตราการเจริญเติบโตได้ดี และให้ผลผลิตค่อนข้างสูง โดยประเทศไทยมีผลผลิตมันเทศรวม 184,353 ตันปี และมีมูลค่าเท่ากับ 1,336.56 ล้านบาท เมื่อขายในกิโลกรัมละ 7.25 บาท (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) มันเทศเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้รับประทานได้ทั้ง ยอดอ่อน ใบ ดอก และหัว ถึงแม้ว่าส่วนของยอดอ่อนจะมีคุณค่าทางอาหารสูงแต่นิยมนำส่วนของหัวมาใช้ประโยชน์มากกว่า หัวมันเทศแต่ละสายพันธุ์จะมีสีของเนื้อในแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของรงควัตถุที่เป็นองค์ประกอบ นอกจากคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว หัวมันเทศยังเป็นแหล่งของวิตามิน รวมถึงสารต้านอนุมูลอิสระต่างๆ เช่น วิตามินเอ เบต้าแคโรทีน และแอนโทไซยานิน เป็นต้น ในประเทศไทยมันเทศมักถูกใช้ประโยชน์อย่างจำกัดในรูปของหัวสดเพื่อเป็นแหล่งอาหารของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งมีข้อจำกัดหากต้องการเก็บรักษาในรูปหัวสดเป็นเวลานาน ถึงแม้ว่ามันเทศจะเป็นพืชหัวที่มีอัตราการคายน้ำไม่สูง สามารถเก็บได้เป็นปีโดยที่หัวยังไม่งอก แต่การที่หัวสดมีองค์ประกอบของน้ำจำนวนมากทำให้เกิดการเน่าเสียง่าย และมีคุณภาพลดลงตามระยะเวลาที่เก็บ ดังนั้นหากต้องการนำมันเทศไปใช้ประโยชน์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นควรมานำมาแปรรูปเป็นฟลาวัวร์หรือสตาร์ช ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับมันเทศแล้ว ยังเป็นการเพิ่มแหล่งของฟลาวัวร์และสตาร์ชจากพืชที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ บะหมี่ สลัดให้ความหวาน คุกกี้ และไอศกรีม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้แก่ ภาสัชภัณฑ์ สารยัดเกาะ ฟิล์มรับประทานได้ และสีผสมอาหาร เป็นต้น

จากรายงานวิจัยหลายฉบับ พบว่ามันเทศต่างสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์และสตาร์ชมันเทศแตกต่างกันไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับฟลาวัวร์และสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยยังมีอยู่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางเคมี

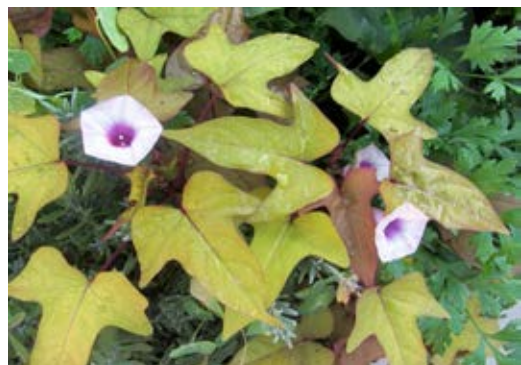
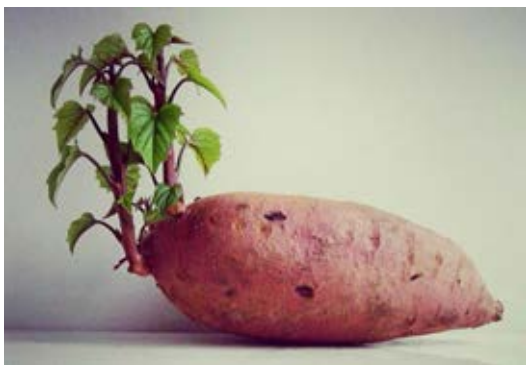
กายภาพของฟลาวัวร์และสตาร์ชจากมันเทศ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ 0106-1 (เนื้อสีขาว) พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) T101 (เนื้อสีส้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม) ที่ปลูกมากในประเทศไทย เปรียบเทียบกับฟลาวัวร์และสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์แอตแลนติก ซึ่งเป็นพืชหัวที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานหรือเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 มันเทศ (*Ipomoea batatas* L.)

โดยทั่วไปพืชหัวหรือรากที่นิยมนำมาผลิตเป็นแป้งใช้ในอุตสาหกรรม คือ มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สำหรับในประเทศไทยถือว่ามีการผลิตและแปรรูปแป้งจากมันสำปะหลังมากเป็นอันดับ 3 ของโลก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548) โดยแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์ ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนเจือปนอยู่น้อย ในขณะที่แป้งมันฝรั่งผลิตได้เฉพาะในภาคเหนือของประเทศ เนื่องจากมันฝรั่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะอากาศเย็น ทำให้ราคาขายมันฝรั่งต่อหัวค่อนข้างสูง(พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, 2555b : ออนไลน์) และมันฝรั่งยังมีความหลากหลายของสายพันธุ์น้อย เมื่อนำมาผลิตเป็นแป้งมันฝรั่งจึงมีต้นทุนสูง นอกจากนี้ทั้งมันสำปะหลังและมันฝรั่งยังจัดเป็นพืชเศรษฐกิจ โดยพืชเศรษฐกิจส่วนใหญ่จะถูกผูกขาดเขตการค้าเสรีอาเซียน (AFTA) ทำให้ประสบปัญหาผลิตใช้ในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ (ดโนยา ตัญอุทัยสุข2549: ออนไลน์) จากเหตุผลข้างต้นจะเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่มันเทศซึ่งเป็นพืชหัวที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก มีความหลากหลายของสายพันธุ์สูง และยังมีสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งของแป้งได้



รูปที่ 2.1 หัวมันเทศ (ทางซ้าย) และต้นมันเทศ (ทางขวา)

ที่มา: Gatsbys Garden (2011: online)

มันเทศมีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่บริเวณเขตร้อนของทวีปอเมริกา นำเข้ามาปลูกในประเทศไทย ตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยาได้รับการขนานนามว่า อาหารเอนยามยาก คือเป็นอาหารที่มีความสำคัญอย่างมากเมื่อเกิดความแห้งแล้งหรือเกิดสงคราม เนื่องจากมันเทศนี้ มีความโดดเด่นในหลายด้าน คือ ให้พลังงานสูง สามารถปลูกได้ง่าย เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน เขตกึ่งร้อนหรือเขตหนาว (ณัฐภูมิ สุดแก้ว และคณะ, 2553) ซึ่งในปัจจุบันมันเทศสามารถปลูกได้ทุกภาคในประเทศไทย แต่ส่วนใหญ่นิยมปลูกมากบริเวณภาคกลาง โดยปลูกมากที่สุดที่จังหวัดสุพรรณบุรีมีผลผลิตเฉลี่ยรวมทั้งประเทศ 184,353 ตันปี และมีมูลค่าทั้งหมดเท่ากับ 1,336.56 ล้านบาท เมื่อขายกิโลกรัมละ 7.25 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) มันเทศเป็นพืชเถาเลื้อย อยุ่ราบไปบนพีชดิน มีรากสะสมอาหารขนาดใหญ่อยู่ใต้ดินเรียกว่าหัว ตับมันเทศสามารถนำมาใช้รับประทานได้ทั้งยอดอ่อน ใบ หัว และราก ถึงแม้ว่าส่วนของยอดอ่อนจะมีคุณค่าทางอาหารสูง (Jung et al., 2011) แต่นิยมนำส่วนหัวมาใช้ประโยชน์มากกว่าซึ่งสามารถนำมารับประทานได้โดยตรง เช่น มันเผา แกงเลี้ยง และแกงบวด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังใช้เป็นแหล่งอาหารสัตว์คุณค่าสูง หรือสกัดเป็นแป้งมันเทศนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมได้ มันเทศเป็นพืชที่มีความหลากหลายของสายพันธุ์ โดยมีเกณฑ์การจำแนก คือ แบ่งกลุ่มตามอายุหรือสีเนื้อ อีในของหัวมันเทศ โดยการแบ่งกลุ่มตามอายุสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ สายพันธุ์เบา จะมีอายุประมาณ 90 วัน สายพันธุ์กลาง จะมีอายุประมาณ 120 วัน และสายพันธุ์หนัก จะมีอายุประมาณ 150 วัน โดยนับอายุตั้งแต่เริ่มปลูกถึงเก็บผลผลิต (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2550 : ออนไลน์) ส่วนการแบ่งกลุ่มตามสีเนื้อ อีในของมันเทศ สามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ สีขาว สีเหลือง สีส้ม และมีม่วงปนแดง ซึ่งการแบ่งกลุ่มตามสีของเนื้อ อีในจัดเป็นหลักเกณฑ์ทั่วไปที่นิยมใช้จำแนกลักษณะสายพันธุ์ โดยมันเทศต่างสีจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกันไป (Shih, Kuo and Chiang, 2009)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของมันเทศ

มันเทศจัดเป็นพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับพืชแป้งชนิดอื่น เช่น ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง เป็นต้น โดยมันเทศแต่ละหัวจะประกอบด้วยแป้ง ไขมัน โปรตีน และเส้นใยอาหารประมาณร้อยละ 70 25 0.3 2 และ 4 ตามลำดับ (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2550 : ออนไลน์) ถึงแม้ว่าในด้านพลังงานที่ได้รับจากการบริโภคมันเทศหนึ่งหัวจะให้พลังงานน้อยกว่าบริโภคข้าวในน้ำหนักที่เท่ากัน แต่มีโภชนาการทางอาหารสูง

โดยเฉพาะในมันเทศที่มีเนื้อ อื่นสีต่างๆ จะพบสารพิษเคมีที่มีประโยชน์อีกไม่ต่ำกว่าร้อยละ 2 ซึ่ง จะแตกต่างกันไปในแต่ละสายพันธุ์ (ณัฐภูมิ สุดแก้ว และคณะ, 2553) จากงานวิจัยของ Ahmed, Akter and Eun (2010) พบว่าเมื่อนำมันเทศที่ขึ้นเมืองจากประเทศเกาหลีใต้มาจัดความชื้น นออกไป ด้วยการอบแห้ง จะมีองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ คือ คาร์โบไฮเดรต 84.88 โปรตีน 3.51 ไขมัน 1.29 เกลือ 3.91 และเส้นใยอาหาร 5.60 (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมี เหล่านี้ จะแตกต่างกันไปในแต่ละสายพันธุ์กุลยา ลี มุ่งเรืองรัตน์ 2534) โดยปริมาณเส้นใยอาหาร จากมันเทศหลายสายพันธุ์มักมีค่าสูงกว่าปริมาณเส้นใยอาหารจากมันฝรั่ง และมันสำปะหลัง (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.17 และ 1.53 ตามลำดับ) ในขณะที่ปริมาณโปรตีนมักจะมีค่าต่ำกว่า มันฝรั่ง (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 9-11) แต่สูงกว่าปริมาณโปรตีนของมันสำปะหลัง (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 0.32 - 1.18) (Treadway et al., 1950; Bhattacharya, Sudha and Rahim, 1999; Charoenkul et al., 2011) และยังพบว่ามันฝรั่งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่ามันเทศ และมันสำปะหลังในสัดส่วนที่เท่ากัน (Noda et al., 2008) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ในแต่ละแหล่งของแป้ง จะส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของฟลาวอร์และสตาร์ช

นอกจากนี้ มันเทศที่มีสีของเนื้อ อื่นแตกต่างกันยังประกอบด้วยสารพิษเคมีที่มีประโยชน์ แตกต่างกันไปในแต่ละสายพันธุ์ โดยสารเหล่านี้ จะมีวิตามิน เกลือแร่ และสารต้านอนุมูลอิสระ ต่างๆ เป็นองค์ประกอบ (ณัฐภูมิ สุดแก้ว และคณะ 2553) ได้แก่ มันเทศเนื้อ อื่นสีเหลือง และสีส้ม มักจะพบสารในกลุ่มแคโรทีน (carotene) สูง เช่น เบต้าแคโรทีน (β -carotene) ซึ่งพบว่าในบาง สายพันธุ์มีปริมาณสูงเทียบเท่ากับแครอทหรือสาหร่ายทะเล ในสัดส่วนที่เท่ากัน ส่วนมันเทศเนื้อ อื่น สีม่วง มักจะพบสารแอนโทไซยานิน (anthocyanins) สูง (Teow et al., 2007) นอกจากนี้ มันเทศ ยังมี ไรโบฟลาวิน ไนอาซีน วิตามินบี วิตามินซี และวิตามินอีสูงอีกด้วย (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2550: ออนไลน์) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระและธาตุอาหารต่างๆ ในมันเทศเหล่านี้ จะ ช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจตีบ ป้องกันโรคความดันโลหิตสูง และสามารถรักษาโรคโลหิตจาง เป็นต้น แสดงให้เห็นว่ามันเทศเป็นพืชแป้งที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ควรส่งเสริมให้มีการปลูกมากขึ้น เพื่อนำไปแปรรูปสำหรับใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ (ณัฐภูมิ สุดแก้ว และคณะ 2553)

2.3 ฟลาวัวร์และสตาร์ช

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พืชทั่วไปในส่วนใบและส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บสะสมอาหาร เช่น เมล็ด หัว และราก เป็นต้น ซึ่งในแต่ละประเทศจะมีแหล่งผลิตแป้งที่สำคัญแตกต่างกัน เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้แป้งข้าวโพดมากที่สุดในโลก แป้งสาลีและแป้งมันฝรั่งมีการนำไปใช้อย่างหลากหลายในยุโรป สำหรับในประเทศไทยมีการผลิตแป้งจากมันสำปะหลังสูง เพื่อนำไปแปรรูปสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นกัน (Ostertag, 1996) ส่วนใหญ่แป้งมีบทบาทหลักในการเป็นแหล่งอาหารพลังงานสูงของมนุษย์ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อให้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัว และเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอส ซุป และน้ำปรุงรสอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมแป้งตัดแปรรูป เป็นต้น โดยทั่วไป แป้ง หรือ ฟลาวัวร์ (flour) จะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยยังมีโปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้า เป็นองค์ประกอบรอง หากสกัดองค์ประกอบรองเหล่านี้ ออกไปจนเหลือเพียงแป้งบริสุทธิ์ เป็นส่วนใหญ่ จะเรียกว่า สตาร์ช (starch) โดยสตาร์ชที่ยังไม่ถูกตัดแปรรูปหรือแปรรูปจะเรียกว่า แป้งดิบ (native starch) ส่วนสตาร์ชที่ถูกตัดแปรรูปหรือแปรรูปแล้ว เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อ อกุล ปิยะจอมขวัญ 2550) จากงานวิจัยของ ดารินทร์ กุลมาโนวงศ์ (2549) ที่ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์และสตาร์ชจากมันเทศ 3 สายพันธุ์ (พันธุ์ต่อเผือก พันธุ์ไข่ และพันธุ์เกษตร) พบว่าสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของทั้งฟลาวัวร์และสตาร์ชมันเทศ แสดงแนวโน้มเดียวกันในแต่ละสายพันธุ์ ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆ ทางเคมีของฟลาวัวร์และสตาร์ชจากมันเทศแต่ละสายพันธุ์ด้วย

2.4 อนุมูลอิสระและวิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน

อนุมูลอิสระ คือ โมเลกุลหรือสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในระดับพลังงานวงนอกสุดซึ่งมีค่าพลังงานสูง จึงไม่เสถียรและพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนเดี่ยวอื่น ทำให้อนุมูลอิสระมีคุณสมบัติเฉพาะ โดยมีความไวสูงในการเกิดปฏิกิริยา เช่น โมเลกุลของไฮโดรเจน ออกซิเจน และ

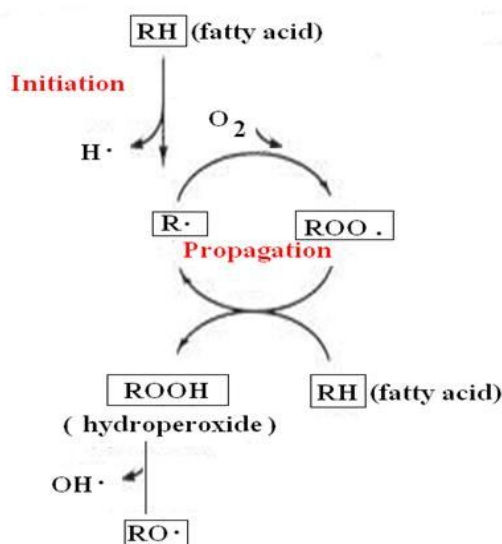
อีกอนส่วนใหญ่ของโลหะทรานซิชัน เป็นต้น (โสภา วัชรคุปต์, 2549) อนุมูลอิสระสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่างๆ ของเซลล์ภายในร่างกายได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์ ทั้งในด้านโครงสร้างดีเอ็นเอ(DNA) การเปลี่ยนแปลงสภาพโปรตีนหรือไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์ หรือการสร้างพันธะโควาเลนต์(covalent bond) กับโปรตีนหรือเอนไซม์บางชนิด จนทำให้การทำงานของโปรตีนหรือเอนไซม์ชนิดนั้นผิดปกติไป(กัลยา เนาวรัตน์วัฒนา และพัชรี บุญศิริ, 2542) อย่างไรก็ตาม ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ต่างก็มีระบบที่เรียกว่า antioxidant defense system เพื่อรักษาระดับของอนุมูลอิสระภายในร่างกายให้สมดุล เช่น เอนไซม์หรือสารประกอบโปรตีนบางชนิด เป็นต้น โดยระบบกำจัดอนุมูลอิสระดังกล่าวเกิดจากการทำงานของสารหลายชนิด ที่เรียกว่า สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมอนุมูลอิสระต่างๆ ให้อยู่ในระดับพอเหมาะ ถ้าหากมีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นในปริมาณที่มากเกินไปกว่าระบบป้องกันจะยับยั้งได้หมด จะส่งผลให้อนุมูลอิสระที่เหลืออยู่ไปทำอันตรายต่ออวัยวะและเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกาย ซึ่งถ้าสะสมในปริมาณมากๆ อาจนำไปสู่ความผิดปกติต่างๆ ได้ เช่น โรคในระบบหัวใจหรือหลอดเลือด และโรคมะเร็ง เป็นต้น (Ames, Shigena and Hagen, 1993) ดังนั้นการได้รับสารต้านอนุมูลอิสระจากภายนอกร่างกาย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยเสริมการควบคุมและป้องกันอันตรายจากอนุมูลอิสระได้ จึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาสารที่ออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากแหล่งต่างๆ ในธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น

วิธีวิเคราะห์ฤทธิ์ ต้านออกซิเดชันของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในอาหาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในระบบที่มีไขมัน(lipid system) และระบบที่ไม่มีไขมัน(non-lipid system) ดังนี้

2.4.1 ระบบที่มีไขมัน (Lipid system)

การวิเคราะห์ฤทธิ์ ต้านออกซิเดชันในระบบนี้ มีความคล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหาร เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับไขมัน หรือไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว(unsaturated fatty acid) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้เกิดสารที่ให้กลิ่นและรสที่ไม่ดี เรียกว่า การหืน(rancidity) โดยเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (แสดงในรูปที่ 2.2) เนื่องจากอนุมูล

อิสระที่เกิดขึ้น จะกระตุ้นโมเลกุลของกรดไขมันที่เหลือให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป มักพบมากในอาหารที่เกี่ยวข้องกับ น้ำมันพืช อาหารแห้ง อาหารทอด เช่นปลาทอดปิ้งรส เป็นต้น



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน

ที่มา: พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปนนท์ (2555a: ออนไลน์)

วิธีวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรก การประเมินทางประสาทสัมผัส กลุ่มที่สอง การวิเคราะห์ทางเคมี เช่น การหาปริมาณสารประกอบคาร์บอนิล และการหาค่าเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น กลุ่มที่สาม การใช้เครื่องมือเฉพาะ เช่น การวิเคราะห์สารระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยเครื่อง gas chromatography โดยการวิเคราะห์ในลักษณะนี้ มีข้อเสียหลายประการ เช่น ใช้เวลานาน และอาจใช้ภาวะเร่ง เช่น การให้ความร้อน ซึ่งสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์อาจเกิดการสลายตัวจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป (Frankel, 2005) จึงมีวิธีวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในระบบที่ไม่มีไขมัน ซึ่งจะใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าและสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งละหลายๆ ในเวลาไม่กี่ชั่วโมงได้

2.4.2 ระบบที่ไม่มีไขมัน (Non-lipid system)

การวิเคราะห์ในระบบนี้ จะมีการสกัดสารที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันออกมาจากตัวอย่างอาหาร เช่น สารกลุ่มฟีนอลิก ที่สามารถสกัดได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยนิยมใช้เมทานอล เนื่องจากเมทานอลมีขั้วค่อนข้างสูง มีจุดเดือดต่ำ และยังมีราคาถูกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายชนิดอื่น (Rumbaoa, Cornago and Geronimo, 2005; Yang et al., 2010) ในขณะที่งานวิจัยบางฉบับเลือกใช้ น้ำ เอทานอล และสารละลายกรดในเมทานอลมาใช้เป็นตัวทำละลายสารสกัดจากพืชแทนเมทานอล ซึ่งพบว่าตัวทำละลายต่างชนิดกัน จะมีประสิทธิภาพในการสกัดสารจากพืชแตกต่างกันไป (Teow et al., 2007; Jung et al., 2011; Liao et al., 2011)

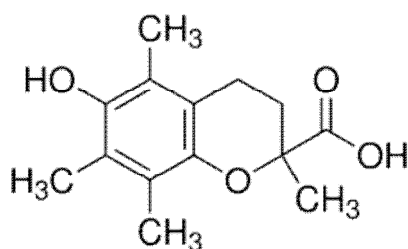
การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันในระบบที่ไม่มีไขมัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือการวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอม (Hydrogen atom transfer, HAT) การวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single electron transfer, ET หรือ SET) และการวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนทั้งไฮโดรเจนอะตอมและอิเล็กตรอนเดี่ยว (Prior, Wu and Schaich, 2005)

2.4.2.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอม

(Hydrogen atom transfer) (Prior et al., 2005)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันตามกลไกนี้ จะใช้เวลาน้อยรวมทั้งปฏิกิริยาจะไม่ขึ้น กับชนิดของตัวทำละลายและค่าพีเอช (pH) ของสารสกัด ตัวอย่างของวิธีวิเคราะห์ในกลุ่มนี้ ที่นิยมใช้กันมาก คือ Oxygen Radical Absorbance Capacity Assay (ORAC) เป็นการวัดความสามารถในการจับอนุมูลอิสระในรูป peroxy radicals โดยมีกลไกดังนี้ peroxy radicals จะทำปฏิกิริยากับสารเรืองแสง (fluorescent probe) ที่มีในระบบ ทำให้ไม่เกิดการเรืองแสง หากปริมาณอนุมูลอิสระในระบบลดลงเนื่องจากประสิทธิภาพของสารต้านออกซิเดชัน จะส่งผลให้สารเรืองแสงมีการเรืองแสงที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปจะบันทึกผลเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปแล้วเป็นเวลา 30 นาที และรายงานเป็นค่า Trolox equivalents (TE) ซึ่ง Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid; รูปที่ 2.3) เป็นสารกลุ่ม

ฟีนอลิกที่นิยมใช้เป็นสารอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ ด้่านออกซิเดชันของตัวอย่างที่วิเคราะห์ จากวิธี ORAC และวิธีอื่นๆ สารเรืองแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ fluorescein หรือ dichlorofluorescein ซึ่งมีความคงตัวและไม่ทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันในตัวอย่าง



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของ Trolox

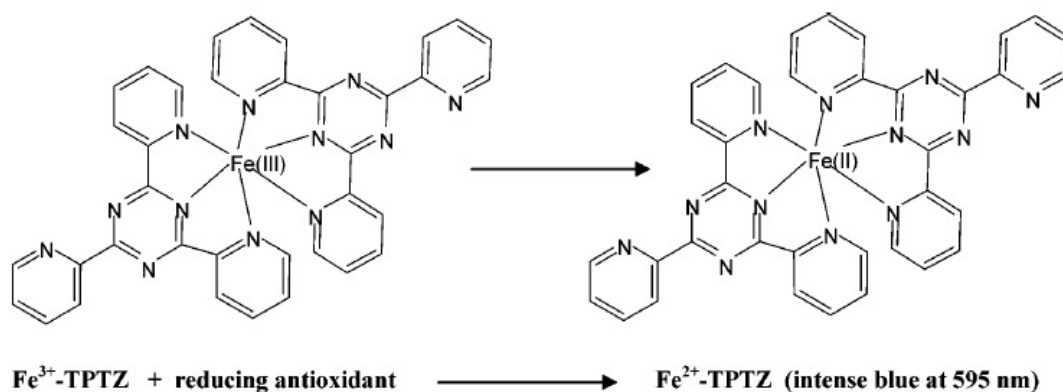
ที่มา: Oehlke et al. (2011)

ข้อดีของวิธีนี้ คือ วัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการจับperoxyl radicals ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่พบได้ทั่วไปในระบบร่างกาย และสามารถวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชันที่เป็นทั้งhydrophilic และ lipophilic อย่างไรก็ดีตามวิธีนี้ มีข้อจำกัดในด้านเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งต้องใช้ fluorimeters วัดปริมาณสารเรืองแสง ซึ่งเป็นเครื่องมือเฉพาะที่ไม่ค่อยมีการใช้ทั่วไป และยังใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน นอกจากนี้ สารเรืองแสงที่ใช้ในระบบมีราคาค่อนข้างแพง

2.4.2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single electron transfer) (Prior et al., 2005)

วิธีนี้ มักจะแสดงผลในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดลงของอนุมูลอิสระ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับพีเอชของระบบ ตัวอย่างของวิธีวิเคราะห์ในกลุ่มนี้ ที่นิยมใช้ คือ Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) เป็นการวัดความสามารถในการเป็นสารรีดิวซ์ (reducing power) ของสารต้านออกซิเดชันในสารละลายกรด เพื่อรักษาความสามารถในการละลายของเหล็กไว้ โดยการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำนั้น จะเป็นการลดค่าionization potential ทำ

ให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ สามารถติดตามผลโดยสังเกตการเปลี่ยนสีของสารประกอบ ferric-tripyridyltriazine (Fe^{3+} -TPTZ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสี (รูปที่ 2.4) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ที่เวลา 4 นาที แสดงผลวิเคราะห์ในรูปแบบของ TE อย่างไรก็ตามเวลาในการวัดการเกิดปฏิกิริยาอาจไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างที่วิเคราะห์ (Yang et al., 2010)



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้น ระหว่างกาวิเคราะห์ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power

ที่มา: Prior et al. (2005)

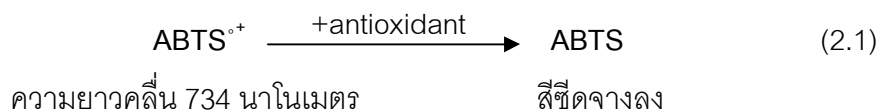
วิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาวิเคราะห์สั้น และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีความจำเพาะในการวิเคราะห์เหมือนกับวิธี ORAC แต่มีข้อจำกัดในด้านกลไกการวิเคราะห์ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชันที่มีกลไกการยับยั้งอนุมูลอิสระโดยการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมได้ รวมทั้ง โปรตีน และ thiols เช่น glutathione ซึ่งเป็นกลไกทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับระบบในร่างกาย ส่งผลให้การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในระบบมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

2.4.2.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนทั้งไฮโดรเจนอะตอมและอิเล็กตรอนเดี่ยว (Prior et al., 2005)

โดยทั่วไปแล้ววิธี 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) และ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) มักถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่มีกลไกในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน แต่ในความจริงแล้วทั้ง 2 วิธีดังกล่าว สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งการยับยั้งอนุมูลอิสระโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอน หรือโดยการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมก็ได้

(1) Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) Assay

วิธีนี้มีหลักการ คือ การวัดความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการจับอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ ที่ให้สีน้ำเงิน โดยอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ จะเปลี่ยนรูปมาจาก ABTS ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วย peroxy radicals หรือสารออกซิไดซ์ชนิดอื่นๆ โดยติดตามการลดลงของอนุมูลอิสระโดยสังเกตการซีดจางลงของสีน้ำเงินในตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ที่เวลา 4-6 นาที แสดงผลวิเคราะห์ในรูปแบบของ TE (แสดงในสมการที่ 2.1)

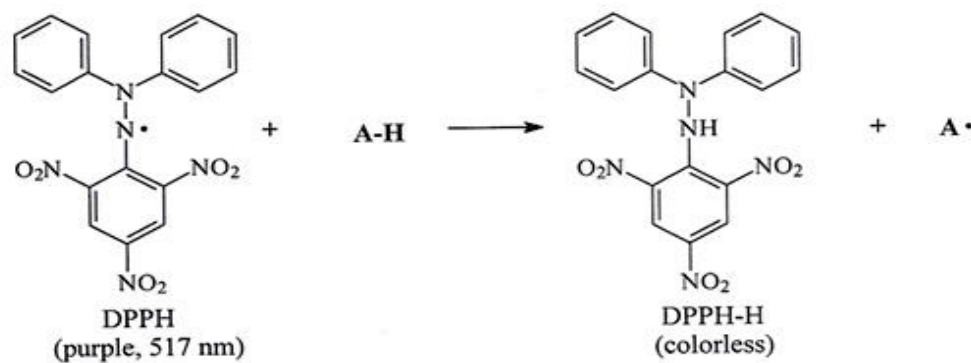


ข้อดีของวิธีนี้ คือ ไม่ซับซ้อน รวมทั้งอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ สามารถละลายได้ทั้งในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำ และยังไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของสารสกัด จึงสามารถวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชันที่เป็น hydrophilic และ lipophilic ได้ รวมทั้งยังสามารถศึกษาผลของค่าพีเอชต่อกลไกของสารต้านออกซิเดชัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ มีข้อจำกัดคือ เวลาที่ใช้วัดการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างน้อย ตัวอย่างบางชนิดยังเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ผลที่ได้ อาจมีค่าต่ำ จึงไม่เหมาะในการวิเคราะห์ปริมาณของสารต้านออกซิเดชัน แต่สามารถใช้ในเชิงเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของตัวอย่างต่างชนิดกัน

(2) 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) Assay

วิธีนี้มีหลักการ คือการวัดความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระชนิด DPPH ของสารต้านออกซิเดชัน (รูปที่ 2.5) โดยติดตามการลดลงของอนุมูลอิสระซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสีในตัวอย่างจากสีม่วงน้ำเงินเป็นสีเหลืองอ่อน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ภายในเวลา 30 นาที หรือจนกว่าจะเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ แสดงผลวิเคราะห์ได้ใน

รูปของ EC_{50} (half maximal effective concentration) คือ ความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชันที่ทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 50 ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารต้านออกซิเดชันกับอนุมูลอิสระ DPPH จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารต้านออกซิเดชัน เช่น สารต้านออกซิเดชันที่มีจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลมาก จะมีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH ได้เร็ว และมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูง (Bondet, Brand-Williams and Berset, 1997)



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) A-H คือ สารต้านออกซิเดชัน
ที่มา: Halliwell and Gutteridge (2007)

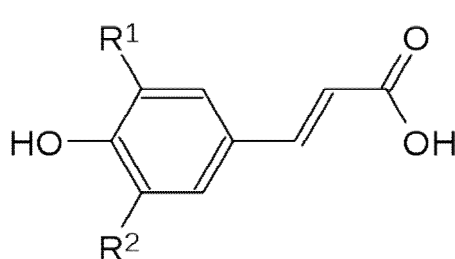
วิธีนี้ มีข้อดี คือ ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีความเฉพาะ แต่มีข้อจำกัด คือ ถ้าในตัวอย่างมีสารประกอบที่มีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับอนุมูลอิสระ DPPH (ที่ความยาวคลื่น 515-517 นาโนเมตร) ซึ่งจะรบกวนการอ่านค่า ส่งผลให้ค่าที่อ่านได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง เช่น ในตัวอย่างที่มีแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุ ซึ่งมีเฉดสีม่วงใกล้เคียงกับสีของอนุมูลอิสระ DPPH ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Huang et al., 2006) ทั้งนี้ อาจใช้วิธีการเจือจางตัวอย่างเพื่อให้เฉดสีของตัวอย่างจางลง ทำให้ไปรบกวนสีของระบบน้อยลงได้ นอกจากนี้ อนุมูลอิสระ DPPH ยังมีความคงตัวไม่ไวต่อปฏิกิริยาเหมือนอนุมูลที่มีในระบบร่างกาย โดยพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมีของ DPPH (รูปที่ 2.5) พบว่าอิเล็กตรอนเดี่ยวของอนุมูลอิสระจะถูกบดบังด้วยวงเบนซีน 3 วง และหมู่ NO_2 ทำให้สารต้านออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีโมเลกุลใหญ่บางชนิดไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ หรือเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าความเป็นจริงได้ (โสภา วัชรคุปต์ 2549)

2.5 สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ

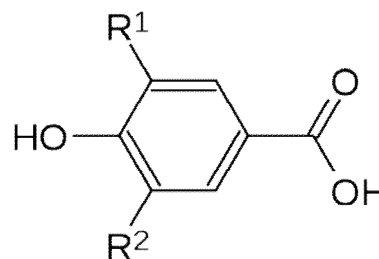
สารกลุ่มฟีนอลิกเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระ โดยเป็นสารที่ได้รับจากภายนอก และพบมากในธรรมชาติ ได้แก่ ผัก ผลไม้ ชาเขียว ช็อกโกแลต และไวน์แดง เป็นต้น (ปรีชา บุญจุง, 2549) ฟีนอลิกมีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอย่างน้อย 1 หมู่ ได้แก่ กรดฟีนอลิก (Phenolic acids) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) แทนนิน (Tannins) (Waterhouse, 2005) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ซึ่งสารกลุ่มฟีนอลิกมักพบตามช่องว่างระหว่างเซลล์ ในส่วนต่างๆ ของพืช

2.5.1 กรดฟีนอลิก (Phenolic acids)

กรดฟีนอลิกเป็นอนุพันธ์ของ cinnamic acids และ benzoic acids จึงสามารถแบ่งกรดฟีนอลิกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) Hydroxycinnamic acids เช่น cinnamic acid chlorogenic acid และ ferulic acid เป็นต้น 2) Hydroxybenzoic acids เช่น vanillic acid gallic acid และ syringic acid เป็นต้น (รูปที่ 2.6) โดยชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบมากในมันเทศ คือ chlorogenic, iso-chlorogenic และ cinammic (Oki et al., 2002) เป็นต้น กรดฟีนอลิกโดยทั่วไปสามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระ (free forms) รูป soluble conjugated และรูปที่ถูกตรึง (bound forms) กรดฟีนอลิกในรูปอิสระจะอยู่บริเวณเยื่อหุ้มเมล็ดชั้น นอกหรืออยู่ระหว่างผิวเซลล์ สามารถสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น เมทานอล และอะซีโตน ส่วนกรดฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงจะสร้างพันธะเอสเทอร์กับองค์ประกอบของผนังเซลล์ (เช่น ลิกนิน และสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ เป็นต้น) ต้องสกัดโดยใช้กรดหรือด่างเพื่อทำลายพันธะเอสเทอร์ และปลดปล่อยกรดฟีนอลิกในรูปที่ถูกตรึงออกจากผนังเซลล์ (Subba and Muralikrishna, 2002)



a) Hydroxycinnamic acid



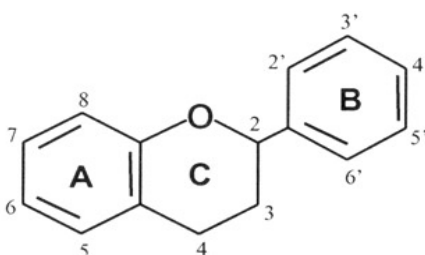
b) Hydroxybenzoic acid

รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของกรดฟีนอลิก

ที่มา: Roland (1952: Online)

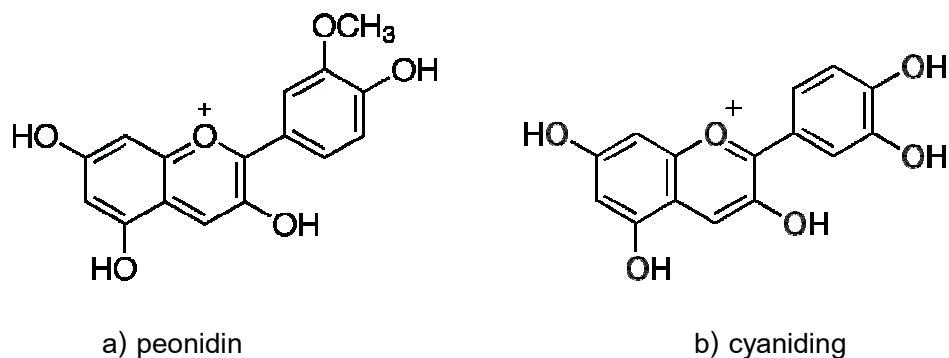
2.5.2 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)

สารฟลาโวนอยด์สามารถพบได้ทั่วไปในพืชที่มีสีเขียว และในทุกส่วนของพืช เช่น ราก เนื้อไม้ ดอก และผล เป็นต้น มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นdiphenylpropane ($C_6-C_3-C_6$) ที่ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก 2 วง เชื่อมต่อกันด้วย oxygenated heterocyclic ring ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม (รูปที่ 2.7) ฟลาโวนอยด์สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้หลายกลุ่ม คือ Anthocyanidins Flavones Flavonols และ Flavanones เป็นต้น (ปรีชา บุญจุง, 2549)



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างแกนของฟลาโวนอยด์ ซึ่งแสดงแต่ตำแหน่งบนวงแหวน (1'-6' และ 2-8) ที่มา: Waterhouse (2005)

แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) เป็นสารฟลาโวนอยด์ที่นิยมศึกษาในพืชที่มีสี แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ ให้สีแดงถึงแดงม่วง แอนโทไซยานินที่สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติจะมีอยู่ 6 ชนิด ซึ่งเรียกชื่อแตกต่างกันตามตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl; OH) และเมทอกซิล (methoxyl; OCH_3) ได้แก่ cyanidin delphinidin malvidin pelargonidin petunidin และ peonidin (ปรีชา บุญจุง, 2549) โดยในมันเทศที่มีสีม่วงแดงส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอนโทไซยานินชนิด peonidin และ cyanidin มากที่สุด ตามลำดับ (Oki et al., 2002 และ Teow et al., 2007) แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่พบมากในมันเทศเนื้อสีม่วงแดง

ที่มา: Edgar181 (2008; Online)

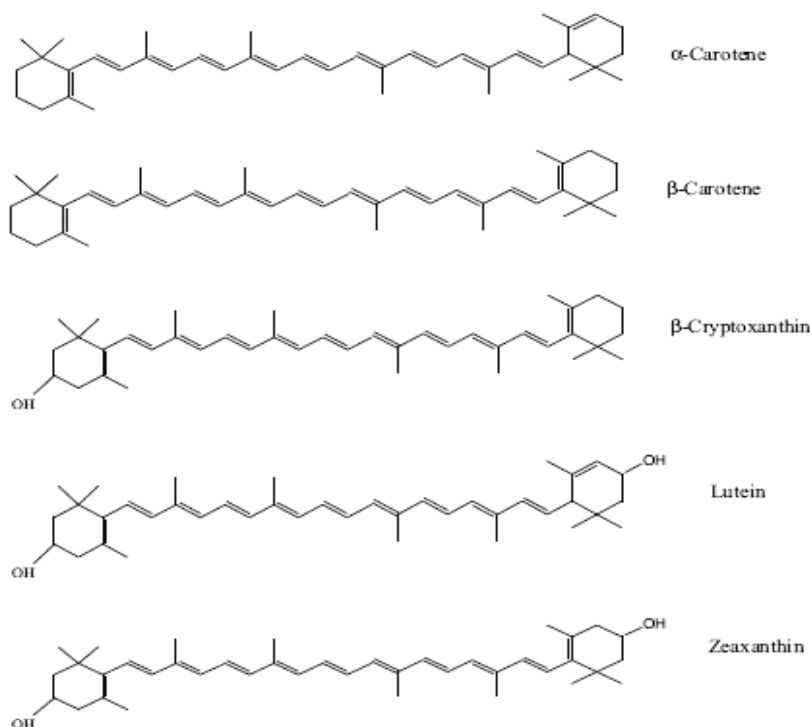
2.5.3 แทนนิน (Tannins)

แทนนินเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ condensed tannins (มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า procyanidins หรือ proanthocyanidins) hydrolysable tannins และ phlorotannins แทนนินมีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันเช่นเดียวกับสารทั้ง 2 กลุ่มที่กล่าวมาแล้ว แต่เนื่องจากแทนนินสามารถเกิดอันตรกิริยากับโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และวิตามินได้ จึงทำให้คุณค่าทางโภชนาการที่ร่างกายควรได้รับจากสารเหล่านี้ มีปริมาณลดลง (Dykes and Rooney, 2007)

2.5.4 แคโรทีนอยด์ (Carotenoids)

แคโรทีนอยด์เป็นกลุ่มของสารมีสี (pigment) เช่น สีเหลือง สีส้ม หรือสีแดง เป็นต้น สามารถพบได้ในพืชโดยทั่วไป แต่ไม่สามารถสังเคราะห์ได้จากสัตว์ มัก จะพบแคโรทีนอยด์อยู่ในรูป β -carotene α -carotene lycopene และ cryptoxanthin แคโรทีนอยด์มักจะมีบทบาทในการเป็นสารตั้งต้นของการสร้างวิตามินเอ หรือเรตินอล (retinol) ซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญต่อการเจริญ และการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ โครงสร้างของแคโรทีนอยด์เป็นแบบ polyisoprenoid ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างสายยาวที่มีการเรียงตัวสลับกันระหว่างพันธะคู่และพันธะเดี่ยว โดยมีปลายทั้งสองข้างสมมาตรกัน (รูปที่ 2.9) การที่แคโรทีนอยด์มีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีพันธะคู่จำนวนมาก ส่งผล

ให้มีคุณสมบัติเป็น hydrophobic ซึ่งจะละลายน้ำได้น้อยมาก (Rao and Rao, 2007) มักพบมากในมันเทศเนื้อ หน่อไม้ฝรั่ง และสีเหลือง ซึ่งมีปริมาณสูงถึง 226 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่าง (มันเทศเนื้อ หน่อไม้ฝรั่งจากประเทศสหรัฐอเมริกา) (Teow et al., 2007)



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

ที่มา: Samee (2005)

2.5.5 ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารกลุ่มฟีนอลิก

ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารกลุ่มฟีนอลิก เป็นผลมาจากการมีวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นโครงสร้าง ซึ่งกลไกของสารกลุ่มฟีนอลิกที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันนั้นมีหลายกลไก ได้แก่ การถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอม (hydrogen atom donor) การกำจัดโลหะ (metal chelators) และการกำจัด singlet oxygen นอกจากนี้ นอนูมูลอิสระของสารกลุ่มฟีนอลิกยังมีความเสถียร เนื่องจากเกิด resonance delocalization และมีโครงสร้างไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Rice-Evans, Miller and Paganga, 1997)

จากงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากมันเทศ พบว่าในมันเทศประกอบด้วยสารกลุ่มฟีนอลิกหลายชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์โดยจากงานวิจัยของ Rumbaoa et al. (2005) ที่ศึกษาฟลาวรรมันเทศพื้นเมืองจากฟิลิปปินส์ 5 สายพันธุ์ พบว่ามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 192.7-1,159.0 mg gallic acid/100 g ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีม่วงแสดงค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด ตามด้วยเนื้อมีสีเหลือง และสีขาว ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามันเทศพื้นเมืองจากไต้หวันสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีส้มมีค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีเหลือง (Shih et al., 2009) แสดงให้เห็นว่าฟลาวรรมันเทศที่มีรงควัตถุต่างชนิดกัน ส่งผลต่อค่าฟีนอลิกทั้งหมดแตกต่างกันด้วยโดย Teow et al. (2007) พบว่ามันเทศสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีม่วงมีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบสูง (0.030 - 0.531 mg/g) ส่วนมันเทศสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีส้มและสีเหลือง มีแคโรทีนอยด์เป็นองค์ประกอบ (1.50 - 226.00 µg/g) ซึ่งรงควัตถุทั้งสองจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน โดยแอนโทไซยานินประกอบด้วยวงเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นโครงสร้าง ซึ่งมีจำนวนมากกว่าโครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์ (โอบาวัชระคุปต์, 2549) ส่งผลให้มันเทศพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีม่วงนั้นจะมีค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าพันธุ์ที่มีสีส้ม สีเหลือง และสีขาว ตามลำดับ ในขณะที่ Jung et al. (2011) ได้ศึกษาส่วนต่างๆ ของมันเทศพื้นเมืองจากเกาหลี เช่น ส่วนดอก ใบ ยอดอ่อน และรากพบว่าไม่เพียงแต่ส่วนราก หากแต่ส่วนอื่นๆ ของต้นมันเทศก็มีสารประกอบฟีนอลิกและสารต้านออกซิเดชันเป็นองค์ประกอบเช่นกัน โดยเฉพาะส่วนใบ และยอดอ่อน ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจากส่วนรากของมันเทศ ในส่วนของฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน Rumbaoa et al. (2005) พบว่าสารสกัดจากฟลาวรรมันเทศ (Dakol, Haponita and Violet) 3 สายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีม่วง เป็นกลุ่มที่มีค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุดใกล้เคียงกัน (2,100-6,100 µg/ml) ตามด้วยสายพันธุ์ที่มีเนื้อมีสีเหลือง และเนื้อมีสีขาว ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Teow et al. (2007) แสดงถึงความสอดคล้องของปริมาณแอนโทไซยานินที่พบในมันเทศเนื้อมีสีม่วงต่างสายพันธุ์ต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน โดยส่วนใหญ่มันเทศเนื้อมีสีม่วงที่มีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบสูง มักจะมีค่าการต้านออกซิเดชันสูงด้วย ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอนโทไซยานินโดยแอนโทไซยานินชนิดที่พบมากในมันเทศเนื้อมีสีม่วงคือ peonidin และ cyanidin

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า EC_{50} จากวิธี DPPH และค่าฟีนอลิกทั้งหมด พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสารสกัดตัวอย่างที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูง จะมีค่า EC_{50} ต่ำ หรือมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันสูง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ชนิดของสารต้านออกซิเดชันในตัวอย่างฟลาวรรมันเทศส่วนใหญ่

เป็นสารกลุ่มฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารกลุ่มที่มีวงเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นโครงสร้าง จึงไวต่อสารอนุมูลอิสระ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teow et al. (2007) ซึ่งพบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH and ORAC assay) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันกัน ($R^2 = 0.870$ และ $R^2 = 0.937$ ตามลำดับ)

2.6 สตาร์ช

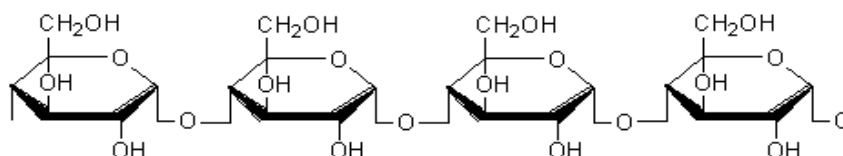
2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) โดยทั่วไปสตาร์ชจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือแอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) (French, 1972) ซึ่งสตาร์ชจากธรรมชาติโดยทั่วไป มักจะประกอบด้วยแอมิโลเพกทินร้อยละ 70-80 และมีแอมิโลสร้อยละ 20-30 โดยอัตราส่วนของแอมิโลเพกทินและแอมิโลสจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งและสายพันธุ์ของสตาร์ช ซึ่งปริมาณและโครงสร้างของโมเลกุลทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของสตาร์ช นอกจากนี้ สตาร์ชยังประกอบด้วยไขมัน (ฟอสโฟลิปิดและกรดไขมันอิสระ) โปรตีน และฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งสารตัวกลางเหล่านี้ ก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของสตาร์ชได้เช่นกัน เพียงแต่ว่าจะมีอิทธิพลน้อยกว่า เนื่องจากสารตัวกลางเหล่านี้ เป็นเพียงองค์ประกอบส่วนน้อยที่มีอยู่ในสตาร์ช (Jane et al., 1999) ยกเว้นสตาร์ชจากมันฝรั่งซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง จึงอาจจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของสตาร์ชมากกว่าปัจจัยอื่น (Wischmann et al., 2005)

2.6.1.1 แอมิโลส (Amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 (รูปที่ 2.10) และแอมิโลสยังประกอบด้วย พอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งแขนงซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 บ้างเล็กน้อย โดยจำนวนกิ่งแขนงซึ่งมีกลูโคส

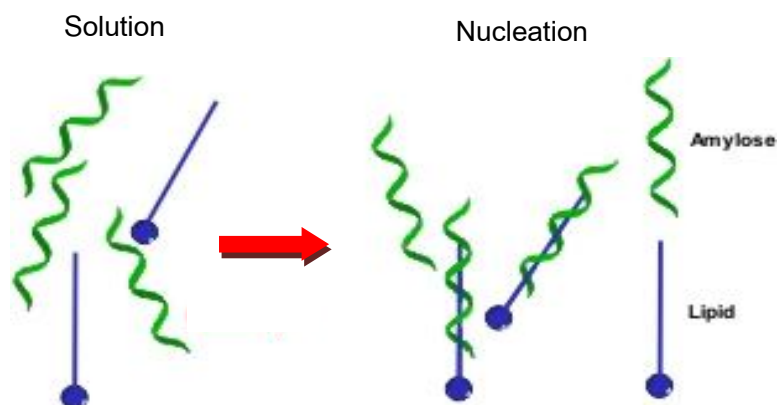
ประมาณ 2-11 หน่วยกลูโคส จะแตกต่างกันไปตามชนิด และแหล่งที่มาของสตาร์ช (Donovan, 1979) น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน ซึ่งแอมิโลสในสตาร์ชแต่ละแหล่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อ อกุล ปิยะจอมขวัญ 2550)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Royal Society of Chemistry (2004; Online)

แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก จึงทำให้สามารถรวมตัวกับโมเลกุลชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น สามารถรวมตัวกับโมเลกุลของแอมิโลเพคตินเกิดเป็นเกลียวคู่ (double helices) (Bower, 1992) หรือโมเลกุลของแอมิโลสด้วยกันเอง สายของแอมิโลสสามารถอยู่ในรูปของเกลียวเดี่ยว (Single helices) ซึ่งหันหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ออกด้านนอก ทำให้ช่องว่างด้านในมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่งผลให้โมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น ไขมัน สามารถแทรกตัวเข้าไป เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose lipid complex) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีการจัดเรียงรูปแบบผลึกแบบ V ที่มีความเสถียรสูง (Jane, 1999) ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 100 องศาเซลเซียสจึงจะทำลายพันธะได้ (Hoover and Hadziyev, 1981) นอกจากนี้ แอมิโลสยังสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ได้ (Teitelbaum, Ruby and Marks, 1978; Jane, 2009)



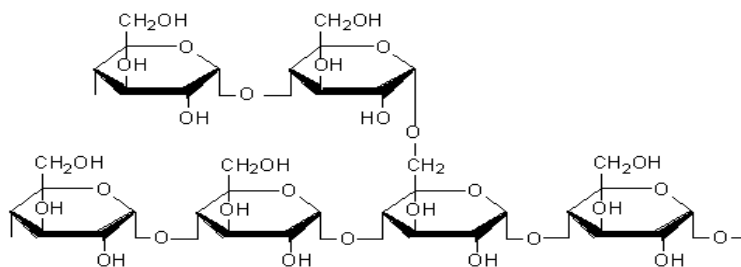
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสกับไขมัน

ที่มา: Mazzocchetti (2012; Online)

โมเลกุลแอมิโลสมีอิทธิพลที่สำคัญต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช ซึ่งสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีโครงสร้างและปริมาณของแอมิโลสที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชจากพืชหัว คือ สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันพื้นบ้าน(Yam) และสตาร์ชมันเทศ มีปริมาณแอมิโลสประมาณร้อยละ 28.8 21.5 25.8 และ 23.4 ตามลำดับ (Zaidul et al., 2007) ทั้งนี้ ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชจากแต่ละแหล่งอาจแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว และสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะปลูกของพืชด้วย

2.6.1.2 แอมิโลเพกทิน (Amylopectin)

แอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของสายกลูโคส ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และมีความยาวแต่ละสายประมาณ 10 – 60 หน่วย (Degree of polymerization; DP) โดยที่แต่ละสายจะมาเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 (รูปที่ 2.12) ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 5 ของปริมาณพันธะที่อยู่ในแอมิโลเพกทินทั้งหมดแอมิโลเพกทินมีน้ำหนักประมาณ 1,000 เท่าของแอมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลนี้จะแตกต่างกันไปตามแหล่งของสตาร์ช (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อ อกุล ปิยะจอมขวัญ 2550)

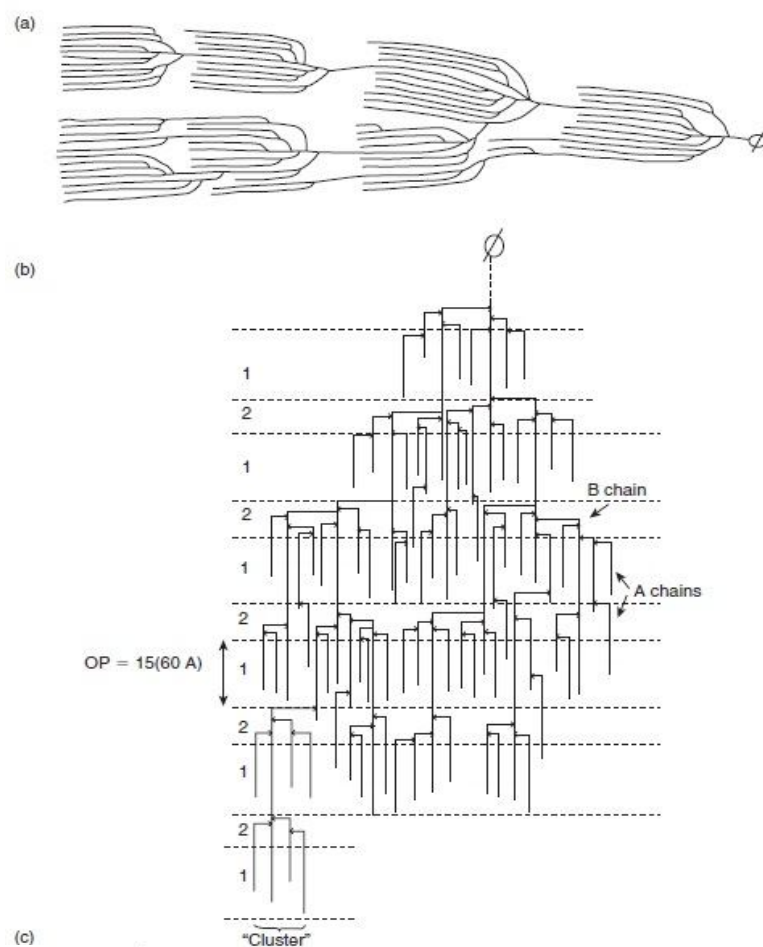


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Royal Society of Chemistry (2004; Online)

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน พบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอแบบจำลองการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินออกมาหลายรูปแบบ ได้แก่ French (1972) และ Nikuni (1978) ได้เสนอแบบจำลองชนิด cluster ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลที่นักวิจัยให้ความยอมรับจนถึงปัจจุบัน โดยสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินจะเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ เรียกแต่ละชั้นว่า cluster และใน 1 cluster จะประกอบด้วยชั้นผลึก (crystalline lamellae) และชั้น นอสส์ลูฐาน (amorphous lamellae) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ภายในโครงสร้าง cluster นี้ จะประกอบด้วยสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทิน 3 ชนิด คือ สาย A (A – chain) สาย B (B – chain) และสาย C (C – chain) โดยสาย A เป็นสายโซ่ที่ไม่มีสายโซ่อื่นใดมาเชื่อมต่อ (unbranched structure) แต่ด้าน reducing group ของสาย A เองจะไปต่อเป็นกิ่งของสายอื่นๆ สาย B (B – chain) เป็นสายที่มีสายโซ่อื่นๆ จำนวนมากกว่า 1 สาย มาเชื่อมต่อเป็นกิ่งบนสายของมัน และสาย B เอง ยังนำด้าน reducing group ไปเชื่อมต่อเป็นกิ่งของสายอื่นๆ ส่วนสาย C (C – chain) เป็นสายแทนที่มีแต่สายอื่นมาเชื่อมต่อเป็นกิ่งบนสายของมัน และสาย C เอง จะไม่นำด้าน reducing group ไปเชื่อมต่อบนสายอื่น ทำให้ยังคงมีด้าน reducing group เหลืออยู่ โดยโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน 1 โมเลกุลจะมีสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 Hizukuri (1986) ได้ศึกษาโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน และสามารถแยกสายโซ่แอมิโลเพกทินได้ 4 ชนิดตามขนาดความยาวจากสั้น สู่ยาวสุดตามลำดับ คือสายโซ่กิ่งก้านชนิด A B1 B2 B3 และ B4 โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 จะมีความยาวเท่ากับหรือน้อยกว่า 1 ชั้น cluster

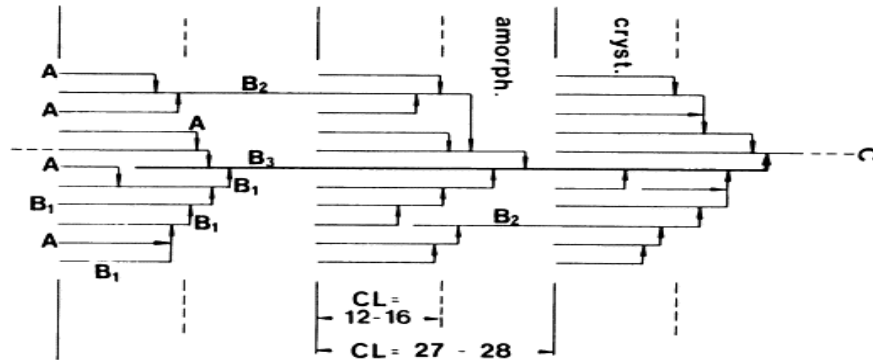
ส่วนสาย B2 B3 และ B4 จะเป็นสายโซ่ที่มีความยาวแผ่ขยายออกไป 2 3 4 หรือ >4 cluster ตามลำดับ โดยความยาวของ 1 cluster เท่ากับ 27-28 DP (Degree of polymerization) นอกจากนี้ ยังพบว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิด A B1 B2 และ B3+ มีขนาดความยาวของโมเลกุลเท่ากับ 6-12 13-24 25-36 และ ≥ 37 ตามลำดับ (Hanashiro, Aba and Hizukuri, 1996) ซึ่งการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินแต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับแหล่งและสายพันธุ์ของสตาร์ชเป็นหลัก



รูปที่ 2.13 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินแบบ cluster

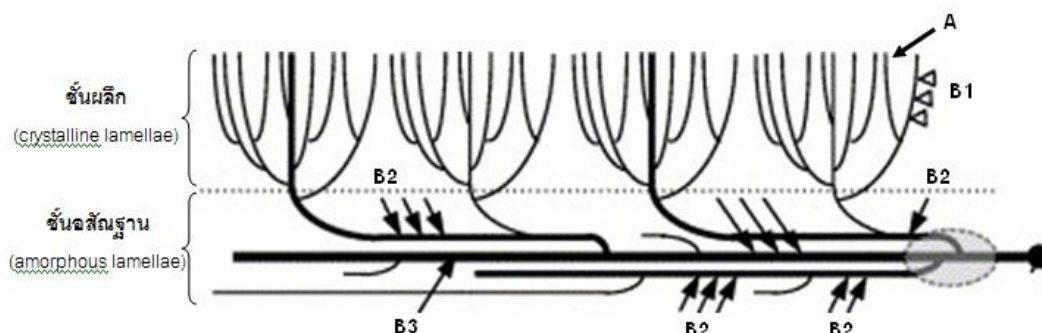
รูป a: cluster model เสนอโดย French (1972)

รูป b: cluster model แสดงถึงบริเวณชั้น ผลิตภัณฑ์ (หมายเลข 1) และบริเวณอัญฐาน (หมายเลข 2) (Robin et al., 1974)



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C
ที่มา: Hizukuri (1986)

นอกจากแบบจำลองชนิด cluster แล้ว Bertoft (2004) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลแอมิโลเพกทินที่เรียกว่าแบบจำลอง backbone (รูปที่ 2.15) ซึ่งจะเห็นว่าแอมิโลเพกทิน 1 โมเลกุล ประกอบด้วยชั้นผลึก (crystalline lamellae) และชั้นนอกสัณฐาน (amorphous lamellae) เพียงอย่างละ 1 ชั้นเท่านั้น โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด A (เส้นบาง) และ B1 (เส้นบางที่มีสายอื่นมาต่อ 1 สาย) อยู่ในชั้นผลึก ซึ่งเชื่อมต่อกับสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 (เส้นหนา) จำนวน 3 สาย และสาย B3 (เส้นหนามาก) จำนวน 1 สายที่อยู่บริเวณชั้นนอกสัณฐาน โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 แต่ละสายมักจะเชื่อมต่อกับสายโซ่กิ่งก้านสายสั้น 2 กลุ่ม



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแบบ backbone ของแอมิโลเพกทิน; สายโซ่กิ่งก้านชนิด A (เส้นบาง) และ B1 (เส้นบางที่มีสายอื่นมาต่อ 1 สาย) อยู่ในบริเวณชั้น ผลึกสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 (เส้นหนา) และสายโซ่กิ่งก้านชนิด B3 (เส้นหนามาก) อยู่ในบริเวณชั้น นอสัญฐาน(A) และ reducing end (Ø) ที่มา: ดัดแปลงจาก Bertoft (2004)

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแอมิโลเพกทินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า และมีกิ่งก้านสาขามากกว่าโครงสร้างของแอมิโลส ทำให้มีความสามารถในการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลต่ำกว่า อย่างไรก็ตามสายโซ่ยาวของแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้เคียงกันสามารถเกิดเกลียวคู่โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อ โดยอาจเกิดการรวมตัวกันระหว่างสายกิ่งที่อยู่ในชั้น cluster เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินก็ได้ ดังนั้นโครงสร้างและขนาดของแอมิโลเพกทินจึงเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

2.6.1.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบทางเคมีชนิดหนึ่งที่พบมากในสตาร์ชจากพืชหัวและราก เช่น มันฝรั่ง ซึ่งพบประมาณร้อยละ 0.3 - 0.4 ขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช โดยทั่วไปฟอสฟอรัสมักอยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 (C_3 และ C_6) ของหน่วยกลูโคส (Lineback, 1996) สตาร์ชที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงจะส่งผลทำให้เม็ดสตาร์ชมีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ ซึ่งแรงผลักระหว่างประจุลบจะทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีคุณสมบัติพองตัวง่ายจึงมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ (Galliard and Bowler, 1987)

2.6.1.4 โปรตีน

โปรตีนเป็นพอลิเพปไทด์ ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์สายตรงของกรดอะมิโนเชื่อมเข้ากันด้วยพันธะเพปไทด์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและกรดอะมิโนที่อยู่ใกล้กัน โดยทั่วไปมักพบอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้สตาร์ชมีอัตราการดูดน้ำ กำลังการพองตัว และการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลง (Hamaker, 1994) ทั้งยังทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง ส่งผลให้สีและกลิ่นของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป โดยมักพบในสตาร์ชธัญพืชที่มีโปรตีนสูง (Swinkels, 1985) การสกัดโปรตีนออกจากแป้งมักนิยมใช้สารละลายด่าง (alkali extraction) เนื่องจากโปรตีนที่พบมากในแป้งและละลายได้ดีในด่าง คือ กลูเตลิน (glutelin) ซึ่งพบว่ามีความถึงร้อยละ 80 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Helm and Burks, 1996)

2.6.1.5 ไขมัน

ไขมันภายในสตาร์ชมีทั้งอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช (surface lipid) ซึ่งประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) กลูโคลิพิด (glucolipids) และไขมันที่กระจายอยู่ทั่วไปภายในเม็ดสตาร์ช (internal lipid) โดยเชื่อมพันธะกับสายโซ่แอมิโลสหรือแอมิโลเพกทินอย่างหลวมๆ (Morrison, 1981) ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้งเมื่อเกิดความหนืด (paste) มีค่าลดลง ไขมันที่รวมตัวกับแอมิโลสหรือแอมิโลเพกทินสายยาวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนนี้ (Blanshard, 1987) มีความแข็งแรง และทนต่อการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ จึงไม่ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ และสารละลายแขวนลอยของสตาร์ชยังมีลักษณะขุ่นหรือทึบแสง (Morrison et al., 1993) ในขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชจะทำให้เกิดกลิ่น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Senevigen and Biliaderis, 1991)

2.6.2 เม็ดสตาร์ช

2.6.2.1 ลักษณะทั่วไปของเม็ดสตาร์ช

เมื่อพืชสังเคราะห์แสงได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะถูกลำเลียงมาสู่ส่วนที่เก็บไว้เป็นพลังงานของพืช โดยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้นจะอยู่รวมกันเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่และเก็บไว้ในลักษณะกลุ่มก้อน เรียกว่าเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งและสายพันธุ์ของสตาร์ช (Li and Yeh, 2001) โดยขนาดและรูปร่างจะแปรผันตั้งแต่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก รูปร่างหลายเหลี่ยม เช่น สตาร์ชข้าวเจ้า ไปจนถึงเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ รูปร่างเป็นวงรี คล้ายไข่ เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.1

การตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ชสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยสามารถตรวจสอบถึงรูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ช ตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่สภาวะต่างๆ และยังสามารถตรวจสอบการปนเปื้อนจากสตาร์ชชนิดอื่นได้นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์ยังสามารถใช้ตรวจสอบลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชได้ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) จะเห็นเงารูปกากบาทเกิดขึ้น เรียกว่า maltese cross โดยส่วนมืดเป็นเงาของบริเวณที่สายแอมิโลสกับแอมิโลเพกทินตั้งฉากและขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ส่วนพื้นที่สว่างจะเป็นตำแหน่งของสายแอมิโลสกับแอมิโลเพกทินที่ไม่ตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ และมีจุดที่กากบาทตัดกันตรงกลาง เรียกว่า ไฮลัม (helium) (Oates, 1997) การที่เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็น birefringence เป็นการยืนยันว่าเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ซึ่งหากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Kuakpetoon and Wang, 2007) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ยังมีข้อจำกัด คือ มีกำลังขยายไม่เพียงพอ ทำให้ไม่สามารถเห็นถึงโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อช่วยในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากมีกำลังขยายมากกว่าหลายร้อยเท่า จึงทำให้เห็นพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้ชัดเจน (Bemiller and Whistler, 2009)

ตารางที่ 2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ

แหล่งของสตาร์ช	ชนิดของสตาร์ช	ขนาด (μm)	รูปร่าง
ธัญพืช	ข้าวโพด ^a	5 - 18	กลม มีหลายเหลี่ยม และรูปร่างคล้ายแท่ง
	ข้าวสาลี ^b	ชนิด A : 18 – 33 ชนิด B : 2 - 5	กลม และค่อนข้างรี
หัว	มันฝรั่ง ^c	15 - 110	กลม และวงรี
ราก	มันเทศ ^c	2 - 42	กลม วงรี และมีหลายเหลี่ยม
	มันพี้น้ำ ^c	28.5 – 30.6	กลม และวงรี
	มันสำปะหลัง ^d	2.81 – 14.03	กลม และรูปถ้วย

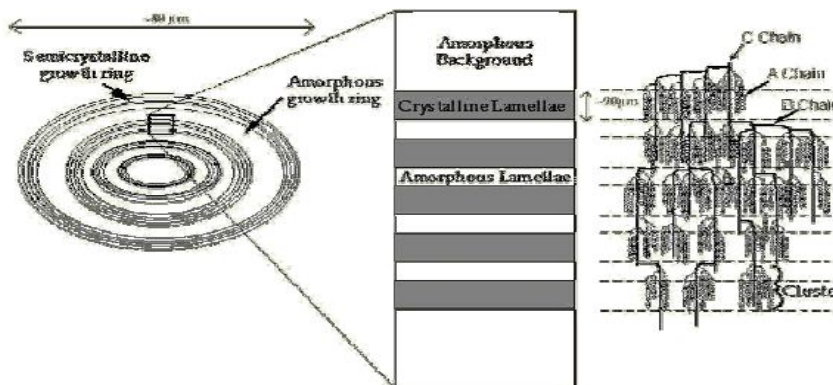
ที่มา: ^a Singh and Singh (2003) ^b Yoo and Jane (2002) ^c Hoover (2001)

^d Nwokocha et al. (2009)

2.6.2.2 โครงสร้างผลึก

เม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมาจัดเรียงตัวกัน ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก และส่วนอสัณฐาน เม็ดสตาร์ชจึงมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยส่วนสายโซ่สั้นของแอมิโลเพกทิน(สายโซ่กึ่งก้านชนิด A และ B1) จะเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) เกิดเป็นชั้นผลึก ส่วนชั้นอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสและสายโซ่ยาวของแอมิโลเพกทิน (สายโซ่กึ่งก้านชนิด B2 และ B3) (Hizukuri, 1986) ดังรูปที่ 2.16 โดยทั่วไปสตาร์ชแต่ละแหล่งจะมีร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กึ่งก้านแอมิโลเพกทินแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้สตาร์ชมีรูปแบบและปริมาณผลึกที่แตกต่างกัน โดย Hizukuri (1985) ได้กล่าวว่า ปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณสายโซ่กึ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 เนื่องจากสายโซ่กึ่งก้านชนิด B1 มี

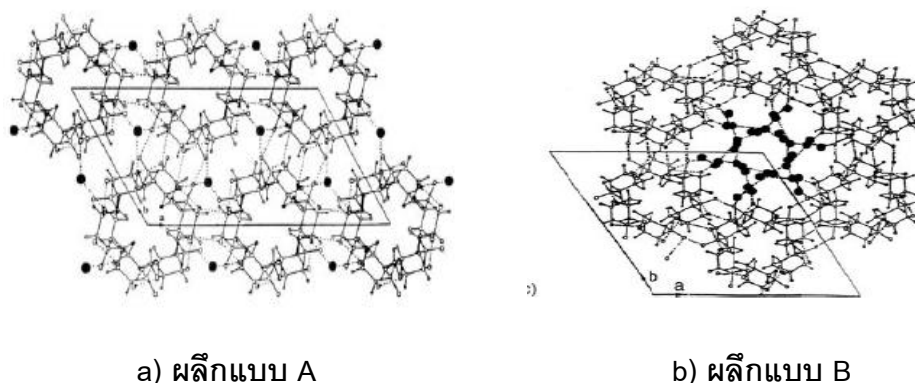
ความยาว (DP 13 – 24) พอดีกับความหนาของผลึก 1 ชั้น (crystalline lamella) ดังนั้นจึงสามารถเกิดเกลียวผลึกอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.16 โครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Jenkins et al. (1994)

โดยทั่วไป เม็ดสตาร์ชจะมีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นผลึกได้ 3 แบบ คือ A B และ C ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่โดยถ้ามีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างหนาแน่นมากจะเกิดผลึกแบบ A คือ มีน้ำแทรกตัวอยู่ 4 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ซึ่งจะพบได้ในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชส่วนใหญ่ และถ้ามีการเรียงตัวของโครงสร้างกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B คือ มีน้ำแทรกตัวอยู่ 6 โมเลกุลต่อ 1 unit cell ซึ่งพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชหัว เช่น มันฝรั่ง (Liu et al., 2003) ดังรูปที่ 2.17 และถ้าหากมีการจัดเรียงตัวผสมกันระหว่างแบบ A และ B นั้น จะจัดเป็นผลึกแบบ C ซึ่งมักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และสตาร์ชมันสำปะหลัง (Ahmad et al., 1999) ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดของโครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกได้โดยการสังเกตลักษณะการหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction) (Zobel, 1988)



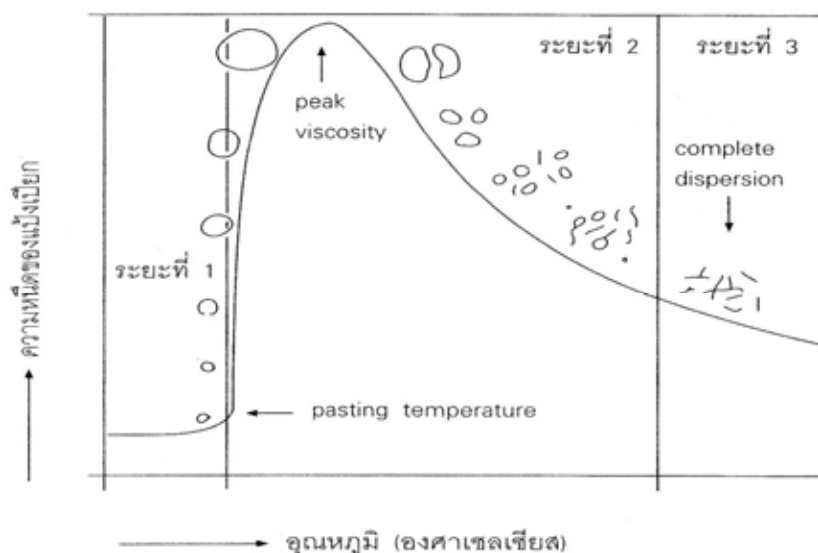
รูปที่ 2.17 รูปแบบผลึกของเม็ดสตาร์ชแบบ A และแบบ B โดยรูปหกเหลี่ยม แทนเกลียวคู่ แอมิโลเพคติน หรือผลึก จุดสีดำ แทนโมเลกุลของน้ำ

ที่มา: Bemiller และ Whistler (2009)

2.6.2.3 การพองตัวและการเกิดเจลาตินในเซชัน (Swelling and Gelatinization)

โดยปกติแล้วโครงสร้างของสตาร์ชจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ทำให้โมเลกุลสตาร์ชสามารถยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง ส่งผลให้สตาร์ชไม่สามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ แต่สามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach, McCowen and Schoch, 1959) เมื่อให้ความร้อนกับสารแขวนลอยสตาร์ช ที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชจะถูกทำลาย สายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชเริ่มคลายตัวออก หรือโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย สังเกตได้จากการหายไปของ maltese cross ภายใต้แสงโพลาไรซ์ ด้วยเหตุนี้ น้ำภายนอกจะสามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้ เม็ดสตาร์ชจะพองตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับน้ำ ภายนอกถูกดูดเข้าไปในเม็ดสตาร์ชมาก ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนตัวได้ยาก และความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุณหภูมิ ณ จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดนี้ จะเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) เมื่อให้ความร้อนต่อไปแอมิโลสจะหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชจะพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนกระทั่งเม็ดสตาร์ชแตกออกในที่สุด ส่งผลให้ความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนโมเลกุลสตาร์ชก็จะหลุด

ออกมาแขวนลอยอยู่ในสารละลายสตาร์ช ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ จะเรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) (รูปที่ 2.18) โดยอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน จะขึ้นกับแหล่งที่มาของสตาร์ชแต่ละชนิด (Lineback, 1984)



รูปที่ 2.18 การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Sanders (1996)

สตาร์ชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการพองตัวและช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ 1) ความแข็งแรงของโครงสร้างแอมิโลเพกทินบริเวณอสัญฐาน (amorphous lamellae) หรือค่า T_g (glass transition) ของบริเวณอสัญฐานระหว่างชั้นผลึก (crystalline lamellae) เนื่องจากผลึกจะเริ่มหลอมละลายจากการได้รับความร้อนก็ต่อเมื่อบริเวณอสัญฐานละลายหรือเคลื่อนตัวก่อน (Donovan, 1979; Donovan and Mapes, 1980) ดังนั้นหากบริเวณอสัญฐานมีค่า T_g สูง จะทำให้บริเวณอสัญฐานมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ยาก เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวได้น้อย และมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันสูง ซึ่งโดยทั่วไปนั้น T_g ของบริเวณอสัญฐานจะขึ้นกับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 ของแอมิโลเพกทิน (Slade and Levine, 1988) หากพิจารณาตามโครงสร้างแบบ backbone (รูปที่ 2.15) ที่เสนอโดย Bertoft (2004) จะพบว่าถ้าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชแหล่งใด

มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มาก บริเวณออสัญฐานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 อยู่ในลักษณะที่ขนานกัน จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มาก ส่งผลให้บริเวณออสัญฐานเกิดการเคลื่อนตัวได้ยาก หรือมีค่า T_g สูงขึ้น²⁾ ความแข็งแรงและสมบัติของโครงสร้างแอมิโลเพกทินบริเวณผลึก โดยพิจารณาจากการที่แอมิโลเพกทินมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 (DP 13-24) สูงแต่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A (DP 6-12) ต่ำ (Asaoka, Okuno and Fuwa, 1985; Shi and Seib, 1992) ซึ่งสายโซ่กิ่งก้านทั้งสองชนิดนี้ จะมีการเรียงตัวอยู่ในชั้นผลึกเดียวกัน (cluster) (Hizukuri, 1986) โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 จะมีความยาวใกล้เคียงกับความหนา 1 ชั้นผลึก ซึ่งหนาประมาณ DP 18-21 (Cameron and Donald, 1992) ดังนั้นหากแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูง จะทำให้เกิดเกลียวยาวตลอดทั้งชั้นผลึก ส่งผลให้ได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์และแข็งแรงทำให้โมเลกุลน้ำแทรกเข้าไปได้น้อย เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการพองตัวได้ยากและต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ในทางตรงกันข้ามหากแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ในชั้นผลึกมาก จะทำให้ความสมบูรณ์และแข็งแรงของผลึกต่ำ (Jane et al., 1999) 3) องค์ประกอบของสตาร์ช เช่น ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมันโดยสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสูงด้วย ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งเสริมให้โมเลกุลสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Jane et al., 1999) และไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โดยการขัดขวางโมเลกุลน้ำไม่ให้เข้าเม็ดสตาร์ชได้ง่าย (Yoo and Jane, 2002) สารละลายสตาร์ชจึงมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันสูง นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากปริมาณฟอสฟอรัส โดยฟอสฟอรัสเป็นโมเลกุลที่มีประจุพินิวเป็นลบ จึงก่อให้เกิดแรงผลักกันทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้โครงร่างผลึกของแอมิโลเพกทินคลายตัวหรืออ่อนแอลง จึงทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ง่าย สารละลายสตาร์ชจึงมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำ (Wischmann et al., 2005) เป็นต้น จากปัจจัยข้างต้นส่งผลให้สตาร์ชแต่ละชนิดมีความสามารถในการพองตัวและช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ

แหล่งของสตาร์ช	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (°C)
มันฝรั่ง ^a	69.1
มันเทศ ^a	81.5
มันพี้น้ำ ^a	71.1
มันสำปะหลัง ^a	72.7
ข้าวโพด ^b	78.9
ข้าวสาลี ^c	85.0

ที่มา: ^a Zaidul et al. (2007); ^b Sandhu and Singh (2007); ^c Yoo and Jane. (2002)

การเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชนั้น จะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และส่งผลให้สารละลายสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้น (Zobel, 1984) ดังนั้นจึงสามารถใช้คุณสมบัติเหล่านี้ในการติดตามหรือตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้หลายวิธี คือ ตรวจสอบจากการเปลี่ยนแปลงการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีฐานให้ความร้อน (Kofler hot stage microscope) (Maaruf et al., 2001) ตรวจสอบรูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องภายใต้แสงปกติหรือแบบชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ติดตามความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Rapid Viscosity Analyzer (RVA) และยังติดตามช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็นต้น (Steven and Elton, 1971)

2.6.2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาติโนเซชันอย่างสมบูรณ์ แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของสตาร์ชขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง

โมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้ สามารถอุ้มน้ำเอาไว้ เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียวข้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) (Hoover, 2001) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก หรือเก็บเจลสตาร์ชไว้ในระยะเวลาที่นานขึ้น ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชจะถูกบีบออกมาจนเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis โดยปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (Smith, 1979)

โดยทั่วไปแล้วทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้ แต่จะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ต่างกัน โดยลักษณะของโมเลกุลแอมิโลสที่เป็นสายตรง จึงสามารถเกิดการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ได้ง่ายและรวดเร็ว (short-term) ซึ่งมักจะเกิดในระยะแรกของการเก็บรักษาเจล ผลึกที่เกิดจากการรวมตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสนี้ จะมีความแข็งแรงสูง ในขณะที่โมเลกุลแอมิโลเพกทินมีขนาดใหญ่และเป็นกิ่งก้านเกะกะ จึงจัดเรียงตัวใหม่ได้ยากและใช้เวลานาน (long-term) ซึ่งมักจะเกิดในกรณีการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะยาว ผลึกที่เกิดขึ้น จะมีความแข็งแรงต่ำกว่าผลึกที่เกิดจากโมเลกุลแอมิโลส (Miles et al., 1985)

การเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ 1) ปริมาณสัดส่วนสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 (DP 13 – 24) และชนิด A (DP 6 – 12) ซึ่งมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันที่สมบูรณ์และแข็งแรงของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (Jane et al., 1999) 2) ปริมาณแอมิโลสในสตาร์ช ซึ่งมีโครงสร้างขนาดเล็กและเป็นเส้นสายสั้นๆ จึงสามารถเกิดการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ได้ง่ายและรวดเร็ว (Miles et al., 1985) 3) องค์ประกอบของสตาร์ช เช่น ปริมาณไขมัน หรือ ฟอสฟอรัส ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 2 ชนิด จะขัดขวางการกลับมาเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช ดังนั้นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีปริมาณน้อยและไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมีค่าต่ำ (Buleon and Colonna, 2004; Wischmann et al., 2005)

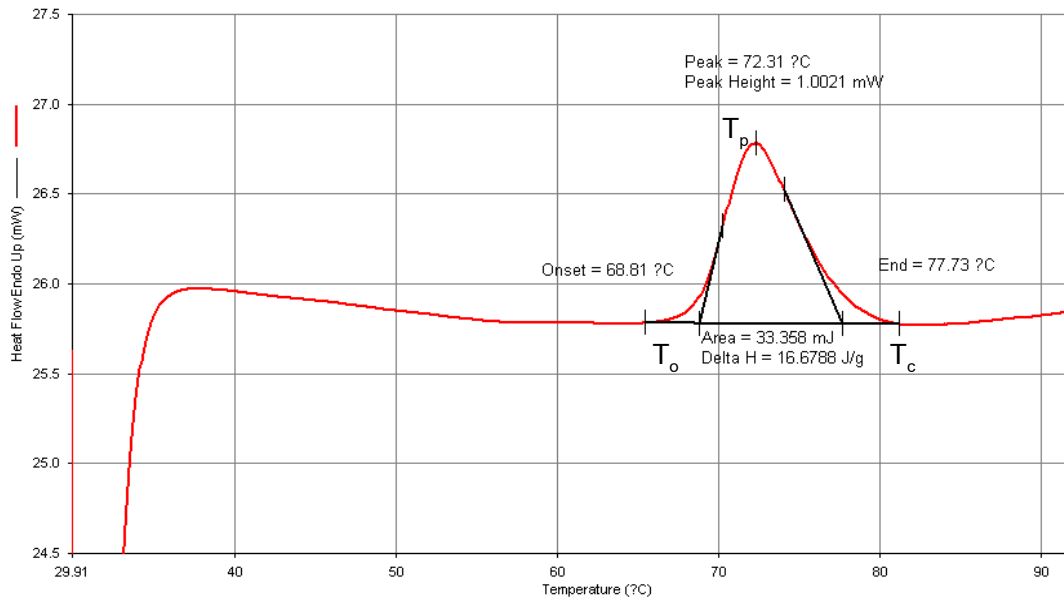
ปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช สามารถประเมินได้ด้วยค่าการคืนตัว (setback) ของเจลสตาร์ช ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง RVA

หรือพิจารณาจากค่าเอนทัลปี (ΔH_{retro}) ที่ใช้ในการหลอมละลายผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ จากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน โดยใช้เครื่อง DSC ถ้าหากว่าสตาร์ชสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก ค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกเกิดใหม่และค่าการคืนตัวก็จะมากไปด้วย (Collado and Corke, 1999)

2.6.2.5 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

2.6.2.5.1 สมบัติทางความร้อน

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเป็นสมบัติชนิดหนึ่งของสตาร์ช สามารถตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งจะวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างในรูปของฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยมีหลักการทำงาน คือ วัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้กับตัวอย่าง และตัวอย่างอ้างอิง (reference) ซึ่งตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้จะเป็นภาชนะ (pan) เปล่า ไม่ได้ใส่ตัวอย่าง เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเปลี่ยนสถานะ ซึ่งตัวอย่างจะดูดหรือคายพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลง เครื่องจะวัดพลังงาน (enthalpy; ΔH) ของตัวอย่างออกมาในรูปของเทอร์โมแกรม (thermogram) ตัวอย่างเทอร์โมแกรมที่ได้จากการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC ดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 โดยแสดงค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช (onset temperature; T_o) อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy; ΔH_{gel}) โดย ΔH เป็นค่าที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ บ่งบอกถึงปริมาณ หรือคุณภาพของโครงสร้างผลึก (Tester and Morrison, 1990) ปริมาณเกลือของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน การสูญเสียความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช (Gernat et al., 1993) และยังใช้บอกพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจน (Singh, McCarthy and Singh, 2006) ส่วนอุณหภูมิ T_o , T_p และ T_c เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสถียร ความสมบูรณ์ และขนาดของโครงร่างผลึก (Shi and Seib, 1992)



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเส้นกราฟความร้อน (thermogram) ที่ได้จากการเกิดเจลาตีไนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่ง

