สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม *Tacca leontopetaloides* Ktze

นายทัศนัย อรรถพรพิทักษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5408-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ARROWROOT *Tacca leontopetaloide* Ktze.

STARCH

Mr. Tassanai Auttapornpitak

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5408-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม *Tacca leontopetaloides* Ktze

โดย นายทัศนัย อรรถพรพิทักษ์

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลาหสงคราม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์)

....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลาหสงคราม)

....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรรณา ตุลยธัญ)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พัชรี ปานกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์ : สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม *Tacca leontopetaloides* Ktze. Physicochemical Properties of Arrowroot *Tacca leontopetaliodes* Ktze. Starch. อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.กัลยา เลาหสงคราม, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ 101 หน้า. ISBN 974-17-5408-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยจากการสกัดสตาร์ชจากหัวเท้ายายม่อม 2 พันธุ์ (green stem Tacca, GST และ purple stem Tacca, PST) ด้วยวิธีโม่เปียก พบว่า yield ที่ได้เท่ากับ 24.46 และ 20.43 % รูปร่างแกรนูลของสตาร์ชทั้ง 2 พันธุ์ เป็นรูปไข่และรูปถ้วย เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 11.17 - 33.51 ไมครอน เม็ดสตาร์ชมีผิวเรียบแต่ที่บริเวณรอยตัดของเม็ดสตาร์ชรูปถ้วยมีลักษณะผิวไม่เรียบ สตาร์ช GST และ PST มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 99.62 และ 99.37 %โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณอะมิโลส 24.53 % และ 21.16 % และมีไขมัน เถ้า เส้นใย ฟอสฟอรัส และโปรตีนน้อยมาก โครงสร้างผลึกของสตาร์ชเท้ายายม่อมเป็นแบบ C สตาร์ชเท้ายายม่อมมีกำลังการพองตัวปานกลาง โดยสตาร์ช PST มีกำลังการพองตัวสูงกว่า GST เมื่อศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันด้วย RVA พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช GST และ PST เท่ากับ 72.25 °C และ 74.43 °C ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาด้วย DSC (67.50 – 83.33 °C) เมื่อศึกษาสมบัติด้านความหนืดของแป้งเปียกด้วย RVA พบว่าแป้งเปียกมีลักษณะใส ความหนืดสูง ความทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนต่ำ โดยสตาร์ช PST มีความหนืดสูงกว่าสตาร์ช GST เมื่อศึกษาเสถียรภาพของแป้งเปียกที่ pH 3 - 9 พบว่า ที่ pH 3 สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์ มีค่า breakdown สูงและค่า final viscosity ต่ำ ทำให้แป้งเปียกที่ pH นี้มีเสถียรภาพต่ำกว่าที่ pH อื่นๆ นอกจากนี้แป้งเปียกที่ความเข้มข้นสูงจะมีเสถียรภาพของความหนืดต่ำกว่าแป้งเปียกความเข้มข้นต่ำ เมื่อศึกษาสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วย DSC พบว่าเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บไว้ที่ 4 °C นาน 1 วัน การเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนาน 7 วัน และเมื่อเก็บไว้นานขึ้น(14 วัน) การเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ การเก็บที่ –20 °C ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ และเมื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี freeze-thaw stability พบว่า สตาร์ชเท้ายายม่อมมี freeze-thaw stability ต่ำ เจลแป้งที่ผ่านการ freeze-thaw มีโครงสร้างคล้ายฟองน้ำ แสดงว่าเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี จากการวิเคราะห์ค่า intrinsic viscosity ของสารละลายสตาร์ชเท้ายายม่อมเข้มข้น 6 % ที่ pH 3 - 9 และปริมาณซูโครส 0 - 100 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง พบว่า pH และความเข้มข้นของซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า intrinsic viscosity ยกเว้นที่ pH 3 ซึ่ง intrinsic viscosity มีค่าลดลงเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาสมบัติการไหลของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 2.5 – 4 % พบว่ามีการไหลแบบ Pseudoplastic จากการศึกษาสมบัติทาง viscoelastic ของเจลแป้งเท้ายายม่อมความเข้มข้น 20 g/dl พบว่าสตาร์ช GST มีเจลที่แข็งแรงกว่าสตาร์ช PST

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา เทคโนลียีทางอาหาร	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...
ปีการศึกษา 2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..

4372270323 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORDS : ARROWROOT/ TACCA/ STARCH/ PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

TASSANAI AUTTAPORNPITAK : PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ARROWROOT *Tacca leontopetaloides* Ktze. STARCH : THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM, Ph.D., AND THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SAIWARUN CHAIWANICHSIRI, Ph.D., 101 pp. ISBN 974-17-5408-6

The research aimed to investigate physicochemical propreties of arrowroot(*Tacca leontopetaloides*, Ktze)strach. Starch extracted from 2 types of arrowroot (green stem tacca, GST and purple stem tacca, PST) by wet-milling yielded 24.46 and 20.43 %. The starch granules from both types of arrowroot were oval and cup shapes having diameter of 11.17 – 33.51 micron. The starch granules had smooth surface in general, but rough surface could be found at the cut of cup shape. GST and PST starches had % carbohydrate of 99.62 and 99.37, % amylose of 24.53 and 21.16 and very little amount of fat, ash, fiber, phosphorous and protein. Both starches had C-type crystalline region and moderate swelling power. PST starch had higher swelling power than GST starch. From the RVA, the result showed that gelatinization temperatures of GST and PST starches were 72.25 ^{o}C and 74.43 ^{o}C which were in the same range as onset and endset temperatures of DSC endotherm (67.50 – 83.33 ^{o}C). Both starch pastes were transparent and had high viscosity and less stability to stress and heat with PST starch having higher viscosity. From the stability study at pH 3 – 9, it was found that starch paste at pH 3 had high breakdown and low final viscosity, therefore it had lower stability than those at other pHs. Moreover, high concentration starch pastes had lower stability than the low concentration pastes. From the retrogradation study by DSC, it was found that both starch pastes retrograded after 1 day of starage at 4 ^{o}C and retrogradation increased after 7 days of storage. After longer period of storage(14 day), retrogradation of the starch pastes tended to increase slowly. The retrogradation of starch paste decreased when stored at -20 ^{o}C. Both starches had low freeze-thaw stability and became spongy after freeze-thaw for 2 cycles. From the measurement of intrinsic viscosity of 6% starch solutions at pH 3 - 9 and 0 - 100% sucrose, it was found that pH and sucrose had no effect on intrinsic viscosity, except at pH 3 that its intrinsic viscosity decreased as sucrose increased. Both starches at 2.5 – 4 % were found to be Pseudoplastic. Viscoelasticity of arrowroot starch gel at 20 g/dl showed that GST starch had stronger gel.

Deparment	Food Technoloogy	Student's signature……………………………………………..
Field of study	Food Technology	Advisor's signature……………………………………………..
Academic year	2003	Co-Advisor's signature……………………………………….

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิตและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ โดยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา เลาหสงคราม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และกำลังใจ ตลอดการทำวิจัย และกรุณาช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ศิษย์ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจาย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์ รองศาสตราจาย์ ดร.วรรณา ตุลยธัญ และ รองศาสตราจารย์ ดร. พัชรี ปานกุล ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ของภาควิชาเทคโนโลยีอาหารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นรากฐานอย่างดีในการศึกษาค้นคว้าวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ Professor Osato Miyawaki แห่ง The University of Tokyo ที่ ให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

งบประมาณสำหรับการวิจัย

- งบประมาณแผ่นดิน ชุดโครงการสำรวจเพื่อประเมินและวางแผนการวิจัยเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมแกษตร-อุตสาหกรรมอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งบประมาณแผ่นดิน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุดิบและข้อมูล

- ศูนย์วิจัยอ่าวคุ้งกระเบน ในพระบรมราชูปถัมภ์ จ.จันทบุรี
- อาจารย์พัชราภรณ์ แสงโยจารย์ อาจารย์สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลพระนครเหนือวิทยาเขต จ.สุรินทร์
- คุณสุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ เจ้าหน้าที่กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติ พี่ น้อง ซึ่งให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา และขอบคุณ คุณธาริน นาคศรีอาภรณ์ และเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ทัศนัย อรรถพรพิทักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง...ฌ

สารบัญรูป..ญ

บทที่

1. บทนำ..1

2. วารสารปริทัศน์..3

3. วิธีการทดลอง..31

4 ผลการทดลองและวิจารณ์...38

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..69

รายการอ้างอิง..72

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก..80

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ 8

2.2 ปริมาณอะมิโลสและอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแต่ละชนิด..........11

2.3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเท้ายายม่อมและแป้งชนิดอื่นๆ..........12

2.4 สมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95 ^{0}C 16

2.5 สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA..........18

2.6 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแต่ละชนิด..........19

2.7 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ โดยใช้ DSC..........20

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อม..........38

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชเท้ายายม่อม(โดยน้ำหนักแห้ง)..........39

4.3 ดัชนีการดูดน้ำและการละลายน้ำที่ 30^{o} C..........44

4.4 การละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ช่วงอุณหภูมิ 50 – 95^{o} C..........45

4.5 กำลังการพองตัวของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ช่วงอุณหภูมิ 50 – 95^{o} C..........45

4.6 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเท้ายายม่อม (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC)..........47

4.7 ความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมในช่วง heating-cooling cycle
(วิเคราะห์ด้วย RVA)..........48

4.8 % การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเท้ายายม่อม..........51

4.9 Freeze-thaw cycle ของสตาร์ชเท้ายายม่อม..........52

4.10 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA
ของสตาร์ช GST ความเข้มข้น6% ที่ pH ต่างๆ..........55

4.11 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA
ของสตาร์ช PST ความเข้มข้น 6 % ที่ pH ต่างๆ..........55

4.12 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA
ของสตาร์ช GST ที่ความเข้มข้นต่างๆ..........59

4.13 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA
ของสตาร์ช PST ที่ความเข้มข้นต่างๆ..........59

4.14. สมการการไหลของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่เป็นไปตาม Power law..........64

ก.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งที่เป็นแบบ A, B และ C 91

ก. 2 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA..........96

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ต้นเท้ายายม่อมพันธุ์ก้านเขียว……………………………………………………………………..3

2.2 ต้นเท้ายายม่อมพันธุ์ก้านม่วง………………………………………………………………………3

2.3 หัวเท้ายายม่อม……………………………………………………………………………………….5

2.4 เมล็ดเท้ายายม่อม…………………………………………………………………………………….5

2.5 โครงสร้างอะมิโลส……………………………………………………………………………….…9

2.6 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน…………………………………………………………………………….9

2.7 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทิน……………………………………………10

2.8 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและอสัณฐาน…………………..10

2.9 บริเวณ crystalline และ amorphous ของเม็ดแป้ง………………………………………...13

2.10 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน……………………………………14

2.11 กำลังการพองตัวของแป้งบางชนิด……………………………………………………………15

2.12 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชบางชนิด……………………………………………..15

2.13 % การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด…………………………………………..17

2.14 กลไกการเกิด syneresis และ รีโทรเกรเดชันของสตาร์ช……………………………………21

2.15 อัตราการรีโทรเกรเดชันของแป้งชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2………………………..22

2.16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งเปียก เป็นกรัมของน้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร……………………………………………24

2.17 ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของแป้ง 35 กรัม(น้ำหนักแห้ง)ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร………………………..25

2.18 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืดเมื่อสิ้นสุด heating-cooling cycle ของแป้งชนิดต่างๆ……………………………………………...25

2.19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากข้าวโพดที่ความเข้มข้น ของแป้งเปียกเป็นกรัมของน้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร……………………………26

2.20 ความสัมพันธ์ของ shear stress กับ shear rate ของของไหลแบบต่างๆ…………………29

2.21 ความสัมพันธ์ของ apparent viscosity กับ shear rate ของของไหลแบบต่างๆ………..30

3.1 กรรมวิธีการสกัดสตาร์ชเท้ายายม่อม……………………………………………………...33

4.1 SEM micrograph แสดงรูปร่างและพื้นผิวเม็ดแป้งของสตาร์ชเท้ายายม่อม…………..….40

4.2 ขนาดและการกระจายขนาดสตาร์ชเท้ายายม่อมจากการวัดโดยเครื่อง lazer particle size analyzer…………………………………………………………..41
4.3 ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อม……………………………………..42
4.4 X-ray diffraction แสดงโครงสร้างของผลึกสตาร์ชเท้ายายม่อม…………………………..43
4.5 การละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมและสตาร์ชชนิดต่างๆ…………………………………45
4.6 กำลังการพองตัวของสตาร์ชเท้ายายม่อมและสตาร์ชชนิดต่างๆ…………………………..46
4.7 Endothermic Peak ของสตาร์ชเท้ายายม่อมแสดงช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน…………47
4.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมจกาการวัดด้วยเครื่อง RVA…………48
4.9 Endothermic Peak ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมหลังเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ –20 องศาเซลเซียส นาน1, 7 และ 14 วัน……………………………………………50
4.10 % Retrogradation ของสตาร์ชเท้ายายม่อม………………………………………………51
4.11 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกสตาร์ชเท้ายายม่อมง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 ที่ pH ต่างๆ ……………………………………………………...54
4.12 ผลของ pH ต่อ Peak viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6 %…………....56
4.13 ผลของ pH ต่อความหนืดที่ 95 °Cของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6%…………...56
4.14 ผลของ pH ต่อ Final viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6 %……………57
4.15 ผลของ pH ต่อ Setback viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6%………...57
4.16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle ของสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ความเข้มข้น 4, 5, 6, 7, และ 8………………………………..59
4.17 กราฟแบบ Marzurs เปรียบเทียบความหนืดที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสตาร์ช…………….62
4.18 ผลของ pH และความเข้มข้นน้ำตาลต่อค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ช PST ที่ 30 องศาเซลเซียส……………………………………………………..64
4.19 ความสัมพันระหว่างอัตราเฉือนและ Apparent viscosity ของแป้งเปียกสตาร์ช เท้ายายม่อมที่ความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 2.5 – 4 % ในสารละลาย pH 7………….66
4.20 Creep recovery ของสตาร์ชเท้ายายม่อม………………………………………………...67
4.21 Creep recovery ของสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ความเข้มข้นน้ำตาลต่างๆ…………………..69
ก. 1 ลักษณะ Thermogram ที่ได้จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง ด้วยเครื่อง DSC……………………………………………………………………...92
ก. 2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA…………………98
ก. 3 Capillary viscosity………………………………………………………………………..96

บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมแป้งมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรโลกเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากแป้งเป็นแหล่งอาหารหลักของมนุษย์ โดยทั่วไปมีการใช้แป้งในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอาหาร เช่น ทำให้เกิดเจล ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารจำพวกซอสและซุป ป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเสียรูปเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและการละลายน้ำแข็ง(freeze-thaw) สภาวะความเป็นกรดในอาหาร กระบวนการทำพาสเจอร์ไรเซชัน(pasteurization) และ สเตอริไรเซชัน(sterilization) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้แป้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง และใช้ในการผลิตสารให้ความหวาน ผงชูรส สาคู แม้ในปัจจุบันจะมีการใช้แป้งหลายชนิด แต่ก็ยังมีการศึกษาแป้งชนิดใหม่จากแหล่งอื่นๆ ที่ยังไม่มีการศึกษา และการใช้เทคนิคการดัดแปรแป้งเพื่อให้สามารถนำแป้งไปใช้อย่างเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

อุตสาหกรรมแป้งในประเทศไทยถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปทางเกษตรกรรมหลักของประเทศ โดยมีการผลิตแป้งและสตาร์ชรวมประมาณ 3 ล้านตัน/ปี แป้งและสตาร์ชที่ผลิตมากที่สุดคือ แป้งและสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยผลิตประมาณ 2 ล้านตัน/ปี รองลงมาคือแป้งและสตาร์ชข้าวเหนียวและแป้งและสตาร์ชข้าวเจ้า ตามลำดับ(สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2545) นอกจากนี้ยังมีการผลิตแป้งชนิดอื่นๆ แบบครัวเรือนเพื่อใช้ในการประกอบอาหารคาวและขนมต่างๆ แป้งเท้ายายม่อม (*Tacca leontopetaliodes Ktze*) เป็นแป้งชนิดหนึ่งที่มีการผลิตแบบครัวเรือน โดยส่วนใหญ่ผลิตจากหัวเท้ายายม่อมที่ขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากมีการปลูกและผลิตน้อยแป้งเท้ายายม่อมจึงมีราคาแพง แป้งเท้ายายม่อมมีสมบัติในการทำให้อาหารมีความข้นหนืดสูงแม้ใช้ในปริมาณน้อย นิยมใช้ในอาหารประเภทราดหน้า กระเพาะปลา หรือนำไปใช้ร่วมกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อทำอาหารเช่น ขนมชั้น หอยทอด รวมถึงการผสมกับแป้งสาลีเพื่อทำขนมปัง และขนมเค้ก โดยการผสมกับแป้งอื่นๆจะใช้ในปริมาณมากน้อยต่างกันแล้วแต่ชนิดของอาหารเพื่อให้มีความใสและความเหนียวนุ่มที่ต้องการ (นันทวัน บุณยะประภัศร และ อรนุช โชคชัยเจริญพร, 2541) นอกจากนี้แป้งเท้ายายม่อมยังใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพหรืออาหารสำหรับผู้ป่วยฟื้นไข้ได้ (Flanch and Rumawas,1996)

จากการศึกษาโดยงานวิชาการเกษตรศูนย์วิจัยอ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรีพบว่า ต้นเท้ายายม่อมเป็นพืชที่สามารถปลูกเสริมพืชหลักและสามารถปลูกได้ง่าย ดินไม่ต้องสมบูรณ์นัก

ไม่มีปัญหาเรื่องโรคและศัตรูพืช ปัจจุบันมีการส่งเสริมการปลูก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแป้งเท้ายายม่อมที่สำคัญ อันได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณอะมิโลส อะมิโลเพกทิน ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง สมบัติการพองตัว การละลาย ความเสถียรต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็ง(freeze-thaw stability) สมบัติทางความหนืด การเกิดเจลาติไนเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน และสมบัติการไหลของแป้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการนำแป้งชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์ในแง่อุตสาหกรรมและเป็นข้อมูลเพื่อรองรับการส่งเสริมการปลูกให้แพร่หลายขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1. เท้ายายม่อม

เท้ายายม่อมเป็นพืชในวงศ์ Taccaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Tacca leontopetaloides* Ktze ชื่ออื่นๆ เช่น บุกรอ, ไม้เท้าฤาษี, สิงโตดำ, East Indian Arrowroot, Tahiti Arrowroot เป็นต้น เท้ายายม่อมมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมาเลเซีย ซึ่งเป็นแหล่งที่มีพืชต่างๆ ในตระกูล Tacca เป็นจำนวนมาก ในอดีตมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะในหมู่เกาะแปซิฟิก เช่น ฮาวาย ตาฮิติ และฟิจิ ซึ่งมีการส่งออกประมาณ 5 ตันต่อปี(Flanch and Rumawas, 1996) ส่วนใหญ่เป็นพืชป่า พบกระจายในหลายพื้นที่ เช่น เขตร้อนของทวีปแอฟริกา เอเชีย ฮาวาย ฟิจิ เป็นต้น ในประเทศไทยมีการสำรวจพบว่ามีอยู่ค่อนข้างหนาแน่นในป่าบริเวณชายทะเลฝั่งตะวันออก(ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด)และภาคใต้ โดยเป็นชนิดที่มีก้านใบสีเขียว(รูปที่ 2.1) ซึ่งแตกต่างจากที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีก้านใบสีม่วงอมน้ำตาล(รูปที่2.2) ต้นเท้ายายม่อมพันธุ์ก้านใบสีม่วงมีขนาดเล็กและเตี้ยกว่าพันธุ์ก้านใบสีเขียว (สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ, 2543)