ที่มา: เส้นกราฟความร้อนที่ได้จากการทดลอง

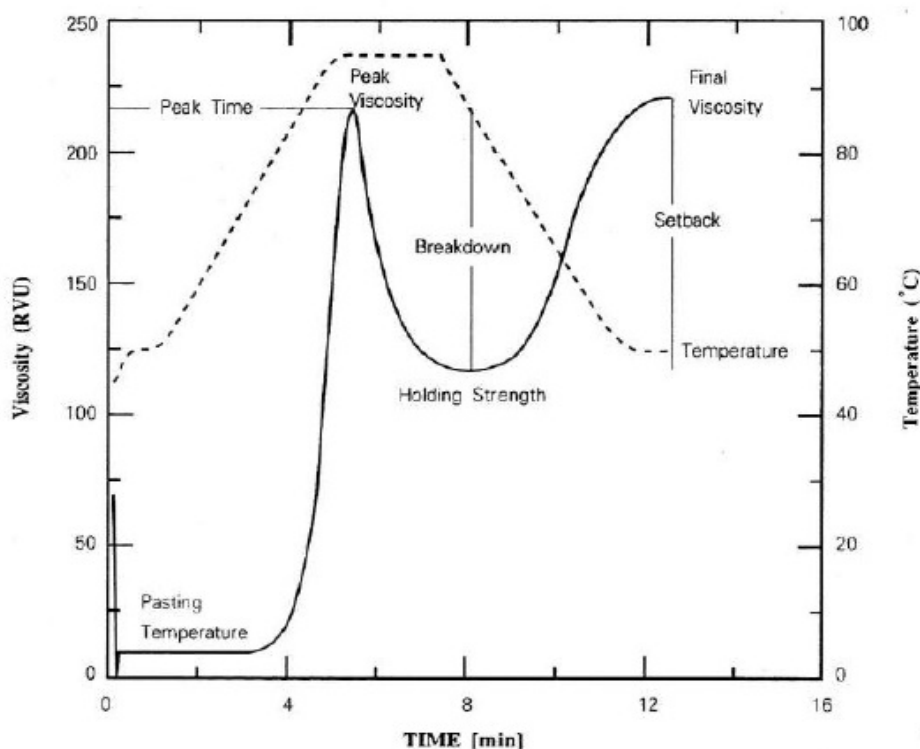
โดยทั่วไปสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่มีการศึกษาจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลาตีไนเซชัน และสมบัติทางความร้อนของผลึกสตาร์ชที่จัดเรียงตัวใหม่หลังการเกิดรีโทรเกรเดชัน การเปลี่ยนแปลงความร้อนและพลังงานของการเกิดเจลาตีไนเซชันมักขึ้นอยู่กับปริมาณผลึก ความสมบูรณ์ และแข็งแรงของโครงสร้างแอมิโลเพกทินเป็นหลัก โดย Ratnayake et al. (2001) ซึ่งศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชจากถั่ว 4 สายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากถั่วสายพันธุ์ Carneval ที่มีปริมาณความเป็นผลึก (% Crystallinity) สูง และยังมีสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 สูง ในขณะที่มีชนิด A ต่ำ นั้น จะมีค่า T_o , T_p , T_c และ ΔH_{gel} ของการเกิดเจลาตีไนเซชันสูงที่สุดด้วย Matveev et al. (2001) ยังพบว่าความยาวและน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่แอมิโลเพกทิน สามารถส่งเสริมให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิและพลังงานความร้อนในการทำลายพันธะไฮโดรเจนสูงขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ องค์ประกอบทางเคมีบางชนิดของสตาร์ช เช่น ฟอสฟอรัส ยังทำหน้าที่ขัดขวางโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินทำให้เกิดการคลายตัวหรืออ่อนแอลง จึงใช้อุณหภูมิต่ำในการสลายพันธะ (Wischmann et al., 2005) การเปลี่ยนแปลงความร้อนและพลังงานของการหลอมละลายผลึก

สตาร์ชที่จัดเรียงตัวใหม่จากการเกิดรีโทรเกรเดชันมักขึ้นอยู่กับปริมาณความเป็นผลึก ความสมบูรณ์ และแข็งแรงของสายโซ่แอมิโลเพกทินจากสตาร์ช เช่นเดียวกันกับการเกิดเจลาติโนเซชัน (มีสายโซ่แอมิโลเพกทินชนิด B1 สูง แต่มีชนิด A ต่ำ) แต่ปริมาณและความแข็งแรงของผลึกที่สร้างขึ้นมาใหม่จะน้อยกว่ามาก จึงใช้อุณหภูมิและพลังงานในการทำละลายพันธะไฮโดรเจนของผลึกใหม่ต่ำกว่า (Liu et al., 2003) นอกจากนี้ Shi and Seib (1992) ยังกล่าวว่สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสขนาดเล็ก หรือมีแอมิโลเพกทินสายยาวจำนวนมากจะสามารถรวมตัวเกิดเป็นผลึกใหม่ได้ง่าย จึงใช้อุณหภูมิและพลังงานในการสลายผลึกสูงกว่า ในขณะที่สตาร์ชที่มีปริมาณพอสฟอรัสสูง เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง จะใช้พลังงานในการสลายผลึกต่ำกว่า เนื่องจากโมเลกุลของพอสฟอรัสจะเคลื่อนที่เข้าไปขัดขวางการรวมตัวของโมเลกุลสตาร์ช

2.6.2.5.2 สมบัติทางความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช ซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียงโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดระหว่างให้ความร้อนได้ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งจะมีการให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ชพร้อมทั้งใช้ใบพัดกวนเพื่อให้แรงเฉือน โดยเครื่องจะเริ่มให้ความร้อนกับสารแขวนลอยสตาร์ชที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 95 °C และคงอุณหภูมินี้ไว้ประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงเป็น 50 °C (Newport scientific, 2007) ซึ่งการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช เครื่องจะแสดงผลออกมาในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting curve) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.20 โดยระยะแรกของการให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยสตาร์ชที่อุณหภูมิ 50 °C เม็ดสตาร์ชจะมีการพองตัวเล็กน้อย จึงยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยเส้นกราฟจะคงที่ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชัน ความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเส้นกราฟจะมีความชันเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกอุณหภูมิตั้งการละลายสตาร์ชเริ่มเกิดความหนืดว่า Pasting temperature (PT) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนถึงอุณหภูมิ Peak temperature ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สารแขวนลอยสตาร์ชจะมีความหนืด

สูงสุด (Peak viscosity; PV) ค่า PV นั้นสามารถบอกถึงความสามารถในการพองตัวอย่างอิสระของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตกออก (Zobel, 1984)



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)
ที่มา: Newport scientific (2007)

เมื่อให้ความร้อนกับสารแขวนลอยสตาร์ชต่อไปอีกจะทำให้เม็ดสตาร์ชแตก โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะแขวนลอยอย่างอิสระในน้ำ เรียกว่า สารละลายสตาร์ช โดยระหว่างที่สารละลายสตาร์ชถูกใบพัดกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิคงที่ คือ 95°C ความหนืดของสารละลายสตาร์ชจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่มีความหนืดต่ำสุด (Trough) ซึ่งการลดลงของความหนืดเกิดขึ้นจากแรงเฉือนที่กระทำกับโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในสารละลายสตาร์ชซึ่งเรียกว่า shear thinning และเมื่อค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงในขณะที่ยังให้แรงเฉือนด้วยใบพัดกวนต่อไป ความหนืดของสารละลายสตาร์ชจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity; FV) ซึ่งการ

ที่สารละลายสตาร์ชสามารถกลับมาที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้งได้นั้น เนื่องจากโมเลกุลแอมิโลส และแอมิโลเพกทินที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย สามารถกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ภายในโมเลกุลได้ (Hoseney, 1998) นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากกราฟ คือ ค่าความหนืดลดลง (Breakdown; BD) และค่าการคืนตัว (Setback from trough; SB) โดยค่า BD เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ณ ช่วงอุณหภูมิที่ได้รับความร้อนและแรงเค้นคองที่ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเค้น และความร้อนของโมเลกุลสตาร์ช (Sandhu and Singh, 2007) ส่วนค่า SB เป็นค่าที่ได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด ณ ช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Smith, 1979; Takeda, Takeda and Hizukuri, 1983) ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมา สามารถนำไปใช้พิจารณาเลือกแหล่งสตาร์ชให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายได้

ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสตาร์ช สมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ช เช่น ปริมาณไขมัน ฟอสฟอรัส และแอมิโลส (Yoo and Jane, 2002) ขนาดเม็ดสตาร์ช การกระจายตัวตามขนาดของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Singh and Singh, 2003) ขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน และองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดสตาร์ช (Hamaker and Griffin, 1990; Tester, 1997) เป็นต้น โดยสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชเหล่านี้ จะแตกต่างกันไปตามแหล่งและสายพันธุ์ของสตาร์ช จึงส่งผลให้สตาร์ชต่างแหล่งและต่างสายพันธุ์มีสมบัติทางความหนืดที่ต่างกันด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Zaidul et al. (2007) พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงทำให้มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดต่ำ ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดลดลงมีค่าสูงมาก ในขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณแอมิโลสสูง แต่มีปริมาณไขมันต่ำ จึงไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสกับไขมันหรือเกิดปริมาณน้อย จึงไม่ส่งเสริมให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรงและสมบูรณ์ ทำให้มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดลดลงมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่มีค่าการคืนตัวที่สูง เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสสามารถเกิดการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ได้ง่ายและรวดเร็ว (Miles et al., 1985) นอกจากนี้ Cameron and Donald (1992) ยังได้กล่าวว่า สตาร์ชที่

มีสายใยกึ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 และมีปริมาณความเป็นผลึกสูง จะทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความสมบูรณ์และแข็งแรง เม็ดสตาร์ชจะพองตัวได้น้อย จึงมีค่าความหนืดสูงสุดค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชนั้น จัดเป็นสมบัติเชิงหน้าที่ ซึ่งจะต้องพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชร่วมกัน

2.6.2.5.3 สมบัติการเกิดเจล

การเกิดเจลของสตาร์ชนั้น เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของสตาร์ช โดยเมื่อสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชัน โมเลกุลน้ำ จะถูกกักเก็บไว้ในโครงร่างแห 3 มิติของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้เกิดเป็นของแข็งกึ่งเหลว เทไหลไม่ได้ เรียกว่า เจล และเมื่อมีการลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกหรือเก็บสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ชจะแน่นมากขึ้น (Smith, 1979) จนกระทั่งโมเลกุลของน้ำ อธิระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมา เรียกว่า syneresis ส่งผลให้เจลมีลักษณะที่แน่นแข็ง ไม่ยืดหยุ่น

การเกิดเจลสตาร์ชนั้น มีความสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยสตาร์ชจากแต่ละแหล่งจะมีลักษณะของเจลสตาร์ชที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปพิจารณาเลือกแหล่งของสตาร์ชให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเครื่องมือที่นิยมใช้ศึกษาเจลสตาร์ช คือ Texture Analyzer ซึ่งค่าที่ได้จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชโดยใช้หัวเจาะ คือ ค่าความแข็ง (Hardness) ซึ่งค่าความแข็งของเจลสตาร์ชเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้จนเกิดการเปลี่ยนแปลงและรูปร่างของเจลสตาร์ชขณะที่มีการกดหัวเจาะลงบนเจลในครั้งแรก ซึ่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของเจลสตาร์ช โดยความแข็งแรงของเจลที่แตกต่างกันมักเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิด (Miles et al., 1985) โดยเจลสตาร์ชที่มีความแข็งแรงนั้น มักจะมีปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทินสายยาวจำนวนมาก (Mua and Jackson, 1997)

2.7 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

โดยทั่วไปฟลาวาร์และสตาร์ชจากพืชนอกจากเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของมนุษย์แล้ว ยังมีสมบัติเฉพาะตัวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้

2.7.1 การประยุกต์ใช้ฟลาวาร์

ในปัจจุบันมีการนำแป้งฟลาวาร์จากพืชมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาลี เป็นต้น ซึ่งแป้งเหล่านี้จัดเป็นแป้งทางการค้าที่ผลิตเพื่อจำหน่ายทั่วไป ซึ่งอาจจำหน่ายเป็นผงแป้งโดยตรง เช่น แป้งชุปทอด หรือตัดแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ขนมปัง เส้นก๋วยเตี๋ยว ยา และเครื่องสำอางค์ เป็นต้น เนื่องจากอุตสาหกรรมแป้งเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่และค่อนข้างหลายหลาย ทั้งหน่วยงานและนักวิจัยจึงมีการเสาะหาพืชแป้งแหล่งใหม่ๆ มาผลิตเป็นแป้งฟลาวาร์อยู่เสมอ ซึ่งฟลาวาร์จากมันเทศนอกจากมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบสูงเทียบเท่ากับแป้งอุตสาหกรรมแล้วยังมีสารพิษเคมีที่มีประโยชน์ต่างๆ (Teow et al., 2007) ดังนั้น จึงมีนักวิจัยหลายท่านสนใจนำฟลาวาร์มันเทศมาประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 โดย กุลยา ลี มรุ่งเรืองรัตน์(2534) ได้ศึกษาการผลิตคูกี้ จากแป้งมันเทศพันธุ์พื้นเมือง 4 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เกษตร (เนื้อสีเหลือง) พันธุ์กระต่าย (เนื้อสีขาว) พันธุ์ไข่ (เนื้อสีส้ม) และพันธุ์ต่อเผือก (เนื้อสีขาวปนม่วง พบว่าแป้งมันเทศพันธุ์เกษตรมีปริมาณโปรตีน (ร้อยละ 3.58 โดยน้ำหนักแห้ง) และปริมาณแป้ง (ร้อยละ 16.44 โดยน้ำหนักแห้ง) สูงที่สุด จึงเลือกแป้งมันเทศสายพันธุ์เกษตรมาศึกษาต่อในขั้นต้นของการทำคูกี้ โดยแปรปริมาณ shortening และสารให้กลิ่นรสเนย จากนั้น นำสูตรที่ได้คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงสุดมาปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยแปรปริมาณน้ำ และไขมันเปรียบเทียบกับคูกี้จากแป้งสาลี พบว่าคะแนนเฉลี่ยด้านสีและรสชาติไม่แตกต่างกัน ส่วนด้านกลิ่นและลักษณะเนื้อสัมผัสจะแตกต่างกัน ส่วน Limroongreungrat and Huang (2007) ศึกษาการตัดแปรรูปแป้งมันเทศเนื้อสีส้มด้วยการปรับค่า (alkaline-treated) เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตเส้นพาสต้า และนำแป้งตัดแปรรูปจากมันเทศมาเสริมด้วยแป้งถั่วเหลืองกำจัดไขมัน (defatted soy flour; DSF) และโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate; SPC) โดยแปรระดับความเข้มข้นของสาร

เสริม คือ 0 15 30 และ 45 กรัมต่อ 100 กรัมแป้งมันเทศดัดแปร นำไปวิเคราะห์ค่าทางเนื้อสัมผัสต่างๆ พบว่าแป้งมันเทศดัดแปรด้วยการปรับค่าให้คุณค่าทางโภชนาการสูง ให้สีธรรมชาติ(สีส้มปนเหลือง) และยังมีปริมาณบีต้าแคโรทีนสูง ส่วนแป้งดัดแปรที่ถูกเสริมด้วย DSF และ SPC ที่ระดับความเข้มข้น 15 กรัมต่อ 100 กรัมแป้งมันเทศดัดแปรจะให้ค่าวิเคราะห์ทางเนื้อสัมผัสต่างๆ ใกล้เคียงกับแป้งดัดแปรที่ไม่ถูกเสริมด้วยDSF และ SPC

ตารางที่ 2.3 การประยุกต์ใช้ฟลาวอร์มันเทศต่างสายพันธุ์

สายพันธุ์ของ มันเทศ	สีเนื้อใน	การประยุกต์ใช้	แหล่งอ้างอิง
Tainong 57 ^a	เหลือง	สารต้านอนุมูลอิสระ	^a Shih et al. (2009)
Tainong 66 ^a	ส้ม	ในระบบน้ำเหลือง	
ZiA ₀ ^b	ม่วง	สีผสมอาหาร	^b Fan et al. (2007)
BC ^c	ส้ม	Pasta	^c Limroongreungrat and Huang (2007)
Toukourou ^d	-	ทดแทนแป้งสาลีบางส่วน	^d Zaidul et al. (2007)
เกษตร ^{e,f}	เหลือง	ทดแทนแป้งสาลีบางส่วน และคุกกี้	^e ชูติมา แต่งสกุลสุวรรณ และจิราพร ศิริติกุล (2534) ^f กุลยา ลี มุ่งรุ่งเรืองรัตน์(2534)
แม่โจ้ ^g	ขาว	Edible Film	^g มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด สายสนม ประดิษฐ์ดวง และสายพิน มณีพันธ์ (2535)
กระต่าย ^f	ขาว	คุกกี้ และสกัด β -amylase	^f กุลยา ลี มุ่งรุ่งเรืองรัตน์(2534)
ไซ ^h	ส้ม		^h วาทีน ปรีชาจารย์ และฤดีวรรณ เลหาทิตติกุล (2530)
ต่อเฟือก ^h	ขาวปนม่วง	สกัด β -amylase	

ในต่างประเทศมีการวิจัยและประยุกต์ใช้ฟลาวอร์มันเทศในอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องและหลากหลาย หากแต่งานวิจัยที่เกี่ยวกับฟลาวอร์มันเทศของพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยยังมีอยู่น้อย และมีข้อจำกัดอยู่มากในด้านข้อมูลพื้นฐาน ผู้วิจัยจึงเห็นว่าควรศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของฟลาวอร์มันเทศต่างสายพันธุ์ให้มากขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้ในอุตสาหกรรมให้เหมาะสมต่อไป

2.7.2 การประยุกต์ใช้สตาร์ช

การประยุกต์ใช้สตาร์ชในอุตสาหกรรมอาหารนั้น มีวัตถุประสงค์แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปสตาร์ชที่เติมลงในอาหารอาจจะทำหน้าที่ต่างๆ ดังนี้ เพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ (thickening agent) เพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ (colloid stabilizer) สร้างโครงสร้างเจล (gel-forming agent) รักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์ (moisture retention) เชื่อมส่วนผสมต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ (binder) เป็นสารเคลือบ (coat) และเป็นสารให้ความมันเงา (glazing agent) (Mason, 2009) เป็นต้น นอกจากอุตสาหกรรมอาหารแล้ว สตาร์ชยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเส้นใยผ้า ใช้เป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์สารโพลีเมอร์เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ และใช้ในอุตสาหกรรมยา เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปการจะนำสตาร์ชไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะทางเคมีกายภาพของสตาร์ช เนื่องจากสตาร์ชจากต่างแหล่งและต่างสายพันธุ์ มีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติเฉพาะในการใช้งานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงควรเลือกแหล่งสตาร์ชให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นสตาร์ชที่ได้จากส่วนรากของพืชเช่นเดียวกับสตาร์ชมันเทศ เป็นสตาร์ชที่มีความหนืดสูง โดยมีค่าความหนืดลดลงสูงเมื่อผ่านการปรุงอาหาร สตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะค่อนข้างหนืดและใส ทั้งนี้ เป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชจากมันสำปะหลังจะมีน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสสูงกว่า และมีสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินที่ยาวกว่า ทั้งสองปัจจัยนี้

จึงส่งผลกระทบต่อการศึกษาในเซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ช (Mason, 2009) โดยทั่วไปสตาร์ชมันสำปะหลังมักถูกนำไปใช้เป็นส่วนให้ความหนืดกับผลิตภัณฑ์บางชนิด แต่เนื่องจากแป้งเปียกของสตาร์ชมันสำปะหลังนี้ ไม่ค่อยคงตัว จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้งเพื่อเพิ่มความคงตัวให้กับแป้งเปียกก่อนจะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ (Moore et al., 1984) นอกจากนี้ สตาร์ชมันสำปะหลังยังมีการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเด็กเนื่องจากมีลักษณะที่บริสุทธิ์ (Mason, 2009)

สตาร์ชข้าวโพดเป็นสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช ซึ่งมีปริมาณมากและถูกนำมาใช้มากที่สุด เมื่อสตาร์ชข้าวโพดได้รับความร้อนจะเป็นแป้งเปียกที่มีลักษณะหนืดและขุ่น และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะได้เจลสตาร์ชที่มีความทึบแสงและมีความยืดหยุ่น เป็นเจลที่มีลักษณะเป็น short-gel สตาร์ชข้าวโพดนิยมนำมาใช้ทั้งในรูปแบบแป้งดิบ (native starch) และสตาร์ชดัดแปร (modified starch) โดยสตาร์ชข้าวโพดมักถูกนำมาเติมในแป้งฟู' นซึ่งเป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) หรือใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารให้ความหวาน (corn syrup) (Mason, 2009) นอกจากนี้ สตาร์ชข้าวโพดยังอาจนำไปใช้เพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ซอส ใส้พายหรือใส้พุดดิ้ง ที่มีอายุการเก็บสั้น (Moore et al., 1984)

สตาร์ชข้าวเจ้าเป็นสตาร์ชจากธัญพืช มีความหลากหลายของสายพันธุ์ซึ่งจะมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกันไป เนื่องจากสตาร์ชข้าวเจ้าจากข้าวต่างสายพันธุ์นั้น จะมีปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ เมื่อเติมลงไปในการผลิตจะให้ความรู้สึกเนียน และให้ความรู้สึกคล้ายครีมเมื่อรับประทาน ซึ่งอาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม นอกจากนี้ สตาร์ชข้าวเจ้าเป็นสตาร์ชที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก จึงใช้เป็นองค์ประกอบในแป้งฟู' นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง หรือใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และยังเป็นส่วนผสมในการผลิตลูกกวาดได้ด้วย สำหรับสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงนั้น นิยมใช้ประกอบอาหารประเภททอด เนื่องจากจะให้เนื้อสัมผัสที่กรอบ หรือหากนำไปนึ่งเมื่อเย็นลงจะเกิดแผ่นฟิล์มเป็นมันดูสวยงาม (Mason, 2009) นอกจากนี้ ฟลาวร์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักถูกนำไปเป็นผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว และเส้นขนมจีน เนื่องจากมีสมบัติในการเกิดเจลสูง

สตาร์ชมันฝรั่งเป็นสตาร์ชจากพืชหัวที่นิยมใช้ทั่วไปในยุโรป โดยเมล็ดสตาร์ชมันฝรั่งนี้ มีขนาดใหญ่ มีการพองตัวและการละลายได้มากกว่าเมล็ดสตาร์ชจากธัญพืช แป้งเปียกมีค่าความหนืดสูง นอกจากนี้ สตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการปรุงสุกจะมีความเสถียรน้อยกว่าสตาร์ชจากธัญพืช เจลสตาร์ชมันฝรั่งมีลักษณะเหนียวคล้ายยาง มีความใสและยืดหยุ่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา นิยมนำสตาร์ชมันฝรั่งมาเติมลงในซูประป้องกันเป็นตัวเชื่อมส่วนผสมต่างๆ และยังเป็นสารทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด นอกจากนี้ สตาร์ชมันฝรั่งยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเพิ่มความเข้มข้นหรือเพิ่มความหนืดให้ผลิตภัณฑ์ประเภท ซอส ไข่พายและไส้พุดดิ้ง (Mason, 2009) เป็นต้น

สตาร์ชที่กล่าวมานี้ เป็นสตาร์ชทางการค้าที่ใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมซึ่งมีการศึกษาและนิยมนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายแล้ว ส่วนสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย นั้นยังมีการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ น้อย ทั้งทั้งที่เป็นสตาร์ชที่ได้จากพืชแป้ง ซึ่งปลูกได้ง่าย มีความหลากหลายของสายพันธุ์ และยังมีองค์ประกอบของสตาร์ชอยู่สูง จึงมีความเป็นไปได้ที่ควรส่งเสริมให้ปลูกและนำมาใช้เป็นแหล่งของสตาร์ชเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 หัวมันเทศและมันฝรั่ง

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย หัวมันเทศ 4 สายพันธุ์ คือ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) T101 (เนื้อ อสีส้ม) พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลือง) และ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) หัวมันฝรั่ง 1 สายพันธุ์ คือ พันธุ์แอตแลนติก โดยมันเทศทั้ง 4 พันธุ์ ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรพิจิตร กรมวิชาการเกษตร ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่กรมวิชาการเกษตรส่งเสริมให้ปลูก เนื่องจากมีสีเด่นชัด และอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ปลูกในแปลงทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิ และสภาวะตลอดการปลูกเป็นเวลาประมาณ 100 วัน ส่วนมันฝรั่งซึ่งใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยเกษตรหลวงเชียงใหม่ กรมวิชาการเกษตร



รูปที่ 3.1 หัวมันเทศและมันฝรั่งที่ใช้ในงานวิจัยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา ได้แก่ มันฝรั่งพันธุ์แอตแลนติก มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) พจ. 65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) และ พจ. 265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม)

3.1.2 การสกัดสตาร์ช

สกัดสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งตามวิธีที่ดัดแปลงจาก ดารินทร์ กุลมานิชวงศ์ (2549) โดยนำมันเทศหรือมันฝรั่งที่ปอกเปลือกแล้วหั่นเป็นชิ้น ขนาดเล็กบดผสมกับสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 3.12 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วนมันเทศต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 (w/v)

ด้วยเครื่องปั่นผสม (Philips รุ่น HR2001, China) ความเร็วสูงสุด เป็นเวลา 2 นาที ที่ังสารแขวนลอยไว้เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ (Hettich zentrifugen รุ่น Rotanta460 R, UK) ที่ความเร็วรอบ 8,000 x g เป็นเวลา 15 นาที อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เทส่วนผสมใส่ด้านบนที่ัง และดูดชั้นสีเหลืองบริเวณผิวหน้าของส่วนตะกอนสตาร์ชออก จากนั้นนำตะกอนสตาร์ชไปล้างด้วยน้ำ ากล้นโดยเขย่าผสมให้เข้ากัน ในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำ เท่ากับ 1:2 (w/v) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์เช่นเดียวกับชั้นตอนที่แล้ว โดยเทส่วนผสมสีเหลืองบริเวณผิวหน้าออก ทำซ้ำชั้นตอนดังกล่าวจนค่า pH ของสารแขวนลอยสตาร์ชเป็นกลาง จึงนำตะกอนสตาร์ชที่ได้ไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Heraeus รุ่น ST5042, Germany) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องปั่นผสม แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ได้เป็นสตาร์ชมันเทศ หรือมันฝรั่ง เก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้อง

3.1.3 การเตรียมฟลาวัวร์

เตรียมฟลาวัวร์มันเทศและฟลาวัวร์มันฝรั่งตามวิธีที่ดัดแปลงจากYadav (2007) โดยนำหัวมันเทศและมันฝรั่งมาปอกเปลือก ล้างทำความสะอาด หั่นให้เป็นชิ้นขนาดใกล้เคียงกัน (1 x 1 x 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร) จากนั้นนำไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 - 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างแห้งที่ได้มาบดละเอียดโดยใช้ rock mill (Lita hatsuyuki รุ่น NSB-6 No.U, Thailand) แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ตัวอย่างที่ร่อนไม่ผ่านนำไปบดละเอียดด้วย rock mill แล้วร่อนอีกครั้ง ตัวอย่างที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเรียกว่า ฟลาวัวร์ ฟลาวัวร์มันเทศและมันฝรั่งเก็บในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้อง จนกว่าจะนำมาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.2 ฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ พจ 265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม, บนซ้าย) 0106-1 (เนื้อ อสีขาว ล่างซ้าย) พจ. 65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม บนกลาง) T101 (เนื้อ อสีส้ม, ล่างกลาง) และฟลาวอร์มันฝรั่งพันธุ์แอตแลนติก(ขวาสุด)

3.1.4 การเตรียมสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งสำหรับศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

เตรียมสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งที่ใช้ศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Teow (2007) โดยนำฟลาวอร์ 1 กรัม มาสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิติกฟายเมธานอล (acidified methanol) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร (เตรียมจากกรดอะซิติกร้อยละ 7 ในสารละลายเมธานอลร้อยละ 80) นำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (LABQUIP, Thailand) ด้วยความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารแขวนลอยที่ได้มากรองด้วยชุดเครื่องกรองบุชเนอร์ (Eyela รุ่น Aspirator A-3S, Japan) แยกสารละลายสกัดที่กรองได้เก็บในขวดกั้นกลม ส่วนตะกอนด้านบนนำไปสกัดอีกครั้งด้วยอะซิติกฟายเมธานอลปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเช่นเดียวกับขั้นตอนที่แล้ว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารแขวนลอยที่ได้มากรองด้วยชุดเครื่องกรองบุชเนอร์ จากนั้นนำสารละลายใสที่กรองได้จากทั้ง 2 รอบ มารวมกัน นำไปทำให้เข้มข้นด้วยเครื่องกลั่นระเหยแห้ง (Buchi รุ่น RII, Thailand) จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายของสารละลายสกัดให้ได้ 25 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร และเก็บไว้ในขวดแก้วสีชา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันเทศโดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันฝรั่ง

3.2.1.1 ปริมาณผลผลิต (% yield)

จากการนำหัวมันเทศ หรือมันฝรั่งมาสกัดสตาร์ชด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 3.12 มิลลิโมลาร์ แล้วผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช สามารถนำมาคำนวณเป็นปริมาณผลผลิต (%) ในรูปของร้อยละโดยน้ำหนักแห้งตามสมการ(3.1)

$$\text{ปริมาณผลผลิต (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่สกัดได้(กรัม)}}{\text{น้ำหนักของเนื้อ มันเทศหรือมันฝรั่งเริ่มต้น(กรัม)}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

3.2.1.2.1 ปริมาณความชื้น ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.1.2.2 ปริมาณโปรตีน ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.1.2.3 ปริมาณเถ้า ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.1.2.4 ปริมาณไขมัน ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.1.2.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.1.2.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ คำนวณจากผลต่างโดยนำองค์ประกอบอื่นๆ หักออกจาก 100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.1.2.7 ปริมาณฟอสฟอรัส ทำการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2006) section 50.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)

3.2.1.2.8 ปริมาณแอมิโลส ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ดัดแปลงวิธีจาก Juliano (1971) และ Juliano (1981) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8)

3.2.1.2.9 การกระจายตัวตามขนาดและขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High performance size exclusion chromatography (HPSEC) (Waters Corporation, Milford, MA) ดัดแปลงวิธีจาก Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

3.2.1.2.10 การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน โดยแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ โดยวิธีดัดแปลงจาก Takeda (1986) จากนั้นนำมาย่อยตัดโซ่กิ่งด้วยเอนไซม์ α -amylase แล้ววิเคราะห์ขนาดของสายโซ่ โดยใช้เทคนิค Ion exchange chromatography ด้วยเครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD, Dionex, BioLC, USA) ดัดแปลงวิธีจาก Kuakpetoon และ Wang (2007) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

3.2.1.3 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

3.2.1.3.1 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากมันฝรั่ง ทำการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) (JEOL รุ่น JSM S410LV, Japan) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

3.2.1.3.2 ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น CH30RF200, Japan) และแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์บีโรตริบรอนาบแสง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12)

3.2.1.3.3 ขนาดและการกระจายตัวตามขนาดของเม็ดสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Laser light scattering particle size analyzer (Mastersizer S long bed Ver.2.11) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13)

3.2.1.3.4 รูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8-Discover, Germany) ดัดแปลงวิธีจาก Zobel (1964) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.14)

3.2.1.4 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

3.2.1.4.1 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (Model Diamond DSC,

Perkin-Elmer, USA) ตามวิธีของ Zhang and Oates (1999) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.15)

3.2.1.4.2 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่เกิดรีโทเกรเดชัน ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (Model Diamond DSC, Perkin-Elmer, USA) ตามวิธีของ Singh et al. (2012) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.16)

3.2.1.4.3 กำลังการพองตัว และการละลายน้ำของสตาร์ชทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ตามวิธีของ Li and Yeh (2001) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.17)

3.2.1.4.4 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (New Scientific รุ่น 4D, Australia) ตามวิธี AACC method 76-71 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.18)

3.2.1.4.5 ความแข็งของเจลสตาร์ช ทำการวิเคราะห์ 6 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA-XT รุ่น Plus, Stable Micro System, Surrey, UK) โดยจะนำเจลสตาร์ชที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วย RVA ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาใช้ในการวิเคราะห์ ศึกษาโดยดัดแปลงวิธีจาก Collado and Corke (1999) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.19)

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟลาวอร์มันเทศโดยศึกษาเปรียบเทียบกับฟลาวอร์มันฝรั่ง

3.2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์

3.2.2.1.1 ปริมาณความชื้น ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.2.2.1.2 ปริมาณโปรตีน ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)

3.2.2.1.3 ปริมาณเถ้า ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)

3.2.2.1.4 ปริมาณไขมัน ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)

3.2.2.1.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)

3.2.2.1.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ จำนวนจากผลต่าง โดยนำองค์ประกอบอื่นๆ หักออกจาก 100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)

3.2.2.2 สมบัติทางกายภาพของฟลาวอร์

3.2.2.2.1 วัดค่าสีของฟลาวอร์ในระบบ Hunter (L, a, b) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยเครื่อง Chroma meter (Minolta Chroma รุ่น CR300 series, Japan) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.20)

3.2.2.3 สมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวอร์

3.2.2.3.1 สมบัติทางความหนืดของฟลาวอร์ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA, New Scientific รุ่น 4D, Australia) ตามวิธี AACC method 76-71 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.18)

3.2.2.3.2 ความแข็งของเจลฟลาวอร์ ทำการวิเคราะห์ 6 ซ้ำ โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA-XT รุ่น Plus, Stable Micro System, Surrey, UK) โดยนำเจลฟลาวอร์ที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางความหนืดด้วย RVA ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาใช้ในการวิเคราะห์ ศึกษาโดยดัดแปลงวิธีจาก Collado and Corke (1999) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.19)

3.2.2.4 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากฟลาวอร์

3.2.2.4.1 ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ด้วยวิธี Folin – Ciocalteu (Waterhouse, 2005) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.21)

3.2.2.4.2 ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน(total antioxidant activity) ด้วยวิธี
- 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) Assay ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยดัดแปลงวิธีจาก Huang (2006) ซึ่งวัดความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระของตัวอย่าง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.22)

- Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยดัดแปลงวิธีจาก Benzie and Strain (1996) ซึ่งวัดกำลังการรีดิวซ์ของตัวอย่าง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.23)

3.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 16 (SPSS Inc., Chicago, IL)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศและมันฝรั่ง

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศที่ 4 สายพันธุ์เปรียบเทียบกับหัวมันฝรั่งสายพันธุ์ Atlantic (ตารางที่ 4.1) พบว่ามันเทศที่ 4 สายพันธุ์ มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยเฉพาะสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) และ พจ.256-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) ซึ่งพบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงกว่ามันฝรั่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยจากงานวิจัยของ กุลยา ลี มุ่งเรืองรัตน์(2534) ที่พบว่ามันเทศมีคาร์โบไฮเดรตสูงถึงร้อยละ 70.53 แสดงว่ามันเทศเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งของแป้งได้

มันเทศแต่ละสายพันธุ์นั้น ยังประกอบด้วยความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่ามันเทศที่ 4 สายพันธุ์ มีปริมาณความชื้น และโปรตีน ต่ำกว่ามันฝรั่ง (ร้อยละ 80.76 และ 12.72 ตามลำดับ) ในขณะที่มีปริมาณไขมัน และเส้นใยหยาบสูงกว่า เมื่อพิจารณามันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้อสีส้ม) มีปริมาณไขมันและเส้นใยหยาบสูงสุด คือ ร้อยละ 7.00 และ 7.11 ตามลำดับ (โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) นั้นพบว่ามีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบต่ำกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น คือ ร้อยละ 66.38 3.49 4.52 3.56 และ 4.74 ตามลำดับ (โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กุลยา ลี มุ่งเรืองรัตน์(2534) ที่พบว่าหัวมันเทศต่างสายพันธุ์กันจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และหัวมันฝรั่ง*

องค์ประกอบทางเคมี (%)	มันเทศสด				มันฝรั่งสด
	0106-1 (เนื้อสีขาว)	พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม)	T101 (เนื้อสีส้ม)	พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)	Atlantic (เนื้อสีครีม)
ความชื้น ^{***} (%wb)	66.38 ^e ± 0.16 ^{**}	70.72 ^d ± 0.15	73.46 ^c ± 0.07	77.60 ^b ± 0.28	80.76 ^a ± 0.23
โปรตีน (%db)	3.49 ^d ± 0.08	4.28 ^c ± 0.17	4.07 ^c ± 0.12	6.52 ^b ± 0.18	12.72 ^a ± 0.18
ไขมัน (%db)	4.52 ^d ± 0.01	5.56 ^b ± 0.03	7.00 ^a ± 0.04	5.36 ^c ± 0.03	1.59 ^e ± 0.07
เถ้า (%db)	3.56 ^d ± 0.04	4.32 ^c ± 0.14	6.15 ^a ± 0.03	5.34 ^b ± 0.14	5.27 ^b ± 0.27
เส้นใยหยาบ (%db)	4.74 ^c ± 0.21	4.74 ^c ± 0.04	7.11 ^a ± 0.02	6.61 ^b ± 0.06	2.73 ^d ± 0.08
คาร์โบไฮเดรต (%db)	83.68 ^a ± 0.09	81.10 ^b ± 0.04	75.67 ^e ± 0.07	76.17 ^d ± 0.13	77.69 ^c ± 0.45

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

*** wb = wet basis , db = dry basis

4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชมันเทศโดยศึกษาเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันฝรั่ง

4.2.1 ปริมาณผลผลิต

จากการนำหัวมันเทศแต่ละสายพันธุ์และมันฝรั่งมาสกัดสตาร์ชด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ แล้วนำมาอบ บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช พบว่าปริมาณผลผลิตของ มันฝรั่งนั้นสูงกว่าปริมาณผลผลิตของมันเทศทุกสายพันธุ์ (ตารางที่ 4.2) เมื่อพิจารณาปริมาณผลผลิตของมันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) ให้ปริมาณผลผลิต

สูงที่สุด ส่วนมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม) และ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) มีปริมาณผลผลิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อสีส้ม) ให้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง*

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	ปริมาณผลผลิต (%)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อสีขาว)	33.67 ^b ± 3.04**
	พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม)	29.76 ^{ab} ± 2.91
	T101 (เนื้อสีส้ม)	26.19 ^c ± 2.11
	พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)	31.47 ^{ab} ± 2.78
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อสีครีม)	52.96 ^a ± 3.20

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

การสูญเสียสตาร์ชไประหว่างการสกัด สามารถเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนของการปอกเปลือก และตกแต่ง หากหัวมันมีขนาดใหญ่เช่นที่พบในมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) ก็จะมีการสูญเสียสตาร์ชไปกับเปลือกน้อย ซึ่ง กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์(2534) พบว่ามันเทศพันธุ์เกษตร (เนื้อสีเหลืองเข้ม) มีขนาดหัวที่ใหญ่ จึงมีปริมาณผลผลิตที่สูง นอกจากนี้ สตาร์ชจำนวนมากยังสูญเสียไปกับชิ้นสีเหลืองด้านบนของโปรตีนและเส้นใย ที่ต้องขูดทิ้งไป เพื่อให้ได้ชิ้นสีขาวด้านล่างของสตาร์ชที่บริสุทธิ์ มากที่สุด ซึ่งจากการทดลอง พบว่าหลังการปั่นเหวี่ยง การแยกตัวระหว่งชิ้นทั้งสองของมันเทศไม่ชัดเจน อีกทั้งชิ้นของสตาร์ชมีลักษณะที่ค่อนข้างเหลว จึงทำให้ต้องขูดชิ้นด้านบนออกไปมากกว่าปกติ ในขณะที่มันฝรั่งมีการแยกชิ้นที่ชัดเจน และมีชิ้นสตาร์ชที่แข็งแรงกว่า

4.2.2 สมบัติทางเคมีของสตาร์ช

4.2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันฝรั่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าสตาร์ชมันเทศมีความชื้น หลังอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแบบภาคอยู่ในช่วงร้อยละ 9.02 – 11.13 ซึ่งต่ำกว่าสตาร์ช มันฝรั่ง (ร้อยละ 12.47)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

องค์ประกอบทางเคมี	สตาร์ชมันเทศ				สตาร์ชมันฝรั่ง
	0106-1 (เนื้อสีขาว)	พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม)	T101 (เนื้อสีส้ม)	พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)	Atlantic (เนื้อสีครีม)
ความชื้น ^{***} (%wb)	9.83 ^c ± 0.17 ^{**}	10.06 ^c ± 0.05	9.02 ^d ± 0.02	11.13 ^b ± 0.07	12.47 ^a ± 0.01
โปรตีน (%db)	0.51 ^a ± 0.06	0.16 ^b ± 0.03	0.25 ^b ± 0.03	0.23 ^b ± 0.00	0.23 ^b ± 0.06
ไขมัน (%db)	0.83 ^a ± 0.00	0.30 ^{cd} ± 0.04	0.27 ^d ± 0.08	0.39 ^c ± 0.00	0.57 ^b ± 0.00
เถ้า (%db)	0.19 ^b ± 0.04	0.41 ^b ± 0.19	0.49 ^{ab} ± 0.08	0.75 ^c ± 0.04	0.48 ^a ± 0.04
เส้นใยหยาบ (%db)	0.93 ^c ± 0.33	0.78 ^{bc} ± 0.13	1.10 ^b ± 0.04	0.24 ^a ± 0.00	1.47 ^b ± 0.07
คาร์โบไฮเดรต (%db)	97.55 ^c ± 0.23	98.34 ^a ± 0.13	97.88 ^b ± 0.01	98.38 ^a ± 0.03	97.24 ^d ± 0.03
ฟอสฟอรัส (mg/kg)	117.44 ± 2.19	161.96 ± 1.77	131.48 ± 0.92	132.34 ± 1.41	701.23 ± 2.89
แอมิโลส (%db)	30.17 ^{bc} ± 0.22	28.47 ^c ± 0.11	31.42 ^b ± 0.88	24.98 ^d ± 1.34	36.23 ^a ± 1.46

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

*** wb = wet basis, db = dry basis

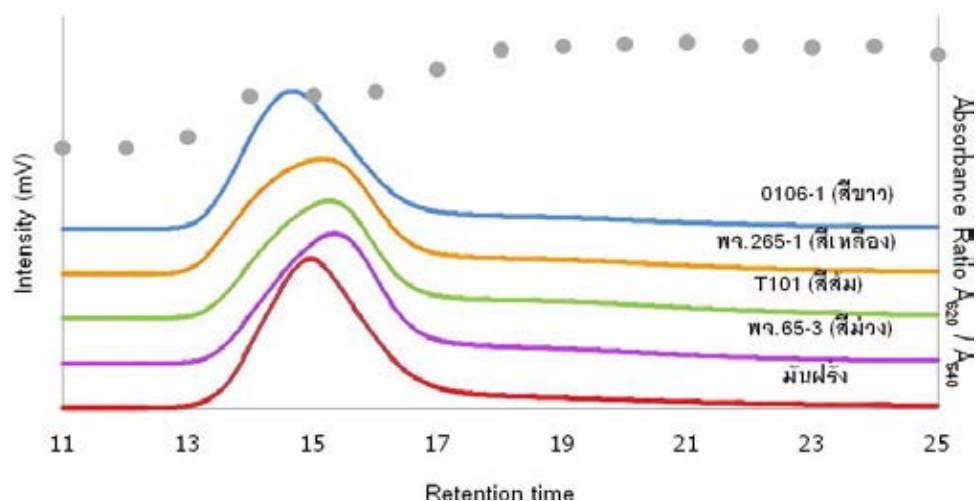
เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนและไขมัน พบว่าสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) มีค่าทั้งสองสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์อื่นนอกจากนี้ ยังพบว่าสตาร์ช

มันฝรั่งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงถึง 701.23 mg/kg ในขณะที่สตาร์ชมันเทศมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 117.44 – 161.96 mg/kg สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noda et al. (2008) ที่พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 416 – 1,118 mg/kg ในขณะที่สตาร์ชมันเทศมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 113 – 231 mg/kg เมื่อพิจารณาปริมาณแอมิโลสพบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีปริมาณแอมิโลสสูงสุด ตามด้วยมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) 0106-1 (เนื้อ อสีขาว พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) โดยจากงานวิจัยของ Huang et al. (2010), Collado and Corke (1999) และ Singh et al. (2006) พบว่าสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งมีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 15.2 – 28.5 (โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละสายพันธุ์ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของสตาร์ชต่างแหล่งและต่างสายพันธุ์เหล่านี้ จะส่งผลที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

4.2.2.2 การกระจายตัวตามขนาดและขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช

การกระจายตัวตามขนาดและขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ size exclusion chromatography (SEC) ประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ refractive index detector ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการแยกสารตามขนาดโมเลกุล โดยเมื่อสารผ่านไปในคอลัมน์ที่บรรจุด้วยของแข็งที่มีรูพรุน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกชะออกมาจากคอลัมน์ด้วยเวลา (retention time) ที่เร็วกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก จากการวิเคราะห์ พบว่าโมเลกุลของสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งแสดงโครมาโทแกรม (chromatogram) ของการกระจายตัวตามขนาดโมเลกุลในลักษณะ 2 พีค (รูปที่ 4.1) ซึ่งแสดงว่าสตาร์ชมีโมเลกุลอยู่ 2 กลุ่ม ที่มีขนาดต่างกัน โดยพีคแรกที่หลุดออกมาจากคอลัมน์ก่อนควรจะเป็นแอมิโลเพกทิน เนื่องจากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ส่วนพีคหลังจะเป็นแอมิโลสซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า จึงหลุดออกมาจากคอลัมน์ช้ากว่า นอกจากนี้ เมื่อทดสอบการเกิดสีกับสารละลายไอโอดีนแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร และ 540 นาโนเมตร พบว่าสารละลายที่หลุดออกมาจากคอลัมน์ในช่วงของพีคที่ 1 จะมีอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ต่อ 540 นาโนเมตร ต่ำกว่าสารละลายที่หลุดออกมาในช่วงพีคที่ 2 ซึ่งแสดงว่าสารละลายในพีคแรก และพีคหลังควรจะเป็นแอมิโลเพกทินและแอมิโลส ตามลำดับ เนื่องจากโดยปกติแอมิโลเพกทินจะเกิดสีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ส่วนแอมิโลสจะเกิดสีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน และมี

ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (Boyer, Garwood and Shannon, 1976)



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวตามขนาดของโมเลกุลของสตาร์ชจากมันเทศต่างสายพันธุ์และมันฝรั่ง (เส้นทึบ) และกราฟแสดงสัดส่วนค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ต่อ 540 นาโนเมตร ณ เวลาต่างๆ (เส้นจุด)

เมื่อเปรียบเทียบโครมาโตแกรมของการกระจายตัวตามขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่ง พบว่าสตาร์ชต่างแหล่งและต่างสายพันธุ์จะมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) มีขนาดโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่ใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์อื่น ในขณะที่มันเทศสายพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม) มีขนาดโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินเล็กที่สุด นอกจากนี้ ยังพบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดโมเลกุลของแอมิโลสเล็กกว่าสตาร์ชมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao et al. (2012) ที่ศึกษาขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของโมเลกุลสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งเปรียบเทียบกับสตาร์ชดัดแปรจากมันเทศและมันฝรั่ง พบว่าขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชทั้งสองชนิดแตกต่าง นอกจากนี้ Zhang and Oates (1999) ยังพบว่าขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสจากสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศอินโดนีเซียนี้ มีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ ความแตกต่างของขนาดโมเลกุลแอมิโลส

และแอมิโลเพกทินของสตาร์ชต่างแหล่งและต่างสายพันธุ์นี้ จะส่งผลให้สตาร์ชมีสมบัติทางเคมี ภายภาพที่ต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.4 ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง*

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ($\bar{M}_w \times 10^5$)	
		แอมิโลส	แอมิโลเพกทิน
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	$5.10^{ab} \pm 0.04^{**}$	$15.11^a \pm 0.78$
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	$5.01^b \pm 0.02$	$12.60^c \pm 0.09$
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	$5.15^a \pm 0.07$	$12.33^c \pm 0.26$
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	$4.35^c \pm 0.06$	$11.60^d \pm 0.19$
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	$4.17^d \pm 0.08$	$13.78^b \pm 0.20$

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนั้น หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

4.2.2.3 การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ช

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 (Hanashino et al., 1996) เมื่อพิจารณาถึงปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด A และ B1 (ตารางที่ 4.5) ซึ่งเป็นสายโซ่กิ่งก้านที่เป็นองค์ประกอบหลักของชั้น นผลึก(crystalline lamellae) (Hizukuri, 1986) พบว่าสตาร์ชจากมันเทศส่วนใหญ่มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชมันเทศที่ 4 สายพันธุ์มีส่วนของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A มากกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด A มากที่สุด ในทางตรงกันข้ามสตาร์ชจากมันเทศที่ 4 สายพันธุ์มีค่าร้อยละ

การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 น้อยกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 และ B3+ ซึ่งเป็นสายโซ่กิ่งก้านที่อยู่ภายในชั้น นอกล้วนฐาน (amorphous lamellae) (Hizukuri, 1986 ; Bertoft, 2004) พบว่า สตาร์ช มันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) T101 (เนื้อ สีส้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) มีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 และ B3+ ไม่แตกต่างกันยกเว้นสตาร์ช มันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) ซึ่งมีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 และ B3+ สูงกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น และยังมีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งก้านทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกับค่า สัดส่วนกิ่งก้านของมันฝรั่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณร้อยละและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจาก มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

แหล่ง สตาร์ช	สายพันธุ์	ความยาว เฉลี่ยของ สายโซ่กิ่งก้าน (DP)	ปริมาณร้อยละของสายโซ่กิ่งก้านชนิดต่างๆ (Molar base)			
			A	B1	B2	B3+
			(DP 6-12)	(DP 13-24)	(DP 25-36)	(DP \geq 37)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	16.69 ^b ± 0.16**	30.51 ^b ± 0.40	56.80 ^b ± 0.42	10.36 ^a ± 0.17	2.32 ^a ± 0.19
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลือง เข้ม)	15.98 ^c ± 0.14	31.11 ^{ab} ± 0.09	59.36 ^b ± 0.02	7.78 ^b ± 0.58	1.74 ^b ± 0.05
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	16.35 ^{bc} ± 0.14	30.97 ^b ± 0.19	58.15 ^b ± 0.18	8.90 ^{ab} ± 0.39	1.97 ^b ± 0.01
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	16.07 ^c ± 0.15	32.90 ^a ± 1.46	56.86 ^b ± 1.38	8.40 ^b ± 0.07	1.84 ^b ± 0.01
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	17.21 ^a ± 0.29	24.56 ^c ± 0.32	62.32 ^a ± 2.02	10.55 ^a ± 1.50	2.57 ^a ± 0.20

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

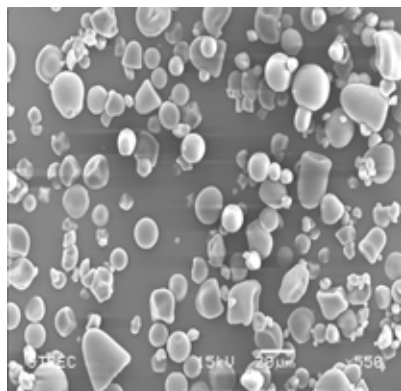
** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายความว่า ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ ส่วนใหญ่มีลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านต่างๆ แตกต่างจากสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งความแตกต่างนี้ จึงส่งผลให้สตาร์ชจากมันเทศมีปริมาณและความแข็งแรงของผลึกแตกต่างจากสตาร์ชมันฝรั่งอีกด้วย และสามารถส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชได้ (Zhu, Corke and Bertoft, 2011)

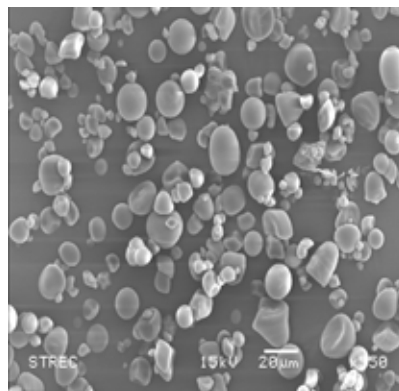
4.2.3 สมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

4.2.3.1 ลักษณะรูปร่าง ขนาด และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช

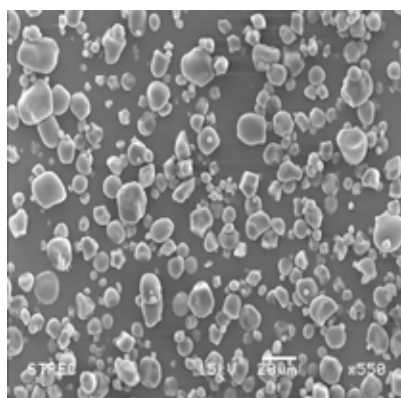
จากการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 550 เท่า (รูปที่ 4.2) พบว่าแกรนูลของสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์มีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 1.5 – 28.5 μm มีรูปร่างเป็นวงกลม วงรี หลายเหลี่ยม และรูปถ้วย ส่วนแกรนูลของสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 5.9- 40.0 μm มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายรูปไข่ สตาร์ชทั้งสองชนิดมีสภาพพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก ร้าว แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้มีความสมบูรณ์และไม่ถูกทำลายในระหว่างขั้นตอนการสกัดหรือการบดร่อน ซึ่งผลที่ได้นี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang and Oates (1999) และ Singh et al. (2006) ที่ศึกษารูปร่างของแกรนูลสตาร์ชของมันเทศพื้นเมืองจากอินโดนีเซียโดยพบว่าเม็ดสตาร์ชจากมันเทศทุกสายพันธุ์ที่ได้ศึกษามีรูปร่างหลากหลาย และมีพื้นผิวเรียบ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์พื้นเมืองจากนิวซีแลนด์



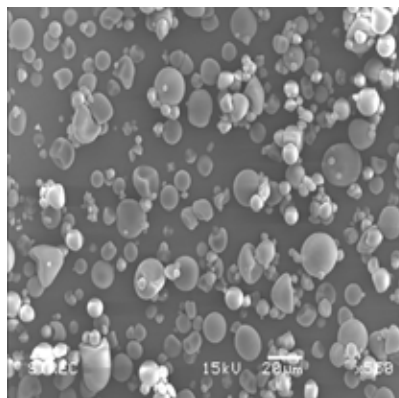
(ก) มั่นเทศ 0106 -1 (เนื้อสีขา)



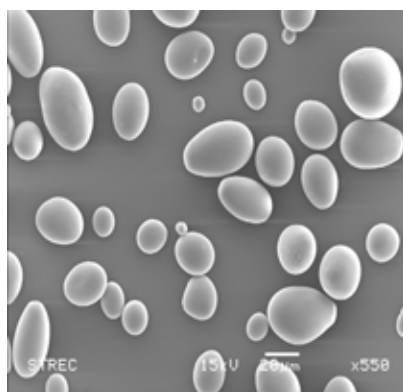
(ข) มั่นเทศ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม)



(ค) มั่นเทศ T101 (เนื้อสีส้ม)



(ง) มั่นเทศ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)



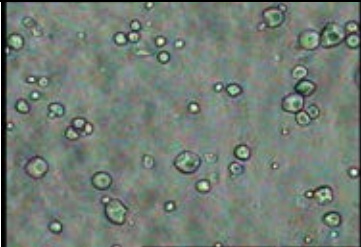

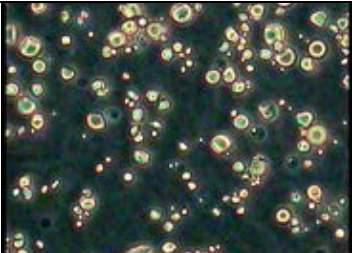
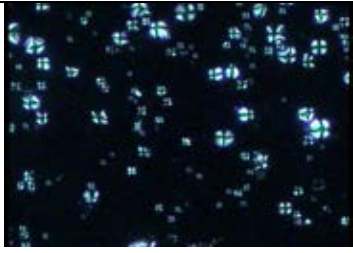
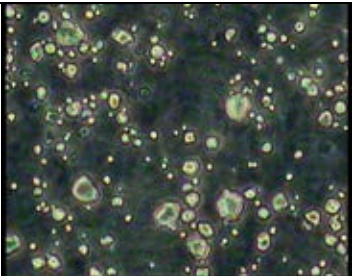
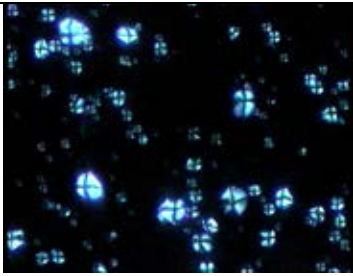

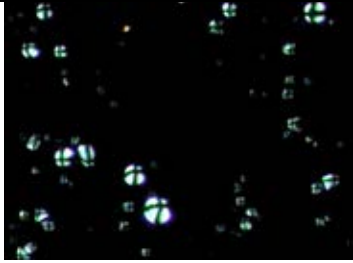
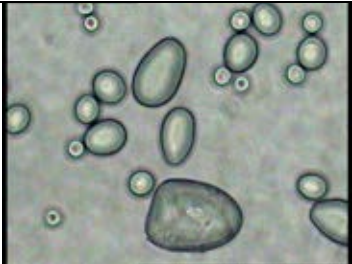
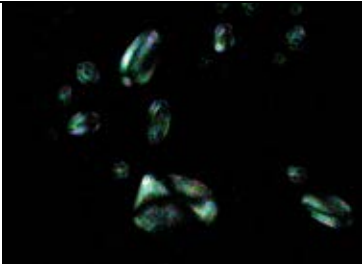
(จ) มั่นฝรั่งAtlantic (เนื้อสีครีม)

รูปที่ 4.2 ลักษณะเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 550 เท่า

4.2.3.2 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช

จากการศึกษารูปร่างเม็ดสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 20 เท่า (รูปที่ 4.3 ทางซ้าย) พบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างและลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของเม็ดสตาร์ช โดยเม็ดสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 พันธุ์ มีรูปร่างหลากหลาย ได้แก่ วงกลม วงรี หลายเหลี่ยม และรูปถ้วย ส่วนสตาร์ชจากมันฝรั่ง มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นรูปวงรีคล้ายไข่ ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ในหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว

กล้องจุลทรรศน์นอกจากจะใช้ในการศึกษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชแล้ว ยังสามารถใช้ตรวจสอบลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) เม็ดสตาร์ชโดยทั่วไปจะแสดงสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งสังเกตได้จากเงาดำรูปกากบาทที่แสดงออกมาเมื่อส่องภายใต้แสงโพลาไรซ์ เรียกว่า maltese cross พาดอยู่บนเม็ดสตาร์ช โดยจุดที่กากบาทมาตัดกันจะเรียกว่า hilum ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการสังเคราะห์เม็ดสตาร์ช ลักษณะหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า birefringence ซึ่งการที่เม็ดสตาร์ชสามารถบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้นั้นเนื่องจากลักษณะโครงสร้างบางส่วนของเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ หรือเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึก (semi-crystalline) เมื่อแสงโพลาไรซ์ผ่านผลึกบางส่วนที่มีโครงสร้างขนานหรือตั้งฉากกับระนาบแสง จะเกิดการบิดระนาบแสงขึ้น (Oates, 1997) โดยลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชนี้ เป็นการตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ช หากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Kuakpetoon and Wang, 2007) จากการทดลองพบว่าเม็ดสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่ง แสดงลักษณะ birefringence ชัดเจน (รูปที่ 4.3 ทางขวา) แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหาย หรือไม่เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินภายในเม็ดสตาร์ชจากขั้นตอนการแยกสตาร์ชโดยเม็ดสตาร์ชมันเทศมี hilum อยู่ที่จุดศูนย์กลาง ในขณะที่เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมี hilum อยู่ค่อนข้างไปทางปลายด้านที่เป็นฐานของวงรีรูปไข่

แหล่งสตาร์ช	กล้องจุลทรรศน์แสงปกติ (20x)	กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (20x)
(ก) 0106-1 (เนื้อ สีขาว)		
(ข) พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)		
(ค) T101 (เนื้อ สีส้ม)		
(ง) พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)		
(จ) มันฝรั่ง Atlantic (เนื้อ สีครีม)		

รูปที่ 4.3 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงปกติ (รูปด้านซ้าย ก - จ) และลักษณะ birefringence ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (รูปด้านขวา ก - จ) ที่กำลังขยาย 20 เท่า

4.2.3.3 การกระจายตัวตามขนาดของเม็ดสตาร์ช

จากการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งด้วย Laser light scattering particle size analyzer (ตารางที่ 4.6) และเมื่อพิจารณาถึงค่าเฉลี่ย (mean) ของขนาดเม็ดสตาร์ช พบว่าสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ มีขนาดที่ใหญ่เกินความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมันเทศบางส่วนที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นเหลี่ยม จึงจับตัวเป็นกลุ่มก้อนง่าย ทำให้ค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ไม่ใช่ค่าที่คำนวณจากขนาดของเม็ดสตาร์ชเพียงหนึ่งเม็ด ขนาดเฉลี่ยที่คำนวณได้จึงมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกที่ใช้ค่าฐานนิยม (mode) เป็นค่าของขนาดเม็ดสตาร์ชที่มีจำนวนมากที่สุดในตัวอย่างแทน โดยพบว่าสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์มีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง เมื่อพิจารณาสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามีขนาดของเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 17.18 ไมครอน รองลงมา คือ สายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) และ T101 (เนื้อ สีส้ม) ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li and Yeh (2001) ซึ่งศึกษาขนาดเม็ดสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ พบว่าเม็ดสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ TNU17 และ TNU57 จากไต้หวัน มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 17.1 และ 11.7 ไมครอน ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งจากเยอรมัน มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 38.3 ไมครอน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดเม็ดสตาร์ชจะแตกต่างกันไปตามแหล่ง และสายพันธุ์ของสตาร์ช

ตารางที่ 4.6 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และมันฝรั่ง

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	ขนาดเม็ดสตาร์ช	
		ค่าเฉลี่ย (μm) D [4, 3]	ค่าฐานนิยม (μm) D [v, 0.5]
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	24.31 ^c \pm 0.44 ^{**}	17.18 ^b \pm 0.09
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	25.80 ^b \pm 0.50	14.46 ^d \pm 0.04
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	22.85 ^d \pm 0.14	13.03 ^e \pm 0.03
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	23.89 ^c \pm 0.51	14.70 ^c \pm 0.08
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	38.42 ^a \pm 0.06	37.32 ^a \pm 0.06

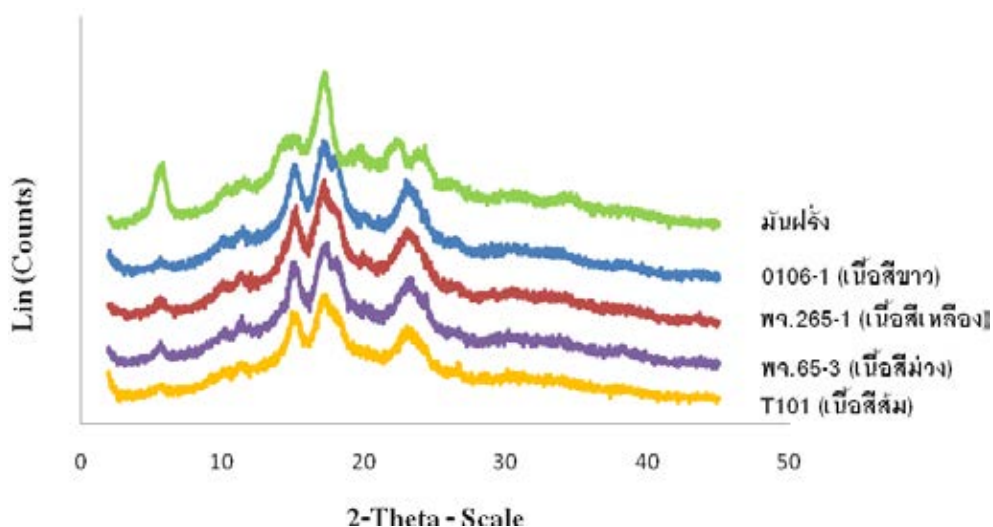
* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนั้น หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

4.2.3.4 รูปแบบและปริมาณผลึกของสตาร์ช

การตรวจสอบรูปแบบผลึกของสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ด้วยเครื่อง Wide angle X-ray diffractometer (XRD) พบว่าผลึกของสตาร์ชมันเทศมีการหักเหแสงที่เด่นชัด คือ มีพีคเดี่ยวเกิดขึ้น ที่มุมประมาณ 5.6 15 และ 23 องศา (2θ) และมีพีคคู่ที่มุมประมาณ 17 และ 18 องศา (2θ) (รูปที่ 4.4) ซึ่งการหักเหแสงในลักษณะนี้เป็นการหักเหแสงของโครงสร้างผลึกแบบ C (Ahmad et al., 1999) คือ ผลึกที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งการที่สตาร์ชจากมันเทศมีโครงสร้างผลึกแบบ C นั้น แสดงว่าบริเวณผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทินหนาแน่นปานกลาง คือไม่หนาแน่นดังเช่นโครงสร้างผลึกแบบ A และไม่หลวมดังเช่นโครงสร้างผลึกแบบ B (Hizukuri, Fujii and Nikuni, 1960) ในขณะที่ผลึกของสตาร์ชมันฝรั่งมีการหักเหแสงที่เด่นชัด คือ มีพีคเดี่ยวเกิดขึ้น ที่มุมประมาณ 5.5, 17.2 และ 22.1 องศา (2θ) ซึ่งการหักเหแสงในลักษณะนี้ เป็นการหักเหแสงของโครงสร้างผลึกแบบ B (Liu et al., 2003) ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชหัว ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoover (2001) ที่ศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของสตาร์ชต่างแหล่ง พบว่าสตาร์ชมันเทศจัดเป็นสตาร์ชในกลุ่มที่สกัดได้จากส่วนรากของพืชซึ่งสตาร์ชในกลุ่มนี้ จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกได้ทั้งแบบ A และแบบ C เช่นเดียวกับ สตาร์ชมันสำปะหลัง (*Manihot exculenta*) และสตาร์ชสาคุ (*Metroxylon* spp.) เป็นต้น ส่วนสตาร์ชมันฝรั่งนั้นจัดอยู่ในกลุ่มสตาร์ชที่สกัดได้จากพืชหัว ซึ่งสตาร์ชในกลุ่มนี้ จะมีโครงสร้างผลึกแบบ B เช่นเดียวกับ สตาร์ชจากมันพีนเมือง (*Dioscorea* spp.) และสตาร์ชจากดอกพุทธรักษา (*Canna edulis*) เป็นต้น



รูปที่ 4.4 รูปแบบการหักเห่งรังสี X-ray (X-ray diffraction pattern) ของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การวิเคราะห์หาปริมาณผลึกของสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังตารางที่ 4.7 โดยพบว่าสตาร์ชจากมันเทศที่ 4 พันธุ์มีปริมาณผลึกน้อยกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alvani et al. (2011) ที่พบว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งสายพันธุ์พื้นเมืองของอังกฤษ 10 สายพันธุ์ มีปริมาณความเป็นผลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 28.3 - 31.2 เมื่อพิจารณาปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) มีปริมาณร้อยละความเป็นผลึกสูงสุด ตามมาด้วย สายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) และ T101 (เนื้อ สีส้ม) ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชต่างแหล่งนี้ มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากแต่ละแหล่งมีโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน โดย Hizukuri (1985) ได้กล่าวว่าปริมาณความเป็นผลึกของสตาร์ชนี้ มีความสัมพันธ์กับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มีความยาวเท่ากับ DP 13 - 24 ซึ่งพอดีกับความหนาของผลึก 1 ชั้น (crystalline lamella) ดังนั้นจึงสามารถเกิดเกลียวผลึกอย่างสมบูรณ์มากกว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิดอื่นที่อาจจะมีมีความยาวที่สั้นเกินไปหรือยาวเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 4.5) ที่พบว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งมีค่าร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากกว่าสตาร์ชจากมันเทศที่ 4 สายพันธุ์ จึงเป็นผลให้สตาร์ชมันฝรั่งนี้ มีปริมาณผลึกมากกว่าสตาร์ชมันเทศ และเมื่อพิจารณามันเทศต่างสายพันธุ์จึง

พบว่าแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) มีปริมาณร้อยละของสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มากที่สุดจึงมีปริมาณผลึกมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 4.7 ปริมาณผลึกและปริมาณสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินชนิด B1 ของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	ปริมาณความเป็นผลึก (%)	ปริมาณสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินชนิด B1 (%)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	25.56	56.80 ^b ± 0.42**
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	26.05	59.36 ^b ± 0.02
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	24.80	58.15 ^b ± 0.18
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	25.56	56.86 ^b ± 1.38
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	28.43	62.32 ^a ± 2.02

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

4.2.4 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

4.2.4.1 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน

การติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) จะให้เทอร์โมแกรม (thermogram) ที่มีลักษณะเป็นพีค ซึ่งแสดงพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช โดยส่วนใหญ่จะเป็นการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเกลียวคู่ของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบเกิดเป็นชั้นผลึก (crystalline lamellae) โดยสตาร์ชจากมันเทศจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (Onset temperature; T_o) อยู่ในช่วง 70.70 – 76.97 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.8) ในขณะที่สตาร์ชจากมันฝรั่งมี T_o ที่ต่ำกว่า คือ 68.81 องศาเซลเซียส ซึ่ง T_o เป็นอุณหภูมิที่บอถึงความแข็งแรงของโครงสร้างผลึก (Kuakpetoon and Wang, 2007)

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง*

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	การเกิดเจลลิตีในเซชัน				
		T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	T _c -T _o (°C)	ΔH _{gel} (J/g)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	76.97 ^a ±0.21**	80.61 ^a ± 0.20	84.90 ^a ±0.28	7.93 ^c ± 0.08	14.22 ^{bc} ± 0.16
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	71.65 ^c ±0.37	80.04 ^{ab} ± 0.15	85.54 ^a ±0.84	13.89 ^a ±1.20	15.20 ^b ± 0.80
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	73.90 ^b ±0.26	79.64 ^b ± 0.22	85.88 ^a ±0.19	11.98 ^b ±0.41	13.86 ^c ±1.00
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	70.70 ^d ±0.26	77.39 ^c ± 0.85	85.42 ^a ±0.69	14.73 ^a ±0.44	12.21 ^d ± 0.29
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	68.81 ^e ±0.27	72.05 ^d ± 0.15	77.40 ^b ±0.27	8.59 ^c ± 0.19	19.19 ^a ± 0.61

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนั้น หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากมันเทศทุกสายพันธุ์มีค่าT_o สูงกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง เนื่องจากอิทธิพลของชนิดโครงสร้างผลึกจากสตาร์ชทั้งสองแหล่งแตกต่างกัน โดยสตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B คือ บริเวณผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทินอย่างหลวม (Hizukuri, 1960) ทำให้น้ำสามารถแทรกตัวผ่านเข้าไปในผลึกของแอมิโลเพกทินได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนของแอมิโลเพกทินจะถูกทำลายได้อย่างรวดเร็ว จึงให้อุณหภูมิต่ำในการเกิดเจลลิตีในเซชันคือมีค่า T_o ต่ำ นอกจากนั้นมันฝรั่งยังเป็นพืชหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง (ตารางที่ 4.3) โดยฟอสฟอรัสมักอยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมต่อกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 (C₃ และ C₆) ของหน่วยกลูโคส (Lineback, 1996) จัดเป็นโมเลกุลที่มีประจุที่ ผิวเป็นลบ จึงก่อให้เกิดแรงผลักระหว่างไฟฟ้า ส่งผลให้โครงสร้าง

อสังฐานของแอมิโลเพกทินคลายตัวหรืออ่อนแอลง จึงใช้อุณหภูมิต่ำในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Wischmann et al., 2005) สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งสายพันธุ์ Atlantic มีค่า T_g ต่ำกว่าสตาร์ชมันเทศทุกสายพันธุ์

เมื่อพิจารณาค่า T_g ของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่า T_g แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) ที่มีค่า T_g สูงที่สุด โดยทั่วไปการที่ T_g มีค่าสูงนั้น มักขึ้นอยู่กับค่า T_g (glass transition) ของบริเวณอสังฐาน (amorphous lamellae) ระหว่างชั้น ผลึก (crystalline lamellae) เนื่องจากผลึกจะเริ่มหลอมละลายก็ต่อเมื่อบริเวณอสังฐานละลายหรือเคลื่อนตัวก่อน (Donovan, 1979; Donovan and Mapes, 1980) ดังนั้นหากบริเวณอสังฐานมีค่า T_g สูง จะส่งผลให้ T_g สูงตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติแล้ว T_g ของบริเวณอสังฐานจะขึ้นอยู่กับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 ของแอมิโลเพกทิน (Slade and Levine, 1988) หากพิจารณาตามโครงสร้างแบบ backbone (รูปที่ 2.15) ที่เสนอโดย Bertoft (2004) จะพบว่าถ้าแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มาก บริเวณอสังฐานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 อยู่ในลักษณะที่ขนานกัน จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มาก ส่งผลให้บริเวณอสังฐานเกิดการเคลื่อนตัวได้ยาก หรือมีค่า T_g สูงขึ้น ซึ่งสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ 106-1 (เนื้อ สีขาว) นั้นมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 มากกว่าสายพันธุ์อื่น (ตารางที่ 4.5) จึงทำให้สตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ สีขาว) มีค่า T_g สูงที่สุด นอกจากค่า T_g ของการเกิดเจลลาติโนเซชันจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของบริเวณอสังฐานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและสมบูรณ์ของบริเวณผลึกด้วย โดยมักพิจารณาจากการที่แอมิโลเพกทินมีสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 (DP 13-24) สูงแต่มีสายโซ่กิ่งก้านชนิด A (DP 6-12) ต่ำ (Asaoka et al., 1985; Shi and Seib, 1992) ซึ่งสายโซ่กิ่งก้านทั้งสองชนิดนี้ จะมีการเรียงตัวอยู่ในชั้น ผลึกเดียวกัน (cluster) (Hizukuri, 1986) โดยสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 จะมีความยาวใกล้เคียงกับความหนา 1 ชั้น ผลึก ซึ่งหนาประมาณ DP 18-21 (Cameron and Donald, 1992) ดังนั้นหากแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูง จะทำให้เกิดเกลียวยาวตลอดทั้งชั้น ผลึก ส่งผลให้ได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์และแข็งแรง จึงต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน คือ มีค่า T_g สูง ในทางตรงกันข้ามหากแอมิโลเพกทินมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด A ในชั้น ผลึกมาก จะทำให้ความสมบูรณ์และแข็งแรงของผลึกต่ำ (Jane et al., 1999) เมื่อพิจารณาผลการทดลองสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) และ T101 (เนื้อ สีส้ม) ซึ่งมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 สูงกว่าสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) จึงทำให้สตาร์ชมันเทศทั้งสองพันธุ์นี้ มีค่า T_g สูงกว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) นอกจากนั้นค่า T_g ยัง

สามารถพิจารณาจากความยาวและขนาดของสายโซ่แอมิโลเพกตินได้อีกด้วย (Matveev et al., 2001) โดยแอมิโลเพกตินที่มีสายยาวหรือมีขนาดโมเลกุลใหญ่ จะทำให้บริเวณผลึกมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น โดยสตาร์ชสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) นั้นมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของแอมิโลเพกตินสูงกว่าอีก 3 สายพันธุ์ (ตารางที่ 4.4) ส่งผลให้สตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่า T_0 สูงที่สุด ซึ่งจากอิทธิพลต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีความแข็งแรงโครงสร้างผลึกสูงกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น

อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลลิตีในเซชันมากที่สุด (peak temperature; T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature; T_c) มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_0) คือ สตาร์ชจากมันเทศทุกสายพันธุ์มี T_p และ T_c สูงกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li and Yeh (2001) ซึ่งพบว่าสตาร์ชมันเทศพื้นเมืองจากไต้หวันมีค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันทั้งสามค่า (T_0 , T_p , และ T_c) สูงกว่าสตาร์ชจากมันฝรั่ง

ค่าส่วนต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_0$) แสดงถึงการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกตินทั้งในส่วนอสัณฐานและในชั้นผลึก (Ratnayake et al., 2001) หากสตาร์ชใดมีค่าส่วนต่างของอุณหภูมิสูง หรือมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชันในช่วงกว้างแสดงว่าสตาร์ชนั้นมีปริมาณของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกตินขนาดต่างๆ ที่กว้าง (heterogeneous structure) ในขณะเดียวกันหากสตาร์ชใดมีค่าส่วนต่างของอุณหภูมิต่ำ หรือมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีในเซชันในช่วงแคบ แสดงว่าสตาร์ชชนิดนั้นมีปริมาณของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกตินขนาดต่างๆ กันในช่วงแคบ (homogeneous structure) จากผลการทดลอง พบว่าสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) และ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าส่วนต่างของอุณหภูมิสูง ในขณะที่สตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) และมันฝรั่ง มีค่าส่วนต่างของอุณหภูมิต่ำกว่า และมีค่าส่วนต่างของอุณหภูมิไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH_{gel}) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณ หรือคุณภาพของโครงสร้างผลึกที่เกิดจากเกลียวคู่ของสายโซ่แอมิโลเพกติน และยังบอกถึงพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจน (Singh et al., 2006) ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และปริมาณความเป็นผลึก โดยค่าทั้งสองนี้ แสดงถึงปริมาณและคุณภาพของ

โครงสร้างผลึกในโมเลกุลสตาร์ช จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากมันฝรั่งมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่ามันเทศ ส่งผลให้มี ΔH_{gel} สูงที่สุด เมื่อพิจารณาสตาร์ชมันเทศ พบว่าค่า ΔH_{gel} ของมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์อยู่ในช่วง 12.21 – 15.20 J/g โดยมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) ที่มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ จึงมีค่า ΔH_{gel} สูงกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่นด้วย ตามด้วยสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว T101 (เนื้อ อสีส้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า ΔH_{gel} ของมันเทศพื้นเมืองจากอินโดนีเซีย 6 สายพันธุ์ ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 11.95 – 14.83 J/g (Zhang and Oates, 1999)

4.2.4.2 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชหลังการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อนำสตาร์ชที่ผ่านการเจลาติไนเซชันมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Hoover, 2001) โดยทั่วไปโมเลกุลแอมิโลสจะเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างรวดเร็วระหว่างการลดอุณหภูมิ ส่วนโมเลกุลแอมิโลเพกทินก็สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้เช่นเดียวกันแต่จะเกิดในอัตราที่ช้ากว่ามาก เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะค่อนข้างเกาะกะ โดยกิ่งก้านของแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้กันจะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นลักษณะเกลียวคู่ เกิดเป็นผลึกขึ้นใหม่ (Hoseney, 1998) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถติดตามได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของผลึกที่เกิดขึ้น ใหม่ด้วยเครื่อง DSC

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งมีช่วงอุณหภูมิเริ่มหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (T_o) เท่ากับ 45.76 – 52.70 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.9) ซึ่งต่ำกว่า T_o ของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกทินที่อยู่ในช่วง 68.81 – 76.97 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้ยังพบว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (ΔH_{retro}) ของสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งมีค่าเท่ากับ 3.90 – 6.11 J/g ซึ่งต่ำกว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH_{gel}) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 12.21 – 19.19 J/g และยังคงแสดงผลในทำนองเดียวกันกับค่า T_p และ T_c ซึ่งความแตกต่างของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่และผลึกเริ่มต้นทั้ง 4 ค่านี้ บ่งบอกว่าผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันเป็นผลึกที่มีปริมาณและความแข็งแรงน้อยกว่าผลึกของแอมิโลเพกทินเริ่มต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. (2003) ที่ศึกษาสมบัติการเกิดเจลา

ดีโนแซชันและรีโทรเกรดชันของสตาร์ชมันฝรั่ง 3 สายพันธุ์จากแคนาดา พบว่าค่า T_o , T_p , T_c และ ΔH_{retro} ของการเกิดรีโทรเกรดชันมีค่าต่ำกว่า T_o , T_p , T_c และ ΔH_{gel} ของการเกิดเจลดีโนแซชัน

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

แหล่ง สตาร์ช	สาย พันธุ์	การเกิดรีโทรเกรดชัน				
		T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	ΔH_{retro} (J/g)
มันเทศ	0106-1 (เน้ สีขาว)	47.73 ^b ±0.06**	60.79 ^{ab} ± 0.18	69.46 ^b ±0.16	21.73 ^a ±0.15	5.19 ^{ab} ± 0.63
	พจ.265-1 (เน้ สี เหลืองเข้ม)	48.08 ^b ±0.57	59.46 ^{bc} ± 1.20	69.55 ^b ±0.01	21.47 ^a ±1.18	6.11 ^a ± 1.58
	T101 (เน้ สีส้ม)	47.54 ^b ±0.41	60.77 ^{ab} ± 0.53	69.07 ^{bc} ±0.08	21.53 ^a ±0.33	4.24 ^b ± 0.64
	พจ.65-3 (เน้ สีม่วง เข้ม)	45.76 ^c ±0.42	57.16 ^c ± 2.93	68.17 ^c ± 0.61	22.41 ^a ±0.69	4.54 ^{ab} ± 0.24
มันฝรั่ง	Atlantic (เน้ สี ครีม)	52.70 ^a ±1.04	62.44 ^a ± 0.08	71.91 ^a ± 0.78	19.21 ^b ±1.54	3.90 ^b ± 0.35

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) และค่าพลังงาน (ΔH_{retro}) ที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ของสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่ง พบว่าสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่า T_o ต่ำกว่า แต่มีค่า ΔH_{retro} ที่สูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของสัดส่วนสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 (DP 13 – 24) และชนิด A (DP 6 – 12) ซึ่งมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรดชันที่สมบูรณ์และแข็งแรงของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (Jane et al., 1999) จากผลการทดลอง พบว่ามันฝรั่งและสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ที่มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพก

ทินชนิด B1 สูง จะแสดงค่า T_0 ที่สูงด้วย โดยเฉพาะสตาร์ชมันฝรั่งซึ่งมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 มากที่สุด จึงมีค่า T_0 สูงที่สุดด้วย เช่นเดียวกับกับมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) ที่มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 ค่อนข้างมากกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น จึงมีค่า T_0 สูงกว่าสตาร์ชมันเทศอีก 3 สายพันธุ์ ในขณะที่มันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม) นั้นมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 น้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาค่า ΔH_{retro} ระหว่างสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์ จะพบว่าค่า ΔH_{retro} มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับค่า T_0 ที่ได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินชนิด B1 โดยค่า ΔH_{retro} นั้นบ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในการทำลายผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ หากค่า ΔH_{retro} สูง ก็แสดงว่าเกิดผลึกขึ้นใหม่ในปริมาณที่สูง ซึ่งสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินชนิด B1 สามารถเกิดผลึกได้ง่ายกว่าสายโซ่กิ่งก้านชนิดอื่น อย่างไรก็ตามสตาร์ชมันฝรั่งมีค่า ΔH_{retro} ต่ำกว่าสตาร์ชมันเทศทุกสายพันธุ์ ทั้งๆ ที่ สตาร์ชมันฝรั่งมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินชนิด B1 สูงกว่าสตาร์ชมันเทศ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสตาร์ชมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตบนสายโซ่แอมิโลเพกทินค่อนข้างมาก จึงเป็นตัวขัดขวางการกลับมาเรียงตัวใหม่ของแอมิโลเพกทิน ทำให้มีปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นใหม่น้อย ส่งผลให้ค่า ΔH_{retro} ของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าต่ำมาก

โดยทั่วไปการจัดเรียงตัวของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ของสตาร์ชต่างแหล่งนั้นจะได้รูปแบบเดียวกันหมด คือ เมื่อนำสตาร์ชไปวิเคราะห์รูปแบบการหักเหรังสี จะพบว่าผลึกใหม่ของสตาร์ชมีการหักเหแสงของผลึกชนิดเดียวเสมอ ซึ่งไม่เหมือนโครงสร้างเดิม (Zobel, 1988) ดังนั้นค่าส่วนต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดรีโทรเกรเดชัน ($T_c - T_0$) ของสตาร์ชมันเทศที่ 4 สายพันธุ์จึงแสดงค่าไม่แตกต่างกัน ในตารางที่ 4.9 ในขณะที่สตาร์ชจากมันฝรั่งมีค่า $T_c - T_0$ ต่ำกว่าเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากปัจจัยด้านปริมาณฟอสฟอรัสที่สูงในสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการกลับมาเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

นอกจากนี้ ยังสามารถนำค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (ΔH_{retro}) และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทิน (ΔH_{gel}) มาคำนวณหาร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่ง แสดงดังตารางที่ 4.10 โดยพบว่าสตาร์ชมันเทศที่ 4 สายพันธุ์มีค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และมีค่าสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเฉพาะสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) มีร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุด รองลงมาคือ สายพันธุ์ พจ.65-1 (เนื้อสีม่วงเข้ม) 0106-1 (เนื้อสีขาว) และ T101 (เนื้อสีส้ม) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (ΔH_{retro}) (ตารางที่ 4.9)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง*

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	การเกิดรีโทรเกรเดชัน (%)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	36.54 ^a ± 4.86**
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	39.95 ^a ± 8.60
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	30.61 ^a ± 4.26
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	37.23 ^a ± 2.30
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	20.37 ^b ± 2.41

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

4.2.4.3 กำลังการพองตัว และการละลายของสตาร์ช

การวัดกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 55 65 75 และ 85 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชจะถูกทำลาย น้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้แอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (Hoover, 2001) จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.11) พบว่าสตาร์ชมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ มีการพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 75 - 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่สตาร์ชมันฝรั่งเริ่มมีการพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 65 - 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสตาร์ชมันเทศมีความแข็งแรงของโครงสร้างผลึกที่มากกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยดูจากค่า T₀ (ตารางที่ 4.8) จึงส่งผลให้สตาร์ชมันเทศเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าสตาร์ช มันฝรั่ง นอกจากนี้การที่สตาร์ชมันฝรั่งมีการพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำเนื่องมาจากอิทธิพลของฟอสฟอรัส โดยฟอสฟอรัสสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ส่งผลให้โครงสร้างอสัณฐานของแอมิโลเพกทินคลายตัว (Wischmann et al., 2005) น้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลในส่วนผลึกของโมเลกุลสตาร์ชได้ง่าย

ตารางที่ 4.11 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 5-85 °C*

แหล่ง สตาร์ช	สายพันธุ์	กำลังการพองตัว (g/g dry starch)				การละลาย (%)			
		55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C
มันเทศ	0106-1 (สีขาว)	2.61 ^a ± 0.32**	2.91 ^c ± 0.17	6.33 ^d ± 0.59	18.05 ^b ± 0.20	1.33 ^c ± 0.11	2.40 ^{bc} ± 0.17	3.86 ^d ± 0.30	11.75 ^b ± 0.44
	พจ.265-1 (สีเหลืองเข้ม)	3.01 ^a ± 0.29	3.66 ^b ± 0.19	10.42 ^b ± 0.39	16.99 ^c ± 0.41	2.11 ^b ± 0.38	3.06 ^b ± 0.35	6.57 ^b ± 0.49	9.77 ^c ± 0.63
	T101 (สีส้ม)	3.04 ^a ± 0.33	3.55 ^{bc} ± 0.23	7.65 ^c ± 0.85	14.53 ^d ± 0.44	1.30 ^c ± 0.26	1.59 ^c ± 0.26	4.68 ^{cd} ± 0.20	9.57 ^c ± 0.42
	พจ.65-3 (สีม่วงเข้ม)	3.17 ^a ± 0.37	3.95 ^b ± 0.12	11.47 ^b ± 0.27	16.16 ^c ± 0.26	1.00 ^c ± 0.26	3.09 ^b ± 0.70	5.33 ^c ± 0.22	7.88 ^d ± 0.33
มันฝรั่ง	Atlantic (สีครีม)	2.98 ^a ± 0.20	12.29 ^a ± 0.72	27.25 ^a ± 0.92	39.80 ^a ± 0.77	5.26 ^a ± 0.73	7.65 ^a ± 0.73	9.16 ^a ± 0.94	13.99 ^a ± 0.30

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของแป้งที่ 85 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชมันเทศและสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์มีกำลังการพองตัวอยู่ในช่วง 14.53 – 18.05 g/g dry starch ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชมันฝรั่ง คือ 39.80 g/g dry starch ทั้งนี้ อาจเนื่องจากรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันเทศเป็นชนิด C ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกหนาแน่นกว่า ชนิด B ของสตาร์ชมันฝรั่ง (Ahmad et al., 1999) ทำให้โมเลกุลน้ำแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้น้อย จึงเกิดการพองตัวน้อยกว่านอกจากนี้ ภายในโมเลกุลของสตาร์ชมันฝรั่งยังมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงซึ่งสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้สตาร์ชมันฝรั่งมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชมันเทศมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณากำลังการพองตัวของแป้งที่ 85 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีกำลังการพองตัวสูงสุด รองลงมาคือ สายพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่สายพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่าต่ำสุด ซึ่งความแตกต่างนี้ สอดคล้องกับ ปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 โดยสตาร์ชที่มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 มาก ทำให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรงสูง (Kuakpetoon and Wang, 2007) ซึ่งสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 ต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.5) ทำให้มีค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สูงกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ โดยทั่วไปปริมาณแอมิโลสที่สูง (ตารางที่ 4.3) หรือโมเลกุลของแอมิโลสที่มีขนาดใหญ่ (ตารางที่ 4.4) มักจะมีผลต่อการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Liu et al., 2003) เนื่องจากแอมิโลสที่มีขนาดใหญ่ จะหลุดออกจากเม็ดสตาร์ชได้ยาก และอาจเกิดเกลียวคู่กับสายโซ่แอมิโลเพกทินภายในเม็ดสตาร์ชได้ ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้น้อย ซึ่งสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีปริมาณแอมิโลสสูงและมีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีกำลังการพองตัวต่ำกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น

จากการศึกษาการละลายของสตาร์ชมันเทศและมันฝรั่งระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55 – 85 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.11) พบว่าสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์และสตาร์ชมันฝรั่ง ส่วนใหญ่มีค่าการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) และ T101 (เนื้อ อสีส้ม) โดยพบว่าค่าการละลายของสตาร์ชมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์นี้ มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li and Yeh (2001) ที่พบว่าสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์จากไต้หวันมีค่ากำลังการพองตัวและการละลายต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่งมากซึ่งค่าการละลายนี้ จะมีความสัมพันธ์ในทำนองเดียวกันกับค่ากำลังการพองตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 ต่ำ (ตารางที่ 4.5) จึงมีค่าการ

ละลายสูงที่สุด ในขณะที่สตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ซึ่งมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้าน ชนิด B1 ต่ำเช่นกัน แต่กลับมีค่าการละลายต่ำที่สุด ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะสตาร์ชมันเทศพันธุ์นี้ มีแอมิโลสในปริมาณน้อย ซึ่งค่าการละลายคำนวณจากน้ำหนักของแข็งที่ละลายออกมานอกเม็ด สตาร์ช ซึ่งส่วนใหญ่คือ โมเลกุลของแอมิโลส (Banks et al., 1971) ดังนั้นสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) จึงมีค่าการละลายต่ำที่สุด

4.2.4.4 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ช

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ภายภาพ โดยสมบัตินี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับองค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียง โครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช โดยสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งตาม อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) จากการศึกษาสมบัติทางความ หนืดของสตาร์ชมันเทศ 4 สายพันธุ์ และสตาร์ชมันฝรั่ง (ตารางที่ 4.12) พบว่าสตาร์ชจากมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature; PT) สูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยทั่วไปสตาร์ชที่มีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชันสูง (T_0) มักจะแสดงค่า PT ที่สูงด้วย (Jane et al., 1999) สอดคล้องกับผลการทดลองจาก DSC ซึ่งสตาร์ชมันเทศมี T_0 ของการเกิดเจลาติไนเซชัน สูง (ตารางที่ 4.8) จึงมีค่า PT ที่สูงด้วย นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับค่ากำลังการพองตัวของ สตาร์ช (ตารางที่ 4.11) ที่พบว่าสตาร์ชจากมันเทศเริ่มเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง กว่าสตาร์ชมันฝรั่ง

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

แหล่ง สตาร์ช	สายพันธุ์	สมบัติทางความหนืด					
		Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Breakdown (cP) (%Breakdown)	Final viscosity (cP)	Setback (cP) (%Setback)
มันเทศ	0106-1 (เนื้ สีขาว)	80.9 ^a ± 0.1**	4,238.0 ^c ± 17.3	1,850.3 ^e ± 5.1	2,387.7 ^b ± 17.2 (56.3 ^a ± 0.2)	2,672.0 ^e ± 21.9	821.7 ^c ± 24.8 (-44.4 ^d ± 1.4)
	พจ.265-1 (เนื้ สีเหลืองเข้ม)	80.0 ^b ± 0.0	3,801.3 ^d ± 31.3	1,991.3 ^d ± 22.5	1,810.0 ^c ± 8.9 (47.6 ^c ± 0.2)	2,984.7 ^d ± 17.4	993.3 ^b ± 7.2 (-49.9 ^e ± 0.9)
	T101 (เนื้ สีส้ม)	80.0 ^b ± 0.1	4,980.3 ^b ± 71.4	3,152.3 ^b ± 43.7	1,828.0 ^c ± 27.8 (36.7 ^e ± 0.0)	4,418.7 ^b ± 97.2	1,266.3 ^a ± 53.6 (-40.2 ^b ± 1.1)
	พจ.65-3 (เนื้ สีม่วงเข้ม)	78.1 ^c ± 0.5	4,231.3 ^c ± 19.3	2,399.3 ^c ± 24.6	1,832.0 ^c ± 26.9 (43.3 ^d ± 0.6)	3,422.7 ^c ± 21.5	1,023.3 ^b ± 3.0 (-42.6 ^c ± 0.6)
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้ สีครีม)	72.7 ^d ± 0.1	11,529.0 ^a ± 76.2	5,344.7 ^a ± 15.1	6,184.0 ^a ± 84.9 (53.6 ^b ± 0.4)	5,987.0 ^a ± 32.7	642.3 ^d ± 20.1 (-12.0 ^a ± 0.3)

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

เมื่อเปรียบเทียบกับ PT ของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้ อสีขาว) เริ่มเกิดความหนืดที่อุณหภูมิ 80.9 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชมันเทศอีก 3 สายพันธุ์ อาจเนื่องจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้ อสีขาว) มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 สูง (ตารางที่ 4.5) หากพิจารณาตามโครงสร้างแบบ backbone (Bertoft, 2004) โดยถ้ามีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B2 สูง จะทำให้บริเวณอสัณฐานมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเกิดการเคลื่อนตัวได้ยาก ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ยากด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่ามันเทศพันธุ์ 106-1 (เนื้ อสีขาว) มีปริมาณไขมันเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 0.83 (โดยน้ ้าหนักแห้ง) (ตารางที่ 4.10) ซึ่งไขมันจะไปรวมตัวกับแอมิโลสเกิดเป็น amylose-lipid complex ทำหน้าที่ส่งเสริมให้สตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Jane et al., 1999) และไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โดยการขัดขวางโมเลกุลน้ ้าไม่ให้เข้าเม็ดสตาร์ชได้ง่าย (Yoo and Jane, 2002) สารละลายสตาร์ชจึงเริ่มเกิดความหนืดที่อุณหภูมิสูง ส่วนสตาร์ชมันฝรั่งที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง (ตารางที่ 4.3) จึงก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ส่งผลให้ส่วนอสัณฐานของแอมิโลเพกทินคลายตัวหรืออ่อนแอลง ทำให้น้ ้าแทรกตัวเข้าไปเม็ดสตาร์ชได้ง่าย สารละลายสตาร์ชจึงเริ่มเกิดความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ

ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity; PV) เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการพองตัวของอิสระของเม็ดสตาร์ชก่อนที่เม็ดสตาร์ชจะแตก (Zobel, 1984) จากผลการทดลองพบว่า สตาร์ชจากมันฝรั่งมีค่า PV สูงกว่าสตาร์ชมันเทศทั้ง 4 พันธุ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ช (ตารางที่ 4.11) ที่พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าสตาร์ชมันเทศทุกสายพันธุ์ อาจเนื่องจากอิทธิพลของฟอสฟอรัสที่อยู่ในสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าทำให้โครงสร้างอสัณฐานของแอมิโลเพกทินคลายตัว น้ ้าภายนอกจึงเข้าไปแทรกตัวภายในโมเลกุลสตาร์ชได้ง่าย เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวเต็มที่ ทำให้เคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น ดังนั้น สตาร์ชมันฝรั่งจึงมีค่า PV สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบ PV ของสตาร์ชมันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่ามันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้ อสีส้ม) มีค่า PV สูงที่สุดในขณะที่สายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) มีค่า PV ต่ำที่สุด ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) นั้นมีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 (ตารางที่ 4.5) และมีปริมาณความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.7) มากกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ทำให้ผลึกของสตาร์ชมีความสมบูรณ์และแข็งแรง (Cameron and Donald, 1992) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงทำให้สตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) พองตัวได้น้อย และมีค่า PV ต่ำ ในขณะที่สตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้ อสีส้ม) มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านชนิด B1 และมีปริมาณความเป็นผลึกต่ำ นอกจากนั้น

อาจจะเป็นเพราะมีปริมาณไขมันน้อย จึงมีปริมาณ amylose-lipid complex ที่ต่ำ ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้ช่วยส่งเสริมให้สตาร์ชมีความแข็งแรง (Jane et al., 1999) และไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชได้ (Yoo and Jane, 2002)

ค่าความหนืดลดลง (Breakdown; BD) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความทนต่อแรงเฉือนและความร้อนของโมเลกุลสตาร์ช (Sandhu and Singh, 2007) ซึ่งจากผลการทดลองจะพิจารณาค่าร้อยละของ BD (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.12) โดยพบว่าสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่าร้อยละของ BD สูงที่สุด รองลงมาคือ สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) และ T101 (เนื้อ อสีส้ม) โดยค่าร้อยละ BD ที่สูงในสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) นี้ จะแสดงถึงความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนและความร้อนที่ต่ำ โดยทั่วไปแล้วสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักจะมีค่าร้อยละ BD ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสายโซ่เส้นตรงและยาวของแอมิโลสสามารถต้านทานแรงเฉือนและทนความร้อนได้ดี (Singh et al., 2006) ซึ่งสอดคล้องกับสตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าสตาร์ช มันเทศสายพันธุ์อื่น ส่งผลให้มีความสามารถต้านทานแรงเฉือนและทนความร้อนได้ดี จึงแสดงค่าร้อยละ BD ต่ำมาก แต่ไม่สอดคล้องในกรณีของสตาร์ชมันฝรั่งที่มีปริมาณแอมิโลสสูง แต่แสดงค่าร้อยละ BD ค่อนข้างสูงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสตาร์ชจากมันฝรั่งมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในโครงสร้าง จึงอาจขัดขวางการรวมตัวกันของแอมิโลส ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนและความร้อนของมันฝรั่งมีน้อยลง ค่าร้อยละ BD จึงสูง เมื่อพิจารณาสตาร์ชมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่าร้อยละ BD สูงกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ค่อนข้างมาก ในขณะที่ปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากแอมิโลสของสตาร์ช มันเทศต่างชนิดนี้ มีความยาวที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังพบว่าขนาดของแอมิโลเพกตินยังแตกต่างกันด้วย (ตารางที่ 4.4) โดยมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีแอมิโลสสายยาว และมี แอมิโลเพกตินขนาดใหญ่มาก ซึ่งอาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแอมิโลสได้ ทำให้มันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนต่ำ ค่าร้อยละ BD จึงสูง

ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity; FV) เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช (retrogradation) (Sandhu and Singh, 2007) โดยค่าที่ใช้บอกแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช คือค่าการคืนตัว (Setback) โดยพิจารณาจากค่าร้อยละของการคืนตัว (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.12) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยที่สำคัญ คือ ปริมาณแอมิโลส สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโล

เพกทินสูง (Wong, 1989) จากผลการทดลองพบว่าสตาร์ชจากมันเทศทุกสายพันธุ์มีการคืนตัวสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ถึงแม้ว่าสตาร์ชมันฝรั่งจะมีปริมาณแอมิโลสสูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลพอสฟอไรสภายในสตาร์ชมันฝรั่งเข้ามาขัดขวางการกลับมาเรียงตัวใหม่ของแอมิโลส ดังนั้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีปริมาณน้อยและไม่สมบูรณ์ ค่าการคืนตัวของสตาร์ชมันฝรั่งจึงมีค่าต่ำ และเมื่อพิจารณาค่าการคืนตัวของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ. 265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าร้อยละการคืนตัวสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า ΔH_{retro} (ตารางที่ 4.10) ที่มีค่าสูงกว่าสตาร์ชชนิดอื่น ในขณะที่สตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่าร้อยละการคืนตัวต่ำกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ นั้นมีค่า ΔH_{retro} ต่ำกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่นด้วย อาจเนื่องมาจากโครงสร้างแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) ส่งเสริมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าสตาร์ชมันเทศชนิดอื่น จึงแสดงค่าร้อยละการคืนตัวที่สูง นอกจากนี้ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทินแล้ว ขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินก็มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการคืนตัวด้วย โดยพบว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำและโมเลกุลแอมิโลสขนาดเล็ก นั้นมีค่าร้อยละของการคืนตัวที่สูงกว่ามันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในบางกรณีขนาดโมเลกุลของแอมิโลส อาจมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมากกว่าปริมาณแอมิโลส โดยขนาดโมเลกุลของแอมิโลสในสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) อาจจะเป็นขนาดที่เหมาะสมในการเกิดรีโทรเกรเดชันแบบทันที ส่วนขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่ใหญ่เกินไปในสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) อาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแอมิโลส ทำให้ค่าร้อยละการคืนตัวของสตาร์ชมีค่าต่ำลง ซึ่งผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zaidul et al. (2007) ที่พบว่ามันเทศพื้นเมืองจากญี่ปุ่น มีค่า PV BD และ FV ต่ำกว่าของมันฝรั่งพื้นเมืองจากญี่ปุ่น ในขณะที่มีค่า PT และค่าการคืนตัวสูงกว่า

4.2.4.5 ความแข็งของเจลสตาร์ช

จากการวัดความแข็งของเจลสตาร์ชด้วยเครื่อง Texture analyzer (ตารางที่ 4.13) พบว่าเจลสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) T101 (เนื้อ อสีส้ม) และมันฝรั่ง มีค่าความแข็ง (Hardness) ของเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนเจลสตาร์ชของมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลือง) มีค่าความแข็งของเจลสูงที่สุด ในขณะที่พันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) มีค่าความแข็งของเจลต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.13 ลักษณะเนื้อ อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง**

แหล่งสตาร์ช	สายพันธุ์	Hardness (g)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	47.81 ^b ± 8.07**
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	60.51 ^a ± 9.73
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	50.35 ^b ± 6.46
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	35.84 ^c ± 3.73
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	46.62 ^b ± 7.39

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

ค่าความแข็งเป็นค่าของแรงที่ใช้กดลงบนเจลจนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่าง ซึ่งค่านี้ จะสะท้อนถึงความแข็งแรงของเจลสตาร์ชในตัวอย่างแต่ละชนิด โดยทั่วไปค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่แตกต่างกันนั้น มักเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแต่ละชนิด (Sandhu and Singh, 2007) ซึ่งทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้ แต่จะมีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชันที่แตกต่างกัน โดยโมเลกุลของแอมิโลสมีโครงสร้างที่เป็นสายตรง จึงสามารถเกิดการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ได้ง่ายและรวดเร็ว (short-term) ซึ่งมักจะเกิดในระยะแรกของการเก็บรักษาเจล สังเกตได้จากค่า setback ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แต่หากมีการเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำไว้เป็นเวลานาน การเกิดรีโทรเกรเดชันในลักษณะหลังนี้ ผลึกที่เกิดขึ้นใหม่จะไม่ขึ้น นอยู่กับโมเลกุลของแอมิโลสเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้น นอยู่กับแอมิโลเพกทินด้วย ซึ่งโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่มีขนาดใหญ่และเป็นกิ่ง ก้านเกะกะนั้น สามารถมารวมตัวกันเกิดเป็นผลึกใหม่ได้เช่นกัน เพียงแต่มาเรียงตัวยากและใช้เวลานานกว่า (long-term) (Miles et al., 1985) โดย Mua and Jackson (1997) กล่าวว่าสตาร์ช ที่มีเจลแข็งแรงนั้น มักจะมีปริมาณแอมิโลสสูงและมีสายโซ่แอมิโลเพกทินสายยาวจำนวนมาก ในทางกลับกันหากมีปริมาณแอมิโลสน้อยหรือมีสายโซ่แอมิโลเพกทินสายสั้น จะส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อย เจลสตาร์ชจึงมีค่าความแข็งแรงต่ำด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) ที่มีปริมาณแอมิโลสน้อย (ตารางที่ 4.3) และมีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสเล็กที่สุดด้วย (ตารางที่ 4.4) จึงเกิดเจล

สตาร์ชที่มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าสายพันธุ์อื่น ในขณะที่มันเทศอีก 3 สายพันธุ์มีปริมาณแอมิโลสสูงไม่แตกต่างกัน แต่มันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) กลับแสดงค่าความแข็งแรงของเจลสูงกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่นทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของแอมิโลเพกทินที่มีสายยาว ซึ่งสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้เช่นเดียวกัน แต่จะต้องใช้เวลานานกว่าแอมิโลส สังเกตได้จากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) นี้มีค่าร้อยละของการคืนตัว (ตารางที่ 4.12) และ ΔH_{retro} (ตารางที่ 4.10) สูงกว่าสตาร์ชอื่นๆ แสดงว่าโครงสร้างแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) ส่งเสริมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่ามันเทศสายพันธุ์อื่น จึงมีค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่สุดด้วย ส่วนสตาร์ชมันฝรั่งซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูง แต่กลับมีค่าความแข็งแรงของเจลไม่สูงมาก อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของโมเลกุลฟอสเฟตที่จะเข้ามาขัดขวางการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่หรือการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Billaderis, 1998) จึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของเจลสตาร์ชมันฝรั่งด้วย

อย่างไรก็ตาม การเกิดรีโทรเกรเดชันที่สูงของสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) สามารถสังเกตได้จากปรากฏการณ์การแยกตัวของน้ำ ออกจากเจลสตาร์ช (syneresis) โดยเมื่อเก็บเจลสตาร์ชมันเทศพันธุ์นี้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีหยดน้ำ เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของเจลสตาร์ช แสดงว่าโมเลกุลสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) เกิดรีโทรเกรเดชันในอัตราสูงจนกระทั่งโมเลกุลเข้ามาอยู่ใกล้กันมาก และบีบน้ำออกมา (Miles et al., 1985) ส่งผลให้เกิดเป็นเจลสตาร์ชที่แข็ง

4.3 การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวอร์มันเทศโดยศึกษาเปรียบเทียบกับฟลาวอร์มันฝรั่ง

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์

เมื่อนำหัวมันเทศและมันฝรั่งมาปอกเปลือก หั่นให้มีขนาดเล็ก อบ และบดร่อนให้เป็นผงจะได้แป้งฟลาวอร์ จากผลการทดลองพบว่าฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.14) โดยฟลาวอร์ทั้งสองแหล่งมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักในช่วงร้อยละ 79.92 – 87.44 (โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งฟลาวอร์มันเทศมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าฟลาวอร์มันฝรั่ง โดยเฉพาะมันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้ อสีขาว) และ พจ.265-1 (เนื้ อสีเหลืองเข้ม) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yadav et al. (2006) ซึ่งพบว่าฟลาวอร์มันเทศที่ นเมื่องจากประเทศอินเดียมีคาร์โบไฮเดรตมากถึงร้อยละ 73 (โดยน้ำหนักแห้ง) แสดงว่ามันเทศเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งของฟลาวอร์ได้ นอกจากนี้ ยังพบว่า ฟลาวอร์มันเทศมีปริมาณไขมัน

และเส้นใยหยาบสูงกว่าฟลาวอร์มันฝรั่ง โดยเฉพาะมันเทศพันธุ์T101 (เนื้อ อสีส้ม) และ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ในขณะที่ฟลาวอร์มันเทศทุกสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีน และเถ้า ต่ำกว่าฟลาวอร์มันฝรั่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmed et al. (2010) ซึ่งพบว่ามันเทศจากฟาร์มในเกาหลีใต้ มีปริมาณโปรตีน เส้นใยหยาบ และเถ้า เท่ากับร้อยละ 3.48 5.26 และ 3.45 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ แต่ไม่สอดคล้องกับปริมาณไขมัน(ร้อยละ 1.27 โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณไขมันที่พบในมันเทศสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yadav et al. (2006) ซึ่งพบว่ามันเทศเนื้อ อสีม่วงแดงจากประเทศอินเดียนี้ มีปริมาณโปรตีน และเส้นใยหยาบสูงถึงร้อยละ 6.6 และ 17.5 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ แต่มีปริมาณไขมันต่ำ เท่ากับร้อยละ1.0 (โดยน้ำหนักแห้ง) จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ามันเทศต่างสายพันธุ์นี้ มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามอายุการเก็บเกี่ยว สภาพอากาศ และแหล่งปลูกที่แตกต่างกัน อาจส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของมันเทศที่แตกต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง*

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ฟลาวอร์มันเทศ				ฟลาวอร์มันฝรั่ง
	0106-1 (เนื้อสีขาว)	พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม)	T101 (เนื้อสีส้ม)	พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)	Atlantic (เนื้อสีครีม)
ความชื้น ^{***} (%wb)	8.59 ^c ± 0.00 ^{**}	8.60 ^c ± 0.01	7.70 ^d ± 0.00	10.23 ^{cb} ± 0.00	12.08 ^a ± 0.03
โปรตีน (%db)	2.72 ^d ± 0.01	4.28 ^c ± 0.07	4.09 ^c ± 0.03	5.23 ^b ± 0.14	10.75 ^a ± 0.20
ไขมัน (%db)	3.95 ^c ± 0.11	2.55 ^d ± 0.08	6.72 ^a ± 0.02	4.49 ^b ± 0.01	0.79 ^e ± 0.08
เถ้า (%db)	2.54 ^e ± 0.03	2.99 ^d ± 0.00	3.97 ^b ± 0.04	3.27 ^c ± 0.07	5.10 ^a ± 0.15
เส้นใยหยาบ (%db)	3.35 ^c ± 0.04	4.06 ^b ± 0.20	5.30 ^a ± 0.10	5.22 ^a ± 0.28	1.85 ^d ± 0.01
คาร์โบไฮเดรต (%db)	87.44 ^a ± 0.03	86.10 ^b ± 0.18	79.92 ^d ± 0.11	81.77 ^c ± 0.22	81.50 ^c ± 0.44

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

*** wb = wet basis, db = dry basis

4.3.2 สมบัติทางกายภาพ

4.3.2.1 ค่าสี

ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของฟลาวอร์มันเทศต่างสายพันธุ์และฟลาวอร์มันฝรั่งแสดงดังตารางที่ 4.15 โดยค่าสีของทั้งฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่งมีค่า L a และ b แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นค่า L ซึ่งแสดงถึงค่าความสว่างของสีจากฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) และมันฝรั่งที่มีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อมองด้วยตาเปล่าก็ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เช่นกัน การที่ฟลาวอร์ของมันเทศต่างสายพันธุ์มีสีที่แตกต่างกันนั้น

ขึ้นอยู่กับชนิดของรงควัตถุที่พบในมันเทศแต่ละสายพันธุ์ โดยจากผลการทดลองพบว่าฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม) และ T101 (เนื้อ สีส้ม) มีค่า b สูงกว่าฟลาวอร์ชนิดอื่น ซึ่งค่า b เป็นค่าที่แสดงการไล่สีจากสีน้ำเงินไปยังสีเหลืองโดยถ้ามีค่า b สูงแสดงว่ามีสีเข้าใกล้สีเหลือง และหากมีค่า b ต่ำแสดงว่าจะมีสีเข้าใกล้สีน้ำเงิน ดังนั้นฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์101 (เนื้อ สีส้ม) ซึ่งมีค่า b สูงที่สุดจึงมีสีเหลืองเข้มที่สุดด้วย และเมื่อมองฟลาวอร์มันเทศทั้งสองสายพันธุ์นี้ด้วยตาเปล่าสามารถสังเกตได้เป็นสีเหลืองเข้ม และสีส้ม ตามลำดับ สอดคล้องกับ Shih et al. (2009) ซึ่งพบว่า ฟลาวอร์จากมันเทศที่มีเนื้อ สีเหลืองและส้มจากไต้หวัน นั้น มีค่า b สูงอยู่ในช่วง 19.90 – 26.20 และยังพบว่าเมื่อนำสารสกัดจากฟลาวอร์ไปวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุจะพบเบต้าแคโรทีนเป็นองค์ประกอบสูงถึง 83.3 ไมโครกรัมต่อกรัมฟลาวอร์ (โดยน้ำหนักแห้ง) โดยเบต้าแคโรทีนเป็นกลุ่มของสารสี เช่น สีเหลือง สีส้ม หรือสีแดง เป็นต้น ซึ่งสามารถพบได้ในพืชโดยทั่วไป (Rao and Rao, 2007) สำหรับฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) นั้น มีค่า a สูงที่สุด ซึ่งค่า a แสดงถึงการไล่สีจากสีเขียวไปยังสีแดง โดยถ้ามีค่า a สูงแสดงว่ามีสีเข้าใกล้สีแดง ในทางกลับกันหากมีค่า a ต่ำแสดงว่ามีสีเข้าใกล้สีเขียว ดังนั้นฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม) ที่มีค่า a สูง จึงมีสีแดงเข้มที่สุด และเมื่อมองฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์นี้ ด้วยตาเปล่าสามารถสังเกตได้เป็นสีม่วงแดง Teow et al. (2007) พบว่าเมื่อนำสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศที่มีสีม่วงแดงไปวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุจะพบแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบสูงถึง 0.531 มิลลิกรัมต่อกรัมฟลาวอร์ โดยแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ ให้สีแดงถึงแดงสีม่วง ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติเช่นกัน (ปรีชา บุญจุง, 2549) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยจำนวนมากรายงานถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของตัวอย่างเนื่องจากอิทธิพลด้านต่างๆ เช่น การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากอุณหภูมิ (Garcia-Viguera and Zafrilla, 2001) อิทธิพลจากค่าพีเอชหรือกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (Ahmed et al., 2010; ณัฐณี ตั้งศรีอนุกุล 2551) เป็นต้น

ตารางที่ 4.15 ค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง*

แหล่งฟลาวอร์	สายพันธุ์	ค่าสี		
		L	a	b
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	66.17 ^a ± 0.57 ^{**}	-0.40 ^e ± 0.06	10.97 ^c ± 0.24
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	64.08 ^b ± 0.80	-0.14 ^d ± 0.01	14.04 ^b ± 0.06
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	58.89 ^c ± 0.66	10.69 ^b ± 0.04	19.35 ^a ± 0.09
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	47.34 ^d ± 0.51	12.80 ^a ± 0.17	2.27 ^e ± 1.38
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	64.51 ^b ± 0.41	0.13 ^c ± 0.03	10.52 ^d ± 0.16

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนั้น หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p ≤ 0.05)

4.3.3 สมบัติทางเคมีกายภาพ

4.3.3.1 สมบัติทางความหนืด

สมบัติทางความหนืดของฟลาวอร์มันเทศต่างสายพันธุ์และฟลาวอร์มันฝรั่งแสดงในตารางที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความหนืดของฟลาวอร์และสตาร์ชจากมันเทศและมันฝรั่ง (ตารางที่ 4.12) พบว่าฟลาวอร์มีค่า PT สูงกว่า แต่มีค่า PV BD และ SB ต่ำกว่าสตาร์ชของแหล่งเดียวกัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากฟลาวอร์โดยทั่วไปยังไม่บริสุทธิ์ มีสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น ไขมัน โปรตีน และเส้นใยอาหาร (Wannerberger and Eliasson, 1993) ซึ่งไขมัน และโปรตีนที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชนี้ จะทำหน้าที่รบกวนและขัดขวางการแพร่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ช (Ogawa et al., 2003) จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อให้เม็ดสตาร์ชพองตัว และเริ่มเกิดความหนืด นอกจากนี้ สิ่งเจือปนเหล่านี้ ยังขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และขัดขวางการรวมตัวกัน เกิดเป็นโครงร่างแหระหว่างโมเลกุลสตาร์ชอีกด้วย

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางความหนืดของฟลาวัวร์จากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง

แหล่ง ฟลาวัวร์	สายพันธุ์	สมบัติทางความหนืด					
		Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Breakdown (cP) (%Breakdown)	Final viscosity (cP)	Setback (cP) (%Setback)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	81.9 ^b ± 0.5 ^{***}	1,191.3 ^b ± 24.4	722.0 ^b ± 24.6	469.3 ^b ± 0.6 (39.4 ^c ± 0.8)	1066.3 ^b ± 33.5	344.3 ^c ± 9.2 (-47.7 ^a ± 0.6)
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	81.9 ^b ± 0.5	365.3 ^d ± 32.7	174.7 ^d ± 34.9	190.7 ^d ± 3.0 (52.5 ^a ± 5.1)	270.7 ^d ± 47.2	96.0 ^e ± 12.5 (-55.4 ^b ± 4.1)
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	84.6 ^a ± 0.5	403.0 ^d ± 2.6	282.0 ^c ± 4.6	121.0 ^e ± 5.3 (30.0 ^d ± 1.2)	406.3 ^c ± 11.4	124.3 ^d ± 6.8 (-44.1 ^a ± 1.7)
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	81.3 ^b ± 0.5	1,049.0 ^c ± 31.5	726.7 ^b ± 15.8	322.3 ^c ± 16.2 (30.7 ^d ± 0.6)	1,106.7 ^b ± 27.0	380.0 ^b ± 11.8 (-52.3 ^b ± 0.7)
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	73.7 ^c ± 0.5	2,760.3 ^a ± 24.3	1,502.7 ^a ± 23.1	1,257.7 ^a ± 12.7 (45.6 ^b ± 0.5)	2,562.3 ^a ± 7.6	1,059.7 ^a ± 15.5 (-70.5 ^c ± 2.1)

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (≤ 0.05)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อน (Pasting temperature; PT) ของฟลาวัวร์ทั้ง 2 แห่ง พบว่าฟลาวัวร์มันเทศที่ 4 สายพันธุ์ มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อน (Pasting temperature; PT) สูงกว่าฟลาวัวร์มันฝรั่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติทางความร้อนของสตาร์ช (ตารางที่ 4.12) ที่พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งนั้นมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง จึงเกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ส่งผลให้โครงสร้างอณูพื้นฐานของเอมิไลเพคตินคลายตัวหรืออ่อนแอลง น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ง่าย (Moorthy, 2002) สตาร์ชมันฝรั่งจึงมีค่า PT ต่ำกว่าสตาร์ชมันเทศ และเมื่อพิจารณาฟลาวัวร์มันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่า PT สูงกว่าฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์อื่น ทั้งนี้ อาจเนื่องจากฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีปริมาณไขมันที่สูง (ตารางที่ 4.14) จึงทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ยากขึ้น ส่งผลให้สตาร์ชต้องใช้อุณหภูมิในการพองตัวที่สูงขึ้น (Hibi, 1998) เพื่อเริ่มเกิดความร้อน

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity; PV) พบว่าฟลาวัวร์มันฝรั่งมีค่า PV สูงกว่าฟลาวัวร์มันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ช (ตารางที่ 4.11) ที่พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าสตาร์ชมันเทศทุกสายพันธุ์ เนื่องจากอิทธิพลของฟอสฟอรัสที่มีมากในมันฝรั่ง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระ จึงเกิดความร้อนขึ้นสูง ฟลาวัวร์มันฝรั่งจึงมีค่า PV สูงมากด้วย เมื่อเปรียบเทียบ PV ของฟลาวัวร์มันเทศแต่ละสายพันธุ์ พบว่าฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่า PV สูงกว่าฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์อื่น ในขณะที่ฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่า PV ต่ำ ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่า PV ของสตาร์ชมันเทศ (ตารางที่ 4.12) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณไขมันที่สูงของฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์นี้ที่ได้กล่าวไว้แล้วนอกจากอิทธิพลของไขมันแล้วยังต้องพิจารณาความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้งด้วย โดยเฉพาะฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) ทั้งที่มีปริมาณไขมันน้อยที่สุด แต่แสดงค่า PV ต่ำมาก เนื่องจากมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) นั้น มีปริมาณสายโซ่กิ่งก้านเอมิไลเพคตินชนิด B1 (ตารางที่ 4.5) และมีปริมาณความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.7) มากกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความสมบูรณ์และแข็งแรง (Cameron and Donald, 1992) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงทำให้ฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) พองตัวได้น้อย และมีค่า PV ต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดลดลง (Breakdown; BD) โดยพิจารณาค่าร้อยละของ BD (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.16) พบว่าฟลาวัวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่าร้อยละของ BD ต่ำกว่าฟลาวัวร์มันเทศสายพันธุ์อื่นและฟลาวัวร์มันฝรั่งซึ่งผลที่ได้มีค่อนข้างสอดคล้องกับค่าร้อยละ BD

ของสตาร์ช (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.12) โดยสตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อสีส้ม) มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์อื่น ส่งผลให้มีความสามารถต้านแรงเฉือนและทนความร้อนได้ดี (Singh et al., 2006) จึงมีค่าร้อยละของ BD ต่ำที่สุด ซึ่งให้ผลในการทำงานเดียวกันกับค่าร้อยละของ BD ของฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้อสีส้ม) แต่ในบางกรณีค่าร้อยละของ BD ของฟลาวร์ อาจได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ยังพบมากในฟลาวร์ เช่น ไขมัน โปรตีน และเส้นใยหยาบ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าร้อยละของ BD จากฟลาวร์และสตาร์ชชนิดนั้นๆ แตกต่างกันไปเช่นที่พบในฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) ที่มีค่าร้อยละ BD สูงที่สุด ในขณะที่ค่าร้อยละ BD ของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์นี้มีค่าไม่สูงมาก (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.12) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์นี้มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างสูง โดยโปรตีนมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายตรงยาวของกรดอะมิโนเช่นเดียวกับโมเลกุลของแอมิโลส (Hamaker, 1994) ซึ่งอาจจะขัดขวางการรวมตัวกันของโมเลกุลแอมิโลสที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายฟลาวร์ ส่งผลให้ฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์นี้ ด้านทานแรงเฉือนและทนความร้อนได้น้อยลง ค่าร้อยละของ BD จึงมีค่าสูง ในขณะที่ฟลาวร์มันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าฟลาวร์ชนิดอื่น และมีปริมาณแอมิโลสค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์นี้ สามารถต้านแรงเฉือนและทนความร้อนได้ดี ค่าร้อยละของ BD จึงมีค่าต่ำ ส่วนสตาร์ช มันฝรั่ง นั้นมีปริมาณแอมิโลสสูง แต่เนื่องจากสตาร์ชมันฝรั่งมีปริมาณพอสฟอรัสสูงด้วย จึงอาจขัดขวางการรวมตัวกันของโมเลกุลแอมิโลสที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายสตาร์ช ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่งผลให้ฟลาวร์มันฝรั่งมีความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนและความร้อนได้น้อยลง จึงมีค่าร้อยละของ BD สูงกว่าที่ควร

เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัว (Setback) ซึ่งใช้บอกแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันของฟลาวร์ (Varavinit et al., 2003) นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่สำคัญ คือ ปริมาณแอมิโลส โดยโมเลกุลแอมิโลสจะเกิดการจับเรียงตัวใหม่ได้มากกว่าและเร็วกว่าโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (Wong, 1989) จากผลการทดลองพิจารณาจากร้อยละของการคืนตัว (ค่าในวงเล็บ ตารางที่ 4.12) พบว่าฟลาวร์มันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ มีร้อยละของการคืนตัวต่ำกว่าฟลาวร์มันฝรั่ง เนื่องจากมันฝรั่งมีปริมาณแอมิโลสสูง จึงมีร้อยละของการคืนตัวสูงด้วย ซึ่งไม่สอดคล้องกับร้อยละการคืนตัวของสตาร์ช (ตารางที่ 4.12) ที่พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ เนื่องจากสตาร์ชมันฝรั่งที่มีปริมาณพอสฟอรัสสูงนั้น จะทำหน้าที่ขัดขวางการกลับมาเรียงตัวของแอมิโลส แต่เนื่องจากฟลาวร์มันฝรั่ง นั้นมีปริมาณโปรตีนเป็นองค์ประกอบสูงด้วย (ตารางที่ 4.14) โดยโปรตีนซึ่งเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ของกรดอะมิโนที่มีโมเลกุลใหญ่ อาจจะสามารถเกิดอัตรกิริยากับโมเลกุลสตาร์ช และให้ความหนืดได้ นอกจากนี้ ปริมาณไขมันที่ต่ำมาก

ของฟลาวอร์มันฝรั่ง จึงไม่สามารถรวมตัวกับโมเลกุลแอมิโลสได้ แอมิโลสจึงเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ อาจส่งผลให้ฟลาวอร์มันฝรั่งมีร้อยละของการคืนตัวที่สูงมาก เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัวของมันเทศทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่าสอดคล้องกับร้อยละของการคืนตัวของสตาร์ช โดย ฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ พจ.256-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าร้อยละการคืนตัวสูงสุด ในขณะที่สตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่าร้อยละการคืนตัวต่ำกว่ามันเทศอีก 3 สายพันธุ์ อาจเนื่องมาจากโครงสร้างแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) ส่งเสริมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าสตาร์ชมันเทศชนิดอื่น จึงแสดงค่าร้อยละการคืนตัวที่สูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีไขมัน และเส้นใยหยาบ ในปริมาณที่สูง ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้ อาจจะไปขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้ จากผลการทดลอง จะพบว่า ฟลาวอร์ต่างแหล่ง และต่างสายพันธุ์จะมีสมบัติทางความหนืดที่แตกต่างกันไป โดยจากงานวิจัยของ Yadav et al. (2006) ที่ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟลาวอร์มันเทศ เนื้อ อสีแดงจากอินเดีย พบว่ามีค่าความหนืด คือ PV BD และ SB เท่ากับ 1,566 240 และ 1,078 cP ตามลำดับ นอกจากนี้ น.ดารินทร์กุลมาโนวงศ์ (2549) ซึ่งศึกษาสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและฟลาวอร์มันเทศ 3 สายพันธุ์ เปรียบเทียบกัน พบว่าฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ต่อเผือก(เนื้อ อสีม่วง) มีค่า PV BD และ SB สูงกว่ามันเทศพันธุ์เกษตร (เนื้อ อสีเหลือง) และพันธุ์ไข่ (เนื้อ อสีส้ม) ในขณะที่ฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ไข่ (เนื้อ อสีส้ม) มี PT สูงกว่าฟลาวอร์มันเทศอีก 2 สายพันธุ์

4.2.2.4 ความแข็งของเจลฟลาวอร์

การศึกษาความแข็งของเจลฟลาวอร์มันเทศและมันฝรั่ง แสดงในตารางที่ 4.17 พบว่าเจลฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่าความแข็ง (Hardness) ของเจลสูงที่สุด รองลงมาคือ เจลฟลาวอร์มันฝรั่ง และมันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ตามลำดับ ส่วนเจลฟลาวอร์มันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) และ T101 (เนื้อ อสีส้ม) นั้นมีค่าความแข็งต่ำซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจะเห็นว่าความแข็งของเจลฟลาวอร์นั้น ไม่สอดคล้องกับความแข็งของเจลสตาร์ช ทั้งนี้ อาจจะเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากสตาร์ช โดยเฉพาะไขมัน และเส้นใยหยาบ ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ สามารถขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้ ดังนั้น ฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) และมันฝรั่ง ซึ่งมีปริมาณไขมัน และเส้นใยหยาบต่ำกว่าฟลาวอร์ชนิดอื่น จึงมีเจลที่มีความแข็งสูงกว่าเจลของฟลาวอร์ชนิดอื่น

ตารางที่ 4.17 ความแข็งของเจลจากฟลาวรรีมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวรรีมันฝรั่ง

แหล่งฟลาวร์	สายพันธุ์	Hardness (g)
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	16.91 ^a ± 0.77**
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	3.07 ^d ± 0.21
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	1.92 ^d ± 0.10
	พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วงเข้ม)	7.49 ^c ± 0.39
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	15.27 ^b ± 2.00

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

อย่างไรก็ตาม เจลของฟลาวรรีมันฝรั่งและมันเทศทุกสายพันธุ์นั้นไม่แสดงปรากฏการณ์การแยกตัวของน้ำออกจากเจล(syneresis) คือ ไม่พบหยดน้ำ เกาะอยู่บนผิวหน้าของเจล เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นที่พบในเจลของสตาร์ช ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว แสดงว่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในฟลาวร์มีค่าต่ำกว่าที่เกิดในสตาร์ช ทั้งนี้ อาจเนื่องจากฟลาวรรีมันเทศและมันฝรั่งยังมีองค์ประกอบอื่นๆ เจือปนอยู่มาก จึงอาจไปขัดขวางการเกิดเจลของฟลาวร์ได้ การเกิดรีโทรเกรเดชัน ตลอดจนค่าความแข็งของเจลฟลาวร์จึงต่ำกว่าเจลสตาร์ช (ตารางที่ 4.13) (Jomduang and Mohaned, 1994)

4.3.4 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากฟลาวร์

4.3.4.1 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวร์

เมื่อนำฟลาวรรีมันเทศต่างสายพันธุ์และฟลาวรรีมันฝรั่งมาสกัดสารฟีนอลิกด้วยสารละลายอะซิติกพวยเมธานอล สำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจะได้ค่าแสดงในตารางที่ 4.18 ซึ่งพบว่าค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวรรีมันเทศทุกสายพันธุ์มีค่าสูงกว่าสารสกัดจากฟลาวรรีมันฝรั่ง อีกทั้ง สารสกัดจากฟลาวรรีมันเทศแต่ละสายพันธุ์นั้นยังแสดงค่าฟีนอลิกทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะมันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ สีม่วง) ซึ่งมีค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดของลงมาคือ พันธุ์ T101 (เนื้อ สีส้ม) พจ.265-1

(เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) และ O106-1 (เนื้อ อสีขาว) ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Rumbaoa et al. (2005) ที่พบว่าสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศต่างสายพันธุ์จากฟิลิปปินส์มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 192.7-1,159.0 mg gallic acid/100 g ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ที่มีเนื้อ อสีม่วง แสดงค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด ตามด้วยเนื้อ อสีเหลือง และสีขาว ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าชนิดของ รงควัตถุที่ทำให้เกิดสีในเนื้อ อมันเทศที่ต่างกัน อาจส่งผลต่อค่าฟีนอลิกทั้งหมดแตกต่างกันด้วย โดย Teow (2007) พบว่ามันเทศสายพันธุ์ที่มีเนื้อ อสีม่วงนั้นมีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบสูง (0.030 - 0.531 mg/g) ส่วนมันเทศสายพันธุ์ที่มีเนื้อ อสีส้มและสีเหลือง มีแคโรทีนอยด์เป็น องค์ประกอบ (1.50 - 226.00 µg/g) โดยรงควัตถุทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มี โครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน โดยแอนโทไซยานินประกอบด้วยวงเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็น โครงสร้าง ซึ่งมีจำนวนมากกว่าโครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์ (โสภา วัชรคุปต์, 2549) ดังนั้น มันเทศพันธุ์ที่มีเนื้อ อสีม่วง จึงมีค่าฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าพันธุ์ที่มีสีส้ม สีเหลือง และสีขาว ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์ มันฝรั่ง*

แหล่งฟลาวอร์	สายพันธุ์	ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg gallic acid/g flour)
มันเทศ	O106-1 (เนื้อ อสีขาว)	92.83 ^d ± 2.84**
	พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม)	117.50 ^c ± 2.29
	T101 (เนื้อ อสีส้ม)	197.33 ^b ± 2.56
	พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม)	224.67 ^a ± 11.09
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ อสีครีม)	84.33 ^d ± 4.31

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

นอกจากส่วนหัวของมันเทศแล้วยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากส่วนต่างๆ ของต้นมันเทศด้วย เช่น ดอก ใบ และยอดอ่อน (Jung et al., 2011) เป็นต้น โดย Liao et al. (2011) พบว่าใบของต้นมันเทศพื้นเมืองจากไต้หวัน มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 28.1 – 130.0 mg gallic acid/ g อย่างไรก็ตามกระบวนการสกัด และชนิดของตัว

ทำละลายที่แตกต่างกัน อาจส่งผลต่อค่าพินอิกทั้งหมดของตัวอย่างชนิดเดียวกัน มีค่าแตกต่างกันได้