รูปที่ 2.1 เท้ายายม่อมพันธุ์ก้านเขียว

รูปที่ 2.2 เท้ายายม่อมพันธุ์ก้านม่วง

ลักษณะทั่วไปของเท้ายายม่อม

เท้ายายม่อมเป็นพืชล้มลุก มีระบบรากแบบรากฝอย (fibrous root) มีลำต้นอยู่ใต้ดิน มีหัวใต้ดิน รูปร่างกลมแบน(รูปที่ 2.3) เกิดจากส่วนของลำต้นที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อสะสมอาหาร เป็นหัวชนิด tuberous rhizome มีใบประกอบเป็นแฉกหยักเว้า ก้านใบยาวประมาณ 30 – 70 ซม. มีสีเขียวหรือม่วงอมน้ำตาล ดอกออกเป็นช่อแบบร่ม (umbel) มีดอกย่อย 15 – 30 ดอก มีใบรองรับช่อดอกสีเขียว และใบประดับรองรับดอกย่อยมีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายหนวดยาวประมาณ 30 ซม. ซึ่งทำให้ชาวบ้านแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกพืชนี้ว่า “ ต้นหนวดแมว ” ดอกย่อยเป็นดอกสมบูรณ์เพศ โคนกลีบดอกเชื่อมติดกัน รังไข่เกิดอยู่ใต้ฐานรองดอก (inferior ovary) ส่วนผลมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมหรือรูปกรวยเมื่ออ่อนมีสีเขียวแล้วเปลี่ยนเป็นเหลืองอมเขียว สีน้ำตาล และสีดำเมื่อแก่จัด ตามลำดับ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 – 3 ซม. ผลแตกได้เมื่อแก่โดยมีเมล็ดรูปไข่สีน้ำตาลอยู่ภายในจำนวนมาก (รูปที่ 2.4)(สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ, 2543)

สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ(2543) พบว่า ต้นเท้ายายม่อมเจริญเติบโตได้ดีใต้ร่มเงาไม้ยืนต้น เติบโตได้ดีในดินร่วนปนทราย มีความต้านทานโรคและแมลงสูง มีการงอกของเมล็ดและหัวในช่วงเดือนเมษายนและเดือนพฤษภาคม และมีการพักตัว(ต้นจะตาย)ในช่วงเดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคม มีการขยายพันธุ์ได้ 2 แบบ คือ การใช้เมล็ด และการใช้หัว การใช้เมล็ดต้องใช้เวลาประมาณ 2 ปีจึงได้หัวที่สามารถผลิตแป้งได้ เนื่องจากหัวเท้ายายม่อมในปีแรกจะมีขนาดเล็ก (รูปที่ 2.3ก) ต้องทิ้งไว้ในดินหรือแปลงปลูก ในปีที่ 2 หัวเท้ายายม่อมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นมีน้ำหนักประมาณ 134 กรัม สามารถนำไปสกัดแป้งได้ แต่ถ้าปล่อยให้หัวเท้ายายม่อมเจริญถึงปีที่ 3 น้ำหนักของหัวเท้ายายม่อมจะมากถึง 295 กรัม(รูปที่ 2.3ข) สำหรับการใช้หัว พบว่าสามารถปลูกหมุนเวียนได้ทุกปี เนื่องจากหัวเท้ายายม่อมที่ปลูกเมื่อถึงระยะเวลาเก็บผลผลิตจะมีการเกิดหัวขนาดเล็กประมาณ 2- 3 หัว อยู่รอบหัวใหญ่ โดยหัวเล็กจะมีขนาดเท่ากับหัวขนาด 1 ปี ซึ่งเมื่อนำหัวเล็กไปปลูกในปีต่อไปก็สามารถนำไปผลิตแป้งได้ การเก็บผลผลิต นิยมเก็บช่วงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นระยะพักตัว ต้นเท้ายายม่อมจะเหี่ยวและตายไป เหลือแต่หัวที่สะสมอาหารไว้ ถ้าเก็บเกี่ยวก่อนช่วงที่ต้นมีการพักตัวจะได้ปริมาณแป้งที่สกัดได้น้อยลง(จีระวรรณ อานามวงศ์, 2544)

ก. หัวเท้ายายม่อมอายุ 1 ปี ข. หัวเท้ายายม่อมอายุ 3 ปี

รูปที่ 2.3 หัวเท้ายายม่อม (กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช, 2544)

รูปที่ 2.4 เมล็ดพันธุ์เท้ายายม่อม(กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช, 2544)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวเท้ายายม่อมสดประกอบด้วยเปลือก 2 – 3 % เส้นใยหยาบ 6 – 7 % แป้ง 20 – 30 % และของเสีย(กาก) 60 – 70 % และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนักแห้งของหัวเท้ายายม่อมจาก Ivory Coast พบว่า มีปริมาณโปรตีน 5.1% ไขมัน 0.2% คาร์โบไฮเดรต 89.4% เซลลูโลส 2.1% เถ้า 3.2% แคลเซียม 0.27% และฟอสฟอรัส 0.2% นอกจากนี้ยัง

พบสารให้รสขม(β-sitosterol , cerylic alcohol, taccalin, alkaloids และ steroidal sapogenins) 2.2 % (Flanch and Rumawas, 1996)

สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ (2543) และประนอม บุญช่วย (2544) ได้ทำการสกัดแป้งจากหัวเท้ายายม่อมโดยมีขั้นตอน คือ ทำความสะอาดด้วยน้ำ ขูดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยสังกะสีเจาะรู หรือปั่นด้วยเครื่องปั่นผลไม้ แช่น้ำ กรองผ่านผ้าขาวบาง 1 ชั้น น้ำที่ผ่านการกรองจะมีแป้งปนอยู่ ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 1 ชั่วโมง ส่วนที่เป็นแป้งจะนอนก้น รินน้ำส่วนบนซึ่งมีสีคล้ำทิ้งไป จากนั้นทำความสะอาดแป้งโดยล้างน้ำและกรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น ตั้งน้ำแป้งที่ได้ไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แป้งจะตกตะกอน เทน้ำส่วนบนทิ้ง ล้างแป้งอีกครั้ง ก่อนกรองด้วยผ้าขาวบาง 3 ชั้น ทำซ้ำจนน้ำที่ล้างแป้งใสขึ้น(สีคล้ำของน้ำที่ล้างหมดไป) นำแป้งที่ได้ไปทำแห้งโดยตากแดดไว้ประมาณ 1-2 วัน พบว่าปริมาณผลผลิตแป้งที่สกัดได้จากหัวเท้ายายม่อมมีประมาณ 20 % Spenneman(1992) สกัดแป้งจากหัวเท้ายายม่อมโดยวิธีคล้ายกันได้ประมาณ 10 - 25 % จีระวรรณ อานามวงศ์ (2544) พบว่าถ้าสกัดแป้งจากหัวเท้ายายม่อมที่ต้นยังไม่มีการพักตัว แป้งที่สกัดได้จะมีปริมาณน้อย(ประมาณ 10 %)

แป้งเท้ายายม่อมที่สกัดได้สามารถนำไปใช้ในการให้ความข้นหนืดแก่อาหาร เช่น ราดหน้า กะเพาะปลา ทำให้อาหารมีความข้นหนืดสูง มีความคงตัว ไม่แยกชั้น และสามารถใช้ในการทำขนมได้หลายชนิด เช่น ทำขนมชั้น ขนมเทียนแก้ว ขนมบัวลอย ขนมลืมกลืน ลอดช่องสิงคโปร์ เม็ดทับทิม ขนมกะละแม (สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ, 2543; เจริญศรี พลเวียง, 2543) นอกจากนี้แป้งเท้ายายม่อมยังมีคุณสมบัติย่อยง่ายจึงนิยมใช้เป็นอาหารสำหรับคนป่วยอ่อนเพลีย ไม่มีกำลัง เด็กเล็ก หรือคนป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบการย่อยอาหาร (Spenneman, 1992; Flanch and Rumawas, 1996)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่มีสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยอาจแบ่งชนิดของแป้งได้เป็น 3 ประเภท ตามแหล่งที่พบ คือ แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ถั่วเขียว แป้งจากรากหรือหัว เช่น มันเทศ มันฝรั่ง มันสำปะหลัง หัวเท้ายายม่อม และแป้งจากลำต้น เช่น สาคู แป้งจากแต่ละแหล่งและชนิดมีลักษณะสำคัญทางเคมีและกายภาพเฉพาะตัว เช่น ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง อุณหภูมิในการเกิดเจล(gelatinization temperature) การพองตัว

(swelling) การคืนตัว (retrogradation) ความหนืดของแป้งเปียก (paste) เป็นต้น เป็นเหตุให้แป้งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกัน (Richard, 1968)

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแป้งมีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูป เช่น ปริมาณแป้งจะให้ลักษณะสัมพันธ์กับความเหนียวนุ่ม ขนาดของเม็ดแป้งสัมพันธ์โดยตรงกับเนื้อสัมผัส (texture) ปริมาณอะมิโลสมีผลต่อรสชาติ ความเหนียวนุ่ม ส่วนอะมิโลเพกตินมีผลต่อการดูดน้ำ (hydration) การพองตัวและการเกิดเจลาติไนเซชัน (Madamba , Bustrillose, and San pedro, 1975) โดยลักษณะเด่นของแป้งแต่ละชนิดเป็นผลเนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนของปริมาณอะมิโลสกับอะมิโลเพกติน ความยาวของสายโมเลกุลของอะมิโลส ความยาวของสายโมเลกุลสาขาของอะมิโลเพกติน และขนาดของโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน(Jane and Chen, 1991 ; กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ก็มีผลต่อสมบัติของแป้งด้วย

2.2.1. **สมบัติทางเคมี**

แป้งประกอบด้วยคาร์บอน 44.4 % ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4 % ซึ่งอยู่ในรูปพอลิเมอร์ของ α-D glucose และสารตัวกลาง ได้แก่ ไขมัน โปรตีน ฟอสฟอรัส และเถ้า ซึ่งมีความสำคัญต่อสมบัติของแป้ง โดยไขมันจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดฟิล์มและแป้งเปียก(paste) ที่มีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น เนื่องจากไขมันจะรวมตัวกับอะมิโลสเกิดเป็น inert complex และกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไนโตรเจนหรือโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งมีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลาติไนซ์เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังทำให้เกิด Maillard reaction ทำให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปได้ ฟอสฟอรัสทำให้ผิวของแป้งมีประจุเป็นลบ จึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบทำให้เกิดการพองตัวง่ายขึ้น และมีความหนืดสูงขึ้น แป้งที่มีฟอสฟอรัสสูง ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง ส่วนเถ้าซึ่งเป็นส่วนที่เหลือของการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ สารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และ แคลเซียม ปกติจะไม่มีผลต่อสมบัติของแป้ง(กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

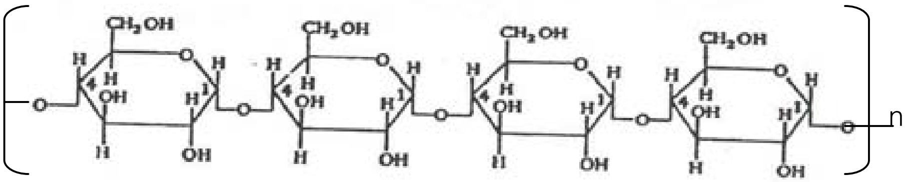
ศิริพรรณ หวังอารีย์ และ นพรัตน์ แซ่อึ้ง (2528) พบว่า แป้งเท้ายายม่อม มีคาร์โบไฮเดรต 94.25 % โปรตีน 0.23 % ไขมัน 0.1 % เถ้า 0.12 % ความชื้น 14.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีกับแป้งจากธัญพืช(ตารางที่ 2.1) พบว่ามีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าในปริมาณน้อย และมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับแป้งจากหัวเช่น แป้งมันสำปะหลัง

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4-glucosidic linkage (รูปที่ 2.5) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากจึงทำให้สามารถจับกับโมเลกุลแป้งชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น อะมิโลสจับกับอะมิโลเพกตินด้วยพันธะเกลียวคู่(double helices) และพันธะเกลียวเดี่ยว (single helices) ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง (Bowers, 1992) นอกจากนี้อะมิโลสยังสามารถจับกับไขมันเป็นสารประกอบเชิงซ้อน(amylose-lipid complex) ที่มีความคงทน การทำลายพันธะนี้ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส (Kugimiya, Donovan, and Wong,1980)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ

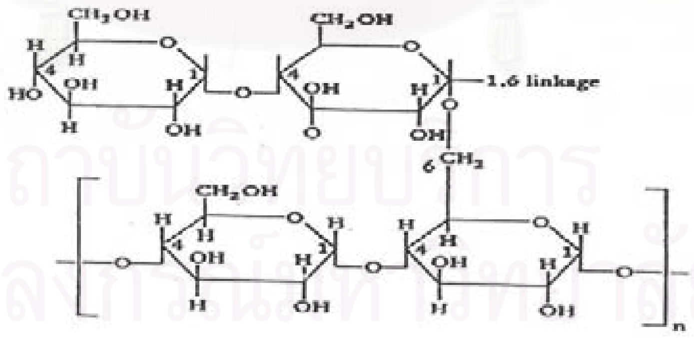
ชนิดแป้ง	% ความชื้น	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	13	0.60	0.35	0.10	0.015
แป้งมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.40	0.080
แป้งสาลี	14	0.80	0.40	0.15	0.060
แป้งมันสำปะหลัง	13	0.10	0.10	0.20	0.010
แป้งข้าวฟ่าง	13	0.70	0.30	0.08	-
แป้งข้าวเจ้า	-	0.80	0.45	0.50	0.100
แป้งสาคู	-	0.10	0.10	0.20	0.020
แป้งมันเทศ	13	0.40	-	0.20	0.070
แป้ง amylomaize	13	-	-	0.10	-
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	13	0.2	0.25	0.07	0.007

ที่มา : Swinkels(1985b)



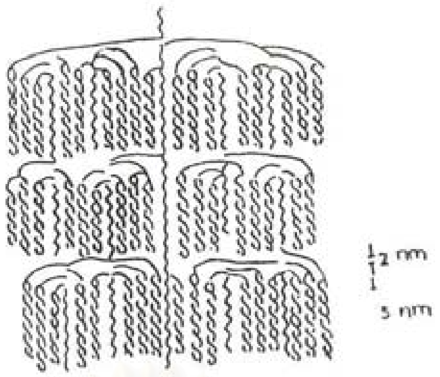
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะมิโลส(Penfield and Campbell, 1990)

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,6-glucosidic linkage (รูปที่ 2.6) อะมิโลเพกตินมีน้ำหนักมากกว่าอะมิโลสประมาณ 1,000 เท่า คือ ประมาณ $10^7 – 10^9$ ดาลตัน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่กว่าและมีกิ่งสาขาทำให้มีการคืนตัวต่ำ อะมิโลเพกตินสามารถเกิดเกลียวคู่(รูปที่2.7) โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม(cluster)เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน (Hizukuri, 1986) ดังนั้นจึงทำให้อะมิโลเพกตินมีความสำคัญมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ โดยอะมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวกันได้ทำให้เกิดโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก(crystallite region) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) (รูปที่ 2.8) ซึ่งรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้ ส่วนอะมิโลสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดส่วนที่เป็นผลึกได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

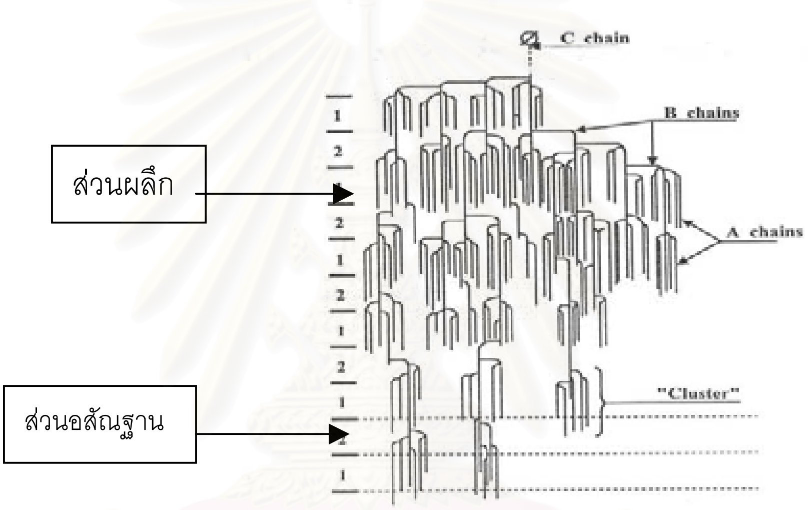


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน(Penfield and Campbell, 1990)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะมิโลเพกติน(Hizukuri, 1986)



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและอสัณฐาน(Robin *et al.*, 1974)

อัตราส่วนของปริมาณอะมิโลสต่ออะมิโลเพกตินมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ความเหนียวและความใสของแป้งเปียกที่ได้หลังจากการเกิดเจล ทั้งยังมีผลต่อเนื้อสัมผัสเนื่องจากสมบัติของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินมีความแตกต่างกัน คือ อะมิโลสเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ดีเมื่อต้มในน้ำจะหนืดน้อยกว่า แต่ขุ่นมากกว่า ส่วนอะมิโลเพกทินจะข้นหนืดและใสกว่า เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นอะมิโลสจะจับเป็นเจลได้ ส่วนอะมิโลเพกทินจะไม่จับเป็นเจล แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีอุณหภูมิในการพองตัวสูงกว่าปกติเมื่อทำให้เกิดการพองตัวอย่างสมบูรณ์ การคืนตัวของแป้งที่มีอะมิโลสน้ำหนักโมเลกุลต่างกันจะให้ผลที่ต่างกัน(Whistler and Smart, 1953) ศิริพรรณ หวังอารีย์ และ นพรัตน์ แซ่อึ้ง (2528) รายงานว่าแป้งเท้ายายม่อมมีอะมิโลส 14 % ซึ่งมีปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น(ตารางที่2.2) อย่างไรก็ตามจากการสำรวจแป้งเท้ายายม่อม

ในประเทศไทยพบว่า แป้งเท้ายายม่อมที่จำหน่ายในตลาดส่วนใหญ่เป็นแป้งผสมแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่ชัดเจน

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะมิโลสและอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแต่ละชนิด

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะมิโลส	อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน(°C) *
ข้าวโอต	23	60.7
ข้าวไรน์	26	61.3
ข้าวสาลี	23	63.5
ข้าวฟ่าง	25	72.2
ข้าวเจ้า	17	70.0
ข้าวโพด	27	71.3
Waxy maize	0	72.7
สาคู	28	70.5
มันฝรั่ง	22	67.3
มันเทศ	20	70.0
มันสำปะหลัง	18	66.0

* จุดกึ่งกลางในช่วงการเกิดเจลาติไนเซชัน

ที่มา : Oates (1996)

2.2.2. สมบัติทางกายภาพ

ก.ลักษณะของเม็ดแป้ง

แป้งส่วนใหญ่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น ขนาดและรูปร่างเม็ดแป้ง (granule)แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง(Oates, 1997) โดยเม็ดแป้งของข้าวมีขนาดเล็กที่สุดและมีรูปร่างหลายเหลี่ยม ส่วนเม็ดแป้งมันฝรั่งมีขนาดใหญ่ที่สุดและมีรูปร่างเป็นรูปไข่ การตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่รวดเร็วและง่ายที่สุด สามารถตรวจสอบลักษณะต่างๆ ได้ เช่น รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของเม็ดแป้ง และตำแหน่งของ hilum รวมทั้งสามารถตรวจสอบความเสียหายและการปนเปื้อนของแป้งชนิดอื่นได้อีกด้วย การตรวจสอบลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ สามารถทำได้ทั้งภายใต้แสงปกติ(normal light) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าผู้

ใช้ไม่มีความชำนาญ ผลที่ได้อาจผิดพลาดได้และยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถดูโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดแป้งได้ เนื่องจากกำลังขยายไม่เพียงพอ ดังนั้นการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) สามารถตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดแป้งได้อย่างละเอียด เนื่องจากมีกำลังขยายมากกว่าหลายร้อยเท่า และสามารถดูพื้นผิวของเม็ดแป้งซึ่งมีรอยแตกหรือรอยร้าวของเม็ดแป้ง(กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

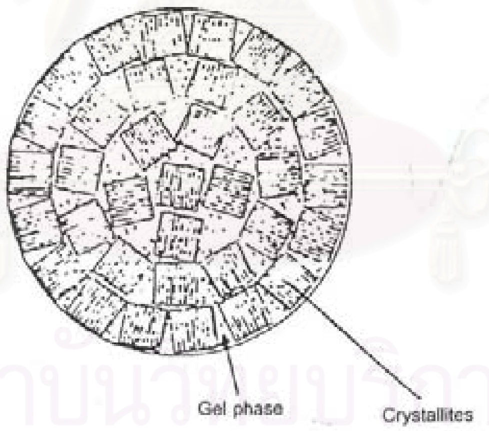
Magningat และ Seib(1992) ได้ศึกษาขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเท้ายายม่อมพบว่ามีลักษณะเป็นรูปไข่มีรอยตัด ขนาดอยู่ในช่วง 13 - 70 ไมครอน ส่วนในประเทศไทยมีการศึกษาพบว่าเม็ดแป้งมีรูปร่างกลม ปลายข้างหนึ่งตัดคล้ายถ้วย เม็ดแป้งมีขนาด 6 - 22 ไมครอน (ศิริพรรณ หวังอารีย์ และ นพรัตน์ แซ่อึ้ง, 2528) สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ(2543)รายงานว่าในขั้นตอนการผลิตแป้ง การตกตะกอนแป้งใช้เวลาประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าแป้งชนิดอื่นที่ต้องใช้การ centrifuge ช่วยในการตกตะกอน แสดงว่าเม็ดแป้งเท้ายายม่อมมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเม็ดแป้งชนิดอื่นๆ(ตารางที่ 2.3) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ศึกษาโดย Magningat และ Seib(1992)