4.3.4.2 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากพลาวร์

การวัดความสามารถในการขจัด DPPH ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีความคงตัวของสารสกัดจากพลาวร์มันเทศและมันฝรั่งโดยเปรียบเทียบกับสารต้านอนุมูลมาตรฐานประสิทธิภาพสูงคือ BHA แสดงผลด้วยค่า EC_{50} และกำลังการรีดิวซ์ (ตารางที่ 4.19) โดยค่า EC_{50} (half maximal effective concentration) คือ ความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชันที่ทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 50 ดังนั้น หากค่า EC_{50} ที่วัดได้มีค่าน้อย จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสูง ในทางกลับกัน หากวัดได้ค่า EC_{50} มาก ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระก็จะน้อยลงไปด้วย เมื่อพิจารณาจากค่า EC_{50} จะพบว่าสารสกัดจากตัวอย่างทั้งหมด มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระต่ำกว่า BHA และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า EC_{50} ของสารสกัดตัวอย่างทั้งหมด พบว่าสารสกัดจากพลาวร์มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูง คือ พลาวร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วง) และ T101 (เนื้อสีส้ม) รองลงมา คือ สายพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) พันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว) และพลาวร์มันฝรั่งพันธุ์ Atlantic ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้มีแนวโน้มเดียวกันกับความแตกต่างระหว่างความสามารถในการรีดิวซ์ของสารสกัดตัวอย่าง ด้วยวิธี FRAP โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของค่า TE (Trolox equivalents) ซึ่งค่า TE ของตัวอย่างใดมีค่าสูง แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงด้วย จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดจาก พลาวร์มันเทศสายพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม) มีค่ากำลังการรีดิวซ์สูงที่สุด รองลงมาคือ สายพันธุ์ T101 (เนื้อสีส้ม) พจ.265-1 (เนื้อสีเหลืองเข้ม) 0106-1 (เนื้อสีขาว) และมันฝรั่ง ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC_{50} และค่ากำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากพลาวร์ตัวอย่าง พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแบบแปรผกผัน โดยมีค่า $R^2 = 0.696$ (รูปที่ 4.5) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang et al. (2010) ที่พบความสัมพันธ์เช่นเดียวกันนี้ ระหว่างฤทธิ์ในการต้านอนุมูล DPPH และค่ากำลังการรีดิวซ์ โดยสารสกัดของพลาวร์มันเทศพันธุ์พื้นเมืองจากประเทศจีนที่มีค่า EC_{50} น้อย จะแสดงค่ากำลังการรีดิวซ์ที่สูง และจากงานวิจัยของ Rumbaoa et al. (2005) พบว่าสารสกัดจากพลาวร์มันเทศพันธุ์ที่มีเนื้อสีม่วง ได้แก่ Dakol Haponita และ Violet เป็นกลุ่มที่มีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (EC_{50} 2.1 – 6.1 mg/ml) ตามด้วยสายพันธุ์ที่มีเนื้อสีเหลือง (EC_{50} 10.3 mg/ml) และเนื้อสีขาว (EC_{50} 24.7 mg/ml) โดยงานวิจัยของ Teow et al. (2007) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอนโทไซ

ยานินที่พบในมันเทศเนื้อ อสีม่วงต่างสายพันธุ์บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระพบว่ามันเทศเนื้อ อสีม่วงที่มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงมักจะมีค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงด้วย ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอนโทไซยานิน ซึ่งแอนโทไซยานินชนิดที่พบมากในมันเทศ ได้แก่ peonidin และ cyanidin ตามลำดับ (Oki et al., 2002)

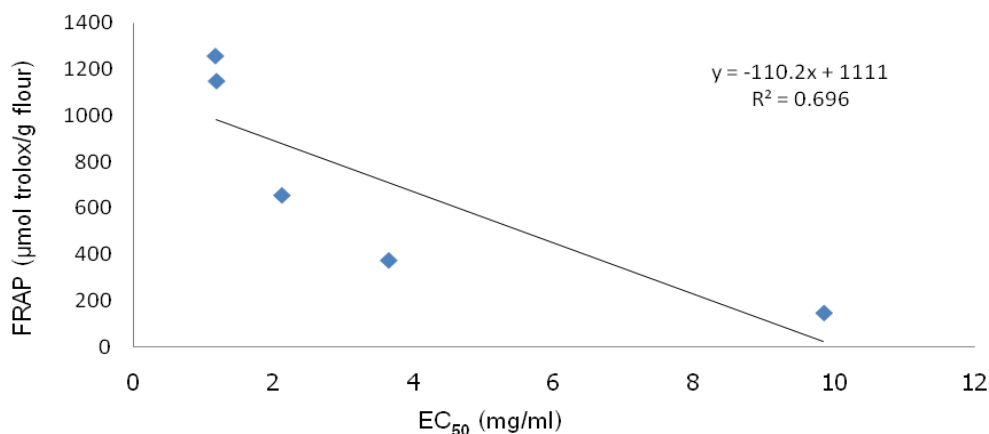
ตารางที่ 4.19 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง

แหล่งฟลาวอร์	สายพันธุ์	EC ₅₀ (mg/ml)	กำลังการรีดิวซ์ ($\mu\text{mol trolox/g flour}$)
BHA	-	0.003 ^e \pm 0.001**	-
มันเทศ	0106-1 (เนื้อ สีขาว)	3.638 ^b \pm 0.102	373.0 ^d \pm 3.9
	พจ.265-1 (เนื้อ สีเหลืองเข้ม)	2.115 ^c \pm 0.024	654.0 ^c \pm 4.0
	T101 (เนื้อ สีส้ม)	1.183 ^d \pm 0.049	1,147.7 ^b \pm 39.9
	พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม)	1.167 ^d \pm 0.040	1,255.8 ^a \pm 62.5
มันฝรั่ง	Atlantic (เนื้อ สีครีม)	9.843 ^a \pm 0.371	145.8 ^e \pm 4.6

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

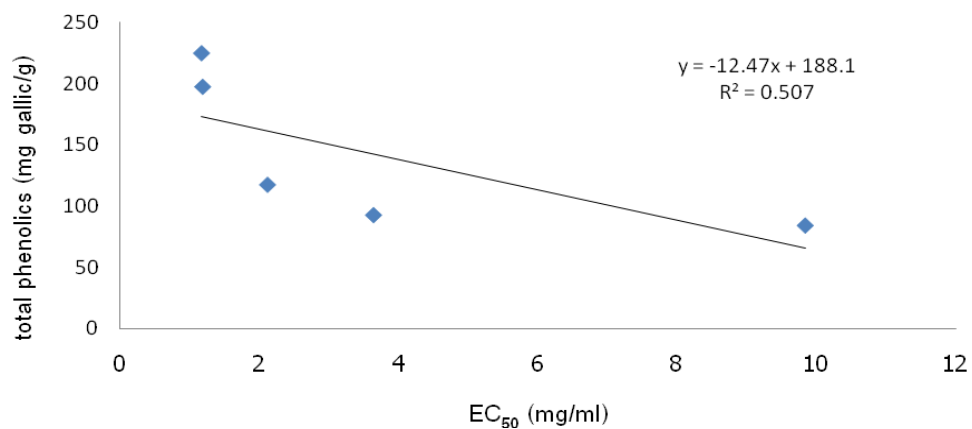
** ตัวอักษรหลังค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแนวนั้น หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

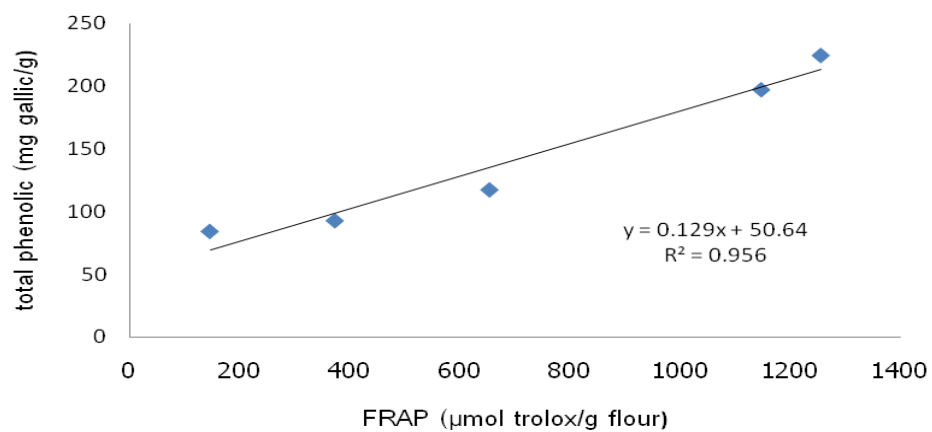


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันของค่า EC₅₀ และความสามารถในการรีดิวซ์ของสารสกัดฟลาวัวร์ ด้วยวิธี FRAP

นอกจากนี้ จะพบว่าค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดฟลาวัวร์มันเทศและมันฝรั่ง จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันกับค่า EC₅₀ โดยมีค่า $R^2 = 0.507$ (รูปที่ 4.6) และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับกำลังการรีดิวซ์ โดยมีค่า $R^2 = 0.956$ (รูปที่ 4.7) สารสกัดตัวอย่างที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูง จะแสดงค่า EC₅₀ ต่ำ และมีค่ากำลังการรีดิวซ์ที่สูงอาจเป็นไปได้ว่าชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระส่วนใหญ่ในตัวอย่างฟลาวัวร์มันเทศ และฟลาวัวร์มันฝรั่ง เป็นสารกลุ่มฟีนอลิกซึ่งจัดเป็นสารกลุ่มที่มีวงเบนซีน และหมู่ไฮดรอกซิลเป็นโครงสร้าง จึงสามารถถ่ายโอนไฮโดรเจนให้กับสารอนุมูลอิสระได้ดี โดย Teow et al. (2007) พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี DPPH และ ORAC) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันกัน ($R^2 = 0.870$ และ $R^2 = 0.937$ ตามลำดับ)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผกผันของค่าEC₅₀ และค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดฟลาวอร์



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบแปรผันตรงของความสามารถในการรีดิวซ์ ด้วยวิธี FRAP และค่าฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดฟลาวอร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

หัวมันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ (0106-1 พจ.265-1 T101 และ พจ.65-3) มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา คือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช พบว่าเม็ดสตาร์ชของมันเทศมีรูปร่างและขนาดหลากหลาย โดยเม็ดสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) ส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชของมันเทศสายพันธุ์อื่น แต่ยังมีขนาดเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งมีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายรูปไข่ ส่วนรูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ พบว่าเม็ดสตาร์ชมันเทศมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C ในขณะที่เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B โดยที่สตาร์ช มันฝรั่งมีปริมาณผลึกสูงกว่าสตาร์ชจากมันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี พบว่าสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์และสตาร์ชมันฝรั่งมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้สตาร์ชทั้งสองแหล่งมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน โดยพบว่าสตาร์ชมันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ มีอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_o , T_p และ T_c) สูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเฉพาะพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่สุด ในขณะที่สตาร์ชมันเทศใช้พลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH_{gel}) ต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง และยังพบว่าสตาร์ช มันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ มีอุณหภูมิของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น ใหม่จากกระบวนการรีโทรเกรดชัน ($T_{o, retro}$, $T_{p, retro}$ และ $T_{c, retro}$) ต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ในขณะที่ใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น ใหม่จากกระบวนการรีโทรเกรดชัน (ΔH_{retro}) สูงกว่า โดยสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าดังกล่าวสูงกว่าสตาร์ชมันเทศอีก 3 สายพันธุ์ จึงมีปริมาณการเกิดรีโทรเกรดชันสูงที่สุด นอกจากนี้ ยังพบว่าสตาร์ชมันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ มีกำลังการพองตัวและการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง เช่นเดียวกับอุณหภูมิเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ของสตาร์ชมันเทศที่ ๔ สายพันธุ์ ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง โดยสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงที่สุด ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ส่วนร้อยละของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ของสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่าสูงสุด ในขณะที่สตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าร้อยละการคืนตัวที่สูงกว่าสตาร์ชมันเทศพันธุ์อื่นและ

สตาร์ชมันฝรั่ง นอกจากนั้น เจลของสตาร์ชพันธุ์นี้ ยังมีค่าความแข็งของเจลสูงที่สุด ในขณะที่เจลสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าความเกาะติดสูงกว่าเจลสตาร์ชมันเทศทุกสายพันธุ์

ฟลาวร์มันเทศต่างสายพันธุ์และฟลาวร์มันฝรั่งมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าสี พบว่าฟลาวร์ที่ ๒ แหล่งมีค่า a และ b ที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของรงควัตถุ ในขณะที่ค่า L ของฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าไม่แตกต่างจากฟลาวร์มันฝรั่ง โดยสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันของฟลาวร์มันเทศและฟลาวร์มันฝรั่ง ส่งผลให้ฟลาวร์ทั้งสองชนิดมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันซึ่งพบว่านอกจากสมบัติของสตาร์ชแล้ว องค์ประกอบอื่น เช่น โปรตีน ไขมัน และเส้นใยหยาบ ยังมีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ ซึ่งทำให้ฟลาวร์มีสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการแตกต่างจากสตาร์ชของแหล่งเดียวกัน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ของฟลาวร์มันเทศต่างสายพันธุ์ พบว่าสูงกว่าฟลาวร์มันฝรั่งโดยฟลาวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงที่สุด ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และร้อยละค่าการคืนตัว (Setback) ของฟลาวร์มันเทศต่างสายพันธุ์มีค่าต่ำกว่าฟลาวร์มันฝรั่ง ในขณะที่ร้อยละของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ของฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีค่าสูงกว่าฟลาวร์ชนิดอื่น และยังพบว่าค่าความแข็งของเจลฟลาวร์มันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว) มีค่าสูงที่สุด ในขณะที่เจลฟลาวร์มันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีค่าความเกาะติดสูงกว่าเจลฟลาวร์มันเทศพันธุ์อื่นและมันฝรั่ง เมื่อพิจารณาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากฟลาวร์ พบว่าฟลาวร์มันเทศที่ ๔ สายพันธุ์มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าฟลาวร์มันฝรั่ง โดยเฉพาะฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) ซึ่งมีค่าทั้งสองสูงกว่าฟลาวร์มันเทศพันธุ์อื่น

งานวิจัยนี้ ทำให้ทราบถึงข้อมูลพื้นฐานทางเคมีกายภาพของสตาร์ชและฟลาวร์มันเทศทั้งสี่สายพันธุ์ที่ปลูกมากในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหาร ในการนำมันเทศไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของสตาร์ชจากมันเทศ พบว่าสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม) มีร้อยละของค่าความหนืดลดลงและค่าการคืนตัวต่ำ ซึ่งแสดงว่ามีความทนต่อแรงกวนและความร้อนสูง แต่เกิดการคืนตัวได้ยาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ประกอบอาหารประเภท ซุปข้น หรือซอส ส่วนสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ.265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม) มีร้อยละของค่าการคืนตัวสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชสามารถขึ้นรูปเป็นเจลได้ดี จึงน่าจะเหมาะที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการขึ้นรูปเป็นเจล เช่น บะหมี่ หรือขนมหวาน ดังนั้นจึงควรนำไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำไปใช้ต่อไป ซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำสตาร์ชจากมันเทศไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือผสมกับสตาร์ชจากแหล่งอื่น

จากการศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของฟลาวร์มันเทศ พบว่าฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) มีปริมาณโปรตีน และเส้นใยหยาบสูงกว่าฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์อื่นนอกจากนี้ ยังมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์นี้ จัดเป็นแหล่งรวมของสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์สูง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่างๆ หรือผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น และเนื่องจากฟลาวร์มันเทศพันธุ์ พจ.65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม) มีร้อยละของค่าการคืนตัวค่อนข้างสูง จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่อาศัยการขึ้นรูปของฟลาวร์ เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว หรือบะหมี่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำฟลาวร์ไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตอาจมีกระบวนการที่ต้องให้ความร้อนหรือมีการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เป็นเวลานาน ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะเนื้อ สัมผัส และประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่ลดลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิ ระยะเวลา และบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อ อกุล ปิยะจอมขวัญ เทคโนโลยีแบ่ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2550.
- กุลยา ลี มุ่งเรืองรัตน์ 2534. การใช้แบ่งมันเทศพันธุ์พื้นเมืองในผลิตภัณฑ์คุกกี้ วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- กล้า นาวรัตน์วัฒนา และพัชรี บุญศิริ. โปรออกซิแดนซ์ อีทโนเมทริกซ์ของแอนติออกซิแดนซ์. วารสารวิทยาศาสตร์ 1/10 (2542): 196-198.
- ชุติมา แต่งสกุลสุวรรณ และจิราพร ศิริติกุล 2534. การนำแบ่งมันเทศมาทดแทนบางส่วนแป้งสาลีบางส่วนในผลิตภัณฑ์ขนม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ณัฐภูมิ สุดแก้ว, สรวานนท์ ไยบำรุง, นันทนิตย์ อนุศาสนะนันท์, ศรีศักดิ์ พิกุลแก้ว และกำพล กาลหลง. 2553. มันพื้นบ้าน มันเทศเกษตรกรรมธรรมชาติ 3: 32 – 37.
- ณัฐินี ตั้งศรีอนุกุล 2551. ผลของวิธีการทำแห้งและภาวะการเก็บรักษาต่อปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวกล้องหอมมะลิแดง *Oryza sativa* L. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ดารินทร์ กุลมานิชวงศ์. 2549. การแยกโปรตีนและการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสตาร์ชมันเทศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
- ดโนยา ตั้งอุทัยสุขนานาสาระ หนังสือพิมพ์สุวรรณคีนิวส์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเจ้าพระยา AFTA คืออะไร? [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา : <http://office.cpu.ac.th/cpu2010/graduate/index.php/afta> [21 พฤศจิกายน 2553].
- ปรีชา บุญจุง. สารต้านอนุมูลอิสระในธรรมชาติ. ใน อนุมูลอิสระ, หน้า 123 - 144. กรุงเทพมหานคร: พี. เอส. พรินท์ 2549.

- ปัทมา เล้าประเสริฐ. 2552. ผลของการเก็บข้าวในถังแบบมีการเป่าอากาศต่อสมบัติทางเคมี
กายภาพและคุณภาพของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด [ออนไลน์]. 2555a.
แหล่งที่มา: [http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0395/lipid-oxidation-
ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด](http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0395/lipid-oxidation-ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด) [25 ธันวาคม 2555].
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. มันฝรั่ง [ออนไลน์]. 2555b. แหล่งที่มา:
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1158/potato-มันฝรั่ง> [18 ธันวาคม
2555].
- มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด สายสนม ประดิษฐ์ดวง และสายพิน มณีพันธ์. 2535. การเตรียมฟิล์มที่
รับประทานได้จากสตาร์ชมันเทศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์
การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- วาทีณี ปรีชาจารย์ และฤดีวรรณ เลหาทิตติกุล. 2530. การสกัดเอนไซม์ β -amylase จากมันเทศ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. ส่วนปฏิบัติการข้อมูลการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. 2548.
- สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. ส่วนปฏิบัติการข้อมูลการเกษตร. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. 2550.
- ไสว พงษ์แก้ว และโสภณ สินธุประมา. ประวัติความเป็นมาของมันเทศ [ออนไลน์]. 2550.
แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/search/> [21 พฤศจิกายน 2553].
- โสภา วัชรคุปต์ สารต้านอนุมูลอิสระ. ใน อนุมูลอิสระ, หน้า 1 – 10. กรุงเทพมหานคร: พี. เอส.
พีร์นธ์ 2549.

ภาษาอังกฤษ

- AACC. Approved Methods of the AACC. 10th ed. St. Paul, Minnesota, USA : The
American Association of Cereal Chemists, 2000.
- Ahmad, F. B., Williams, P. A., Doublier, J. –L., and Durand, S. 1999. Physico-chemical
characterization of sago starch. Carbohydrate Polymers 38 : 361-370.

- Ahmed, M., Akter, M. S., and Eun, J. -B. 2010. Peeling, drying temperatures, and sulphite-treatment affect physicochemical properties and nutritional quality of sweet potato flour. Food Chemistry 121 : 112-118.
- Alvani, K., Qi, X., Tester, R. F., and Snape, C. E. 2011. Physico-chemical properties of potato starches. Food Chemistry 125 : 958-965.
- Ames, B. M., Shigena, M. K., and Hagen, T. M. 1993. Oxidants, antioxidant and the degenerative diseases of aging. Proceedings of the National Academy of Sciences 90 : 7915-7922.
- AOAC. Official Methods of Analysis. 17th ed. Washington : Association of Official Analytical Chemists, 2005.
- AOAC. Official Methods of Analysis. Washington : Association of Official Analytical Chemists, 2006.
- 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.
- Banks, W., Greenwood, C. T., and Muir, D. D. 1971. Studies on starches of high amylose content. Part 14. The fractionation of amylo maize starch by aqueous leaching. Starch/Stärke 23 : 199-201.
- Bechtel, D. B., and Pomeranz, Y. 1978. Utrastucture of the native ungerminated rice (*Oryza sativa*) caryopsis. The starchy endosperm. American Journal of Botany 65 : 684-690.
- Bemiller, J. and Whistler, R. Starch: Chemistry and Technology. 3rd, Macmillan Publishing Solutions : USA, 2009.
- Benzie, I. F. F., and Strain, J. J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power" : The FRAP assay. Analytical Biochemistry 239 : 70-76.
- 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.

- Bhattacharya, S., Sudha, M. L., and Rahim, A. 1999. Pasting characteristics of an extruded blend of potato and wheat flours. Journal of food engineering 40 : 107-111.
- Biliaderis, C. G. Structures and phase transitions of starch polymers. In R. H. Walter (Ed.) Polysaccharide association structures in food, pp. 57-168. New York : Marcel Dekker. 1998.
- Blanshard, J. M. V. Starch granule structure and function: A physicochemical approach. In T. Gailliard (Eds.), Starch: Properties and potential, pp. 16. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- Bondet, V., Brand-williams, W., and Berset, C. 1997. Kinetics and mechanisms of antioxidant activity using the DPPH free radical method. Lebensmittel-Wissenschaftund-Technology 30 : 609-615.
- Bower, J. 1992. Food Theory and Application. New York: Macmillian Publishing Company.
- Boyer, C. D., Garwood, D. L., and Shannon, J. C. 1976. The interaction of the amylose-extender and waxy mutants of maize (*Zea Mays* L.) Fine structure of amylose-extender waxy starch. Starch-Stärke 28(12) : 405-410.
- Buleon, A., and Colonna, P. 2004. The Chemical Physical of Food. Chapter 2: 20-67.
- 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.
- Charoenkul, N., Uttapap, D., Pathipanawat, W., and Takeda, Y. 2011. Physicochemical characteristics of starches and flours from cassava varieties having different cooked root textures. LWT- Food Science and Technology 44 : 1774-1781.
- Collado, L. S., and Corke, H. 1999. Heat-moisture treatment effects on sweetpotato starches differing in amylase content. Food Chemistry 65 : 339-346.
- Donovan, J. W. 1979. Phase transitions 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.

- Dykes, L. and Rooney, L. W. 2007. Phenolic compounds in cereal grain and their health benefits. Cereal Foods World 52 : 105-111.
- Edgar181. Wikipedia. chemical structure of peonidin and cyaniding [Online]. 2008. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Peonidin.png> [2008, May 6]
- Fan, G., Han, Y., Gu, Z. and Gu, F. 2007. Composition and colour stability of anthocyanins extracted from fermented purple sweet potato culture. LWT-Food Science and Technology 41 : 1412-1416.
- Frankel, E. N. Lipid Oxidation. 2nd ed. Bridgewater : Oily Press. 2005.
- 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.
- Galliard, T., and Bowler, P. Morphology and composition of starch. In T. Galliard (Eds.). Starch: Properties and Potential. John Wiley and Sons., New York. 1987.
- Garcia-Viguera, C. and Zafrilla, P. 2001. Changes in anthocyanins during food processing: influence on color. In J. M. Ames and T. F. Hofmann (Eds.) Chemistry and Physiology of Selected Food Colorants. New York : American Chemical Society.
- Gernat, C., Radosta, S., Anger, H., and Damaschun, G. 1993. Crystalline parts of three different conformations detected in native and enzymatically degraded starches. Stärke 45 : 309-314.
- Gatsbys garden. It's time for the cabbages! [online]. 2011. Available from: http://gatsbysgardens.blogspot.com/2011_09_01_archive.html [2013, May 1]
- Halliwell, B., and Gutteridge, J. M.C. Free Radicals in Biology and Medicine. 4th ed. Oxford University Press. 2007.
- Hamaker, R. B. and Griffin, V. K. 1990. Changing the viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. Cereal Chemistry 67 : 261-264.
- Hamaker, B. R., Griffin, V. K., and Moldenhauer, K. A. K. 1991. Potential influence of a starch granule-associated protein on cooked rice stickiness. Journal of Food Science 356: 1327.

- Hamaker, B. R. The influent of rice protein on rice quality. In W. E. Marchell and J. I. Wadsworth (Eds.) Rice science and technology. New York: Marcel Dekker, 1994.
- Hanashiro, I., Aba, 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.
- Helm, R. M., and Burks, A. W. 1996. Hypoallergenicity of rice protein. Cereal Foods World 41(11): 839.
- Hibi, Y. 1998. Role of water-soluble and water-insoluble carbohydrates in the gelatinization and retrogradation of rice starch. Starch/Stärke 50 : 474-478.
- Hizukuri, S., Fujii, M., and Nikuni, Z. 1960. The effect of inorganic ions on the crystallization of amylopectin. Biochimica et Biophysica Acta 40 : 346-348.
- 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., and Hadziyev, D. 1981. Characterization of potato starch and its monoglyceride complexes. Stärke 33, 290-300.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. Carbohydrate Polymers 45 : 253-267.
- Hoseney, R. C. Principles of cereal science and technology. 2nd ed, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists. 1998.
- Huang, C. -C., Lai, P., Chen, I. -H., Liu, Y. -F., and Wang, C. -C. 2010. Effects of mucilage on the thermal and pasting properties of yam, taro, and sweet potato starches. LWT-Food Science and Technology 43 : 849-855.
- Huang, Y. -C., Chang, Y. -H., and Shao, Y. -Y. 2006. Effects of genotype and treatment on the antioxidant activity of sweet potato in Taiwan. Food Chemistry 98 : 529-538.

- 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.
- Jang, J. Chen, J. –F., Zhao, Y. –Y., and MAO, L. –C. 2010. Effects of drying processes on the antioxidant properties in sweet potatoes. Agricultural Sciences in China 9(10) : 1522-1529.
- 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.
- Jomduang, S. and Mohamed, S. 1994. Effect of amylose/amylopectin content, milling methods, particle size, sugar, salt and oil on the puffed product characteristics of a traditional thai rice-based snack food (Khao kriap waue). Journal of Science Food Agriculture 63 : 53.
- 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/Stärke 33 : 157-162.
- Jung, J. –K., Lee, S. –U., Kozukue, N., Levin, C. E., and Friedman, M. 2011. Distribution of phenolic compounds and antioxidant activities in parts of sweet potato

- (*Ipomoea batatas* L.) plants and in home processed roots. Journal of Food Composition and Analysis 24 : 29-37.
- 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.
- Leach, H. W., McCowen, L. D., and Schoch, T. J. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. Cereal Chemists 36 : 534-544.
- Li, J. –Y., and Yeh, A. –I. 2001. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. Journal of Food engineering 50 : 141-148.
- Liao, W. C., Lai, Y. –C., Yuan, M. –C., Hsu, Y. –L., and Chan, C. –F. 2011. Antioxidative activity of water extract of sweet potato leaves in Taiwan. Food Chemistry 127 : 1224-1228.
- Limroongreungrat, K. and Huang, Y.W. 2007. Pasta products made from sweetpotato fortified with soy protein. LWT-Food Science and Technology 40 : 200-206.
- Lineback, D. R. 1984. The starch granule organization and properties. Baker's Digest 58: 16-21.
- Lineback, D. R. Structure starch-degrading enzymes. In R. C. Hoseney (Eds.). AACC short course on "Starch: Structure, Properties, and Food Uses." August 27-29, 1996. Bangkok, Thailand. 1996.
- Liu, Q., Weber, E., Currie, V., and Yada, R. 2003. Physicochemical properties of starches during potato growth. Carbohydrate Polymers 51 : 213-221.
- Lu, S., Chen, L., and Lii, C. 1997. Correlations between the fine structure, physicochemical properties, and retrogradation of amylopectins from Taiwan rice varieties. Cereal Chemistry 74 : 34-39.
- Maaruf, A. G., Man, Y. B. C., Asbi, B. A., Junainah, A. H., and Kennedy, J. F. 2001. Effect of water content on the gelatinization temperature of sago starch. Carbohydrate Polymers 46 : 331-337.

- 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.
- Matveev, Y. I., Van-Soest, J. J. G., Nieman, C., Wasserman, L. A., Protserov, V. A., Ezernitskaja, M., and Yuryev, V.P. 2001. The relationship between thermodynamic and structural properties of low and high amylose maize starches. Carbohydrate Polymers 44(2) : 151-160.
- Mazzocchetti, L. Biocatalysis in Polymer Chemistry. Unraveling the lipid-amylose inclusion complex formation [Online]. 2012. Available from: <http://www.rug.nl/research/polymerr-chemistry/members/laura/> [2013, February 12]
- 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.
- Moorthy, S. N. 2002. Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches : A Review. Starch/Stärke 54 : 559-592.
- Morrison, W. R. 1981. Starch lipids: A reappraisal. Starch/stärke 33: 408.
- Morrison, W. R., Tester, R. F., Gidley, M. J., and Karlas, J. 1993. Resistance to acid hydrolysis of lipid-complexed amylose and lipid-free amylose in lintnerized waxy and non-waxy barley starches. Carbohydrate Research 245: 289.
- Mua, J. P., and Jackson, D. S. 1997. Relationships between functional attributes and molecular structures of amylose and amylopectin fraction of corn starch. Journal of Agricultural and Food Chemistry 45 : 3848-3854.
- 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.

- Noda, T., Takigawa, S., Matsuuru-Endo, C., Suzuki, T., Hashimoto, N., Kottearachchi, N. S., Yamauchi, H., and Zaidul, I. S. M. 2008. Factors affecting the digestibility of raw and gelatinized potato starches. Food Chemistry 110 : 465-470.
- Nwokocha, L., Aviara, N. A., Senan, C., and Williams, P. A. 2009. A comparative study of some properties of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) and cocoyam (*Colocasia esculenta*, Linn) starches. Carbohydrate Polymers 76 : 362-367.
- Oates, C. G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. Trends in Food Science and Technology 8 : 375-382.
- Oehlke, K., Heins, A., Stöckmann, H., Sönnichsen, F., and Schwarz, K. 2011. New insights into the antioxidant activity of Trolox in o/w emulsions. Food Chemistry 124 : 781-787.
- Ogawa, Y., Glenn, G. M., Orts, W. J. and Wood, D. F. 2003. Histological structures of cooked rice grain. Journal of Agriculture and Food Chemistry 51 : 7019-7023.
- Oki, T., Masuda, M., Furuta, S., Nishiba, Y., Terahara, N., and Suda, I. 2002. Involvement of anthocyanins and other phenolic compounds in radical scavenging activity of purple-fleshed sweet potato cultivars. Journal of Food Science 67 : 1752-1756.
- Ostertag, C. F. World production and marketing of starch. In D. Dufour, G. M. O'Brien, and R. Best (Eds.). Cassava Flour and Starch: Progress in Research and Development, pp. 105-120. France : Centro Internacional de Agricultura Tropical, Montpellier, 1996.
- Prior, R. L., Wu, X., and Schaich, K. 2005. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in food and dietary supplements. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53 : 4290-4301.
- Rao, A. V., and Rao, L. G. 2007. Carotenoids and human health. Pharmacological Research 55 : 207-216.
- Ratnayake, W. S., Hoover, R., Shahidi, F., Perera, C., and Jane, J. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of starches from four field pea (*Pisum sativum* L.) cultivars. Food Chemistry 74 : 189-202.

- Rice-Evans, C. A., Miller, N. J., and Paganga, G. 1997. Antioxidant properties of phenolic compounds. Trends in Plant Science 2 : 152-159.
- 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.
- Roland, M. Wikipedia. Hydroxycinnamic acids/Hydroxybenzoic acids [Online]. 1952. Available from: http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Hydroxycinnamic_acids.svg [2009, January 27]
- Royal Society of Chemistry. Carbohydrates [Online]. 2004. Available from: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/cfb/carbohydrates.htm> [2013, January 25]
- Rumbaoa, R. G. O., Cornago, D. F., and Geronimo, I. M. 2005. Phenolic content and antioxidant capacity of Philippine sweet potato. Food Chemistry 113 : 1133-1138.
- Samee, W. 2005. Carotenoids: Structures and Potential Mechanisms in Biological Functions. Srinakharinwirot Journal of Pharmaceutical Sciences 10(1) : 58-66.
- Sanders, J. P. M. Starch manufacturing in the world. In Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology. Jan. 22-26 & Feb. 19-23, 1996. AIT Center, Bangkok, 1996.
- 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.
- Senevigaten, H. D., and Biliaderis, C. G. 1991. Action of α -amyloses on amylose-lipid complex superstructure. Journal of Cereal Science 13: 129.
- Shi, Y. C., and Seib, P. A. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. Carbohydrate Research 227 : 131-145.
- Shih, M. -C., Kuo, C. -C., and Chiang, W. 2009. Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. Food Chemistry 117 : 114-121.

- 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.
- Singh, J., McCarthy, O. J., and Singh, H. 2006. Physico-chemical and morphological characteristics of New Zealand *Taewa* (Maori potato) starches. Carbohydrate Polymers 64 : 569-581.
- Singh, H., Lin, J. -H., Huang, W. -H., and Chang, Y. -H. 2012. Influence of amylopectin structure on rheological and retrogradation properties of waxy rice starches. Journal of Cereal Science xx : 1-7.
- 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 Polymers 8 : 183-208.
- Smith, R. J. 1979. Food Carbohydrate. Wesport, Connecticut: The AVI Publishing Co.
- Stevens, D. J. and Elton, G. A. H. 1971. Thermal properties of the starch water system. Past I. Measurement of heat of gelatinization by differential scanning calorimetry. Starch/Stärke 23 : 8-11.
- Subba, R. M. V. S. S. T., and Muralikrishna, G. 2002. Evaluation of the antioxidant properties of free and bound phenolic acids from native and malted finger millet (*ragi*, *Eleusine coracana* Indaf-15). Journal of Agricultural and Food Chemistry 50 : 889-892.
- Swinkels, J. J. M. 1985. Sources of starch, its Chemistry and Physics. In G. M. A. van Bynum and J. A. Roels (Eds.). Starch Conversion Technology, pp. 15-45. New York : Marcel Dekker, 1985.
- Takeda, C., Takeda, Y., and Hizukuri, S. 1983. Physicochemical properties of lily starch. Cereal Chemistry 60 : 212-216.
- Takeda, Y., Hizukuri, S., and Juliano, B. O. 1986. Purification and structure of amylose from rice starch. Carbohydrate Research 148 : 299-308.
- Teitelbaum, R. C., Ruby, S. L., and Marks, T. J. 1978. Amylose-iodine complex formation. Journal of American Chemical Society 100 : 3215-3218.

- Teow, C. C., Truong, V. -D., McFeeters, R. F., Thompson, R. L., Pecota, K. V., and Yencho, G. C. 2007. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. Food Chemistry 103 : 829-838.
- Tester, R. F., and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effect of amylopectin, amylose and lipid. Cereal Chemistry 67 : 551-559.
- Tester, R. F. 1997. Influence of growth conditions of barley starch properties. International Journal of Biological Macromolecules 21 : 37-45.
- Treadway, R. H., Willits, C. O., Heisler, E. G., Ross, L. R., and Osborne, M. F. 1950. Composition of flour from the 1948 potato crop. US Department of Agriculture. AIC-277.
- Varavinit, S., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P., and Naivikul, O. 2003. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai Rice. Starch/Stärke 55 : 410-415.
- Wannerberger, L. and Eliasson, A. C. 1993. Differential Scanning Calorimetry studies on rye flour-milling streams. Cereal Chemistry 70 : 196-198
- Waterhouse, A. L. Determination of total phenolics. In R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, D. Smith and P. Sporns (Eds.). Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigment, Colorants, Flavors, Texture and Bioactive Food Components, pp. 463-470. New Jersey : John Wiley & Sons Inc. 2005.
- Wischmann, B., Blennow, A., Madsen, F., Jørgensen, K., Poulsen, P., and Bandsholm, O. 2005. Functional characterization of potato starch modified by specific in planta alteration of the amylopectin branching and phosphate substitution. Food Hydrocolloids 19 : 1016-1024.
- Wong, D. W. S. Carbohydrate. In D. W. S. Wong (Eds.), Mechanism and Theory in Food Chemistry, pp. 105-146. AVI Book: NY, 1989.

- Yadav, A. R., Guha, M., Tharanathan, R. N., and Ramteke, R. S. 2006. Changes in characteristics of sweet potato flour prepared by different drying techniques. LWT-Food Science and Technology 39 : 20-26.
- Yadav, A. R., Mahadevamma, S., Tharanathan, R. N., and Ramteke, R. S. 2007. Characteristics of acetylated and enzyme-modified potato and sweet potato flours. Food Chemistry 103 : 1119-1126.
- Yang, J., Chen, J. -F., Zhao, Y. -Y, and Mao, L. C. 2010. Effect of drying processes on the antioxidant properties in sweet potato. Agricultural Sciences in China 9(10) : 1522-1529.
- Yoo, S. -H., and Jane, J. -I. 2002. Structural and physical characteristics of waxy and other wheat starches. Carbohydrate Polymers 49 : 297-305.
- Zaidul, I. S. M., Nik Norulaini, N. A., Mohd. Omar, A. K. M., Yamauchi, H., and Noda, T. 2007. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches. Carbohydrate Polymers 69 : 784-791.
- Zhang, T., and Oates, C. G. 1999. Relationship between α -amylase degradation and physic-chemical properties of sweet potato starches. Food Chemistry 65 : 157-163.
- Zhao, J., Schols, H. A., Chen, Z., Jin, Z., Buwalda, P., and Gruppen, H. 2012. Substituent distribution within cross-linked and hydroxypropylated sweet potato starch and potato starch. Food Chemistry 133 : 1333-1340.
- Zhu, F., Corke, H., and Bertoft, E. 2011. Amylopectin internal molecular structure in relation to physical properties of sweetpotato starch. Carbohydrate Polymers 84 : 907-918.
- 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 : Acedemic Press, 1964.
- Zobel, H. F. Chapter 9: Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller, and E. F. Paschall (Eds.), Starch:

Chemistry and Technology, pp. 285-305. 2nd ed. New York: Academic Press, 1984.

Zobel, H. F. 1988. Molecules to granules – a comprehensive starch review. Stärke 40 : 44-50.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีAOAC (2005) section 32.1.03

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน(Heraeus รุ่น ST5042, Germany)
2. ถ้วยอะลูมิเนียม
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Scaltee Instrument รุ่น SBC31, Germany)
4. โถดูดความชื้น(desiccator)

วิธีการทดลอง

1. นำถ้วยอะลูมิเนียมและฝาไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
2. นำไปใส่โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมซึ่งอบแห้ง และทราบน้ำหนักที่แน่นอน
4. นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาไว้เป็นเวลา 5 - 6 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่(น้ำหนักคงที่ คือน้ำหนักบวกลบไม่เกิน 0.02 กรัม)
5. ปิดฝาด้วยอะลูมิเนียม แล้วนำออกจากตู้อบ ที่ ึ่งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก
6. คำนวณหาคความชื้นจากสมการ(ก.1)

$$\text{ปริมาณความชื้น(wb\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \quad (\text{ก.1})$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีAOAC (2005) section 32.1.22

อุปกรณ์

1. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
2. Buchi scrubber (รุ่น B-414, Switzerland)
3. Buchi distillation unit (รุ่น B-324, Switzerland)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument รุ่น SI-234, Germany)

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (A.R. grade)
2. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 0.1N
3. สารละลายกรดบอริก (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 4 (w/v)
4. สารเร่งปฏิกิริยา (selenium reagent mixture) (A.R. grade)
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 45 (w/v)
6. สารละลายอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลายเมทิลเรด 1 กรัม ในเมทานอล 100

มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องย่อยโปรตีนเพื่ออุ่นเตาให้ร้อน ปรับระดับความร้อนไปที่เบอร์ 10 และเปิดเครื่องทำความสะอาดที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดไอน้ำ (scrubber) อย่างน้อย 10 นาที ก่อนการย่อยตัวอย่างทุกครั้ง
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้ น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 1 กรัม ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 41 ห่อกระดาษกรองแล้วใส่ลงในหลอดย่อย
3. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 กรัม และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยแต่ละหลอด
4. ทำ blank โดยการใช้น้ำ ากล้น 1 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์เช่นเดียวกัน
5. ต่อหลอดย่อยโปรตีนเข้ากับเครื่องย่อยโปรตีน เปิดเครื่องดูดไอน้ำ เปิดเตาให้ความร้อนที่เบอร์ 8 ย่อยจนได้สารละลายใสสีน้ำตาลแดง (ประมาณ 20 - 40 นาที) ควรตรวจสอบลักษณะสารในหลอดเป็นระยะๆ
6. ปิดเตาแล้วยกหลอดออกจากเตาย่อย พักไว้ให้หมดควัน แล้วจึงแยกชุดหลอดทดลองออกจากเครื่องย่อย ย้ายมาวางไว้ในตู้ดูดควัน ที่ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. เติมกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วจึงเติม methyl red-methylene blue indicator 2 – 3 หยด เพื่อรองรับสารที่กลั่นได้จากหลอดย่อย (distillation unit) โดยสารละลายที่เติม indicator แล้วจะมีสีม่วงแดง
8. การใช้เครื่องกลั่น (distillation unit)
 - 8.1 preheat เครื่องก่อนใช้โดยนำหลอดย่อยที่สะอาด เติมน้ำ ากล้นประมาณ $\frac{3}{4}$ ของหลอด ต่อเข้ากับเครื่องแล้วเลือก preheat mode
 - 8.2 ทำความสะอาดชุดกลั่นโดยนำหลอดย่อยที่สะอาด ต่อเข้ากับเครื่อง แล้วเลือก clean mode

8.3 เริ่มกลั่นตัวอย่างโดนนำหลอดย่อยที่ได้จากข้อ 6 ต่อเข้ากับเครื่อง และนำขวดรูปชมพู่ที่ได้จากข้อ 7 ต่อเข้าเครื่องด้านที่จะรองรับสารที่กลั่นได้ เลือก digest mode กำหนดภาวะกลั่น ดังนี้

น้ำ ากลั่น	50 มิลลิลิตร
สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 45	60 มิลลิลิตร
เวลา	5 นาที
Steam	100 %
Aspiration	SAM

9. ในระหว่างการกลั่นจะเกิดแอมโมเนียขึ้น และแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริก ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียว เมื่อกลั่นครบตามเวลาจะได้สารละลายทั้งหมดประมาณ 200 มิลลิลิตร

10. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ที่ได้จากการกลั่นไปไตเตรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 N จนถึงจุดยุติได้สารละลายสีม่วงแดง จดปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตไปคำนวณหาปริมาณโปรตีน ตามสมการ ก.2 และ ก.3

11. ทำ blank โดยวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง และไม่ต้องเติมน้ำ ากลั่น

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (\%)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4}{\text{น้ำ หนักตัวอย่างแห้งม้วน}} \quad (\text{ก.2})$$

$$\text{ร้อยละปริมาณโปรตีน} = \text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} \times 5.95 \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ V_a คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง

V_b คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรต blank

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.05

อุปกรณ์

- เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
- ครุชีเบิล (Crucible)
- เตาให้ความร้อน (Hot plate)

4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Scaltee Instrument รุ่น SBC31, Germany)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 5 กรัม ใส่ในครุฑเปิดที่เผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
2. นำตัวอย่างไปเผาโดยใช้ hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งตัวอย่างหมดคั่น
3. นำตัวอย่างไปเผาต่อในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือน้ำหนักคงที่
4. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักเถ้าที่ได้และคำนวณหาปริมาณเถ้าตามสมการ ก.4

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \quad (\text{ก.4})$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ดัดแปลงจากวิธี AOAC (2005) section 32.1.13

อุปกรณ์

1. Soxhlet (Gerhardt รุ่น HC61, Germany)
2. เครื่อง evaporator (Buchi รุ่น RII, Switzerland)
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Scaltee Instrument รุ่น SBC31, Germany)
4. โถดูดความชื้น (desiccator)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน 2 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ลงใน thimble
2. นำ thimble ที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ในหลอดแก้วซึ่งต่อเชื่อมกับขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักแน่นอน
3. เติม Absolute ethanol ซึ่งใช้เป็นตัวสกัด 250 มิลลิลิตร ลงในขวดสกัด
4. สกัดไขมันเป็นเวลา 4 – 6 ชั่วโมง โดยปรับความร้อนให้หยดของตัวทำละลายกลั่นจากดอนเดนเซอร์ในอัตรา 300 – 360 หยดต่อนาที
5. ระเหยส่วนของ Absolute ethanol ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้ แล้วอบขวดสกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หรือน้ำหนักคงที่

6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนักขวดสกัดที่มีไขมันอยู่ภายในและคำนวณหาปริมาณไขมันตามสมการ ก.5

$$\text{ไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \times 100 \quad (\text{ก.5})$$

ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธี AOAC (2005) section 32.1.15

อุปกรณ์

1. ครูชีเบล
2. ตู้อบลมร้อน(Memmert รุ่น 600, Germany)
3. เตาเผา (Muffle furnace, Fisher Scientific รุ่น Isotemp, USA)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Scaltec Instrument รุ่น SBC31, Germany)
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 (v/v)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 (w/v)
3. เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95

วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วไปชั่งน้ำหนัก และใส่ตัวอย่างในปิកเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในปิกเกอร์ ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำ ร้อน
3. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Buchner funnel ที่รองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิลิตรปรอท ล้างตะกอนด้วยน้ำ ร้อนจนหมดฤทธิ์ กรด ตรวจสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส
4. นำกากมาละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ต้มเดือดนาน 30 นาที โดยปรับปริมาตรให้คงที่ด้วยน้ำ ร้อน
5. กรองตัวอย่างที่ถูกละลายด้วย Buchner funnel ที่รองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 มิลลิลิตรปรอท ล้างตะกอนด้วยน้ำ ร้อนจนหมดฤทธิ์ ดัง

6. ล้างตะกอนที่ได้ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร 2 ครั้ง
7. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำ านหนักคงที่
8. ที่ ึ่งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำ านหนักจะได้น้ำ านหนักตัวอย่างก่อนเผา
9. นำตัวอย่างใส่ในครุชีเบ็ดที่ผ่านการเผา และทราบน้ำ านหนักที่แน่นอน
10. เผาตัวอย่างบน hot plate จนหมดควัน ก่อนนำเข้าเตาเผาที่ 550 องศาเซลเซียส จนได้
ถ้ำสีขาว
11. ที่ ึ่งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา ั่วโมง และชั่งน้ำ านหนัก จะได้น้ำ านหนักตัวอย่าง
หลังเผา นำมาคำนวณหาปริมาณเส้นใยหยาบ ตามสมการ ก.6

$$\text{ปริมาณเส้นใยหยาบ (\%)} = \frac{[\text{น้ำ านหนักตัวอย่างก่อนเผา(กรัม)} - \text{น้ำ านหนักตัวอย่างหลังเผา(กรัม)}] \times 100}{\text{น้ำ านหนักตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการหาไขมัน(กรัม)}} \quad (\text{ก.6})$$

ก.6 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีคำนวณ (สมการ ก.7)

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\%db)} = 100 - \% (\text{โปรตีน} + \text{ถ้ำ} + \text{เส้นใยหยาบ} + \text{ไขมัน}) \quad (\text{ก.7})$$

ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส ตามวิธี AOAC (2006) section 50.1.15 (ตามวิธี วิเคราะห์จากศูนย์วิจัยและทดสอบอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์

1. เครื่อง spectrophotometer

สารเคมี

1. ผสม HNO_3 เข้มข้น กับ HClO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 70 ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร
ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปเก็บไว้ในขวดสีขาว
2. สารละลายโมลิบโดวานาเตท (Molybdovanadate solution) หรือ Barton's reagent
 - 2.1 ละลาย $\text{NH}_4 \text{Molybdate} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 40 กรัม ในน้ำ ากล้นขึ้น 400 มิลลิลิตร แล้วตั้งที่ ึ่ง
ไว้ให้เย็น โดยใช้แท่งแก้วคนเป็นระยะๆ จนกว่าสารจะละลายหมด
 - 2.2 ละลาย NH_4VO_3 2 กรัมในน้ำ ากล้นร้อน 250 มิลลิลิตร ตั้งที่ ึ่งไว้ให้เย็น แล้วเติม
 HClO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 450 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันและที่ ึ่งไว้ให้เย็น

2.3 ผสมสารละลายในข้อ 2.1 ลงในสารละลายในข้อ 2.2 ใช้แท่งแก้วคน และปรับปริมาตรด้วยน้ำ ากล้นจนครบ 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดสีชา ซึ่งจะได้สารละลายสีค่อนข้างเหลืองอ่อน (ต้องเติมตามขั้น ตอน หากผิดขั้น ตอนสารละลายจะเกิดการตกตะกอนไม่สามารถนำไปใช้งานได้)

3. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

3.1 ละลาย KH_2PO_4 ซึ่งอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.4394 กรัม ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2 เติมน้ำ ากล้นจนครบ สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3 ไปเปิดสารละลายจาก stock solution ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำ ากล้นจนครบ สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 ไปเปิดสารละลายจาก stock solution ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาครั้งละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Molybdovanadate ขวดละ 10 มิลลิลิตร และใส่ในขวดวัดปริมาตรที่ไม่ได้เติมสารละลายฟอสฟอรัสด้วยเพื่อทำเป็น blank เติมน้ำ ากล้นจนครบ 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีทดลอง

1. ชั่งสารตัวอย่างอบแห้ง 1 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

2. เติมกรดผสมลงไปประมาณ 20 มิลลิลิตร แล้วค่อยบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ค่อยจนสารละลายมีลักษณะใสเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่ประมาณ 5-10 มิลลิลิตร เอาลงจาก Hot plate ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2-4 ชั่วโมง ตามลักษณะของตัวอย่าง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3. นำสารละลายที่ย่อยสมบูรณ์แล้วใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ด้วยความระมัดระวัง โดยอาจใช้ขวดรูปชมพู่ ด้วยแท่งโปลิชแมนให้ฟอสเฟตที่ติดอยู่ข้างขวดออกให้หมด เมื่อแน่ใจว่าหมดแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ ากล้น

4. ปิเปิดสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 3 มา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร (ปริมาตรที่ปิเปิดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในตัวอย่าง ถ้ามีมากอาจปิเปิดมาน้อยกว่า 5 มิลลิลิตร แต่ถ้าน้อย ให้ปิเปิดมากกว่า 5 มิลลิลิตร) แล้วเติม

สารละลาย molybdovanadate 5 มิลลิลิตร (1/10 ของปริมาตรสุดท้ายที่ทำให้เจือจาง) ปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

5. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เทียบกับสารละลายมาตรฐาน โดยให้แสงผ่าน Blank ร้อยละ 100 หรือ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วปรับเป็น 0 เมื่อแสงไม่ผ่าน โดยอ่านเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสง (Abs)

6. อ่านค่าของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวาดกราฟโดยให้แกนตั้งเป็นค่าดูดกลืนแสง (Abs) และแกนนอนเป็นค่าของความเข้มข้น (mg/L) แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างมาอ่านค่าของความเข้มข้นจากกราฟ

ก.8 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1971) และ Juliano (1981)

อุปกรณ์

1. เครื่อง spectrophotometer (Spectronic รุ่น Genesys 10UV, USA)
2. เครื่องชั่งละเอียดชนิดนิยม 4 ตำแหน่ง (Scaltee Instrument รุ่น SBC31, Germany)
3. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
4. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate stirrer รุ่น Gerattetechnik M 21/1)

สารเคมี

1. แอมิโลสบริสุทธิ์ จากมันฝรั่ง (Amylose type III จากบริษัท SIGMA-ALDRICH, Germany) โดยนำมาอบแห้งไล่ความชื้น นอออกก่อน
2. Waxy corn starch (Amylopectin จากบริษัท SIGMA-ALDRICH, Germany) โดยนำมาอบแห้งไล่ความชื้น นอออกก่อน
3. เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 (A.R. grade)
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 2 N
5. สารละลายกรดแอสติก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
6. สารละลายไอโอดีน เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (A.R. grade) 2.00 กรัม และไอโอดีน 0.20 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
7. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์ จากมันฝรั่ง และWaxy corn starch ตามอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ ก.1 ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนของแอมิโลสบริสุทธิ์ จากมันฝรั่ง และWaxy corn starch ที่ใช้ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน

ขวดที่	แอมิโลสบริสุทธิ์ จากมันฝรั่ง (db)		แอมิโลเพกทิน (Waxy corn starch, db)	
	ร้อยละ	ปริมาณ (mg)	ร้อยละ	ปริมาณ (mg)
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	45	45	55	55
Blank	0	0	0	0

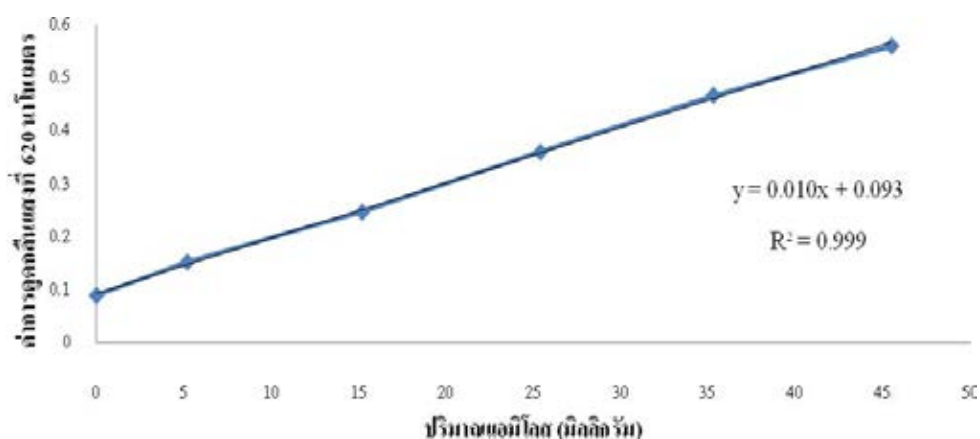
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ให้สตาร์ชกระจายตัว จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร

3. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร ลงในขวดปรับปริมาตร นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารเบาๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที

4. ชะสารละลายมาตรฐานแอมิโลสผสมแอมิโลเพกทินในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำ ากล้นชะให้ได้มากที่สุด จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำ ากล้น เขย่าให้เข้ากัน

5. เติมน้ำ ากล้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร สารละลายกรดแอสซิติค ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ไปใหม่

6. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแอมิโลสผสมแอมิโลเพคติก (จากข้อที่ 4) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
7. วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
8. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณแอมิโลสผสมแอมิโลสเพคติน ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลส

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างสตาร์ชซึ่งร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ปริมาณ 100 มิลลิกรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ให้สตาร์ชกระจายตัว จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 N ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
3. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร ลงในขวดปรับปริมาตร นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารเบาๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที
4. ชะสารละลายมาตรฐานแอมิโลสผสมแอมิโลเพคตินในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ใช้น้ำกลั่นชะให้ได้มากที่สุด จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

5. เติมน้ำ ากล้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร สารละลายกรดแอสติค ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ไปใหม่

6. ปิเปิดสารละลายสตาร์ช (จากข้อที่ 4) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ ากล้น เขย่าให้เข้ากัน ค้ทิ้งไว้ 10 นาที

7. วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร สามารถคำนวณหาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชตัวอย่างได้ โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

ก.9 วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ช โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High performance size exclusion chromatography (HPSEC) ดัดแปลงวิธีจาก Kuakpetoon และ Wang (2007)

อุปกรณ์

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

สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
2. เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 (A.R. grade)
3. สารละลายกรดแอสติค (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 N
4. สารละลายไดเมทิลซัลโฟกไซด์ (DMSO) (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 90 (v/v)
5. สารละลายโซเดียมเฮไซด (A.R. grade) ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 (w/v)
6. Shodex Standard P-82 kit, Japan

วิธีการทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐาน (Shodex Standard P-82 kit, Japan)

1. ชั่งพุลลูแลน (pullulan) ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ (ดังตารางที่ ก.2) จำนวน 1 มิลลิกรัม และปิเปิดน้ำ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ที่ ึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

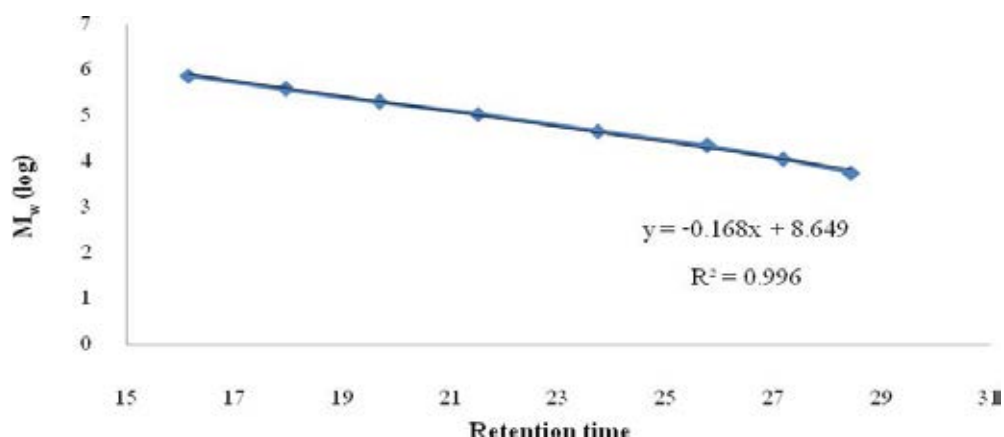
ตารางที่ ก.2 หน้ากระดาษโมเลกุลของพอลิแลนที่นำมาใช้สร้างกราฟมาตรฐาน

Grade	$\bar{M}_w \times 10^4$
P-800	78.80
P-400	40.40
P-200	21.20
P-100	11.20
P-50	4.73
P-20	2.28
P-10	1.18
P-5	0.59

2. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในหลอดทดลอง แล้ววางบนเครื่องกวนสาร โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่านmembrane (nylon filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วฉีดเข้าเครื่อง HPLC จากนั้น นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ดังรูปที่ ก.2

การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิเลสและแอมิโลเพกทิน

1. ชั่งแป้งประมาณ 0.03 กรัม และบีบอัดสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 2.7 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารขนาดเล็กลงไป
2. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสารโดยจะกวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสาร ให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 N โดยใช้กระดาษทดสอบกรด-เบส (pH paper) ในการวัดค่าความเป็นกรดเบสของสาร
4. ตกตะกอนด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 โดยเติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
5. บั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4000 x g เป็นเวลา 10 นาที
6. เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านล่างนำไปละลายด้วยสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาตร 6 มิลลิลิตร



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานที่ใช้การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

7. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสารโดยจะกวนสารที่อุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPSEC
8. นำตัวอย่างที่ได้มากรองผ่าน membrane (nylon filter) ขนาด 5 ไมโครเมตร
9. ตัวอย่างที่กรองได้ นำมาฉีดเข้าเครื่อง HPSEC โดยใช้คอลัมน์ TOSHO TSK G4000 PWXL analytical column ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 40 องศาเซลเซียส โดยปริมาณตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 40 ไมโครลิตร และใช้ deionized water ที่ผสมกับสารละลายโซเดียมเฮไลต์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 (w/v) โดยผ่านแผ่นกรองของ Millipore ขนาด 0.45 ไมครอน และ degassed แล้ว ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) และใช้อัตราการไหล (flow rate) 3 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจสอบสารที่แยกด้วย refractive index detector
10. นำโครมาโตแกรมที่ได้มาวิเคราะห์หาเวลาที่แอมิโลสและแอมิโลเพกทินหลุดออกจากคอลัมน์ แล้วนำเวลาที่ได้อ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน

ก.10 วิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทิน โดยแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช โดยวิธีดัดแปลงจาก Takeda (1968) จากนั้นนำมาย่อยตัดขั้วกิ่งด้วยเอนไซม์ isoamylase แล้ววิเคราะห์ขนาดของสายโซ่ โดยใช้เทคนิค ion exchange chromatography ด้วยเครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) ดัดแปลงวิธีจาก Kuakpetoon และ Wang (2007)

อุปกรณ์

1. เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) (Freeze dry/Shell Freeze System, Labconco, USA)
2. เครื่อง High Performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วย ดีเทคเตอร์แบบ pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD)
3. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Muti-RF, USA)
4. อ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ 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 M
2. แก๊สไนโตรเจน
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (A.R. grade) ความเข้มข้น 1 M
4. บิวทานอล (A.R. grade)
5. เอทิลแอลกอฮอล์ (A.R. grade)
6. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
7. เอนไซม์ isoamylase (Hayashibara, Japan)
8. บัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.1 M (พีเอช 3.5)
9. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) ความเข้มข้น 0.15 M
10. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) ความเข้มข้น 0.20 M
11. สารละลายโซเดียมอะซิเตท (HPLC grade) ความเข้มข้น 0.5 M ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (HPLC grade) ความเข้มข้น 0.15 M

วิธีการทดลอง

การแยกแอมิโลเพกทินออกจากตัวอย่างสตาร์ช

1. ชั่งสตาร์ชที่ปราศจากไขมัน 0.1 กรัม และเปิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง แล้วนำไปอัดแก๊สไนโตรเจน 30 วินาที จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร
2. นำหลอดทดลองไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยจะกวนสารที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3. ปรับค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 M จากนั้น หนีเปิดบิวทานอลปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรลงไป

4. นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยกวนสารที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5. ทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ โดยใส่ไว้ในกระตักน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. นำไปเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

7. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 12,100 x g ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที ตะกอนด้านล่างคือแอมิโลส แยกเก็บไว้ ส่วนสารละลายด้านบนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

8. หนีเปิดบิวทานอลปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีสารละลายด้านบนอยู่ จากนั้น ทำซ้ำ ตามขั้นตอนข้อที่ 7

9. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในสารละลายด้านบนที่ได้จากการปั่นเหวี่ยง โดยแยกตะกอนด้านล่างออกไปแล้ว

10. เขย่าให้เข้ากัน และวางทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

11. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,520 x g นาน 15 นาที จากนั้น แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านล่างคือแอมิโลเพกทิน นำไปล้างอีกครั้งด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,520 x g นาน 15 นาที แยกส่วนใสด้านบนทิ้ง ส่วนตะกอนด้านล่างนำไปละลายในน้ำ ปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

12. เตรียมสารละลายตัวอย่างให้แข็งในกล่องที่บรรจุ น้ำแข็งแห้งและเอทิลแอลกอฮอล์ สำหรับนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง

13. นำตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง จนกระทั่งตัวอย่างแห้ง มีลักษณะเป็นผง

14. เก็บผงตัวอย่างที่ได้ไว้ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดสนิท

การวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดความยาวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน

1. ชั่งตัวอย่างแอมิโลเพกทินของสตาร์ชที่แยกได้ 0.009 กรัม หนีเปิดน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 3.2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้น หนีใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงไป นำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เพื่อกวนสาร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2. เติมบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.1 M (พีเอช 3.5) ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร

3. เติมเอนไซม์ isoamylase (1770 unit) ปริมาตร 30 ไมโครลิตร แล้วบ่มสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พร้อมกับเขย่าตลอดเวลา ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

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

5. นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่แอมิโลเพกทิน (chain length distribution) ด้วยเครื่อง HPAEC-PAD โดยใช้คอลัมน์ Carbowac PA1 (250 x 4 mm) แปรผลในรูปของโครมาโตแกรม แล้วคำนวณในรูปร้อยละของการกระจายตัวของกิ่งแอมิโลเพกทิน ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 25 ไมโครลิตร สำหรับเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่ใช้ ประกอบด้วย Eluent A คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 M Eluent B คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.20 M Eluent C คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท 0.5 M ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 M และ Eluent D คือ น้ำปราศจากไอออน โดยควบคุมโปรแกรมให้เป็นแบบ gradient และมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที

ก.11 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากมันฝรั่ง โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) (ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL รุ่น JSM-5800 LV, Japan)
2. เครื่องฉาบทอง (ion sputter) (Balzers Union รุ่น SCD 040, Liechtenstein)

วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างสตาร์ชติดบน stub โดยใช้เทปกาวสองหน้า
2. ฉาบด้วยทองหนา 20 – 30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง ion sputter โดยใช้เทคนิค Hammer V Sputter Coater
3. บันทึกภาพโครงสร้างของตัวอย่างด้วย SEM ความดันที่ 20 kV ใช้กำลังขยาย 550 และ 1,000 เท่า
4. วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากภาพที่บันทึกได้

ก.12 ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (microscope)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายกลีเซอรินและน้ำ ในอัตราส่วน 1:1 แล้วหยดลงบนสไลด์ 1-2 หยด
2. นำตัวอย่างสตาโรมาละลายกับสารละลายข้อ 1 บนสไลด์ให้ได้ความหนาของเม็ดสตาโรมาพอดีกับการถ่ายภาพ
3. ปรับระยะโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำที่สุด ที่เห็นภาพชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 40 เท่า
4. ปรับเลนส์ไลต์ให้ได้องค์ประกอบของภาพที่ต้องการ และปรับความคมชัดของภาพโดยดูที่กล้องถ่ายภาพ
5. ตั้งระบบการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายภาพเป็นแบบอัตโนมัติ แลปรับเป็นแบบไม่ใช้ Flash
6. ทำการถ่ายภาพเม็ดสตาโรมาภายใต้แสงปกติ
7. นำฟิล์มโพลาไรซ์วางบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ และนำแผ่นฟิล์มอีก 1 แผ่น วางปิดบนสไลด์หรือกั้นระหว่างสไลด์กับอุปกรณ์ถ่ายภาพ
8. หมุนแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์ที่วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงให้ได้สีของพื้นภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาโรมา
9. ปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสตาโรมาภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มโพลาไรซ์

ก.13 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาโรมา ด้วยเครื่อง Laser light scattering particle size analyzer (ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์

1. Laser particle size analyzer (Masterizer S long bed ver. 2. 11)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายตัวอย่างสตาโรมา ความเข้มข้นร้อยละ 0.0320 – 0.0550 (w/v)
2. ประกอบเครื่องโดยใส่เลนส์ (300RF) และเซลล์ใส่ตัวอย่างเข้ากับตัวเครื่อง
3. เปิดเครื่องทิ้งไว้ 15 นาที (warming) เพื่อให้แสงเลเซอร์เข้าสู่สมดุล

4. ใช้น้ำ ากล้นในการปรับค่าbackground ของเครื่องก่อนวิเคราะห์ตัวอย่าง
5. นำสารละลายสตาร์ชใส่ในเซลล์สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง รอจนกว่าค่า obscuration อยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 30
6. ประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ หาขนาดอนุภาพสตาร์ชที่มีมากที่สุด และสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเม็ดสตาร์ช

ก.14 รูปแบบและปริมาณผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ดัดแปลงวิธีจาก Zobel (1964)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างสตาร์ชมาโรยบน Sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสตาร์ชเรียงตัวอัดกันแน่น
2. นำ sample plate ใส่เข้าเครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ที่ช่อง sample holder แล้วเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาที
3. วัดค่าในช่วงมุมที่ต้องการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสภาวะ 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 ที่ได้ลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เป็น 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	Intensity*	2θ	d-spacing	Intensity*	2θ	d-spacing	Intensity*	2θ
A°			A°			A°		
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-	10.0
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, บริษัท Bruker AXS) ตามสมการ ก.8

$$\text{Degree of crystallinity (\%)} = (A_c / A_t) \times 100 \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่ใต้กราฟของส่วนผลึก(พื้นที่ใต้พีค)

A_t คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดที่วัดจาก baseline

ก.15 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชระหว่างการเกิดเจลลาติโนเซชัน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Zhang and Oates (1999)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่ทราบค่าความชื้นในอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 โดยชั่งสตาร์ชประมาณ 2 มิลลิกรัม ลงใน pan และเปิดน้ำ ากล้น 6 ไมโครลิตร ใส่ลงใน pan อย่างช้าๆ
2. ปิดฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก ปม pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน เพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่สภาวะสมดุล
3. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า) ในอีกช่อง ตั้งค่าเครื่องให้ scan ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 5 ถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature; T_o หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; T_p หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature; T_c หน่วย °C) ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน และค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (enthalpy of gelatinization; ΔH_{gel} หน่วย J/g)

ก.16 สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชที่เกิดรีโทเกรเดชัน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงวิธีของ Singh (2012)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการศึกษาศักสมบัติทางความร้อนระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ภาคผนวก ก.22) ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน เมื่อเก็บ pan จนครบตามระยะเวลาแล้ว นำ pan ออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. นำ pan ใส่ในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า) ในอีกช่อง ตั้งค่าเครื่องให้ scan ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3. หาค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature; T_o หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature; T_p หน่วย °C) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature; T_c หน่วย °C) ในการหลอมละลายผลึกของโมเลกุลสตาร์ชที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรดชัน และค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการหลอมละลายผลึก (enthalpy of retrogradation; ΔH_{regel} หน่วย J/g)

ก.17 การวัดกำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility) ดัดแปลงวิธีจาก Li and Yeh (2001)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC Multi-RE, USA)
2. อ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ 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 85 มิลลิลิตร อบให้แห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง 0.1 กรัม ใส่ในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำ ากล้นลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

3. นำไปเขย่าในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 5, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. เมื่อครบเวลา นำหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงมาเช็ดด้านนอกหลอดที่มีน้ำ ให้แห้ง

5. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 6,000 x g อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

6. แยกส่วนใส่ออกจากตะกอน โดยใช้ปิเปตดูดส่วนใส่ออกมาใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ควรพยายามดูดส่วนใส่ออกให้มากที่สุดระวังอย่ากให้ตะกอนของตัวอย่างติดมาด้วย)

7. นำหลอดทดลองพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงที่มีตะกอนตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก

8. นำถ้วยอลูมิเนียมที่มีส่วนใส่อยู ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำหนักของถ้วยอลูมิเนียมคงที่ ที่ ึ่งให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็นเวสชั่วคราว เพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างที่ละลายนี้

9. คำนวณค่ากำลังการพองตัว และค่าการละลายของสตาร์ชตามสมการ ก.9 และ ก.10 ต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย (\% solubility)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ละลายน้ำ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}} \quad (\text{ก.9})$$

$$\text{กำลังการพองตัว (swelling power)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนตัวอย่าง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})} \quad (\text{ก.10})$$

ก.18 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ตามวิธี 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: STD1 ดังตารางที่

ก.4

ตารางที่ ก.4 Temperature profile STD1

เวลา (นาทิจวินาที)	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. ตวงน้ำ ากล้นปริมาตร 25.00 ± 0.1 มิลลิลิตร (สำหรับแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 12) ใส่ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง (can)

4. ชั่งตัวอย่าง 3.00 ± 0.01 กรัม ใส่ลงใน can ที่มีน้ำ ากล้นอยู่ น้ำ ากหนักตัวอย่างนี้ นอยู่กับชนิดตัวอย่าง โดยทั่วไปแนะนำตามตารางที่ ก.5

5. ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยบรรจุตัวอย่าง หมุนใบพัดกวนไปมา และดึงขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับกันเป็นก้อนที่ผิวหน้าหรือติดที่ใบพัดกวน ให้ทำซ้ำ อีกครั้ง

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

6.1 เวลาที่เกิดค่าความหนืดสูงสุด(peak time) มีหน่วยเป็นนาทิจวินาที

6.2 อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด(pasting temperature) มีหน่วยเป็น °C

6.3 อุณหภูมิที่เกิดค่าความหนืดสูงสุด(peak temperature) มีหน่วยเป็น °C

6.4 ความหนืดสูงสุด(peak viscosity) มีหน่วยเป็น cP

6.5 ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด(breakdown) มีหน่วยเป็น cP และสามารถคำนวณหาร้อยละของค่า Breakdown ได้จากสมการ ก.11

$$\% \text{ Breakdown} = \frac{\text{Peak viscosity} - \text{Trough}}{\text{Peak viscosity}} \times 100 \quad (\text{ก.11})$$

6.6 ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (final viscosity) มีหน่วยเป็น cP

6.7 ความหนืดต่ำสุด (trough) มีหน่วยเป็น cP

6.8 ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) มีหน่วยเป็น cP และสามารถคำนวณหาร้อยละของค่า Setback ได้จากสมการ ก.12

$$\% \text{ Setback} = \frac{\text{Trough} - \text{Final viscosity}}{\text{Trough}} \times 100 \quad (\text{ก.12})$$

ตารางที่ ก.5 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องRVA

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
Substitued	2.50
Cross-linked	2.50

¹ใช้ 1.2 กรัม ถ้าเป็นสตาร์ชที่ไม่ได้ผลิตมาเพื่อวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์

²จำนวนที่ใช้ขึ้นอยู่กับ degree of modification

ก.19 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจล โดยใช้เครื่อง Texture analyzer ดัดแปลงวิธีจาก Collado and Corke (1999)

อุปกรณ์

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

วิธีการทดลอง

1. เจลตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือเจลตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วยเครื่อง RVA โดยนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนจะนำมาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อ อสัมผัสด
2. Double click ที่ไอคอนของโปรแกรม Exponent lite express เพื่อเข้าสู่โปรแกรม
3. คลิกที่ T.A. บนแถบเมนูหลัก จากนั้น เลือก calibration force โดยไม่ให้มีหัววัดและตัวอย่างบนฐาน จากนั้น กดปุ่ม Next
4. พิมพ์น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน กิโลกรัม จากนั้น จึงวางตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมบนฐานของเครื่อง แล้วกดปุ่ม Next
5. เมื่อเครื่อง calibrate เสร็จจะปรากฏสถานะ calibration complete จากนั้น ให้กดปุ่ม finish
6. ติดตั้งหัววัดรูปทรงกระบอก(P/6) เข้ากับตัวเครื่อง
7. คลิกที่ T.A. บนแถบเมนูหลัก จากนั้น เลือก calibration height โดยไม่ให้มีสิ่งของวางอยู่บนฐาน โดยตั้งระยะหัววัดให้ห่างจากแท่นวางตัวอย่าง 50 มิลลิเมตร จากนั้น กดปุ่ม OK เลื่อนหัววัดให้เข้าใกล้ฐานมากที่สุด เพื่อลดเวลาในการ calibrate
8. วางถ้วยวิเคราะห์ RVA ที่มีเจลตัวอย่างอยู่ในบนฐานเครื่อง คลิก T.A. บนแถบเมนูหลักแล้วเลือก T.A. Settings กดปุ่ม Library เพื่อเลือกวิธีวัด (option) สำหรับการวัดแบบ Texture profile analysis ให้เลือก TPA แล้วกำหนดค่าโปรแกรมดังนี้

หัว cylinder probe P/6

Pre-test speed: 1.0 มิลลิเมตร/วินาที

Test-speed: 1.0 มิลลิเมตร/วินาที

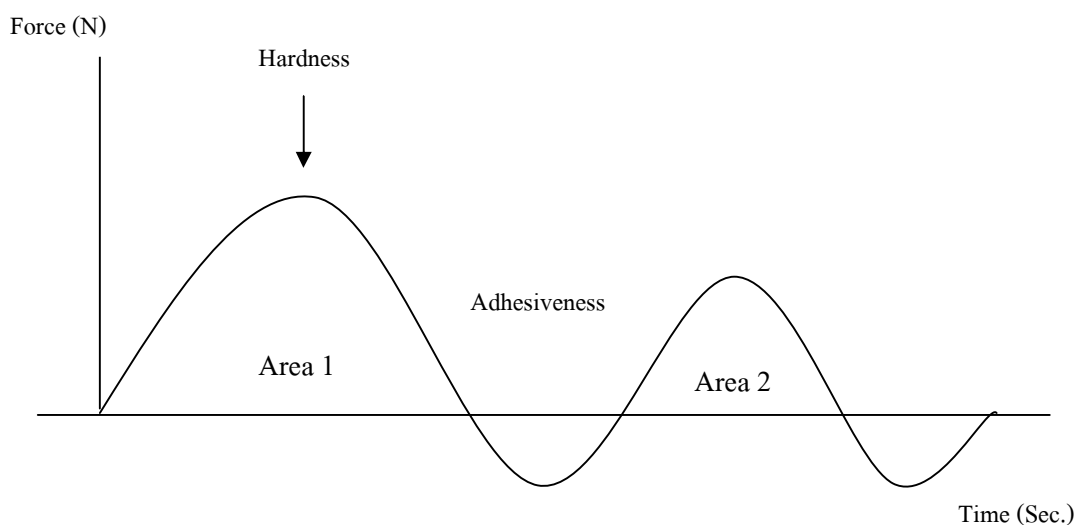
Post-test speed: 1.0 มิลลิเมตร/วินาที

Distance: 10 มิลลิเมตร

Time: 5 วินาที

9. วัดตัวอย่างชุดการทดลองละ 6 ถ้วย แต่ละถ้วยวัดหนึ่งครั้ง แสดงค่าความแข็ง (hardness) จาก peak force ของกราฟ (รูปที่ ก.2) นอกจากนั้น ยังสามารถคำนวณค่า cohesiveness ของตัวอย่างได้ตามสมการดังนี้

$$\text{cohesiveness} = \text{Area 2} / \text{Area 1} \quad (\text{ก.13})$$



รูปที่ ก.3 ตัวอย่างลักษณะกราฟจากเครื่อง Texture Analyser ซึ่งวัดด้วยวิธี texture profile analysis

ก.20 การวัดค่าสี (L, a, b) โดยใช้เครื่อง Chroma meter

อุปกรณ์

เครื่องวัดสี (Minolta Chroma รุ่น CR300 series, Japan)

ก.21 การวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu แบบ microscale (Waterhouse, 2005)

อุปกรณ์

1. เครื่อง spectrophotometer (Spectronic รุ่น Genesys 10UV, USA)

สารเคมี

1. Gallic acid (Fluka, Spain)
2. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตอิมิตัว (A.R. grade)

3. Folin-Ciocalteu (Merck, Germany)

4. Absolute ethanol (A.R. grade)

วิธีการทดลอง

วิธีการเตรียมสารละลายไซเตียมคาร์บอเนตอิมตัว

1. ชั่งไซเตียมคาร์บอเนต 200 กรัม ละลายในน้ำ ากล้น 800 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อน เพื่อเพิ่มอัตราการละลาย
2. เมื่อไซเตียมคาร์บอเนตละลายจนหมดแล้ว ให้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมเกล็ดไซเตียมคาร์บอเนตลงไปเล็กน้อย ที่ ึ่งไว้ 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำสารละลายมากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ปรับปริมาตรด้วยน้ำ ากล้นให้เป็น 1 ลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

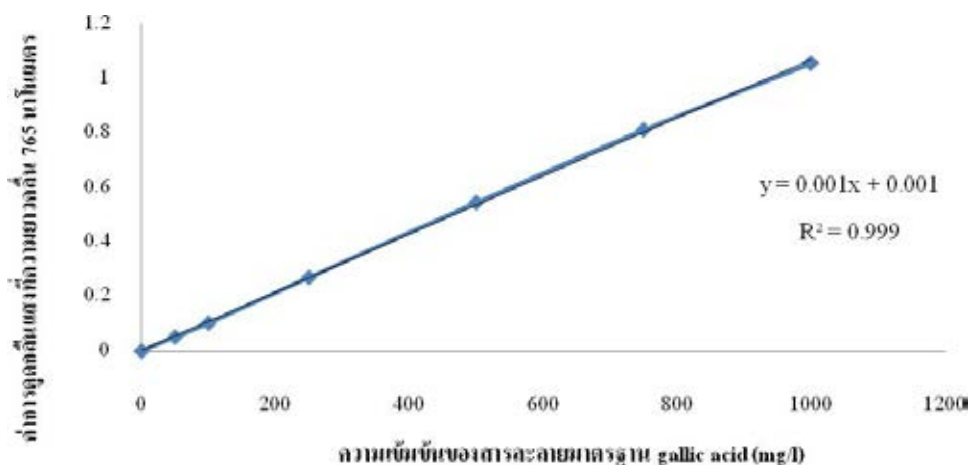
วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก

1. ชั่งกรดแกลลิก 0.5 กรัม ละลายในเอทานอล 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ ากล้นให้มีปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกความเข้มข้นเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร
2. ดูดสารละลายกรดแกลลิกที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มา 1, 2, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำ ากล้น จะได้สารละลายกรดแกลลิกความเข้มข้นเท่ากับ 50, 100, 250, 500, 750 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ หรือสารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำ ากล้น ปริมาตร 7 มิลลิลิตร สารละลาย Folin-Ciocalteu ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 นาที
3. เติมสารละลายไซเตียมคาร์บอเนตอิมตัว ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ ากล้นให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4. เมื่อครบเวลา นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 765 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไป

คำนวณหาปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐาน (รูปที่ ก.4) รายงานค่าเป็น mg gallic acid equivalent(GAE) /g flour



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด

ก.22 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) Assay ดัดแปลงวิธีจาก Huang (2006)

อุปกรณ์

1. เครื่อง spectrophotometer (Spectronic รุ่น Genesys 10UV, USA)

สารเคมี

1. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (SIGMA-ALDRICH, Germany)
2. เมทานอล (A.R. grade)
3. Butylated hydroxyanisole (BHA) ความเข้มข้น 0.001 M
4. L-ascorbic acid (Vitamin C) ความเข้มข้น 0.001 M

วิธีการทดลอง

วิธีการเตรียมสารละลาย DPPH

ซึ่งสาร DPPH ปริมาณ 4 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอลประมาณ 50 มิลลิลิตร เติลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล จะได้สารละลาย DPPH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1×10^{-4} M เก็บสารละลาย DPPH ในขวดสีชา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 5 วัน

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน BHA และ Vitamin C ความเข้มข้น 0.001 M

1. ชั่งสาร BHA ปริมาณ 9 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอลประมาณ 20 มิลลิลิตร เทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล จะได้สารละลายมาตรฐาน BHA ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.001 M

2. ชั่งสาร Vitamin C ปริมาณ 8.8 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอลประมาณ 20 มิลลิลิตร เทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล จะได้สารละลายมาตรฐาน Vitamin C ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.001 M

3. นำสารละลาย BHA และ Vitamin C ความเข้มข้น 0.001 M มาเจือจางในหลอดทดลอง ดังตารางที่ ก.6 โดยจะให้สารละลาย BHA และ Vitamin C มีความเข้มข้นในช่วง 0.0016 – 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ ก.6 วิธีการเตรียมสารละลาย BHA และ Vitamin C

น้ำหนัก สารเริ่มต้น (mg)	สารละลาย BHA		สารละลาย Vitamin C		ปริมาณ DPPH (ml)	ความ เข้มข้น สุดท้าย (mg/ml)
	ปริมาตร BHA (ml)	ปริมาตร เม ทานอล (ml)	ปริมาตร Vitamin C (ml)	ปริมาตร เม ทานอล (ml)		
0.008	0.044	1.956	0.045	1.955	3	0.0016
0.010	0.055	1.945	0.057	1.943	3	0.0020
0.020	0.111	1.889	0.113	1.887	3	0.0040
0.040	0.222	1.778	0.227	1.773	3	0.0080
0.080	0.444	1.556	0.454	1.546	3	0.0160
0.100	0.555	1.445	0.568	1.432	3	0.0200

วิธีวิเคราะห์ DPPH ของตัวอย่าง และสารละลายควบคุม

1. ปิเปตสารสกัดตัวอย่างที่เตรียมจากฟลาวัวร์ 1 กรัม มาปริมาตรต่างๆ ดังตารางที่ ก.7
2. เติมเมทานอลปริมาตรต่างๆ ให้ได้ปริมาตรสารละลายรวมเท่ากับ 2 มิลลิลิตร (ทำเช่นเดียวกัน สำหรับหลอดทดลองที่มีสารละลายมาตรฐาน BHA และ Vitamin C)

3. เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จะได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 5 มิลลิลิตร เท่ากันทุกหลอดทดลอง

ตารางที่ ก.7 วิธีการเตรียมสารสกัดฟลาวอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

น้ำหนักสาร เริ่มต้น (mg)	ปริมาตรสารสกัด (ml)	ปริมาตรเมทานอล (ml)	ปริมาณ DPPH (ml)	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg/ml)
0 (Control)	0	2	3	0
0.8	0.02	1.98	3	0.16
2.0	0.05	1.95	3	0.40
4.0	0.10	1.90	3	0.80
10.0	0.25	1.75	3	2.00
20.0	0.50	1.50	3	4.00
40.0	1.00	1.00	3	8.00
80.0	2.00	0	3	16.00

4. เขย่าสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน บ่มไว้ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา % Radical scavenging activity โดยใช้สูตรตามสมการ ก.14

$$\text{Radical scavenging activity (\%)} = [1 - (A_{\text{control}} / A_{\text{sample}})] \times 100 \quad (\text{ก.14})$$

โดย A_{control} = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่ไม่เติมสารสกัดตัวอย่าง

A_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่เติมสารสกัดตัวอย่าง

6. ค่า % Radical scavenging activity ที่คำนวณได้ นำไปพล็อตกราฟเส้นตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง ได้เป็นค่า EC_{50} (EC_{50} คือ ค่าความเข้มข้นของสารต้านการออกซิเดชันสูงสุด ที่ทำให้อนุมูลอิสระลดลงไปได้ 50%) โดยรายงานเป็น mg flour/ml

ก.23 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay ดัดแปลงวิธีจาก Benzie and Strain (1996)

อุปกรณ์

1. เครื่อง spectrophotometer (Spectronic รุ่น Genesys 10UV, USA)

สารเคมี

1. Trolox (Fluka, Denmark)
2. Sodium acetate trihydrate
3. Tripyridyltriazine (TPTZ)
4. Ferric chloride
5. Glacial acetic acid (A.R. grade)
6. กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (A.R. grade)
7. เมทานอล (A.R. grade)

วิธีการทดลอง

วิธีการเตรียมสารละลาย FRAP

1. เตรียมสารละลาย Acetate buffer โดยผสม Sodium acetate trihydrate 0.3 กรัม และ Glacial acetic ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร แล้วปรับให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลาย Ferric chloride โดยละลาย Ferric chloride 270 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลาย TPTZ โดยเติม TPTZ ปริมาณ 31.2 มิลลิกรัม ลงในกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.04 M ในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
4. เตรียมสารละลาย FRAP โดยผสม Acetate buffer 25 มิลลิลิตร Ferric chloride 2.5 มิลลิลิตร และ TPTZ 2.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox

1. ชั่ง Trolox มาประมาณ 25 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอลปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน สารละลายที่ได้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10000 μM

2. นำสารละลาย Trolox ความเข้มข้น 10000 μM มาเจือจาง ดังตารางที่ ก.8 ในการสร้างกราฟมาตรฐานจะใช้สารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้น 82 – 417 μM

ตารางที่ ก.8 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox

ความเข้มข้นเริ่มต้น (μM)	ปริมาตร Trolox (ml)	ปริมาตรเมทานอล (ml)	ความเข้มข้นสุดท้าย (μM)
10000	5	5	5000
5000	5	5	2500
2500	5	5	1250
1250	5	5	625
625	4	2	417
417	4	2	278
278	4	2	185
185	4	2	123
123	4	2	82