ตารางที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเท้ายายม่อมและแป้งชนิดอื่นๆ

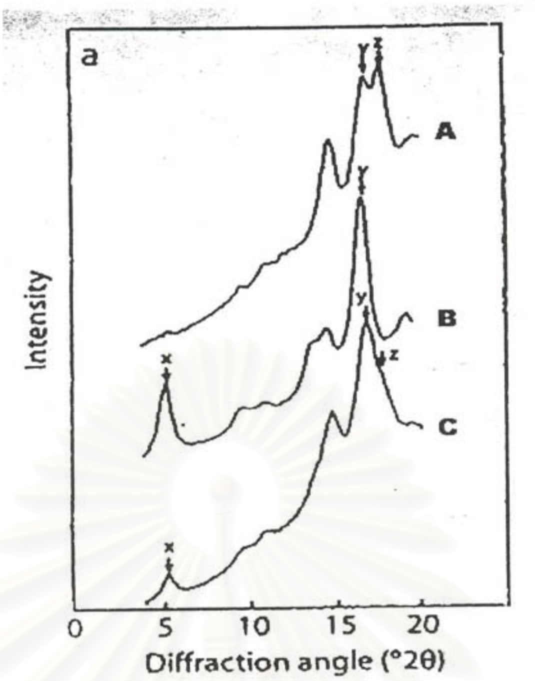
แหล่งแป้ง	ขนาด(ไมครอน)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2 - 35	กลม ค่อนข้างรี
ข้าวโพด	5 - 25	กลม แบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3 - 5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2 - 35	กลม คล้ายไข่
ข้าวฟ่าง	15 - 35	กลม แบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอต	5 - 8	กลม แบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10 - 50	กลม ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8 - 20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

ที่มา : Magningat and Seib(1992)

แป้งที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็กซึ่งมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) (รูปที่ 2.9) จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเม็ดแป้งด้วยเครื่องมือ wide angle X-ray diffraction(WAXS) (รูปที่ 2.10) พบว่าเม็ดแป้งโดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างผลึกได้ 3 แบบ คือ ผลึกแบบ A เป็นการเรียงตัวของโครงสร้างแบบหนาแน่นมาก มี peak ขึ้นที่มุมหักเห(diffraction angle) 17° และ 17.9° พบในแป้งจากธัญพืช ผลึกแบบ B มีการเรียงตัวกันหลวมๆ มี peak ขึ้นที่มุมหักเห 5.6° และ 17° พบในแป้งจากพืชหัว และผลึกแบบ C จะมีการเรียงตัวผสมกันระหว่างแบบ A และแบบ B (5.6°, 17° และ 17.9°) พบในแป้งจากพืชตระกูลถั่ว (Hoseney, 1994) ส่วนผลึกของอะมิโลสที่เกิดร่วมกับองค์ประกอบอื่นๆ จะให้ X-ray diffraction pattern แบบ V เช่น อะมิโลสรวมตัวกับไขมันเป็น amylose-lipid complex เกิดโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง รูปแบบของผลึกสามารถพิจารณาได้จากตารางมาตรฐานของ Zobel(1964) ดังตารางที่ ก.1 นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการปฏิบัติ(treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น การดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ



รูปที่ 2.9 บริเวณ crystallites และ amorphous ของเม็ดแป้ง(ดัดแปลงจาก French, 1975)



รูปที่ 2.10 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน (Brogracheva *et al.*, 1998)

(A) แป้งข้าวโพด ผลึกแบบ A

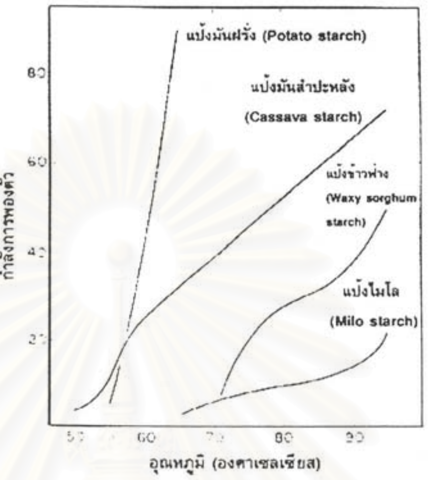
(B) แป้งมันฝรั่ง ผลึกแบบ B

(C) แป้งถั่ว ผลึกแบบ C

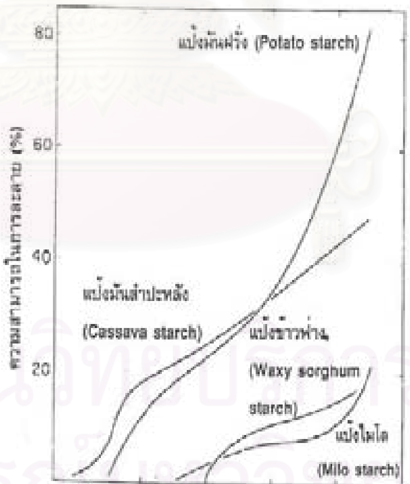
ข. กำลังการพองตัว(Swelling power)**และการละลาย**(Solubility)

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ โดยทั่วไปเม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำในบรรยากาศได้จนเกิดความสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ดูดซึมจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% ที่อุณหภูมิต่ำแป้งสามารถดูดน้ำได้ประมาณ 25 – 30 % และมีการพองตัวน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตได้ (Kerr, 1950) การให้ความร้อนแก่น้ำแป้งทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดน้ำตลอดเวลาที่ให้ความร้อน พองตัวเป็นหลายเท่าของขนาดเดิม และมีโมเลกุลอะมิโลสละลายออกมาในน้ำที่อยู่บริเวณรอบๆเม็ดแป้ง(Bowers,1992) กำลังการพองตัวของแป้งแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่แยกออกด้วยการปั่นเหวี่ยง กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ซึ่งพบว่าการ

ละลายและการพองตัวมีความสัมพันธ์กัน โดยทั่วไปพบว่าเมื่อแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จะเกิดรอยแตกบนเม็ดแป้ง ทำให้เกิดการไหลออกมาของอะมิโลส ส่งผลให้การละลายสูงขึ้น(กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.11 กำลังการพองตัวของสตาร์ชบางชนิด(Leach, McCowen, and Schoch, 1959)



รูปที่ 2.12 ความสามารถในการละลายของสตาร์ชบางชนิด(Leach, McCowen, and Schoch, 1959)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งได้แก่ ชนิดของแป้ง เช่น แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนราก และแป้งจากส่วนหัว ความแตกต่างกันของการพองตัวและความสามารถในการละลายเกิดจากจำนวนอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง เช่น จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในอะมิโลเพกติน รวมถึงน้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน สารเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน โปรตีนและฟอสฟอรัส ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว เป็นต้น (Leach, McCowen, and Schoch 1959) แป้งเท้ายายม่อมมีการละลายสูงสุด 28 % ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และมีกำลังการพองตัวเท่ากับ 54 % ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Leach, McCowen, and Schoch,1959; Swinkels,1985a; ศิริพรรณ หวังอารีย์ และ นพรัตน์ แซ่อึ้ง, 2528) ซึ่งแป้งเท้ายายม่อมมีกำลังการพองตัวและการละลายปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ(ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 สมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95 ^{0}C

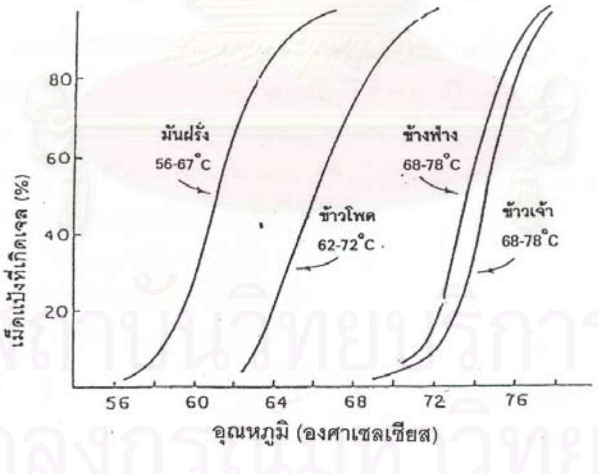
แป้ง	กำลังการพองตัว(%)	การละลาย(%)
มันฝรั่ง	>1,000	82
สาคู	97	39
Canna	72	37
มันสำปะหลัง	71	48
ข้าวโพดข้าวเหนียว	64	23
ข้าวเจ้าข้าวเหนียว	56	13
เท้ายายม่อม	**54**	**28**
ข้าวฟ่างข้าวเหนียว	49	19
มันเทศ	46	18
ข้าวโพด	24	25
ข้าวฟ่าง	22	22
ข้าวสาลี	21	41
ข้าวเจ้า	19	18
Chick pea(Garbanzo)	13	15
Wrinkled pea	6	19
High-amylose corn	6	12

ที่มา : Leach, McCowen, and Schoch(1959)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. การเกิดเจลาติไนเซชัน

การเกิดเจลาติไนเซชันเป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว และการดูดซึมน้ำของเม็ดแป้งในขณะที่ได้รับความร้อน ซึ่งน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น การศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งทำให้ทราบถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันซึ่งนำไปใช้ในการกำหนดการให้ความร้อนต่อแป้งที่นำไปใช้ นอกจากนี้การศึกษาด้วยเครื่องมือบางชนิด เช่น Brabender visco analyzer หรือ RVA ยังทำให้ทราบ heating-cooling cycle ของแป้งซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ แป้งแต่ละชนิดมีการเกิดเจลาติไนเซชันที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.13) อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยส่วนใหญ่พืชหัวจะมีการเกิดเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำ เช่น แป้งมันฝรั่งเนื่องจากแป้งชนิดนี้มีฟอสฟอรัสอยู่ด้วยทำให้เกิดประจุผลักเม็ดแป้งให้ออกจากกัน และเม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ทำให้พองตัวได้ง่าย เม็ดแป้งจึงมีการพองตัวได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดเจลาติไนเซชันเร็วขึ้น ส่วนแป้งข้าวโพด แป้งข้าวฟ่าง และแป้งข้าวเจ้า มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูง เนื่องจากแป้งดังกล่าวมีปริมาณไขมันสูง และมีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่ง ไขมันสามารถรวมตัวกับอะมิโลสได้ ทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น การพองตัวจึงลดลงและทำให้เกิดเจลาติไนเซชันช้าลง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.13 % การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด(Sanders, 1996)

Rapid Visco Analyzer(RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน หลักการทำงานคล้าย Brabender visco analyzer แต่มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิให้ร้อนและเย็นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ และสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ทำให้การหา pasting curve ใช้เวลาน้อยลงเนื่องจากมี

กลไกในการให้ความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า (Thiewes and Steeneken, 1997) เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA และเครื่อง Brabender visco analyzer พบว่ามีค่าความสัมพันธ์กันสูง(r = 0.94)ในทุกจุดที่เปรียบเทียบ ยกเว้นจุดที่แสดงการเกิด final viscosity จะมีความสัมพันธ์กันต่ำ(r = 0.74) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการคืนตัวของแป้งต้องใช้ระยะเวลามาก (Haasse, Mintus, and Weipert, 1995) สำหรับการศึกษา heating-cooling cycle พบว่า RVA ใช้ตัวอย่างน้อยกว่า สามารถทำซ้ำได้และใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นกว่า ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ heating-cooling cycle คือ 13 นาที โดยมีอัตราการให้ความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราทำให้เย็น 12 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยแป้งธัญพืชส่วนใหญ่เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งข้าวฟ่าง จะมี gelatinization temperature สูงกว่า แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง(ตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.5 สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

แป้ง	Gelatinization temperature (^{0}C)	Peak viscosity	Breakdown	Setback	Paste type	Paste clarity
ข้าวสาลี	52 - 65	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง/สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	62 -72	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพดข้าวเหนียว	63 - 72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
ข้าวฟ่าง	68 - 78	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเจ้า	61 - 78	ปานกลาง	ต่ำ/สูง	ปานกลาง /สูง	สั้น	ทึบแสง
มันสำปะหลัง	50 -68	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
มันฝรั่ง	56 - 69	สูง	สูง	ปานกลาง	ยาว	โปร่งแสง
สาคู	60 - 72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง

(ที่มา : Newport Scientific Pty,Ltd.,1995)

การเกิดเจลาติไนซ์ไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิประมาณ 8 – 12 ^{0}C (Schoch and Maywald, 1968) การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันโดยวิธีอื่น เช่น Kolfer gelatinization temperature range ซึ่งเป็นการวัดโดยสังเกตการหายไปของ birefringence ที่ 5 %, 50 % และ 95% ในระหว่างเกิดเจลาติไนเซชันภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เมื่อเปรียบเทียบ Kolfer gelatinization temperature range กับวิธีอื่นๆ (ตารางที่ 2.6) จะพบว่าช่วงอุณหภูมิการเกิด gelatinization จะกว้างกว่าการวัดด้วย RVA และ Brabender visco analyzer

ตารางที่ 2.6 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งแต่ละชนิด

แป้ง	Kofler Gelatinization temperature range (^{0}C)[a]	Brabender Pasting Temperature (8%;^{0}C)[b]	Brabender Peak Viscosity (8%;BU)[b,c]
แป้งข้าวโพด	62 - 67- 72	75 - 80	700
แป้งมันฝรั่ง	58 - 63 - 68	60 - 65	3,000
แป้งสาลี	58 - 61 - 64	80 - 85	200
แป้งมันสำปะหลัง	59 - 64 - 69	65 - 70	1,200
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	63 - 68 - 72	65 - 70	1,100
แป้งข้าวฟ่าง	68 - 74 - 78	75 - 80	700
แป้งข้าวเจ้า	68 - 74 - 78	70 - 75	500
แป้งสาคู	60 - 66 - 72	65 - 70	1,100
แป้งเท้ายายม่อม	62 - 66 - 70	-	-
แป้ง amylomaize	67 - 80 - 92	90 - 95	-
แป้งมันเทศ	58 - 65 - 72	65 - 70	-

(ที่มา : Swinkels, 1985b)

[a]Kofler hot-stage microscope เป็นวิธีหนึ่งในการวัดอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง

[b]starch concentration, 8%db

[c]BU = Brabender Unit

นอกจากนี้ยังอาจศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ การวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งด้วยเครื่อง DSC ทำโดยการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาติไนเซชัน ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูป thermogram (รูปที่ ก.1) ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถวิเคราะห์หาพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชัน ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ ซึ่งวิเคราะห์โดยเครื่อง DSC แสดงในตารางที่ 2.7

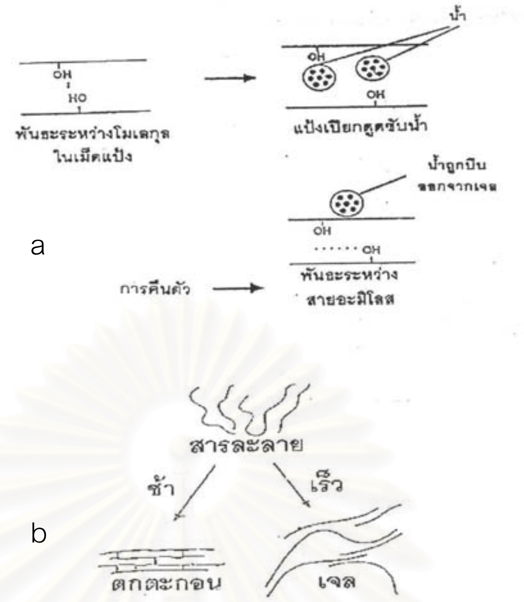
ตารางที่ 2.7 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ โดยใช้ DSC

แป้ง	อุณหภูมิ (^{o}C)
แป้งข้าวโพด	70 – 89
แป้งมันฝรั่ง	57 – 87
แป้งสาลี	50 – 86
แป้งมันสำปะหลัง	68 – 92
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	68 – 90

ที่มา : Swinkels(1985b)

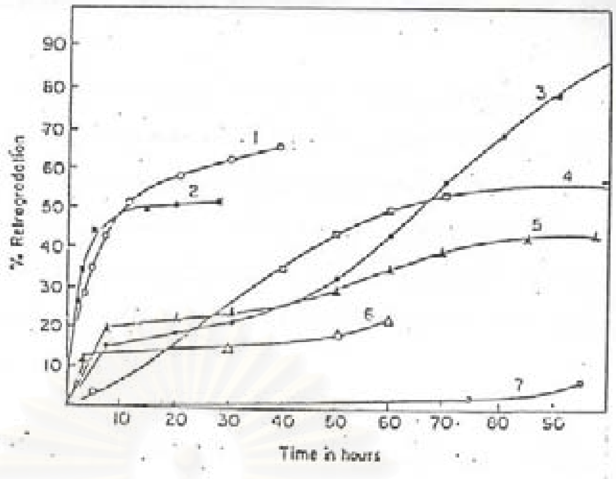
ง. การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้การพองตัวเพิ่มขึ้นจนพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีการจัดตัวของโมเลกุลอะมิโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำได้ และไม่มีการดูดน้ำกลับเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือการคืนตัว (Smith, 1979) และเมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่ภายในเม็ดแป้งถูกบีบตัวออกมานอกเจล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองทำให้เจลมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมีลักษณะขาวขุ่น ทึบแสง การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีกลไกในรีโทรเกรเดชันและ syneresis ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิด syneresis และ รีโทรเกรเดชันของสตาร์ช
a.กลไกการเกิด syneresis b. กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชัน
(ดัดแปลงจากFruton and Simmonds,1958)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งชนิดต่างๆ (รูปที่ 2.15) แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี เกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าแป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันเทศ แป้งมันสำปะหลัง และ แป้ง arrowroot (*Malanta audinaceae*) สำหรับแป้ง waxy corn ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสน้อย ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ช้ากว่า ส่งผลให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้น้อย ส่วนแป้งมันฝรั่งมีการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงเนื่องจากเม็ดแป้งมันฝรั่งมีขนาดใหญ่กว่าแป้งหัวชนิดอื่นจึงมีความทนทานต่อความร้อนน้อยกว่าเม็ดแป้งขนาดเล็ก ทำให้เม็ดแป้งมันฝรั่งพองตัวและแตกตัวได้ง่าย เมื่อเม็ดแป้งมีการแตกตัว อะมิโลสจะละลายหลุดออกมาได้มากกว่า ทำให้เมื่อเจลเย็นตัวลง อะมิโลสที่หลุดออกมามากสามารถจับตัวด้วยพันธะไฮโดรเจนได้มากขึ้น ทำให้แป้งเกิดการรีโทรเกรเดชันได้มาก (Collison, 1968)



รูปที่ 2.15 อัตราการรีโทรเกรเดชันของแป้งชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 (Collison,1968)

1. แป้งข้าวโพด 2. แป้งสาลี 3. แป้งมันฝรั่ง
4. แป้งมันเทศ 5. แป้ง arrowroot 6. แป้งมันสำปะหลัง
7. แป้ง waxy corn

Doremus, Crenshaw, และThurber(1951) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง ได้แก่ **อุณหภูมิ** การรีโทรเกรเดชันของเจลจะเกิดเร็วขึ้นถ้าเก็บเจลแป้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำทำให้อะมิโลสเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้เกิดการจับตัวกันได้เร็ว **ระยะเวลา** การยึดเกาะขึ้นเป็นโครงสร้างจะแน่นขึ้นเมื่อเวลามาก **ปริมาณและขนาดของโมเลกุล** แป้งที่มีอะมิโลสอยู่มากจะมีการรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีอะมิโลสน้อย เช่น แป้งจากธัญพืชมีอะมิโลสมากกว่าแป้งจากพืชหัว ทำให้มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าแป้งจากพืชหัว และโมเลกุลของอะมิโลสขนาดปานกลางจะเกิดการรีโทรเกรเดชันเร็ว เนื่องจากถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่เกินไปจะใช้เวลาในการยึดจับกันนาน ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะมีการเคลื่อนไหวแบบ Brownian อยู่ตลอดเวลาจนไม่สามารถยึดจับกันได้ **ความเป็นกรด-เบส** สารละลายกรดสามารถทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันที่เร็ว แต่ในสารละลายเบส การรีโทรเกรเดชันเกิดอย่างช้าๆ เพราะโมเลกุลของอะมิโลสแตกตัวออก จึงไม่สามารถจับกันได้ง่าย โดยที่ pH 5 – 7 แป้งจะมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วที่สุด

การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งอาจทำได้หลายวิธี ได้แก่ การพิจารณาค่า total setback ของแป้งที่วัดได้โดยเครื่อง Brabender visco amylograph หรือ Rapid visco analyzer (Miles, Morris, and Ring,1985) หรือพิจารณาค่าเอนทาลปี(ΔH)ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะเก็บเจลแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter(DSC) โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (เอนทาลปี, $\Delta H_{gelatinization}$)และค่าพลังงานในการรีเจลาติไนเซชันหรือค่าพลังงานในการเกิดรีโทรเกรเดชัน(เอนทาลปี, $\Delta H_{retrogradation}$) (Stevens and Elton, 1971) และคำนวณค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันได้จากสมการ

$$\% \text{ retrogradation} = \frac{\Delta H_{retrogradation} \times 100}{\Delta H_{gelatinization}}$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถตรวจสอบได้จากการวัดค่า freeze-thaw stability ของเจลแป้ง(Schoch, 1968) โดยสามารถบอกแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันจากปริมาณน้ำที่เกิดจาก syneresis ของเจลแป้ง ซึ่งเจลแป้งที่เกิด syneresis มากแสดงว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันมาก Varavinit, Anuntavuttikul, และ Shobsngob(2000)พบว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมี freeze-thaw stability ต่ำ และขั้นตอนในการ freeze-thaw มีผลต่อ stability ของเจลแป้ง โดยการ freeze ที่อุณหภูมิต่ำ(-20^{o}C) และการ thaw ที่อุณหภูมิสูง(90^{o}C) สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้

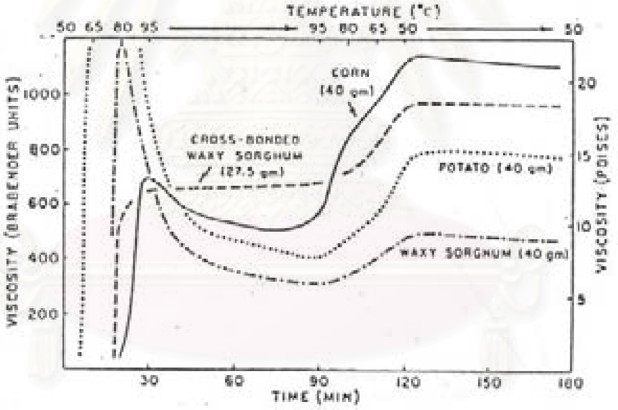
จ. สมบัติทางความหนืดของแป้งเปียก

แป้งที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารจะอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวเป็นส่วนมาก คือ อยู่ในลักษณะที่เรียกว่า แป้งเปียก(paste) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของแป้งเปียกที่ควรคำนึงถึงในแง่การใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิการเกิดเจล ความสม่ำเสมอของขนาดเม็ดแป้ง ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกในขณะเกิดเจล เสถียรภาพของแป้งเปียกต่อสภาพการได้รับความร้อนและการกวน การคืนตัวหรือการเพิ่มขึ้นของความหนืดในช่วงที่แป้งเปียกมีอุณหภูมิลดลง เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาลักษณะที่สำคัญของแป้งเปียกเพื่อประโยชน์ในการใช้งาน จึงทำโดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก

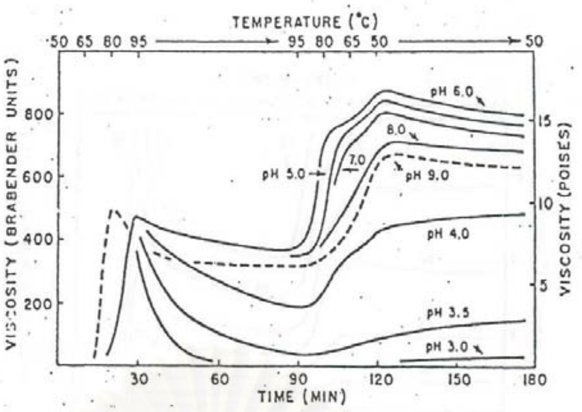
Schoch (1985) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating-cooling cycle จากแป้งชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Brabender visco amylograph พบว่า แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.16) และ pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด (รูปที่ 2.17) เมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืดเมื่อสิ้น

สุด heating-cooling cycle (รูปที่ 2.18) พบว่า แป้งข้าวโพดมีเสถียรภาพสูงสุดที่ pH 6.0 เมื่อ pH ต่ำกว่า 4.5 ความหนืดจะลดลงมาก แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และ waxy sorghum เปลี่ยนแปลงความหนืดได้ง่ายในสภาพเป็นกรด ความหนืดจะลดลงอย่างมากเมื่อ pH ต่ำกว่า 5 และแป้ง cross-bonded waxy sorghum มีเสถียรภาพดีโดยสามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ถึง pH 3.5 และเมื่อ pH สูงกว่า 6.0 แป้งข้าวโพด และแป้ง waxy sorghum จะมีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าที่ pH 6.0

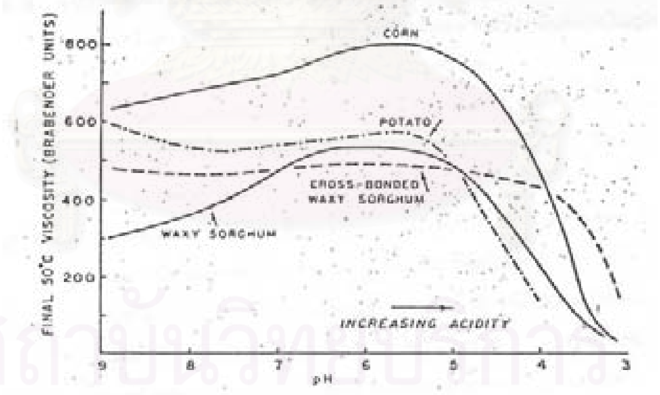
Marzurs, Schoch, และ Kite (1957) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกที่ความเข้มข้นต่างๆ ในช่วง heating-cooling cycle ด้วยเครื่อง Brabender viscoamylgraph พบว่า ความเข้มข้นของแป้งเปียกมีผลต่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืด (รูปที่ 2.19) ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก จะทำให้สามารถเข้าใจถึงลักษณะที่สำคัญของแป้ง อันจะเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งาน ซึ่งปัจจัยที่มีบทบาทเกี่ยวข้อง ได้แก่ pH และ ความเข้มข้นของแป้ง



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งเปียกเป็นกรัมของน้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร (Schoch, 1985)

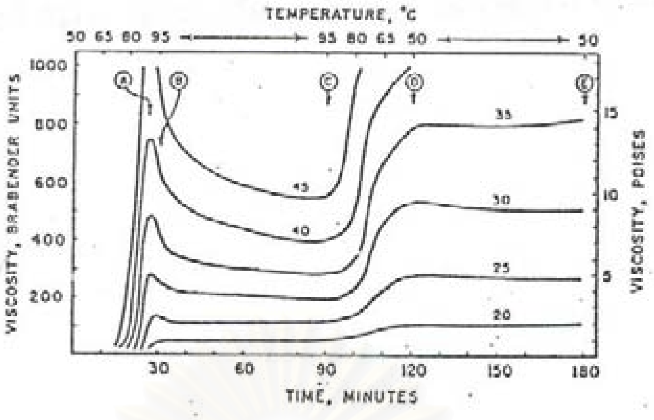


รูปที่2.17 ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของแป้ง 35 กรัม(น้ำหนักแห้ง)ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร (Schoch, 1985)



รูปที่ 2.18 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความหนืดเมื่อสิ้นสุด heating-cooling cycle ของแป้งชนิดต่างๆ (Schoch, 1985)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจากข้าวโพดที่ความเข้มข้นของแป้งเปียกเป็นกรัมของน้ำหนักแห้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร(Schoch, 1985)

ซ. สมบัติการไหลของสตาร์ช

สมบัติการไหล มีความสำคัญต่อการทำนายพฤติกรรมของสตาร์ชในระหว่างกระบวนการแปรรูป โดยลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส สมบัติของ paste และความหนืดของสตาร์ชเป็นปัจจัยสำคัญ ในการเลือกสตาร์ชเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Islam and Mohd, 1997) สมบัติการไหลของสตาร์ชที่เป็นส่วนประกอบในอาหารขึ้นอยู่กับธรรมชาติและรูปแบบของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ช โครงสร้างทางเคมี และแรงกระทำระหว่างโมเลกุล (Mani *et al*., 1992) ความหนืดเป็นสมบัติการไหลที่สำคัญสำหรับอาหารเหลว เช่น อาหารจำพวกซุป ซอส คัสตาร์ด และเครื่องดื่ม เป็นต้น (Evans and Haisman, 1975) สมบัติทางกายภาพของ paste และเจลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ช และปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่แยกออกมาจากเม็ดสตาร์ชระหว่างที่ให้ความร้อน (Islam, Mohd, and Noor, 2001) Morris(1989) รายงานว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของพอลิแซคคาไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง เกิดเนื่องจากการ overlap และ/หรือการแทรกตัว (interpenetration) ของสายโมเลกุลหนึ่งกับอีกสายโมเลกุลหนึ่ง การ overlap กันของสายโมเลกุลเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นวิกฤต (critical concentration) ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างทันที ในแง่ของโมเลกุล การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีนี้คือการที่สายโมเลกุลของพอลิเมอร์ในส่วนกระจาย (dispersions) เริ่มมีการพันกัน (entanglement) เกิด coil overlap ซึ่งสามารถ characterize ได้จากค่า intrinsic viscosity ซึ่ง intrinsic viscosity เป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งบ่งถึงปริมาตรของ

พอลิเมอร์เมื่ออุ้มตัวทำละลายไว้แล้วและเคลื่อนที่โดย hydrodynamic และยังบ่งถึงขนาดและรูปร่างของโมเลกุลได้ (Tanglertpaibul and Rao, 1987) สมบัติการไหลของสตาร์ชสุกในตัวทำละลายแบ่งเป็น 3 ช่วงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ชดังนี้

1. Dilute solution ในสารละลายเจือจางเม็ดสตาร์ชสุกอยู่ห่างจากกันมาก จึงไม่มี granule-granule interaction ทำให้ความหนืดของสารละลายสตาร์ชเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น

$$\eta_s = \eta_0(1 + [\eta]C)$$

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_s}{\eta_0} = (1 + [\eta]C)$$

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 = (\eta_s/\eta_0) - 1$$

เมื่อ η_0 = viscosity ของตัวทำละลาย (mPa*s)

η_s = viscosity ของสารแขวนลอยสตาร์ชสุก (mPa*s)

η_{rel} = relative viscosity

C = concentration (g/dl)

$[\eta]$ = intrinsic viscosity (dl/g)

η_{sp} = specific viscosity

$$[\eta] = \lim_{c \to 0} \frac{\eta_{sp}}{C}$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่า intrinsic viscosity ที่ความเข้มข้นต่ำเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งสารละลายจะแสดงพฤติกรรมแบบ Newtonian การวัดส่วนใหญ่ใช้ capillary viscometer McMilan(1974) รายงานว่า reduced viscosity เขียนในรูปสมการของ Huggin ได้ดังนี้

$$\eta_{red} = \eta_{sp}/C = [\eta] + k'[\eta]^2C$$

เมื่อ η_{red} = reduced viscosity

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

k = ค่าคงที่ของ Huggin ซึ่งบอกถึง gelatinized starch granule solvent interaction ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าสตาร์ชสุกชอบตัวทำละลาย

ในตัวทำละลายที่ดีการดึงดูด (attraction) ระหว่างเม็ดสตาร์ชกับตัวทำละลายจะสูงกว่าระหว่างเม็ดสตาร์ชด้วยกัน ค่า [η] บ่งถึงขนาดของเม็ดสตาร์ชซึ่งพองตัวเมื่อมีการดูดน้ำและเกิดเจลาติไนซ์ (Launay, Doublier, and Cuvelier, 1986) Islam และคณะ (2001) ศึกษา intrinsic viscosity ของสตาร์ช sago สุกโดยใช้ตัวทำละลายน้ำตาลซูโครส ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.5, 1.0,1.5, 2.0 g/100ml น้ำ และพบว่า ค่า intrinsic viscosity ลดลง เมื่อความเข้มข้นของซูโครสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 2.133, 2.071, 1.659, 1.653, 1.576, 1.454 dl/g ตามลำดับ เนื่องจากซูโครสสามารถแย่งน้ำอิสระกับเม็ดแป้ง ทำให้น้ำอิสระน้อยลง แป้งจึงมีการพองตัวได้น้อยลง ความหนืดของ paste สตาร์ชจึงลดลง

2. Paste ในช่วงนี้ความเข้มข้นของสตาร์ชสุกสูงพอที่จะทำให้เกิด granule-granule interaction นอกจากนี้ยังมีส่วนของอะมิโลสรอบนอกละลาย ออกมาจากเม็ดสตาร์ช ทำให้ลักษณะการไหลขึ้นกับรูปร่างและกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ช การพันกันระหว่าง amylose-amylopectin , granule-granule, amylose-granule, และ amylopectin-granule interaction (Ring *et al.*,1987) วิธีการศึกษาสมบัติการไหลของ paste สตาร์ช ที่นิยมคือการใช้ rotational viscometer โดยพฤติกรรมการไหลของ paste สตาร์ชที่อุณหภูมิคงที่อธิบายได้ด้วยสมการ power law ดังนี้ (Launay, Doublier, and Cuvelier, 1986)

$$\tau = K(du/dy)^n + \tau_o$$

เมื่อ τ = shear stress (mPa)

K = consistency index (mPa*s^n)

du/dy = shear rate (s^{-1})

n = flow behavior index

τ_o = yield value (mPa)

และสามารถเขียนในรูปของความหนืดของของไหลได้ดังนี้

$$\tau = K(du/dy)^{n-1}du/dy + \tau_o$$

เมื่อ $K(du/dy)^{n-1}$ = apparent viscosity

จากสมบัติการไหล สามารถแบ่งชนิดของ paste สตาร์ชได้ดังนี้(รูปที่ 2.20 และ 2.21)

2.1. Pseudoplastic (shear thinning) fluids

Paste สตาร์ชในกลุ่มนี้จะมีค่าของ apparent viscosity ลดลง เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น โดยไม่มีค่าของ yield และค่าของ flow behavior index น้อยกว่า 1

2.2. Dilatant (shear thickening) fluids

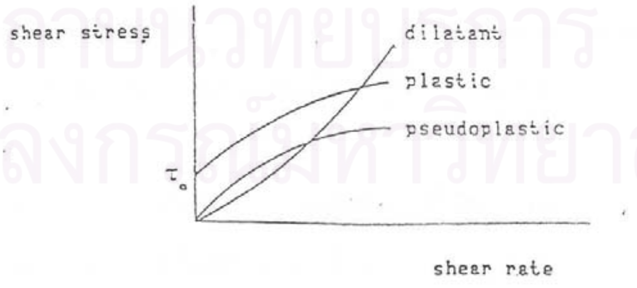
Paste สตาร์ชในกลุ่มนี้มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น ของไหลกลุ่มนี้จะมีค่า flow behavior index มากกว่า 1 และไม่มีค่า yield

2.3. Newtonian fluids

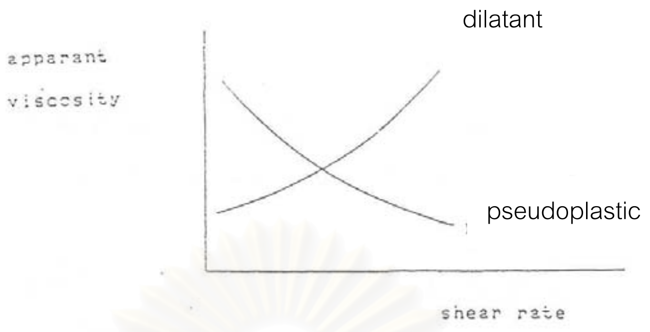
Paste สตาร์ชกลุ่มนี้จะมีค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น ของไหลกลุ่มนี้จะมีค่า flow behavior index เท่ากับ 1และไม่มีค่า yield

2.4. Plastic fluids

Paste สตาร์ชในกลุ่มนี้มีค่าความหนืดลดลง เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับของไหลในกลุ่ม pseudoplastic แต่จะต้องให้ shear stress กับของไหลสูงกว่าค่า yield ของไหลจึงจะไหลได้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของ shear stress กับ shear rate ของของไหลแบบต่างๆ (Schutz, 1971)



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของ apparent viscosity กับ shear rate ของของไหลแบบต่างๆ (Schutz,1971)

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการไหลของแป้ง ได้แก่ วิธีการเตรียม gelatinized starch การใช้อัตราความร้อนที่สูง จะทำให้เจลที่ได้มีความหนืดมากกว่าการใช้อัตราการให้ความร้อนที่น้อยกว่า ความเร็วในการกวนก็มีผลเช่นกัน โดยการกวนที่รุนแรงจะทำให้เจลมีความหนืดต่ำ (Doublier, 1981; Odigboh and Mohsenin, 1975) อุณหภูมิมีผลต่อการไหลโดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นของไหลส่วนใหญ่จะมีความหนืดลดลง โดยความสัมพันธ์ของความหนืดและอุณหภูมิแสดงได้ด้วยสมการ Arrhenius (Holdsworth, 1969) ความเข้มข้นของแป้งที่แตกต่างกันก็มีผลทำให้ความหนืดแตกต่างกัน(Radley, 1976) นอกจากนี้สายพันธุ์ของแป้งก็มีผลต่อความหนืด (Kurasawa, Kanauchi, and Wakayama,1973)

3. gel ในช่วงที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสูงมาก(มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) จะเกิด granule-granule interaction สูงพอเพียง พร้อมกับการที่เม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและมีน้ำมากพอ ทำให้อะมิโลสที่แยกออกมาจากแกรนูลมีปริมาณพอเพียงสำหรับการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติ (Tester and Morrison, 1990) โดยมีเม็ดสตาร์ชที่พองตัวถูกตรึงไว้ภายในโครงร่างแหนั้น paste สตาร์ชจะกลายเป็นเจลที่มีลักษณะของ viscoelastic เมื่อทำให้เย็น (Ring *et al.*, 1987) การศึกษาลักษณะทาง viscoelastic ของสตาร์ชทำได้โดยการทดลอง creep และ stress relaxation (Barbosa-Canovas *et al.*, 1996)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

วัตถุดิบ

ตัวอย่างใช้คือหัวเท้ายายม่อมพันธุ์ก้านใบสีเขียวจากศูนย์วิจัยอ่าวคุ้งกระเบน ในพระบรมราชูปถัมภ์ จ. จันทบุรี และหัวเท้ายายม่อมพันธุ์ก้านใบสีม่วงจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลพระนครเหนือ วิทยาลัยเขต จ. สุรินทร์ ซึ่งควบคุมขนาดหัวให้อยู่ในช่วงน้ำหนัก 300 – 400 กรัม/หัว

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อม

นำหัวเท้ายายม่อมมาล้างน้ำให้สะอาด และปอกเปลือกด้วยมีด ล้างน้ำอีกครั้ง แล้วนำมาสับให้ละเอียดและบดด้วยเครื่อง Ball mill (Laboratory Centrifugal Mill FRITSCH GMBH รุ่น Pulverisette) นำส่วนที่บดได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังนี้

3.1.1. ความชื้นโดยใช้ Hot Air Oven ตามวิธี AOAC 925.10(1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.1

3.1.2. โปรตีนโดยใช้วิธี Kjeldahl ตามวิธี AOAC 920.87 (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.2

3.1.3. ไขมันโดยวิธี Soxhlet extraction ตามวิธี AOAC 920.85(1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.3

3.1.4. เส้นใย(Crude fiber) ตามวิธี AOAC 978.10 (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.4

3.1.5. เถ้าโดยวิธี AOAC 923.03 (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.5

3.1.6. ฟอสฟอรัส ตามวิธี AOAC 923.03 (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.6