วิธีวิเคราะห์

1. นำสารละลาย FRAP มาให้ความร้อนที่ 37 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะให้สีน้ำตาลอมแดง

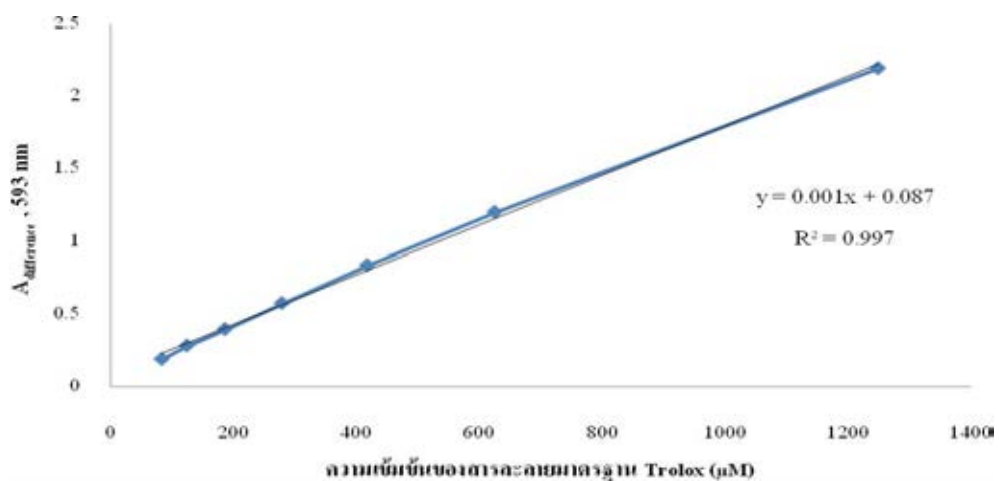
2. ปิเปตตัวอย่างมา 50 ไมโครลิตร (การสร้างกราฟมาตรฐานจะใช้ Trolox แทนตัวอย่าง) ผสมกับสารละลาย FRAP 950 ไมโครลิตร ในคิวเวต ที่ ึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 นาที

3. นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวอ้างอิง (เพื่อปรับค่าการดูดกลืนแสงให้เท่ากับ 0) โดยสีของตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมแดงไปเป็นสีม่วง

4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) มาหักลบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) ได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{\text{difference}}$) ตามสมการ ก.15

$$A_{\text{difference}} = A_{\text{final}} - A_{\text{initial}} \quad (\text{ก.15})$$

5. นำ $A_{\text{difference}}$ ที่ได้จากตัวอย่างไปคำนวณหาค่าฤทธิ์ต้านออกซิเดชันโดยเทียบกับ $A_{\text{difference}}$ ของกราฟมาตรฐานของ Trolox (รูปที่ ก.5) รายงานค่าเป็น $\mu\text{mol Trolox/g flour}$



รูปที่ ก.5 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธีFRAP

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองเพิ่มเติม

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อสีขาว)

Angle 2-Theta °	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.6135	15.7308	417	29.9
7.2104	12.2501	385	27.6
10.0082	8.8310	608	43.7
11.0187	8.0232	634	45.6
11.1969	7.8959	654	47.0
11.4960	7.6912	670	48.2
12.5080	7.0711	633	45.5
15.0389	5.8863	1213	87.2
15.1729	5.8346	1217	87.5
16.9435	5.2287	1343	96.5
17.1577	5.1639	1392	100.0
17.3243	5.1146	1389	99.8
17.9200	4.9459	1298	93.3
18.0763	4.9035	1255	90.2
19.9649	4.4437	804	57.7
22.9300	3.8754	1059	76.1
24.3682	3.6498	805	57.9
26.6817	3.3383	589	42.3
30.0444	2.9719	536	38.5

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลือง
เข้ม)

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.5903	15.7960	487	32.8
5.7288	15.4144	485	32.6
10.0348	8.8077	609	41.0
10.3563	8.5349	612	41.2
11.4045	7.7527	680	45.8
12.0098	7.3633	647	43.5
14.9446	5.9232	1182	79.6
15.1719	5.8350	1245	83.8
16.7993	5.2733	1338	90.1
17.0182	5.2059	1429	96.2
17.1585	5.1636	1485	100.0
17.3232	5.1149	1402	94.4
17.9276	4.9438	1274	85.8
19.8680	4.4651	838	56.4
22.2715	3.9884	910	61.3
22.5200	3.9450	978	65.9
22.7239	3.9100	1004	67.6
22.9279	3.8757	1044	70.3
23.1359	3.8413	1062	71.5
24.3720	3.6492	829	55.8
24.7114	3.5999	756	50.9
26.5435	3.3554	618	41.6
29.0209	3.0744	549	37.0
30.3704	2.9407	553	37.2

ตารางที่ ๓.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์T101 (เนื้อ อสีส้ม)

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.6636	15.5919	333	30.9
9.0691	9.7432	408	37.8
10.0308	8.8111	464	43.0
11.1106	7.9572	518	48.0
11.3770	7.7714	524	48.5
14.9035	5.9395	945	87.5
15.2664	5.7991	944	87.4
15.5169	5.7061	838	77.7
15.8596	5.5835	730	67.6
16.5918	5.3387	891	82.5
16.8659	5.2526	1004	93.0
17.0534	5.1952	1078	99.8
17.3240	5.1147	1080	100.0
17.5765	5.0418	991	91.8
17.8325	4.9700	991	91.8
18.0598	4.9079	977	90.5
18.2870	4.8475	905	83.8
18.5034	4.7913	826	76.5
20.1915	4.3943	644	59.6
21.4893	4.1318	613	56.8
22.2903	3.9851	676	62.6
22.5875	3.9333	744	68.9
22.7706	3.9021	769	71.3
22.9742	3.8680	812	75.2
23.3180	3.8117	795	73.7
23.6192	3.7638	757	70.1

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
23.9920	3.7062	699	64.7
24.1642	3.6801	675	62.5
24.4161	3.6427	645	59.7
25.7444	3.4577	477	44.1
26.6132	3.3468	494	45.8
27.0713	3.2912	447	41.4
30.6199	2.9174	427	39.6

ตารางที่ ๗.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม)

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.6671	15.5821	415	32.2
10.0972	8.7533	543	42.1
11.1500	7.9291	603	46.7
11.4028	7.7539	632	49.0
14.9686	5.9138	1135	88.0
15.1324	5.8501	1116	86.6
15.2869	5.7914	1077	83.6
17.0699	5.1903	1256	97.4
17.2556	5.1348	1289	100.0
17.7617	4.9896	1154	89.5
17.9168	4.9468	1156	89.7
18.0563	4.9089	1162	90.1
20.0924	4.4158	767	59.5
22.6297	3.9261	910	70.6
22.8861	3.8827	928	72.0

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
23.0438	3.8565	999	77.5
23.2012	3.8307	997	77.3
23.3934	3.7996	945	73.3
23.6497	3.7590	905	70.2
23.8760	3.7239	857	66.4
24.1435	3.6832	811	62.9
24.4151	3.6429	831	64.4
26.1623	3.4034	560	43.5
26.6552	3.3416	560	43.4
30.0723	2.9692	542	42.0

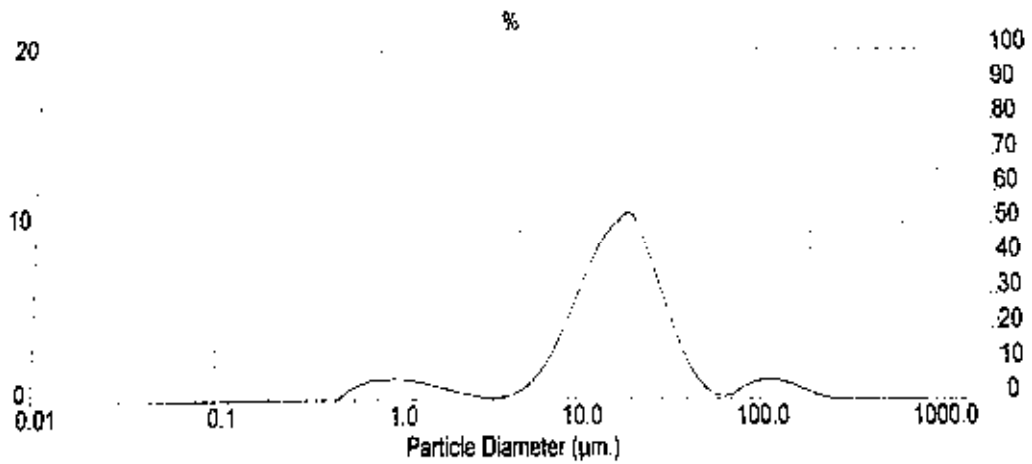
ตารางที่ ๕.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์Atlantic (เนื้อ อสีครีม)

Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
5.6671	15.5821	415	32.2
10.0972	8.7533	543	42.1
11.1500	7.9291	603	46.7
11.4028	7.7539	632	49.0
14.9686	5.9138	1135	88.0
15.1324	5.8501	1116	86.6
15.2869	5.7914	1077	83.6
17.0699	5.1903	1256	97.4
17.2556	5.1348	1289	100.0
17.7617	4.9896	1154	89.5
17.9168	4.9468	1156	89.7
18.0563	4.9089	1162	90.1

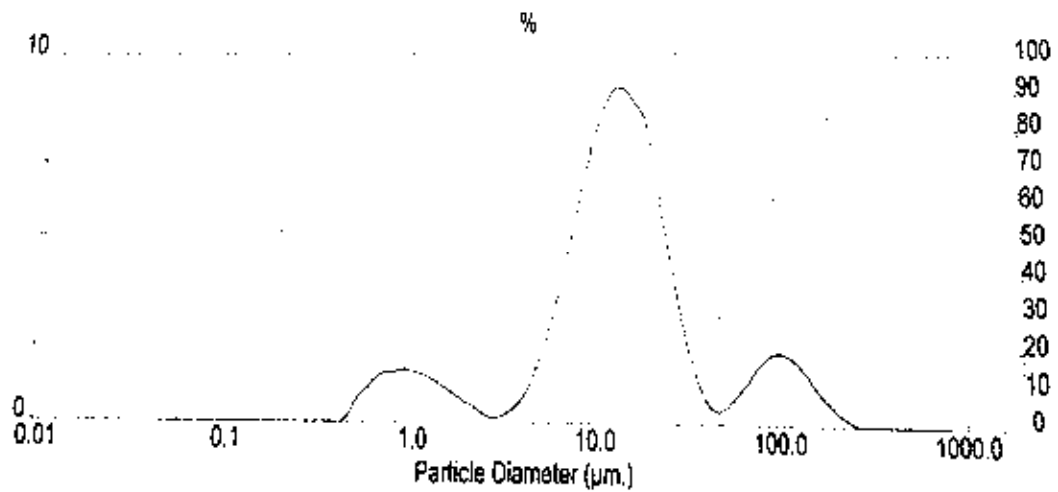
Angle 2-Theta°	D value Angstrom	Intensity Count	Intensity (%)
20.0924	4.4158	767	59.5
22.6297	3.9261	910	70.6
22.8861	3.8827	928	72.0
23.0438	3.8565	999	77.5
23.2012	3.8307	997	77.3
23.3934	3.7996	945	73.3
23.6497	3.7590	905	70.2
23.8760	3.7239	857	66.4
24.1435	3.6832	811	62.9
24.4151	3.6429	831	64.4
26.1623	3.4034	560	43.5
26.6552	3.3416	560	43.4
30.0723	2.9692	542	42.0

ภาคผนวก ค

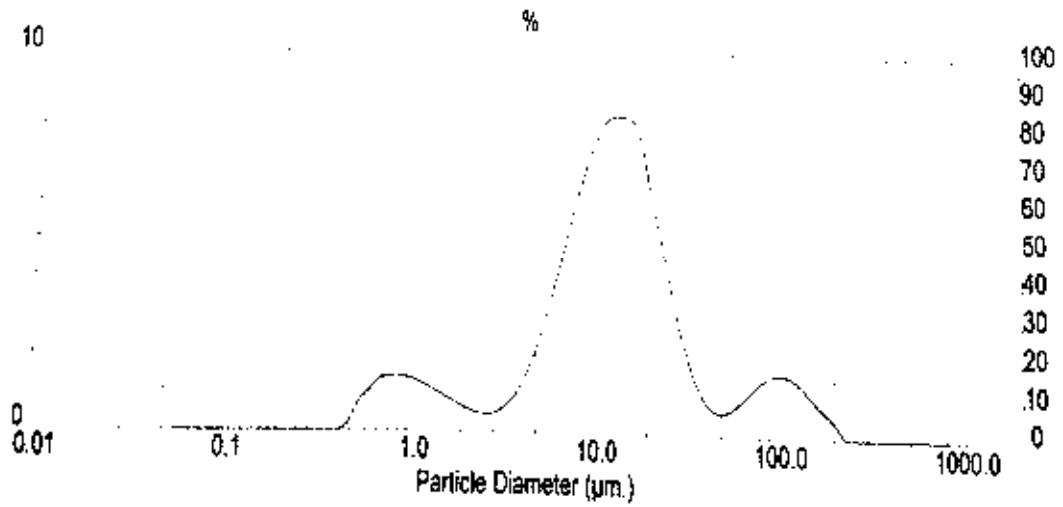
รูปภาพและกราฟผลการทดลองเพิ่มเติม



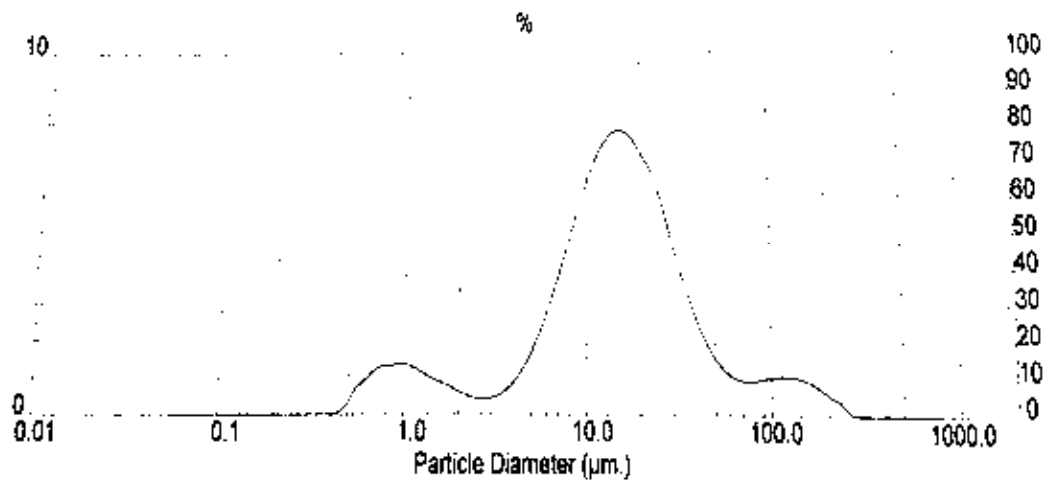
รูปที่ ค.1 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ 0106-1 (เนื้อ อสีขาว)



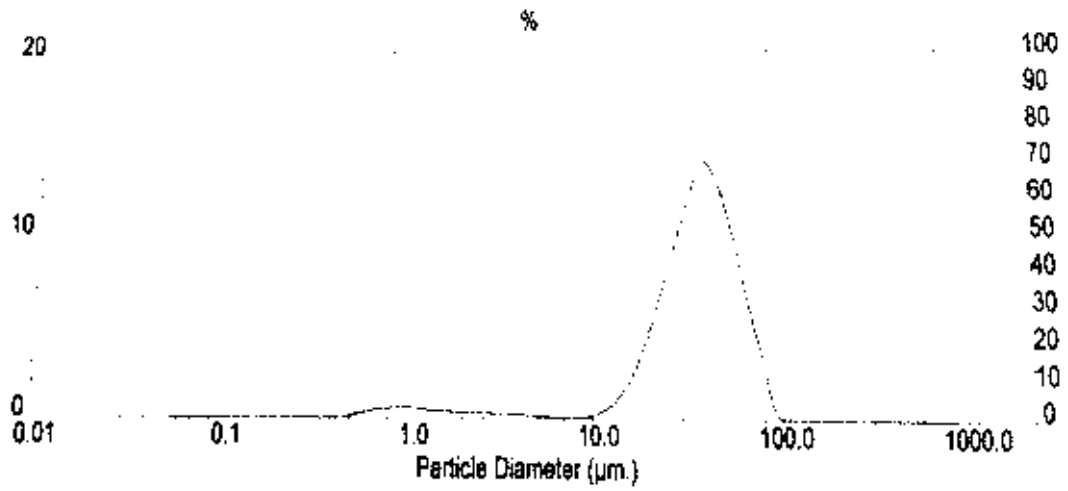
รูปที่ ค.2 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม)



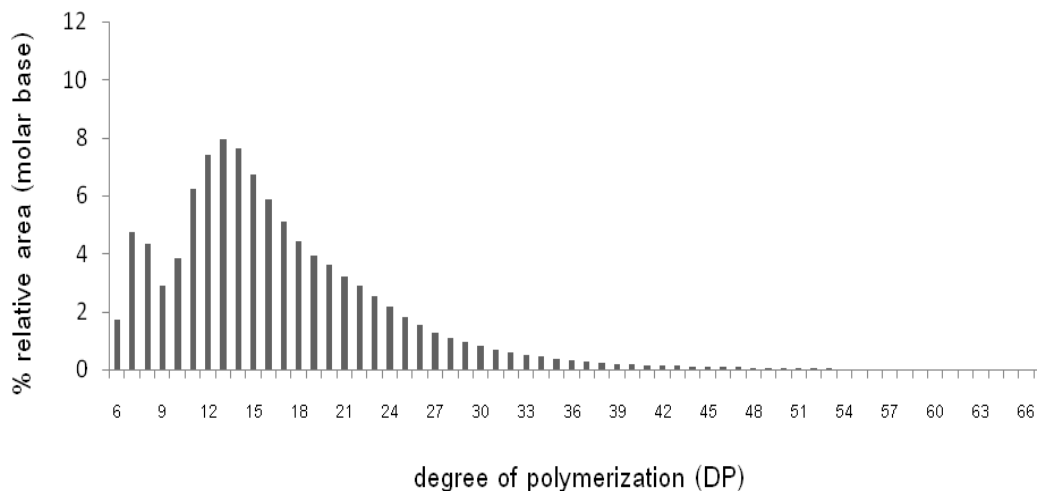
รูปที่ ค.3 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม)



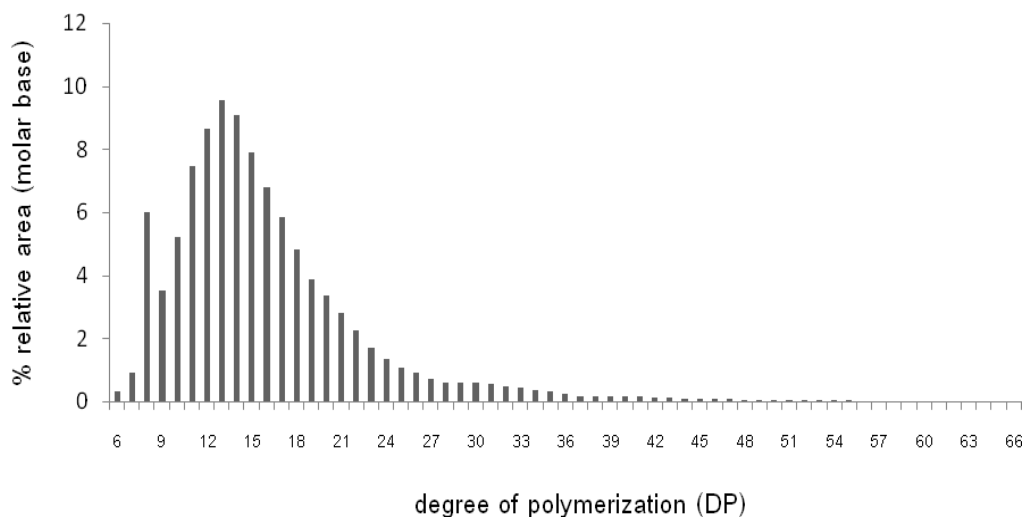
รูปที่ ค.4 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อ อสีม่วงเข้ม)



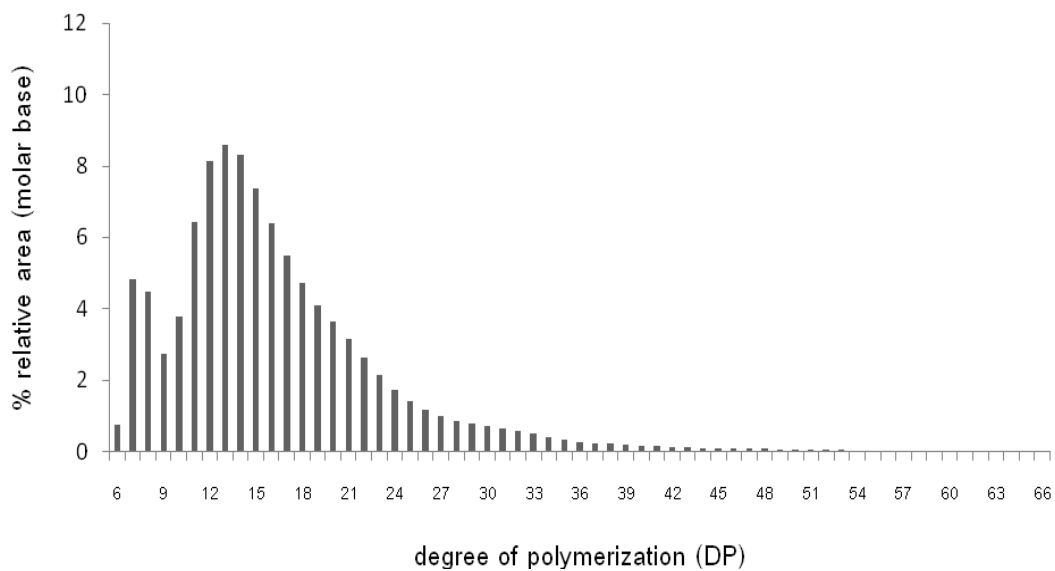
รูปที่ ๑.๕ ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดสตาเร็กซ์จากสตาเร็กซ์มันฝรั่งพันธุ์Atlantic



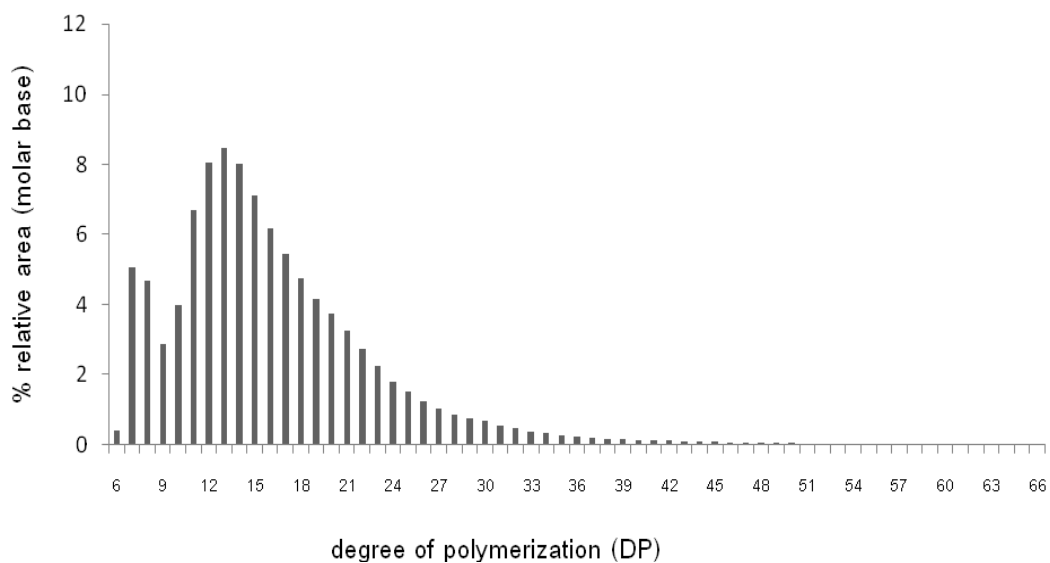
รูปที่ ๑.๖ การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาเร็กซ์จากมันเทศพันธุ์0106-1 (เนื้อ อสีขาว)



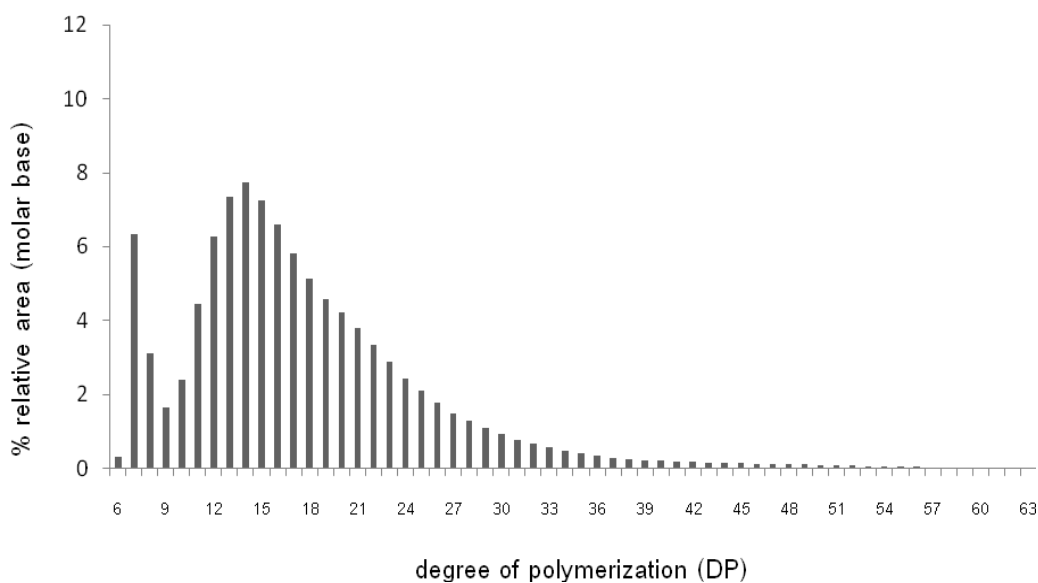
รูปที่ ๗.7 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ 265-1 (เนื้อ อสีเหลืองเข้ม)



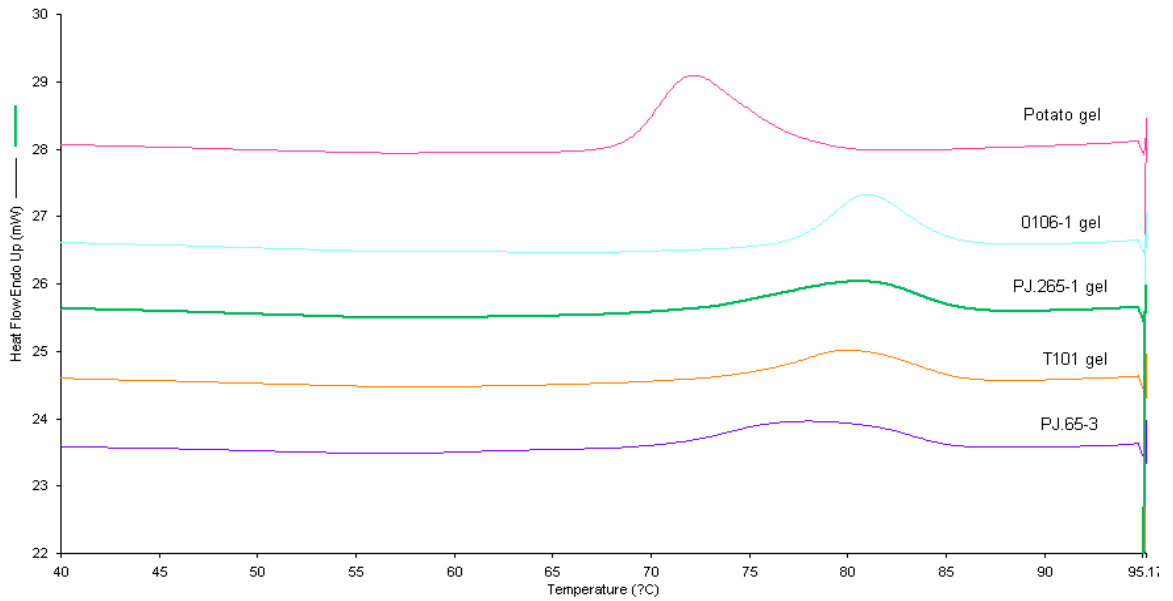
รูปที่ ๗.8 การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ T101 (เนื้อ อสีส้ม)



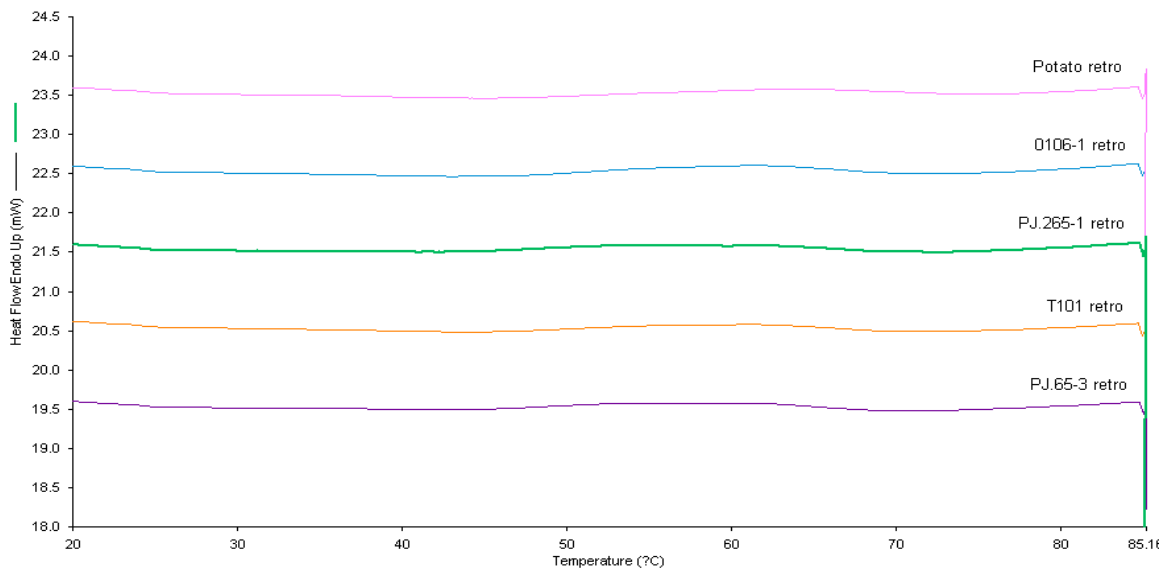
รูปที่ ๙.๙ การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศพันธุ์ พจ65-3 (เนื้อสีม่วงเข้ม)



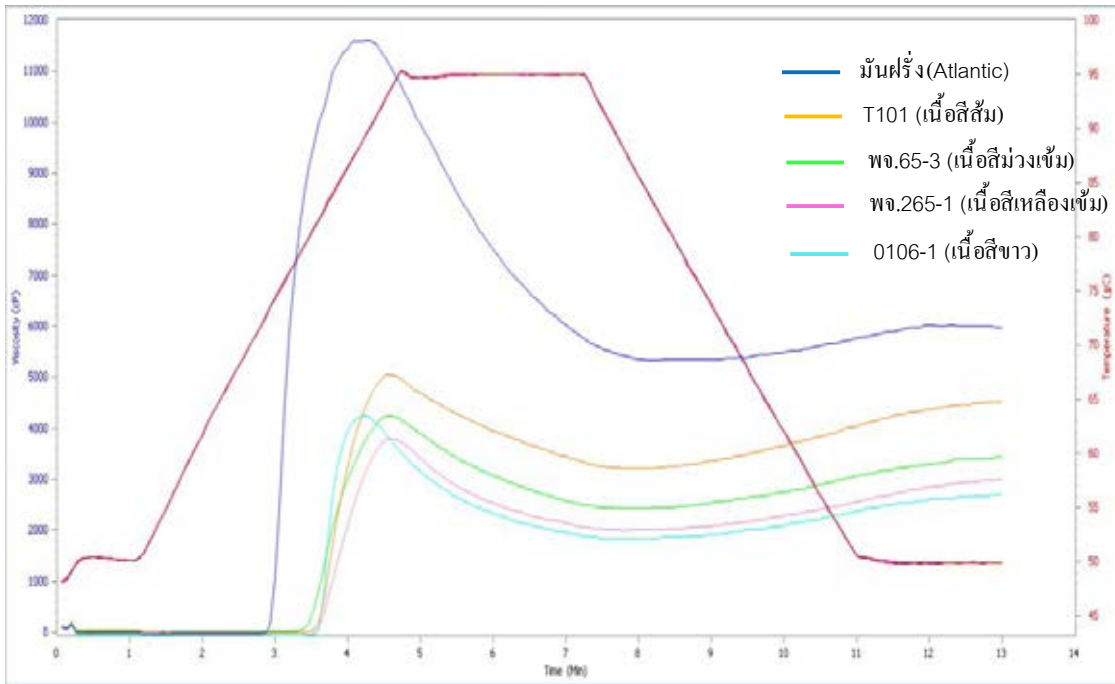
รูปที่ ๙.๑๐ การกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันฝรั่งพันธุ์ Atlantic



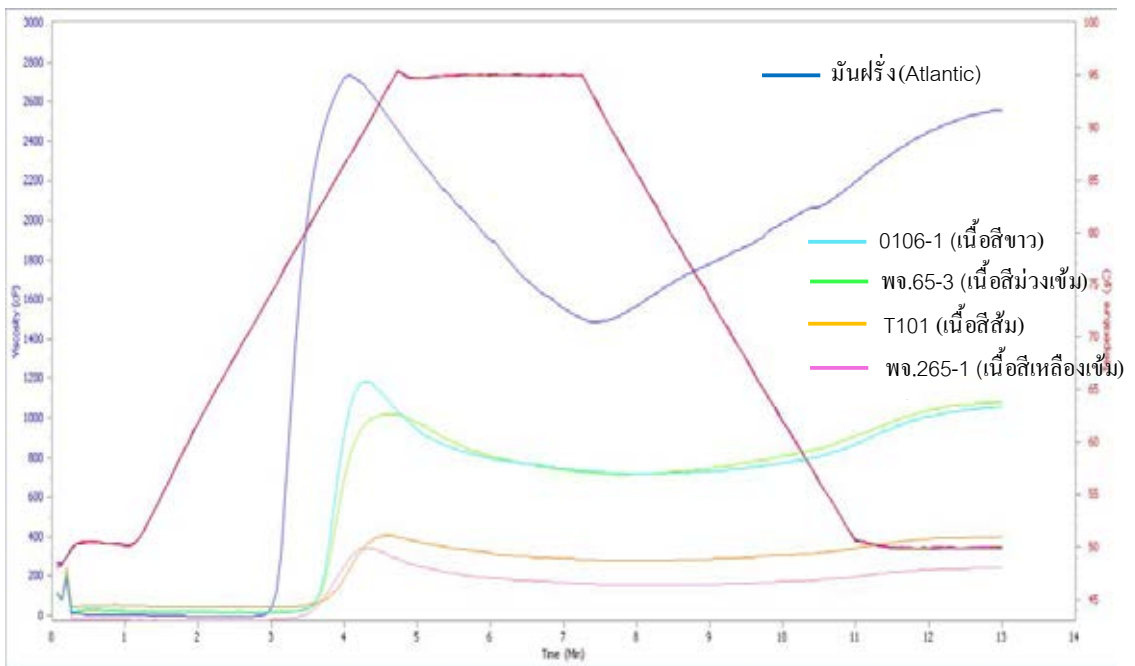
รูปที่ ค.11 กราฟสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์ และสตาร์ชมันฝรั่ง



รูปที่ ค.12 กราฟสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรดชันของ สตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง



รูปที่ ค.13 กราฟสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชมันเทศต่างสายพันธุ์และสตาร์ชมันฝรั่ง



รูปที่ ค.14 กราฟสมบัติทางความหนืดของฟลาวร์มันเทศต่างสายพันธุ์และฟลาวร์มันฝรั่ง

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และหัวมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
องค์ประกอบทางเคมี	ความชื้น	4	63.767*	1.677E3
	Error	5	0.038	
โปรตีน		4	29.114*	1.257E3
	Error	5	0.23	
ไขมัน		4	8.060*	4.759E3
	Error	5	0.002	
เถ้า		4	2.017*	88.976
	Error	5	0.023	
เส้นใยหยาบ		4	6.070*	522.477
	Error	5	0.012	
คาร์โบไฮเดรต		4	23.527*	497.065
	Error	5	0.047	

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

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลผลิตของสตาร์ชจากหัวมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่งสด

SOV	df	MS	F
ปริมาณผลผลิต	4	331.260*	41.230
Error	10	8.035	

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

ตารางที่ ๓.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
องค์ประกอบทางเคมี	ความชื้น	4	3.569*	466.876
	Error	5	0.008	
โปรตีน		4	0.035*	16.540
	Error	5	0.02	
ไขมัน		4	0.106*	69.893
	Error	5	0.002	
เถ้า		4	0.081*	0.020
	Error	5	0.01	
เส้นใยหยาบ		4	0.412*	15.384
	Error	5	0.027	
คาร์โบไฮเดรต		4	0.489*	34.981
	Error	5	0.014	

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

ตารางที่ ๓.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

SOV	df	MS	F
ปริมาณผลผลิต	4	51.022*	53.276
Error	10	0.958	

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

ตารางที่ ๖5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	แอมิโลส	4	6.375E9*	195.039
	Error	10	3.269E7	
	แอมิโลเพกทิน	4	5.686E10*	37.615
	Error	10	1.512E9	

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

ตารางที่ ๖6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวตามขนาดและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้านแอมิโลเพกทินของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
การกระจายตัวตามขนาดและ	ความยาวเฉลี่ยของสายโซ่กิ่งก้าน	4	0.503*	14.354
	Error	5	0.035	
ความยาวสายโซ่กิ่งก้าน	สายโซ่กิ่งก้านชนิด A	4	20.216*	41.217
	Error	5	0.490	
	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B1	4	10.436*	8.433
	Error	5	1.238	
	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B2	4	2.944*	6.088
	Error	5	0.484	
	สายโซ่กิ่งก้านชนิด B3+	4	0.242*	14.695
	Error	5	0.016	

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

ตารางที่ ๗.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และมันฝรั่ง

SOV	df	MS	F
ขนาดเฉลี่ย	4	124.516*	843.987
Error	10	0.148	
ค่าฐานนิยม	4	309.846*	7.521E4
Error	10	0.004	

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

ตารางที่ ๗.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	4	29.623*	383.546
	Error	10	0.077	
	Peak temperature	4	37.003*	216.552
	Error	10	0.171	
	Conclusion temperature	4	39.108*	141.739
	Error	10	0.276	
	$T_c - T_o$	4	20.462*	47.958
	Error	10	0.427	
	Enthalpy	4	28.138*	76.329
	Error	10	0.369	

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

ตารางที่ ๙9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความร้อนในการหลอมละลายผลึกที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความร้อน	Onset temperature	4	20.098*	57.332
	Error	10	0.351	
	Peak temperature	4	11.577*	5.585
	Error	10	2.073	
	Conclusion temperature	4	5.777*	20.487
	Error	10	0.282	
	T _c - T _o	4	4.401*	5.017
	Error	10	0.877	
	Enthalpy	4	2.304*	3.290
	Error	10	0.700	

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

ตารางที่ ๙10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

SOV	df	MS	F
การเกิดรีโทรเกรเดชัน	4	182.867*	7.208
Error	10	25.369	

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

ตารางที่ ๑11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 55 – 85 °C

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
กำลังการพองตัว	55 องศาเซลเซียส	4	0.130*	1.373
	Error	10	0.095	
	65 องศาเซลเซียส	4	46.670*	358.457
	Error	10	0.130	
	75 องศาเซลเซียส	4	213.195*	495.682
	Error	10	0.430	
	85 องศาเซลเซียส	4	332.721*	1.568E3
	Error	10	0.212	

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

ตารางที่ ๑12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 55 – 85 °C

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
การละลาย	55 องศาเซลเซียส	4	9.286*	56.151
	Error	10	0.165	
	65 องศาเซลเซียส	4	16.803*	66.960
	Error	10	0.251	
	75 องศาเซลเซียส	4	12.788*	48.695
	Error	10	0.263	
	85 องศาเซลเซียส	4	16.421*	84.700
	Error	10	0.194	

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

ตารางที่ ง.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชจากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความหนืด	Pasting temperature	4	33.020*	594.952
	Error	10	0.056	
	Peak viscosity	4	3.178E7*	1.267E4
	Error	10	2509.267	
	Trough	4	6155160.567*	9.398E3
	Error	10	654.933	
	Breakdown	4	1.086E7*	5.979E3
	Error	10	1816.667	
	Final viscosity	4	5398654.000*	2.295E3
	Error	10	2352.000	
	Setback	4	163836.567*	207.196
	Error	10	790.733	

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

ตารางที่ ง.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อ อัดัมผัสของเจลสตาร์ชจากสตาร์ชมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และสตาร์ชมันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
ลักษณะเนื้อ อัดัมผัสเจ	ค่าความแข็ง	4	467.629*	8.657
	Error	25	54.017	

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

ตารางที่ ๑15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
องค์ประกอบทางเคมี	ความชื้น	4	6.034*	2.321E4
	Error	5	0.000	
โปรตีน		4	19.401*	1.509E3
	Error	5	0.013	
ไขมัน		4	9.798*	1.870E3
	Error	5	0.005	
เถ้า		4	1.994*	323.372
	Error	5	0.006	
เส้นใยหยาบ		4	4.108*	157.372
	Error	5	0.026	
คาร์โบไฮเดรต		4	20.987*	361.536
	Error	5	0.058	

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

ตารางที่ ๑16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีในระบบ Hunter (L, a, b) ของฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
ค่าสี	ค่า L	4	177.243*	480.673
	Error	10	0.369	
ค่า a		4	128.882*	1.792E4
	Error	10	0.007	
ค่า b		4	115.883*	4.968E3
	Error	10	0.023	

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

ตารางที่ ๑17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมบัติทางความหนืดของฟลาวร์จากมันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
สมบัติทางความหนืด	Pasting temperature	4	50.082*	188.752
	Error	10	0.265	
	Peak viscosity	4	2834041.100*	4.347E3
	Error	10	652.000	
	Trough	4	820856.400*	1.562E3
	Error	10	525.400	
	Breakdown	4	631521.433*	6.874E3
	Error	10	91.867	
	Final viscosity	4	2480270.100*	2.909E3
	Error	10	852.533	
	Setback	4	455297.433*	3.413E3
	Error	10	133.400	

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

ตารางที่ ๑18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะเนื้อ อัดัมผัสของเจลจากฟลาวร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวร์มันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
ลักษณะเนื้อ อัดัมผัสเจ	ค่าความแข็ง	4	284.008*	296.658
	Error	25	0.957	

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

ตารางที่ ๑19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง

SOV	df	MS	F
ค่าฟีนอลิกทั้งหมด	4	12172.292*	376.657
Error	10	32.317	

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

ตารางที่ ๑20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและกำลังการรีดิวซ์ของสารสกัดจากฟลาวอร์มันเทศสายพันธุ์ต่างๆ และฟลาวอร์มันฝรั่ง

การทดสอบ	SOV	df	MS	F
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	EC ₅₀	5	38.198*	1.499E3
	Error	12	0.025	
	กำลังการรีดิวซ์	4	693252.358*	624.270
	Error	10	1110.500	

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

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเบญจพร พวงมาลี เกิดวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

ผลงานวิจัย

เสนอผลงานระดับนานาชาติเรื่อง TOTAL PHENOLIC CONTENT AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF SWEET POTATO (*IPOMOEA BATATAS* L.) FLOURS FROM DIFFERENT VARIETIES GROWN IN THAILAND ในงานประชุมทางวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (Paccon 2013) ระหว่างวันที่ 23-25 มกราคม 2556 ณ The Tide Resort จังหวัดชลบุรี