3.1.7. คาร์โบไฮเดรต รายละเอียดในภาคผนวก ก.7

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ t- test

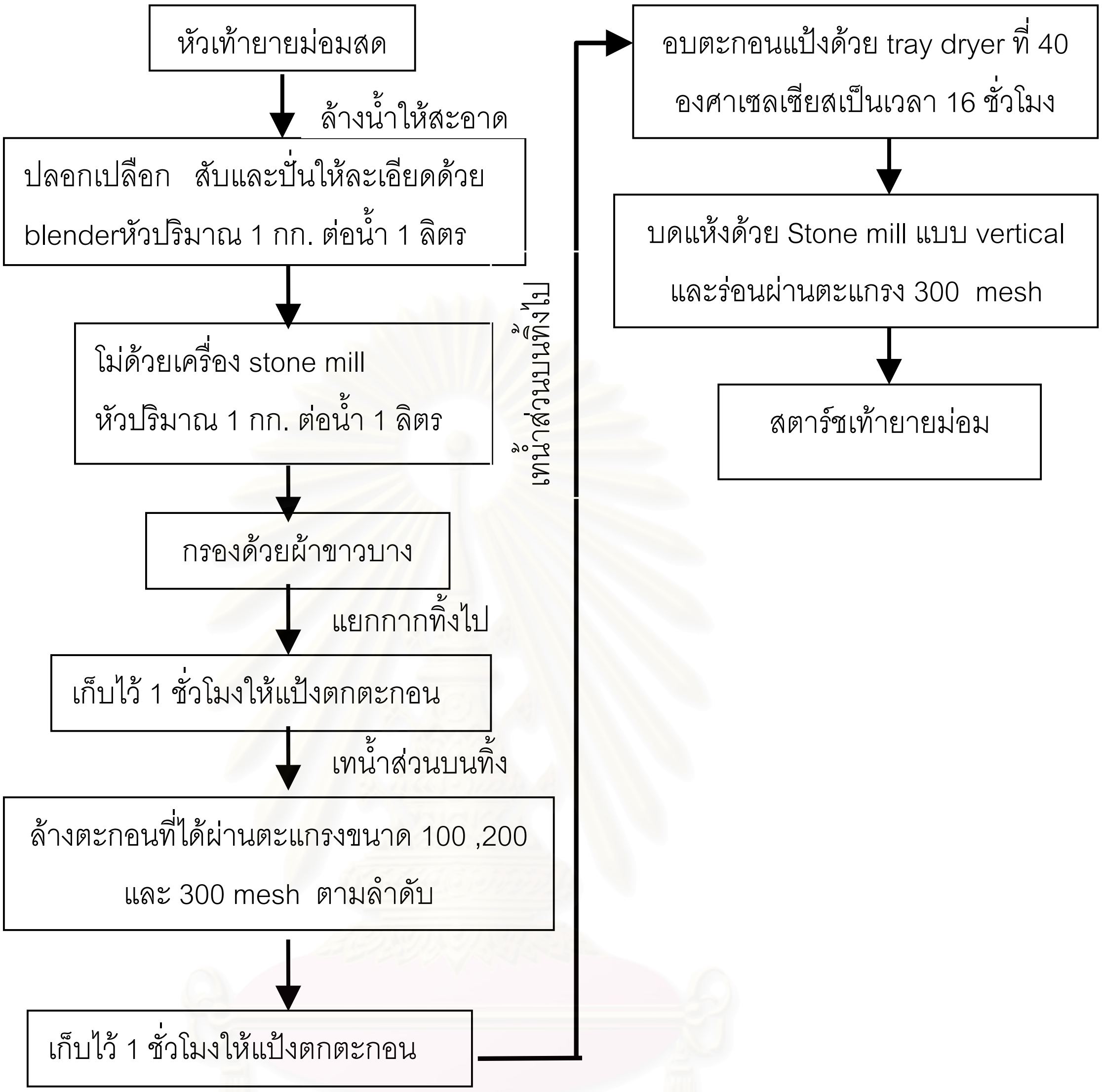
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2. การวิเคราะห์ร้อยละปริมาณผลผลิตของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่สกัดได้จากหัวเท้ายายม่อม

สกัดสตาร์ชจากหัวเท้ายายม่อม โดยดัดแปลงขั้นตอนการสกัดจากวิธีของ สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ(2543) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยนำหัวเท้ายายม่อมสดมาล้างน้ำให้สะอาด 2 ครั้ง ปอกเปลือก และล้างน้ำอีกครั้ง ก่อนนำไปสับและปั่นด้วยเครื่อง blender ด้วยอัตราส่วนหัวเท้ายายม่อมปริมาณ 1 กก.ต่อน้ำ 1 ลิตร แล้วนำไปโม่ด้วยเครื่อง stone mill แบบ vertical โดยเติมน้ำลงไปอีก 1 ลิตร(ต่อน้ำหนักหัวเท้ายายม่อม) เมื่อโม่แล้ว นำมากรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกากทิ้งไป เก็บส่วนที่กรองได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อให้แป้งตกตะกอน แล้วเทส่วนน้ำที่แยกชั้นออกมาทิ้งไป ล้างตะกอนด้วยน้ำโดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เก็บส่วนที่กรองได้ไว้ 1 ชั่วโมง แยกน้ำส่วนบนทิ้งไป และล้างตะกอนอีกครั้งโดยผ่านตะแกรงขนาด 200 และ 300 ตามลำดับ จนน้ำที่กรองได้ใสขึ้น เก็บส่วนที่กรองได้ไว้ 1 ชั่วโมง จะได้แป้งเท้ายายม่อมซึ่งมีสีขาว สะอาดอยู่ที่ก้นภาชนะ นำแป้งเท้ายายม่อมไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง บดแป้งให้ละเอียดด้วย stone mill แบบ vertical โดยต้องระวังไม่ให้แป้งมีความชื้นสูง เพราะจะทำให้แป้งติด stone mill และเกิดความร้อนจนเม็ดแป้งเสียหาย ร่อนแป้งผ่านตะแกรง 300 mesh เก็บแป้งที่ร่อนแล้วด้วยระบบสุญญากาศ (vacuum seal) ในถุงพลาสติกชนิด PET/DL/vmPET/DL/L-LDPE เก็บที่อุณหภูมิห้องในภาชนะปิดสนิทที่มี silica gel เป็นสารดูดความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป คำนวณปริมาณผลผลิตจาก

$$\text{ร้อยละปริมาณผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของสตาร์ช(กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของหัวเท้ายายม่อม(กรัม)}}$$

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ t- test



รูปที่ 3.1 กรรมวิธีการสกัดสตาร์ชเท้ายายม่อม

3.3. การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม

3.3.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชเท้ายายม่อม

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชเท้ายายม่อมตามข้อ 3.1 และวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส โดยใช้ High Performance Size Exclusion Chromatography(HPSEC) รุ่น CTO- 10 AS column oven (Shimadzu, Japan) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Govindasamy, Oates และ Wang(1992) รายละเอียดในภาคผนวก ก.8 และวัดค่า pH ของสตาร์ช ตามวิธีของ AOAC 943.02(1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.9

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ t- test

3.3.2. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม

3.3.2.1. ลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้ง

วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมที่สกัดได้ดังต่อไปนี้

ก. รูปร่าง การกระจายตัวและพื้นผิวของเม็ดแป้งสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รายละเอียดในภาคผนวก ก.10

ข. ลักษณะ birefringence โดยกล้องจุลทรรศน์ และแผ่นฟิล์มโพลารอยด์ บิดระนาบแสง รายละเอียดในภาคผนวก ก.11

ค. ขนาดของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยใช้เครื่อง Laser particle size analyzer ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รายละเอียดในภาคผนวก ก.12

ง. โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เทคนิค Wide Angle X-ray Diffraction มุมในการวัดตั้งแต่ 5 องศา ถึง 45 องศา รายละเอียดในภาคผนวก ก.13

จ. ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ โดยวิธีซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Anderson และคณะ(1969) รายละเอียดในภาคผนวก ก.14

ฉ. กำลังการพองตัวและการละลายน้ำของสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยวิธีซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Schoch(1964) รายละเอียดในภาคผนวก ก.15

ช. freeze-thaw stabilityของสตาร์ชเท้ายายม่อม ตามวิธีของ Hoover และ Manuel(1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.16

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ t- test

3.3.2.2. การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเท้ายายม่อม

เปรียบเทียบการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC-7 Perkin Elmer Connecticut USA โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.17 และ เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA 4 D, Newport Scientific, Australia) โดยวิธีของ Norbert, Mintus, and Detmold (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก.18

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ t- test

3.3.2.3. การเกิดรีโทรเกรเดชั่นของสตาร์ชเท้ายายม่อม

วิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC โดยหาค่า onset temperature (T_o), peak temperature(T_p), final temperature(T_f)และ enthalpy of regelatinization (ΔH_R) ของสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40 -110 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เก็บตัวอย่างโดยแปรอุณหภูมิการเก็บตัวอย่าง 2 ระดับ คือ 4 และ –20 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 3 ระดับ คือ 1, 7 และ 14 วัน โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Baker และ Duarte (1995) ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.19 และคำนวณ % Retrogradation ตามสูตรต่อไปนี้

$$\% \text{ Retrogradation} = \frac{\text{enthalpy of regelatinization } (\Delta H_R)}{\text{enthalpy of gelatinization } (\Delta H_{gelatinization})} \times 100$$

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2×3 ทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบหาความแตกต่างทางสถิติด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3.3.2.4.เสถียรภาพของความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อม

ก. ผลของความเป็นกรดต่อสมบัติด้านความหนืด

นำสตาร์ชจากเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มาศึกษาสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA 4 D, Newport Scientific, Australia) โดยดัดแปลงวิธีของ Marzurs, Schoch และ Kite(1957) ติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก ใน heating-cooling cycle ขั้นตอนการทดลองตามรายละเอียดในภาคผนวก ก 18 แต่ควบคุมระดับความเข้มข้นของสารละลายสตาร์ชร้อยละ 6 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3, 5, 7 และ 9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมโดยใช้ค่าความหนืดที่จุดสูงสุดช่วงให้ความร้อน, ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 2.5 นาที, ความหนืดต่ำสุด, ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ ความหนืดสุดท้าย

ข. ผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อสมบัติด้านความหนืด

นำสตาร์ชจากเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มาศึกษาสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA 4 D,Newport Scientific, Australia) โดยดัดแปลงวิธีของ Marzurs, Schoch และ Kite(1957) ติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก ใน heating-cooling cycle ขั้นตอนการทดลองตามรายละเอียดในภาคผนวก ก 18 ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

pH 7 และแปรระดับความเข้มข้นของสารละลายสตาร์ชร้อยละ 4, 5, 6, 7 และ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมโดยใช้ค่าความหนืดที่จุดสูงสุดช่วงให้ความร้อน, ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 2.5 นาที, ความหนืดต่ำสุด, ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ ความหนืดสุดท้าย

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย Duncan' s New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

3.3.2.5. การศึกษาผลของ pH และความเข้มข้นของน้ำตาลต่อ Intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมสุก

วิเคราะห์ค่า Intrinsic viscosity ของ paste สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ด้วย capillary viscometer (Cannon-Fenske เบอร์ 50) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Islam, Mohd, และ Noor(2001)รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.20 โดยแปรความเข้มข้นของน้ำตาลเป็น 0, 25, 50, 75 และ 100 % ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3, 5, 7 และ 9 และควบคุมอุณหภูมิในการทดลองที่ 30 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียส

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 4 $\times$ 5 ทดลอง 2 ซ้ำ เปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วย Duncan's New Multiple Range Test

3.3.2.6. การศึกษาผลของความเข้มข้นสตาร์ชต่อลักษณะการไหลของ paste เท้ายายม่อม

วัดค่า apparent viscosity ของ paste สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์ที่แปรความเข้มข้นของสตาร์ช 4 ระดับ คือ 3, 3.5, 4 และ 4.5 กรัมต่อเดซิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7ด้วย rotational viscometer (Brookfield, DV-II+,Stoughton, USA) ในช่วงอัตราการเฉือน 0.5 – 10 นาที$^{-1}$ ภายในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียสคำนวณค่า flow behavior index และ consistency index ตามสมการของ Ostwald-De Waele ตามวิธีของ Launay, Doublier, และ Cuvelier(1986) และประมาณค่า yield stress ตามวิธีของ Casson (1959) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.21

3.3.2.7. การศึกษาผลของน้ำตาลต่อลักษณะทาง viscoelastic **ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม**

วิเคราะห์ลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ความเข้มข้นสตาร์ชเท้ายายม่อม 20 %โดยน้ำหนักแห้งในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 แปรระดับความเข้ม sucrose 5 ระดับคือ 0, 25, 50, 75 และ 100 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ด้วยเครื่อง Texture analyzer (Stable Micro System, TA-XT21) โดยใช้ Probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร กดเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมด้วยแรงเค้น 20 N เป็นเวลา 300 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 $\pm$ 1 องศาเซลเซียส บันทึกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา (รายละเอียดในภาคผนวก ก.22)

วิเคราะห์กราฟ strain กับ เวลา เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1. องค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อมสดพันธุ์ลำต้นสีเขียว(Green Stem Tacca, GST) และพันธุ์ลำต้นสีม่วง(Purple Stem Tacca, PST) (ตารางที่ 4.1) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นฟอสฟอรัส ความชื้นของหัว GST น้อยกว่าหัว PST และปริมาณเถ้าของหัวเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีปริมาณสูง โดยหัว PST มีปริมาณเถ้ามากกว่าหัว GST ส่วนองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ พบว่ามีปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.1. องค์ประกอบทางเคมีของหัวเท้ายายม่อม

องค์ประกอบทางเคมี (%)	หัว GST	หัว PST
ความชื้น(%wt)	54.26a ± 0.07	63.93b ± 0.28
คาร์โบไฮเดรต(%db)	95.06a ± 0.13	94.45a ± 0.38
โปรตีน(%db)	0.67a ± 0.01	0.87b ± 0.04
ไขมัน(%db)	0.24a ± 0.04	0.33b ± 0.04
ฟอสฟอรัส(%db)	0.05a ± 0.01	0.05a ± 0.01
เถ้า(%db)	3.24a ± 0.08	3.69b ± 0.01
เส้นใย(%db)	0.75a ± 0.05	0.60b ± 0.05

a,b ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการสกัดแป้งจากหัวเท้ายายม่อมโดยวิธีสกัดแบบไม่เปียก พบว่าแป้งเท้ายายม่อมตกตะกอนได้ดี สามารถแยกตะกอนได้โดยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำที่ได้หลังการล้างแป้งมีสีแดงคล้ำซึ่งเกิดจากสารที่มีรสขมในหัวเท้ายายม่อมซึ่งเป็นสาร alkaloid และสาร steroid (Elsheikh *et al.*, 1990) ดังนั้นจึงต้องล้างจนกว่าน้ำที่ได้หลังการล้างแป้งใส ไม่มีสีแดงคล้ำเจือปน ซึ่งพบว่าต้องล้างน้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และจากการสกัดแป้งพบว่า % yield แป้งที่ได้จากหัว GST เท่ากับ 24.46 ± 0.59 ซึ่งสูงกว่า% yield ที่ได้จากการสกัดหัว PST(20.43 ± 0.31) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นในหัวเท้ายายม่อมสดGST ต่ำกว่า PST (ตารางที่ 4.1)

4.2. องค์ประกอบทางเคมีของแป้งเท้ายายม่อม

แป้งเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีสีขาว เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง GST และ แป้ง PST (ตารางที่ 4.2) พบว่า แป้งทั้งสองมีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน โดยมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใย ในปริมาณต่ำ แป้งเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์จัดว่าเป็นสตาร์ชเนื่องจากมีโปรตีนในปริมาณต่ำกว่า 0.3%(มอก. 274, 2521) ปริมาณความชื้นหลังอบแห้งด้วย tray dryer ของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ไม่แตกต่างกัน จากการหาปริมาณอะมิโลสโดยใช้ High Performance Size Exclusion Chromatography(HPSEC) (ตารางที่ 4.2) พบว่าปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกัน โดยสตาร์ช GST มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าสตาร์ช PST สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์จัดว่ามีปริมาณอะมิโลสปานกลาง โดยสตาร์ชเท้ายายม่อมมีปริมาณอะมิโลสมากกว่าสตาร์ชจากพืชหัวชนิดอื่นๆ เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันสำปะหลัง และใกล้เคียงกับสตาร์ชจากธัญพืช เช่น สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวไรน์ (Oates, 1996) แต่น้อยกว่าสตาร์ชถั่วเขียว (Hoover *et al.*, 1997; นภมณี มงคลประเสริฐ, 2544)

ตารางที่ 4.2. องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชเท้ายายม่อม(โดยน้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบทางเคมี	สตาร์ช GST	สตาร์ช PST
ความชื้น(%wt)	12.79a ± 0.23	13.15a ± 0.43
คาร์โบไฮเดรต(%db)	99.59a ± 0.04	99.57a ± 0.05
โปรตีน(%db)	0.11a ± 0.02	0.11a ± 0.03
ไขมัน(%db)	0.13a ± 0.01	0.15a ± 0.02
ฟอสฟอรัส(%db)	0.01a ± 0.00	0.01a ± 0.00
เถ้า(%db)	0.10a ± 0.03	0.09a ± 0.02
เส้นใย(%db)	0.06a ± 0.01	0.07a ± 0.02
อะมิโลส(%)	24.53a± 0.53	21.16b± 0.67

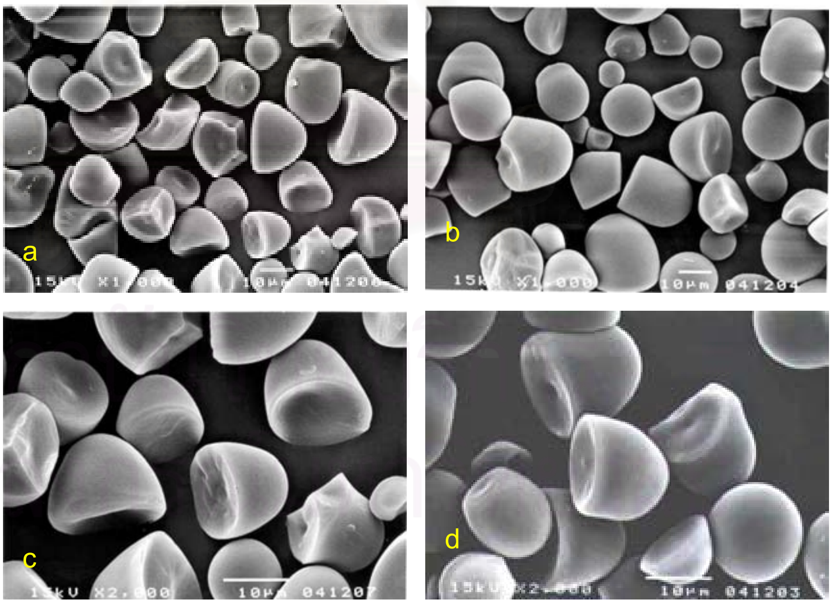
a,b ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.. สมบัติทางกายภาพของสตาร์ชเท้ายายม่อม

4.3.1. รูปร่าง การกระจายตัวและขนาดของสตาร์ชเท้ายายม่อม

เมื่อศึกษาขนาดของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์พบว่าเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชจากธัญพืช เช่น สตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชข้าวโพด แต่มีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง และเมื่อศึกษารูปร่างและพื้นผิวของสตาร์ชเท้ายายม่อมโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope(SEM)(รูปที่ 4.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเป็นรูปไข่และรูปถ้วยคล้ายเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลัง เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า(รูปที่ 4.1a และ4.1b) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีการกระจายไม่เกาะกลุ่มกัน เม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มีพื้นผิวเรียบ ไม่มีรอยแตก ยกเว้นที่บริเวณหัวหรือท้ายของเม็ดสตาร์ชที่เป็นรูปถ้วย ซึ่งจะมีพื้นผิวที่ขรุขระ ทั้งนี้อาจเกิดจากการแตกระหว่างขั้นตอนการบด, การโม่ หรือขั้นตอนการทำแห้ง ในการสกัดแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) และเมื่อใช้กล้อง SEM กำลังขยายเพิ่มเป็น 2000 เท่า(รูปที่ 4.1c และ 4.1b) เพื่อดูสภาพผิวของเม็ดสตาร์ชให้ชัดเจนขึ้น พบว่าไม่พบรอยแตกที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์

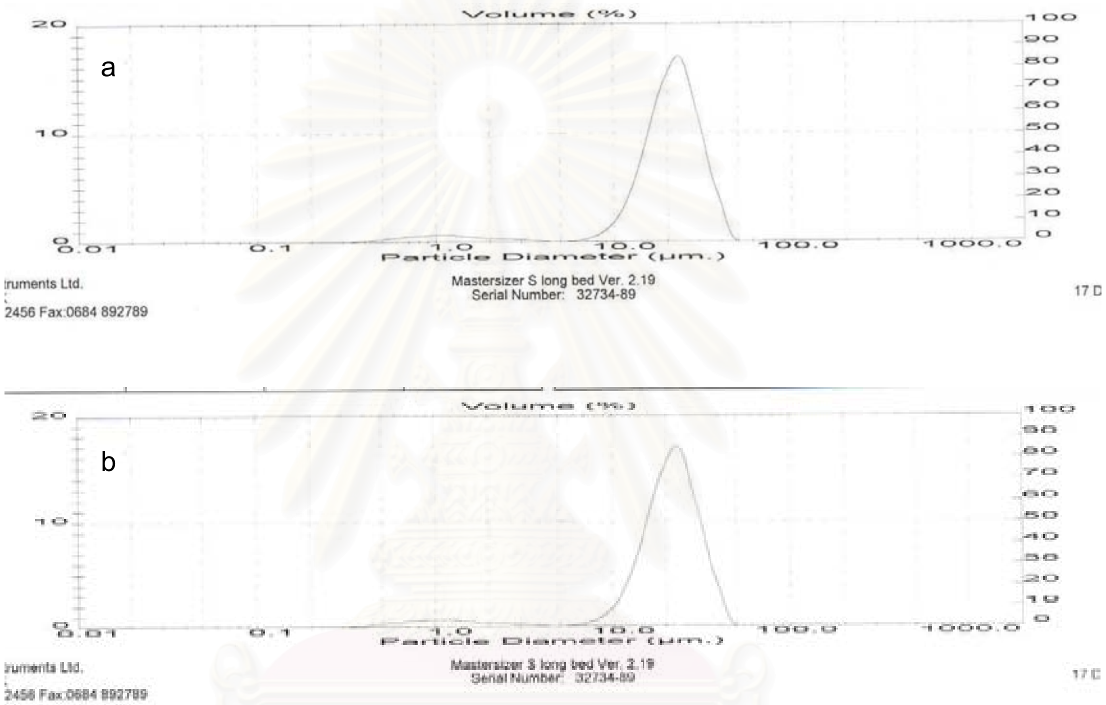


รูปที่ 4.1 SEM micrograph แสดงรูปร่างและพื้นผิวเม็ดแป้งของสตาร์ชเท้ายายม่อม

a. สตาร์ช GST กำลังขยาย 1,000 เท่า b. สตาร์ช PST กำลังขยาย 1,000 เท่า

c. สตาร์ช GST กำลังขยาย 2,000 เท่า d. สตาร์ช PST กำลังขยาย 2,000 เท่า

จากการศึกษาขนาดและการกระจายของขนาดเม็ดสตาร์ช โดยเครื่อง laser particle size analyzer(รูปที่ 4.2) พบว่าขนาดของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์ไม่มีความแตกต่างกัน โดยสตาร์ช GST มีขนาดอยู่ในช่วง 13.21 - 32.90 μm มีขนาดเฉลี่ย 21.10 $\pm$ 0.21 μm และสตาร์ช PST มีขนาดอยู่ในช่วง 11.17 - 33.51 μm มีขนาดเฉลี่ย 21.38 $\pm$ 0.32 μm ซึ่งขนาดเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมใกล้เคียงกับเม็ดแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีขนาด 5 - 35 μm และมีขนาดเฉลี่ย 25 μm (Magningat and Seib, 1992)



รูปที่ 4.2 ขนาดและการกระจายของขนาดสตาร์ชเท้ายายม่อมจากการวัดโดยเครื่อง laser particle size analyzer

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

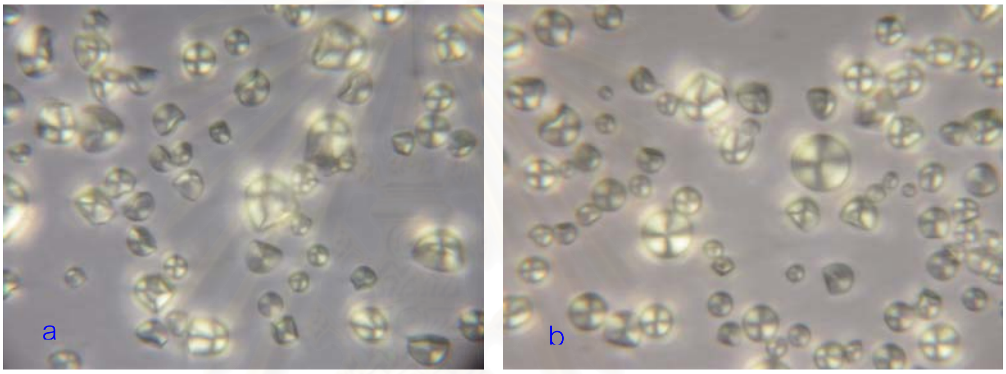
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2. **ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อม**

ลักษณะ birefringence เกิดจากความสามารถในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ของผลึกภายในเม็ดสตาร์ช เกิดเป็นแนวสีดำตัดกันที่ไฮลัม(hilum) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ช โดยภายในเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ มีไฮลัมเป็นจุดศูนย์กลางและสายพอลิเมอร์เหล่านี้จะเรียงตัวกันในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวเม็ดสตาร์ช ซึ่งพื้นที่มืดที่เห็นภายใต้แสงโพลาไรซ์เป็นตำแหน่งเฉลี่ยของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับแสงโพลาไรซ์ แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช

เป็นเส้นโค้ง ดังนั้นสายพอลิเมอร์บางสายที่ไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสง-โพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิดระนาบแสงและเห็นเป็นพื้นที่สว่างเกิดขึ้น(Gallant, Bouchet, and Baldwin, 1997)

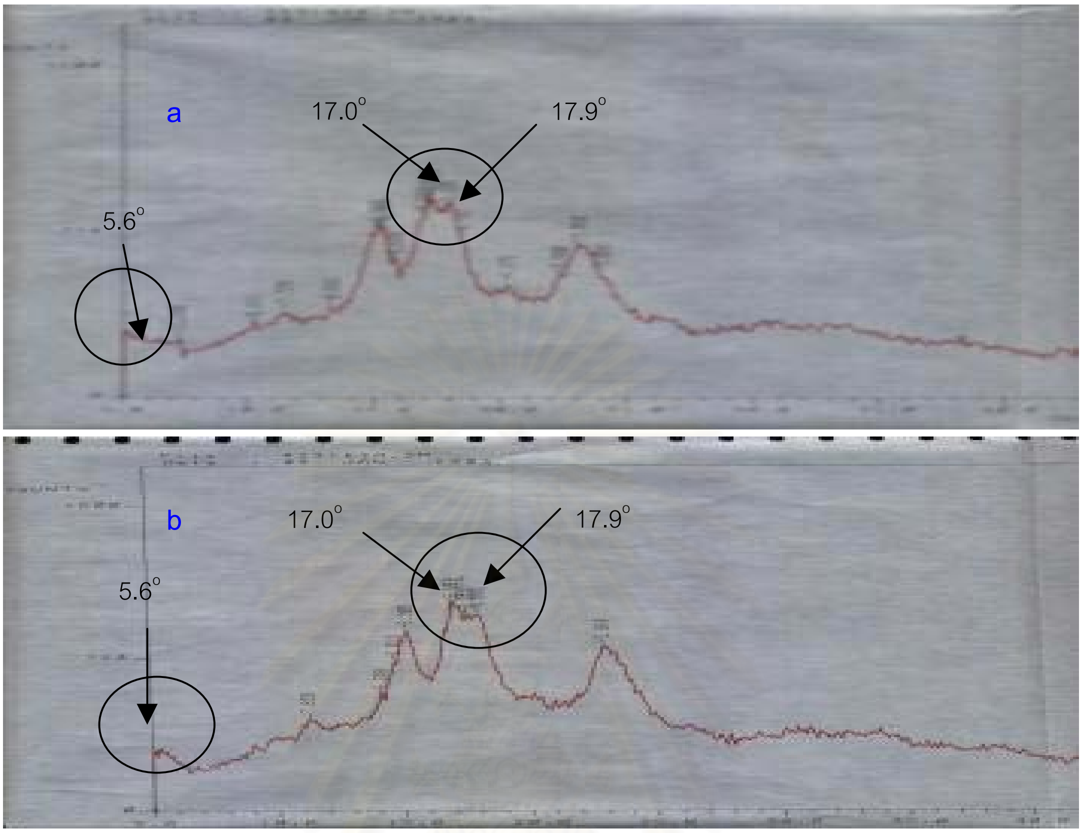
การตรวจสอบลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเป็นการตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ช หากโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ลักษณะ birefringence จะหายไป (Gallant, Bouchet, and Baldwin, 1997) จากการทดลอง พบว่า เม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มี birefringence ที่ชัดเจนและมีตำแหน่งไฮลัมเกิดที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช(รูปที่ 4.3a และ 4.3b) แสดงว่าการสร้างสายพอลิเมอร์ของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชและขยายออกตามแนวรัศมีของเม็ดสตาร์ช



รูปที่ 4.3 ลักษณะ birefringence ของเม็ดแป้งสตาร์ชเท้ายายม่อม

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

การที่เม็ดแป้งเกิด birefringence เมื่อบิดระนาบแสงโพลาไรซ์แสดงว่าเม็ดแป้งมีสภาพเป็น semi-crystalline โดยส่วนที่เป็น birefringence เกิดจาก crystalline region ในเม็ดแป้ง(กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชโดยใช้ wide angle X-ray diffraction พบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์ มี peak ขึ้นที่ 5.6 องศา 17.0 องศา และ 17.9 องศา(รูปที่ 4.4) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่มักพบในโครงสร้างของแป้งจากพืชตระกูลถั่ว แตกต่างจากแป้งจากพืชหัวทั่วไปที่เป็นแบบ B ทั้งนี้อาจเนื่องจากอะมิโลสทำให้ผลึกมีโครงสร้างที่หนาแน่นและแข็งแรง โดยสตาร์ชเท้ายายม่อมมีปริมาณอะมิโลสประมาณ 21 - 24 % ซึ่งมากกว่าสตาร์ชจากพืชหัวที่มีประมาณ 18 - 20 % แต่น้อยกว่าสตาร์ชจากธัญพืชที่มีประมาณ 23 - 30 %(โครงสร้างผลึกแบบ A)(Oates, 1997) ทำให้เกิดลักษณะผสมระหว่างโครงสร้างผลึก A(ธัญพืช) ที่มีโครงสร้างผลึกเรียงตัวแบบหนาแน่น และโครงสร้างผลึกแบบ B(พืชหัว) ซึ่งมีการเรียงตัวกันแบบหลวมๆ



รูปที่ 4.4 X-ray diffraction pattern แสดงโครงสร้างของผลึกสตาร์ชเท้ายายม่อม

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

4.3.3. ดัชนีการดูดน้ำและการละลายน้ำ(Water adsorption and water solubility Indices)

โดยทั่วไปแป้งจะไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน แต่เมื่อเติมน้ำลงในสตาร์ชและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำซึ่งเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) จากการศึกษาการดูดน้ำและการละลายน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ (ตารางที่ 4.3) พบว่า การดูดน้ำที่ 30 องศาเซลเซียสของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีปริมาณต่ำซึ่งตรงกับการศึกษาของ Leach, McCowen และ Schoch(1959) ซึ่งรายงานว่าเม็ดแป้งจะมีการดูดน้ำและการละลายได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ส่วนการละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ 30 องศาเซลเซียสมีค่าแตกต่างกัน โดยสตาร์ช PST มีค่าการละลายมากกว่าสตาร์ช GST

ตารางที่ 4.3 การดูดน้ำและการละลายน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส

	สตาร์ช GST	สตาร์ช PST
Water Adsorption Index (WAI, g/g)	1.89a ± 0.09	1.85a ± 0.04
Water Solubility Index (WSI, %)	6.29a ± 0.49	7.68b ± 0.50

a,b ที่แตกต่างกันในนอนหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

4.3.4. กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility)

กำลังการพองตัวสามารถบ่งบอกความหนืดของสตาร์ชได้ โดยสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงแสดงว่าสตาร์ชมีความหนืดสูง เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง ส่วนสตาร์ชที่มีการพองตัวต่ำจะมีความหนืดต่ำ เช่น high-amylose starch ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลให้ gel มีการเคลื่อนที่ได้น้อยลง ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดความหนืด ส่วนการละลายมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว คือ เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่ จะทำให้อะมิโลสบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้มีการละลายสูงขึ้นด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอตและเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) จากการวิเคราะห์การละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ (ตารางที่ 4.4) พบว่า สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีการละลายที่ไม่แตกต่างกัน การพองตัวของสตาร์ชเท้ายายม่อม(ตารางที่ 4.5) เริ่มแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส โดยที่ 95 องศาเซลเซียส สตาร์ช PSTสามารถพองตัวเท่ากับ 65.15 ± 1.22 % ซึ่งมากกว่าสตาร์ช GST (56.55 ± 1.15 %) สตาร์ช PST มีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ช GST เนื่องจากสตาร์ช PST มีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าสตาร์ช GST จึงมีโครงสร้างหนาแน่นน้อยกว่า สอดคล้องกับรายงานของ Visser และคณะ(1997)ที่รายงานว่าอะมิโลสจะทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น การพองตัวจึงเกิดได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการละลายและกำลังการพองตัวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ช่วงอุณหภูมิ 65 - 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวและการละลายกับสตาร์ชชนิดอื่นๆ (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่า กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมอยู่ในระดับปานกลาง ใกล้เคียงกับสตาร์ชมันสำปะหลัง แต่มีค่าน้อยกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง และมีค่ามากกว่าสตาร์ชข้าวฟ่าง

ตารางที่ 4.4 การละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 - 95^{0}C

สตาร์ช	การละลาย (%)^{ns}									
	50^{0}C	55^{0}C	60^{0}C	65^{0}C	70^{0}C	75^{0}C	80^{0}C	85^{0}C	90^{0}C	95^{0}C
GST	0.52a ±0.14	1.38 a ±0.22	5.66a ±0.47	8.69 a ±0.97	19.23a ±0.86	20.73a ±1.11	22.43a ±1.12	24.10a ±1.53	25.65a ±1.37	27.92a ±1.69
PST	0.82 a ±0.12	2.02 a ±0.35	6.33a ±0.54	10.87a ±0.88	22.20a ±1.20	23.65a ±1.55	25.23a ±0.98	26.87a ±1.24	28.32a ±1.03	30.06a ±1.23

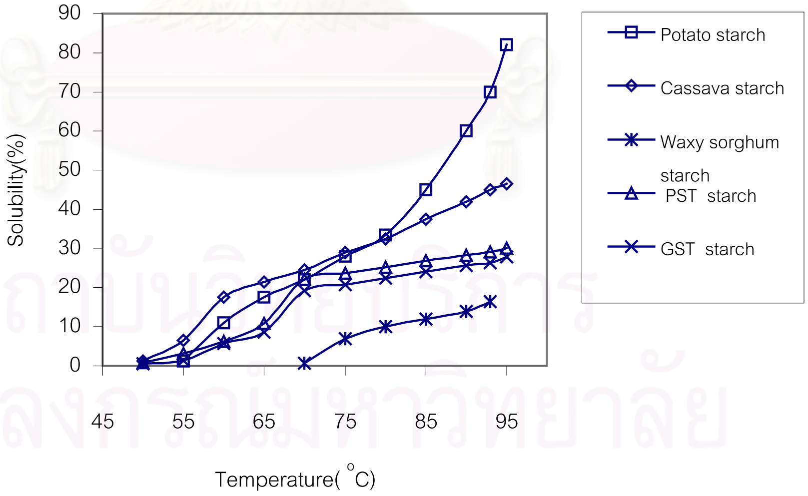
a,b ที่แตกต่างกันในตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq$ 0.05)

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในทุกค่า

ตารางที่ 4.5 กำลังการพองตัวของสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 – 95^{0}C

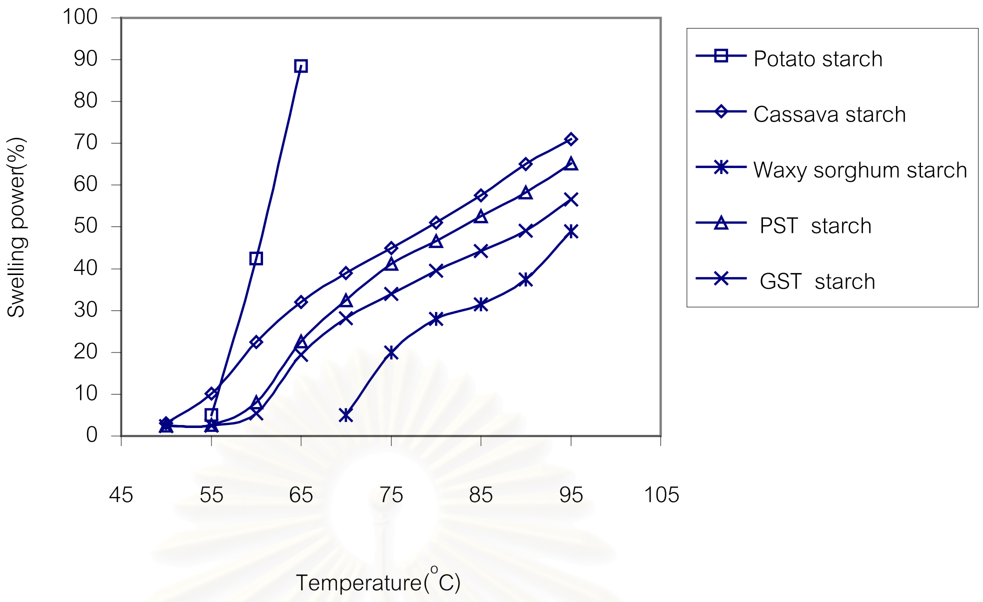
สตาร์ช	กำลังการพองตัว (%)									
	50^{0}C	55^{0}C	60^{0}C	65^{0}C	70^{0}C	75^{0}C	80^{0}C	85^{0}C	90^{0}C	95^{0}C
GST	2.35a ±0.26	2.52a ±0.25	5.41a ±0.09	19.37a ±0.81	28.22a ±0.31	34.00a ±0.70	39.48a ±0.70	44.22a ±0.69	49.07a ±0.89	56.55a ±1.15
PST	2.43a ±0.33	2.67a ±0.13	6.06a ±0.59	22.54a ±0.63	32.45b ±2.13	41.18b ±1.97	46.64b ±0.71	52.25b ±0.76	58.32b ±1.04	65.15b ±1.22

a,b ที่แตกต่างกันในตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq$ 0.05)



รูปที่ 4.5 การละลายของสตาร์ชเท้ายายม่อมและสตาร์ชชนิดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 กำลังการพองตัวของสตาร์ชเท้ายายม่อมและสตาร์ชชนิดต่างๆ

4.3.5 การเกิดเจลาติไนเซชัน

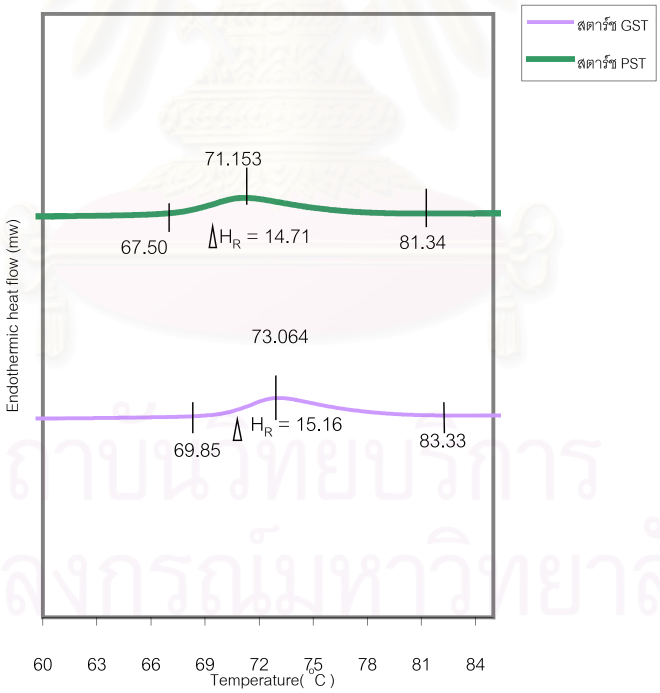
จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันโดยใช้เครื่อง DSC (ตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7) พบว่าอุณหภูมิ เริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน(onset temperature)และ อุณหภูมิ peak temperature ของสตาร์ช PSTต่ำกว่าสตาร์ช GST ทั้งนี้อาจเนื่องจากสตาร์ช GST มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าสตาร์ช PST ทำให้โครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงกว่าซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Visser และคณะ (1997) ที่พบว่า อะมิโลสทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น onset temperature เพิ่มขึ้น และต้องใช้ $\Delta H_{gelatinization}$ ในการละลายโครงสร้างผลึกในการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาติไนเซชันพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันโดยใช้เครื่อง RVA (ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8) พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชทั้งสองพันธุ์ไม่แตกต่างกันและอยู่ในช่วงที่วัดได้จากเครื่อง DSC ความหนืดของสตาร์ชทั้งสองพันธุ์ในช่วง heating-cooling cycle แตกต่างกัน โดยค่า peak viscosity, trough และ breakdown ของสตาร์ช PST มีความหนืดสูงกว่าสตาร์ช GST แต่ค่า setback ของสตาร์ช PST มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอะมิโลสของสตาร์ช GST สูงกว่าสตาร์ช PST ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jane และคณะ(1999) ที่รายงานว่าอะมิโลสมีผลทำให้ค่า peak viscosity และ final viscosityลดต่ำลง แต่กลับทำให้ค่า setback viscosity สูง

ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ พบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับสตาร์ชมันสำปะหลัง(Sriroth, Santisoparsri, *et al.*,1999) ซึ่งจัดว่ามีความหนืดสูงเมื่อเทียบกับสตาร์ชจากธัญพืช และสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว เจลแป้งเปียกของสตาร์ชเท้ายายม่อมมีเนื้อสัมผัสเหนียว มีลักษณะโปร่งใส และมีความคงทนต่อแรงเฉือนต่ำเนื่องจากมีค่า breakdown สูง ทำให้สตาร์ชเท้ายายม่อมเหมาะกับการใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ และความข้นหนืด (ในอาหารประเภทกระเพาะปลา) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปทำแผ่นฟิล์ม และกาว

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเท้ายายม่อม (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC)

สตาร์ชเท้ายายม่อม	Onset Temperature T_o(°C)	PeakTemperature T_p(°C)	Final Temperature T_f(°C)
GST	69.85b ± 0.15	73.06b ± 0.19	83.33a ± 1.29
PST	67.50a ± 0.42	71.15a ± 0.40	81.40a ± 1.47

a,b ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

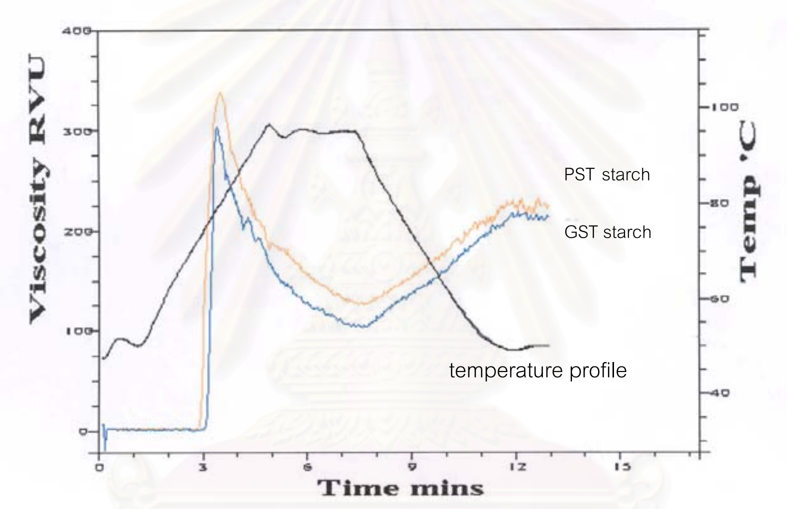


รูปที่ 4.7 Endothermic peak ของสตาร์ชเท้ายายม่อมแสดงช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน

ตารางที่ 4.7 ความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมในช่วง heating-cooling cycle (วิเคราะห์ด้วย RVA)

สตาร์ชเท้ายายม่อม	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temp (°C)
GST	308b ± 6	109b ± 8	199b ± 2	216a ± 5	107b ± 3	74.43a ± 0.37
PST	340a ± 3	124a ± 3	216a ± 7	223a ± 2	100a ± 2	72.25a ± 0.21

a,b ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)



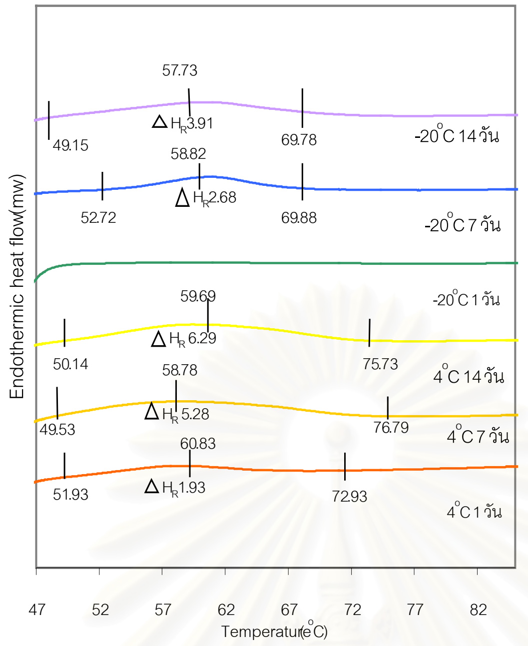
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมจากการวัดด้วยเครื่อง RVA

4.3.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

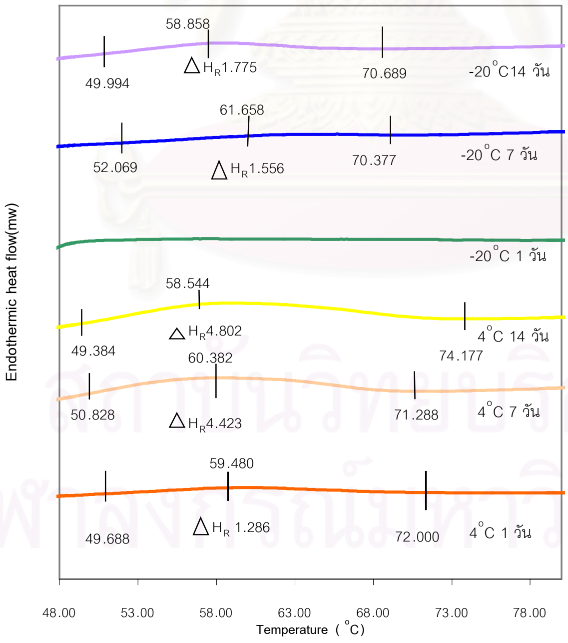
การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเกิดจากการที่โมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้นเพื่อเข้าสู่โครงสร้างที่เป็นผลึก(Atwell *et al.*, 1988) ดังนั้นเมื่อนำสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วไปให้ความร้อนอีกภายหลังการเก็บ จะเกิด peak ของ regelatinization ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช โดย ค่าพลังงานในการ regelatinization (ΔH_R) ของ peak แสดงปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชัน จากการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้เครื่อง DSC (รูปที่ 4.9) พบว่าการเก็บเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ ที่ 4 องศาเซลเซียส เกิดการรีโทรเกรเดชันทันทีเมื่อเก็บไว้ 1 วัน และเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น

ในช่วง 7 วัน เมื่อเก็บต่ออีก 7 วัน การรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มคงที่ ส่วนการเก็บที่ –20 องศาเซลเซียส ช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันซึ่งอาศัยการเรียงตัวของสายโมเลกุลของสตาร์ชต้องการการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลให้มาเรียงตัวกันเป็นระเบียบ ซึ่งที่ -20 องศาเซลเซียส การเคลื่อนที่ของโมเลกุลช้ากว่าที่ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ที่ –20 องศาเซลเซียส น้ำในเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมบางส่วนเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้น จึงขัดขวางการเคลื่อนที่และการเรียงตัวของสายโมเลกุลสตาร์ชทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันน้อยกว่าการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส (Zeneznak and Hoseney, 1987) ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าเจลสตาร์ช GST เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าเจลสตาร์ช PST โดยการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียสนาน 1 วัน สตาร์ช GSTมีค่า ΔH_R = 1.93 และสตาร์ช PST =1.29 J/g และเมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้นค่า ΔH_R จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงขึ้น หรือมีปริมาณที่โมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น (Hoover *et al*., 1997)

จากการวิเคราะห์หา %การเกิดรีโทรเกรเดชันจากค่าΔH_R ของสตาร์ชเท้ายายม่อม(ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10) พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกัน โดยสตาร์ช GSTมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าสตาร์ช PST เนื่องจากปริมาณอะมิโลสของสตาร์ช GST สูงกว่า ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่า สอดคล้องกับรายงานของ Miles, Morris, และ Ring(1985) ที่พบว่าแป้งที่มีอะมิโลสมากทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันมาก โดยสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ เกิดรีโทรเกรเดชันทันทีเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน คือ มี % รีโทรเกรเดชัน เท่ากับ 8.87 และ 13.46 % รีโทรเกรเดชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก แต่เมื่อเก็บไว้อีก 7 วัน พบว่า %รีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มคงที่ และการเก็บที่ – 20 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่า % รีโทรเกรเดชันลดลงและช้าลงเมื่อเทียบกับการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิ onset temperature ในการเกิด regelatinization ของเจลที่เกิดรีโทรเกรเดชันนี้มีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันในครั้งแรก (67 – 70 องศาเซลเซียส) แสดงว่าการเรียงตัวของโครงสร้างของสายโมเลกุลของสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชัน ไม่หนาแน่นและแข็งแรงเท่าการเรียงตัวของโครงสร้างเดิมของเม็ดสตาร์ช (White and Abbas, 1989; Yaun, Thompson, and Boyer, 1993)



a



b

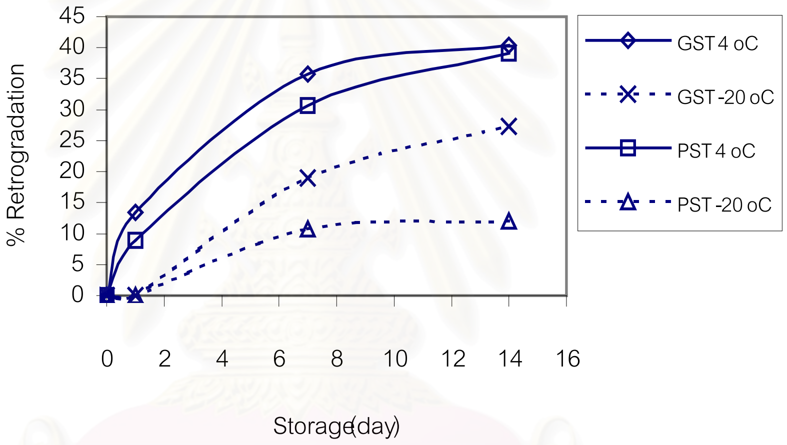
รูปที่ 4.9 Endothermic peak ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมหลังเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ –20 องศาเซลเซียส นาน 1, 7, และ 14 วัน

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 % การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเท้ายายม่อม

สตาร์ชเท้ายายม่อม	% Retrogradation	
	GST	PST
4^0C 1 วัน	13.46	8.87
4^0C 7 วัน	35.80	30.69
4^0C14 วัน	40.38	39.08
-20^0C1 วัน	0	0
-20^0C7 วัน	18.94	10.80
-20^0C14 วัน	27.29	12.08



รูปที่ 4.10 % Retrogradation ของสตาร์ชเท้ายายม่อม

4.3.7 Freeze-thaw stability **ของสตาร์ชเท้ายายม่อม**

จากการศึกษา freeze-thaw stability ซึ่งเป็นการวัดปริมาณน้ำที่แยกออกมาหลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge (การเกิด syneresis) พบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกัน(ตารางที่ 4.9) โดยที่ freeze-thaw cycle 1 และ cycle 2 ไม่มีน้ำแยกตัวจากเจลหลังการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge แสดงว่าไม่มีการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC (ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10) ซึ่งไม่เกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บเจลไว้เป็นเวลา 1 วัน ที่ -20 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผ่าน freeze-thaw cycle มากกว่า 3 รอบพบว่ามีน้ำแยกตัวออกมา(เกิด syneresis) ขึ้นหลังจาก centrifuge แต่เนื่องจากโครงสร้างของเจลของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างคล้ายฟองน้ำ ซึ่งโครงสร้างนี้สามารถดูดน้ำกลับได้ ทำให้ไม่สามารถวัดการเกิด

น้ำที่แยกออกมาได้ การเกิดโครงสร้างคล้ายฟองน้ำของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม แสดงว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมี freeze-thaw stability ต่ำ ทำให้สตาร์ชเท้ายายม่อมไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท frozen product สตาร์ชเท้ายายม่อมมี freeze-thaw stability ต่ำ แสดงว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี ทำให้สามารถนำไปผสมกับแป้งชนิดอื่นๆ เพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการการเกิดรีโทรเกรเดชัน เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับ freeze-thaw stability ของสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชสาคูที่ศึกษาโดย Varavinit และคณะ (2000)และสตาร์ชข้าวเจ้าพันธุ์ต่างๆ ที่ศึกษาโดย Varavinit และคณะ (2002) พบว่า สตาร์ชเท้ายายม่อมมี freeze-thaw stability ต่ำกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชสาคู และสตาร์ชข้าวเจ้า เนื่องจากสตาร์ชเท้ายายม่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นโครงสร้างฟองน้ำ

ตารางที่ 4.9 Freeze-thaw cycle ของสตาร์ชเท้ายายม่อม

ตัวอย่าง	ลักษณะโครงสร้างหลัง freeze-thaw cycle						
	1	2	3	4	5	6	7
สตาร์ช GST	ไม่เกิด syneresis ไม่เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	ไม่เกิด syneresis ไม่เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ
สตาร์ช PST	ไม่เกิด syneresis ไม่เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	ไม่เกิด syneresis ไม่เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ	เกิดโครงสร้างฟองน้ำ

หมายเหตุ โครงสร้างฟองน้ำของ cycle ที่ 3 – 7 ไม่มีความแตกต่างกัน โดยหลังจาก centrifuge จะมีน้ำที่แยกออกมาในปริมาณใกล้เคียงกัน ก่อนที่โครงสร้างฟองน้ำจะดูดน้ำกลับ

4.3.8 เสถียรภาพของแป้งเปียกสตาร์ชเท้ายายม่อม

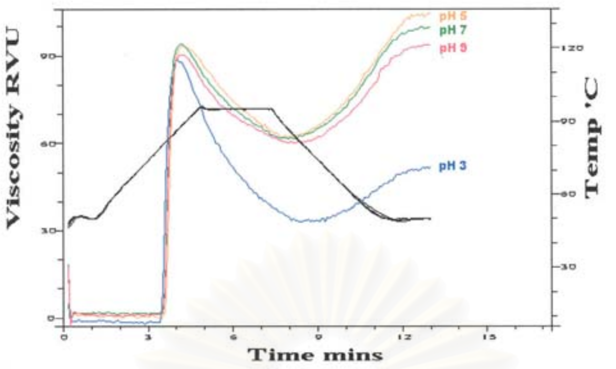
4.3.8.1 เสถียรภาพต่อความเป็นกรด

วัตถุประสงค์ของการใช้แป้งในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายประการ ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ(Furia, 1972) เช่น การใช้แป้งเพื่อเป็นสารเพิ่มความหนืด (thickening agent) ในซอสมะเขือเทศและซุปครีม สารให้เสถียรภาพ(stabilizer) ในน้ำสลัดข้น เป็นต้น แม้ว่าการใช้แป้งจะมีความแตกต่างในวัตถุประสงค์การใช้งาน แต่ในเชิงปฏิบัติหรือ

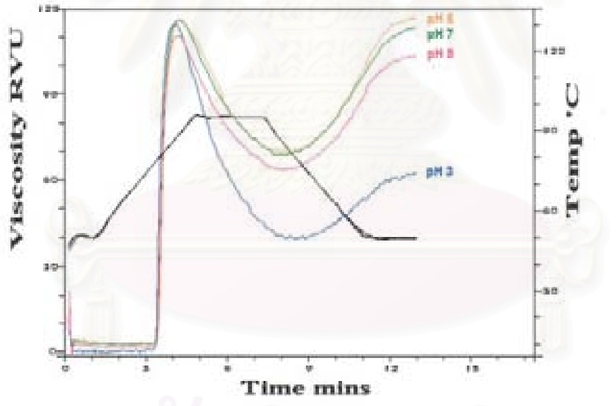
กระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะมีลักษณะการใช้งานที่คล้ายกัน เช่น ใช้แป้งในรูปของแป้งเปียกโดยผ่านกระบวนการให้ความร้อน การกวน และอาจมีการปรับ pH ของอาหาร เป็นต้น ดังนั้นในการทดสอบเสถียรภาพของแป้ง จึงควรพิจารณาถึงผลของ pH ต่อเสถียรภาพของแป้ง โดยทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating-cooling cycle เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับการใช้งานจริง

จากการศึกษาเสถียรภาพต่อความเป็นกรดของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle (รูปที่ 4.11) ใกล้เคียงกัน แต่สตาร์ช PST มีความหนืดมากกว่าสตาร์ช GST (ตารางที่ 4.10 และ 4.11) โดยที่ pH 5, 7 และ 9 สตาร์ชทั้งสองพันธุ์มีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน ส่วนที่ pH 3 สตาร์ชมีความหนืดที่แตกต่างจาก pH อื่นๆ ค่าความหนืดจะเริ่มแตกต่างกันชัดเจนเมื่อผ่านช่วง peak viscosity แล้ว โดยค่า breakdown ที่ pH 3 จะสูงกว่าที่ pH อื่นๆ และ มี final viscosity ต่ำกว่า ส่งผลให้ค่า setback ต่ำด้วย ทั้งนี้เนื่องจากที่ pH ต่ำ สตาร์ชถูก hydrolysedโดยเกิดการตัดพันธะ glycosidic ของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้โมเลกุลแป้งฉีกขาดได้ง่าย ความหนืดจึงลดลงมากในช่วง heating cycle (Freeman and Verr, 1972; Schoch,1985) ดังนั้น ในการนำสตาร์ชเท้ายายม่อมไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือ การดัดแปรแป้งจะต้องระมัดระวังค่าความเป็นกรดของอาหาร สตาร์ชช่วง pH 5 – 7 มีความเหมาะสมในการใช้งานสตาร์ชเท้ายายม่อม เนื่องจากช่วง pH ดังกล่าวมีความแตกต่างของความหนืดน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า pH ไม่มีผลต่อ pasting temperature ของสตาร์ชเท้ายายม่อม

เมื่อนำสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าความหนืดพบว่า pH ไม่มีผลต่อค่า peak viscosity (รูปที่ 4.12) แต่ pH มีผลต่อค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส(รูปที่ 4.13) โดยพบว่าที่ pH 3 สตาร์ชมีความหนืดที่ 95 องศาเซลเซียสต่ำสุด ส่วนที่ pH อื่นค่าความหนืดที่ 95 องศาเซลเซียสไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะส่งเสริมการเกิด hydrolysis ทำให้สตาร์ชทำปฏิกิริยากับกรด(ที่ pH 3 ดีกว่าที่ pH อื่นๆ) ได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนในสตาร์ช ความหนืดจึงลดลง เมื่อพิจารณาผลของ pH ต่อ final viscosity(รูปที่ 4.14) พบว่าที่ pH 3 สตาร์ชมีความหนืดสุดท้ายต่ำสุด ซึ่งผลของ final viscosity นี้เป็นไปทางเดียวกับ setback (รูปที่ 4.15)



a



b

รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 ที่ pH ต่างๆ

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ช GST ความเข้มข้น 6% ที่ pH ต่างๆ

condition	Peak 1 (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
pH 3	90a ± 2	33a ± 2	57b ± 2	52a ± 2	19a ± 0	78.78a ±0.54
pH 5	95a ± 3	62b ± 1	33a ± 2	105c ± 1	43c ± 0	80.33a ±0.84
pH 7	93a ± 2	60b ± 2	34a ± 2	98b ± 3	38b ± 0	79.98a ± 0.53
pH 9	91a ± 2	59b ± 2	32a ± 3	94b ± 1	35b ± 3	79.53a ± 1.17

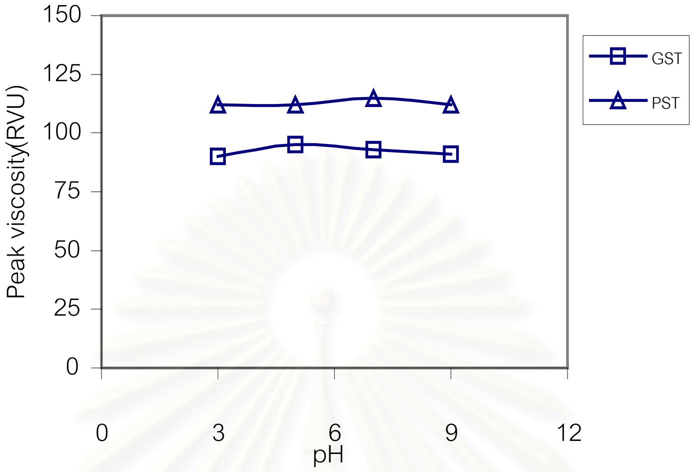
a,b,c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.11 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของสตาร์ช PST ความเข้มข้น 6% ที่ pH ต่างๆ

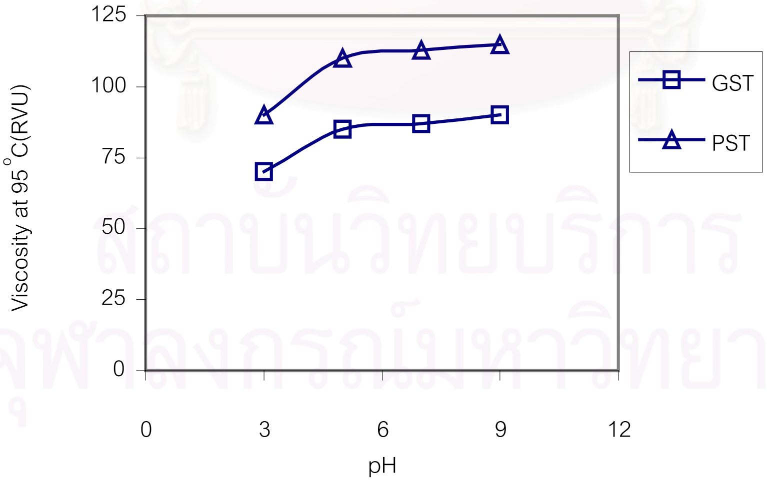
condition	Peak 1 (RVU)	Trough 1 (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
pH 3	112a ± 4	39a ± 1	74b ± 3	62a ± 1	23a ± 0	78.00a ±0.07
pH 5	112a ±4	67b ± 3	45a ± 1	113b ± 4	46c ± 1	78.45a ±0.57
pH 7	115a ± 2	67b ± 3	48a ± 1	111b ± 4	44bc ± 1	78.38a ± 0.67
pH 9	112a ± 2	64b ± 0	48a ± 2	104b ± 4	41b ± 2	78.78a ± 0.04

a,b,c ที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

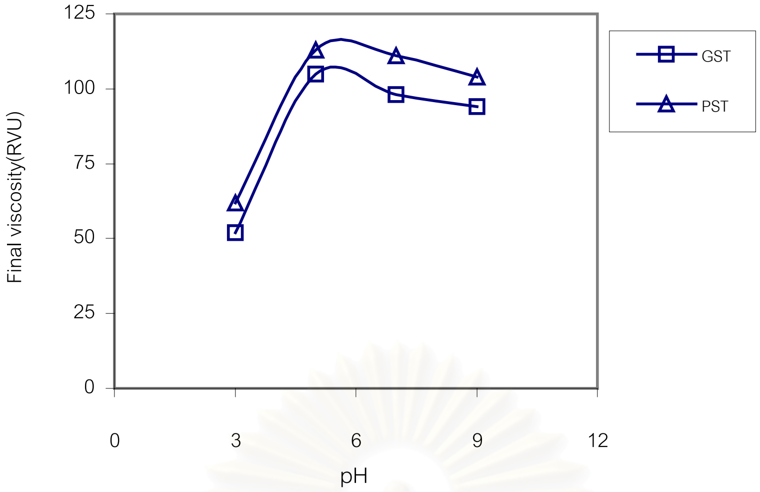
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



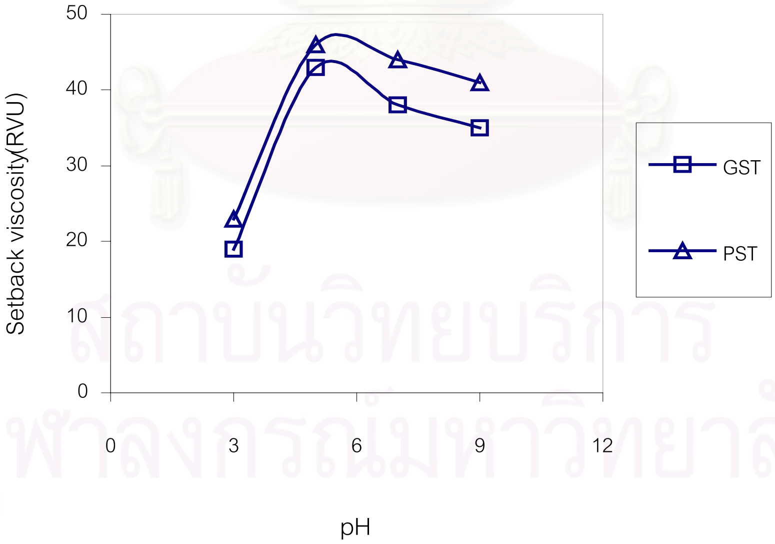
รูปที่ 4.12 ผลของ pH ต่อ peak viscosity ของสตาร์ช
เท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6 %



รูปที่ 4.13 ผลของ pH ต่อความหนืดที่ 95 °C ของ
สตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6 %



รูปที่ 4.14 ผลของ pH ต่อ final viscosityของสตาร์ช
เท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6%



รูปที่ 4.15 ผลของ pH ต่อ setback ของสตาร์ช
เท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 6 %

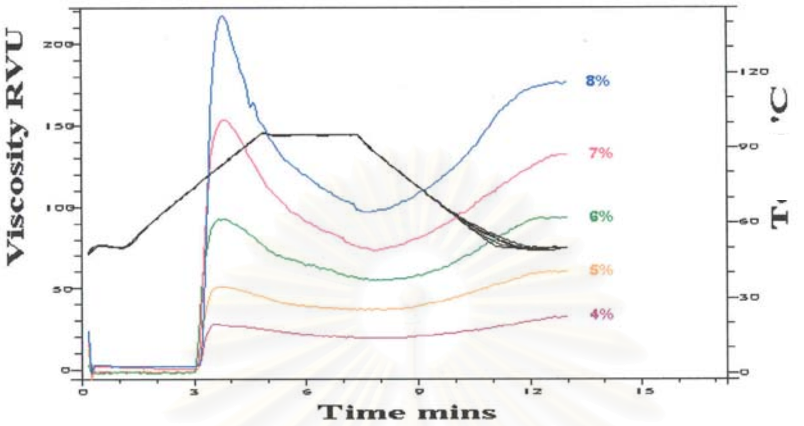
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.8.2 ผลของความความเข้มข้นต่อเสถียรภาพความหนืดของแป้งเปียก

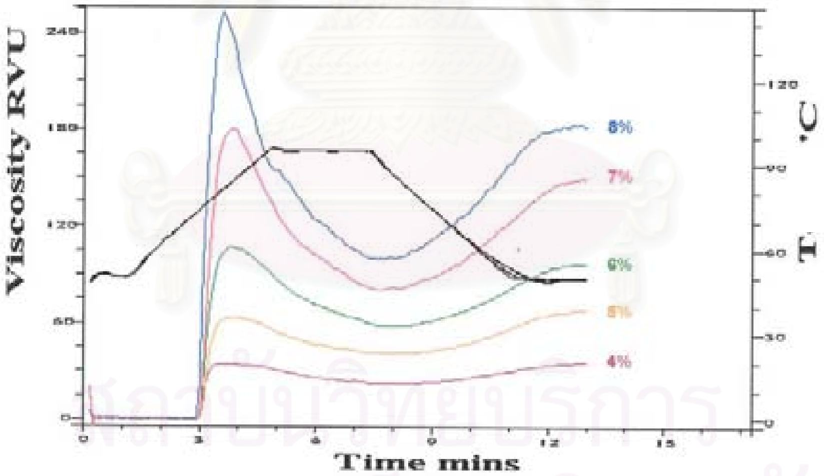
Marzurs, Schoch, และ Kite(1957) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกที่ความเข้มข้นต่างๆ ในช่วง heating-cooling cycle ด้วยเครื่อง Brabender visco analyzer พบว่าความเข้มข้นของแป้งเปียกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating-cooling cycle จากการทดลองซึ่งกำหนดจุดวิเคราะห์ 5 จุด คือ peak viscosity ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ final viscosity พบว่า สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle (รูปที่ 4.16)ไม่แตกต่างกัน โดยเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ค่า peak viscosity และ ค่า breakdown แตกต่างกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชสูงขึ้น granule-granule interaction จะเกิดมากขึ้น ทำให้ peak viscosity สูงขึ้น (Morris, 1989) แต่ granule-granule interaction ทนต่อแรงเฉือนได้ต่ำ ทำให้ค่า breakdown ที่ได้มีความแตกต่างกันมากขึ้นส่วนค่า pasting temperature ไม่แตกต่างกัน(ตารางที่ 4.12 และ 4.13) ซึ่งผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับการทดลองของ Marzurs, Schoch, และ Kite(1957) ที่พบว่า pasting temperature ของสตาร์ชข้าวโพดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้มีเม็ดสตาร์ชมากขึ้น ซึ่งเมื่อมีการพองตัวจะทำให้แป้งเปียกแสดงความหนืดได้เร็วกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ความขัดแย้งนี้อาจเกิดเนื่องจากสตาร์ชเท้ายายม่อมมีเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชเท้ายายม่อมจัดว่ามีความหนืดสูง จึงทำให้ pasting temperature ไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณากราฟระหว่างความเข้มข้นของสตาร์ชกับความหนืดในระหว่าง heating-cooling cycle(รูปที่ 4.17) พบว่า สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้ง 2 พันธุ์มีรูปแบบกราฟใกล้เคียงกัน โดยพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ(4%) ค่าความหนืดใกล้เคียงกัน แสดงว่าแป้งเปียกมีเสถียรภาพดี ความร้อนและแรงเฉือนไม่มีผลต่อความหนืด แต่เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ความหนืดมีความแตกต่างกันมากขึ้น และที่ความเข้มข้นสูง(8%) ความแตกต่างของความหนืดยิ่งมากขึ้น นั่นคือเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ความหนืดต่ำลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงจะเกิดแรง granule-granule interaction ขึ้นยิ่งความเข้มข้นมากขึ้น granule-granule interaction ยิ่งมากขึ้น ทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่ค่า granule-granule interaction นี้มีเสถียรต่อความร้อนและแรงเฉือนต่ำ (Morris, 1989) ทำให้เมื่อความร้อนสูงขึ้นรวมถึงมีปัจจัยจากแรงเฉือนจึงทำให้ breakdown มีสูง ความหนืดที่ความเข้มข้นสูงจึงมีเสถียรภาพน้อยกว่าความหนืดในช่วงความเข้มข้นต่ำ การศึกษาผลของความเข้มข้นแป้งต่อรูปแบบความหนืดใน heating-cooling cycle ทำให้สามารถเลือกช่วงความเข้มข้นของสตาร์ชเท้ายายม่อมไปใช้ได้ โดยที่ความเข้มข้นต่ำเหมาะจะเป็นสารให้

ความข้นหนืดในอาหารประเภท ซุป และ ซอส เนื่องจากความหนืดมีความเสถียรสูง ส่วนที่ความเข้มข้นสูงจะเหมาะกับอาหารประเภทที่ต้องการเพิ่มปริมาณเนื้อและความหนืดสูง



a



b

รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดใน heating-cooling cycle
ของสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ความเข้มข้น 4, 5, 6, 7, และ 8
a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของ สตาร์ช GST ที่ความเข้มข้นต่างๆ

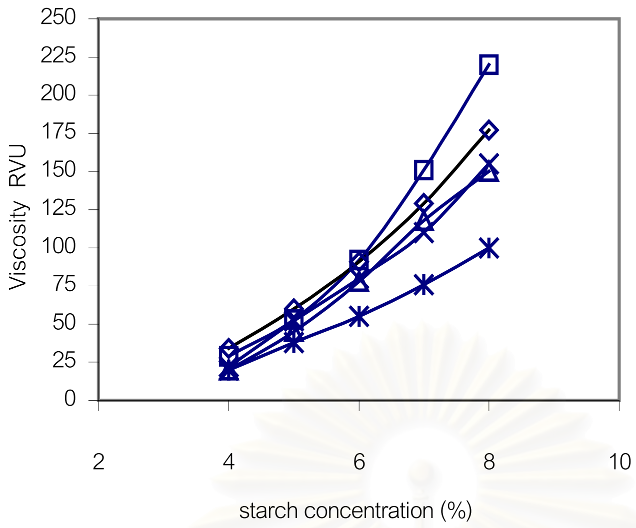
Starch concentration	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Break Down (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
4 %	29a ± 1	20a ± 2	8 a± 1	34a ± 3	14a ± 1	75.18a ± 0.53
5 %	53b ± 2	37b ± 1	15b ± 1	60b ± 1	23b ± 1	71.08a ± 5.13
6 %	92c ± 1	54c ± 0	38c ± 1	91c ± 2	37c ± 2	74.80a ± 1.20
7 %	151d ± 3	71d ± 3	80d ± 1	129d± 4	57d ± 1	74.73a ± 0.04
8 %	220e ± 4	98e ± 1	122e ±3	177e ± 1	80e ± 0	74.70a± 1.06

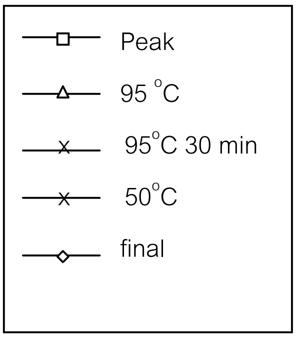
a,b,c... ที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.13 ความหนืดระหว่าง heating-cooling cycle ที่วิเคราะห์โดย RVA ของ สตาร์ช PST ที่ความเข้มข้นต่างๆ

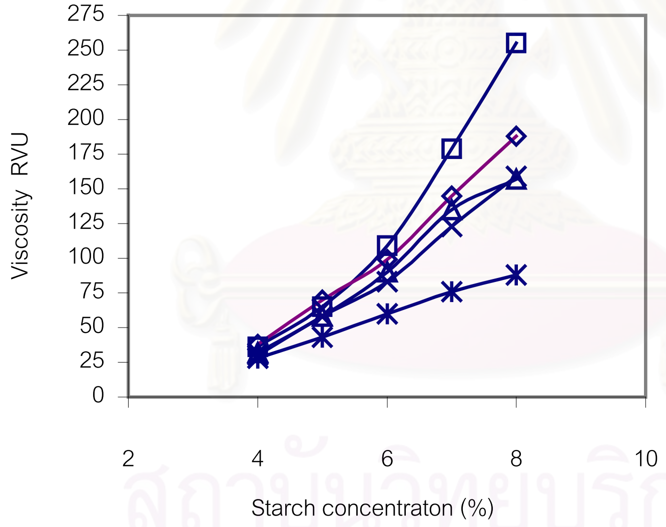
Starch concentration	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Break Down (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (RVU)
4 %	36a ± 2	24a ± 1	12a ± 0	38a ± 3	15a ± 1	73.15a ± 0.07
5 %	65b ± 2	42b ± 1	23b ± 1	70b ± 2	28b ± 1	73.50a ± 0.49
6 %	109c ± 3	59c ± 1	50c ± 2	99c ± 3	40c ± 1	73.55a± 0.57
7 %	179d ± 2	80d ± 1	99d ± 1	145d ± 7	64d ± 6	73.95a ± 0.00
8 %	255e ± 3	102e ± 4	152e ±1	188e ± 6	86e ± 3	72.80a ± 0.64

a,b,c... ที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึง ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p \leq 0.05$)





a



b

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.17 กราฟแบบ Marzurs เปรียบเทียบความหนืดที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสตาร์ชเท้ายายม่อม

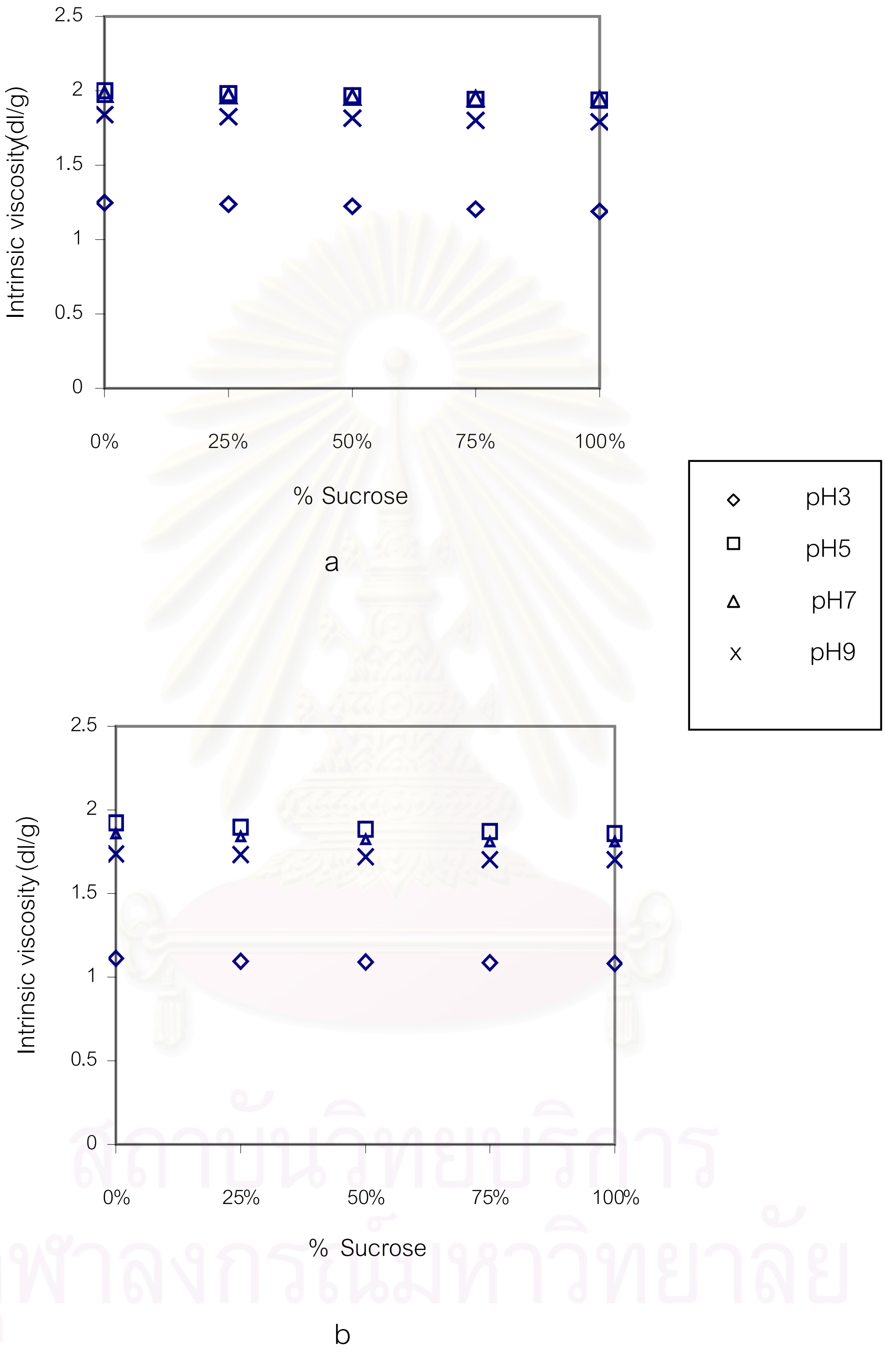
a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

4.3.9 ผลของ pH และความเข้มข้นของซูโครสต่อค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อม

จากการวิเคราะห์ค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมในสารละลายบัฟเฟอร์ citric acid-di-sodium phosphate pH 3 และ pH 5 ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และในสารละลายบัฟเฟอร์ sodium carbonate-sodium bicarbonate pH 9 ที่ความเข้มข้นของน้ำตาล 0, 25, 50, 75 และ 100 % โดยน้ำหนักแป้งแห้ง (รูปที่ 4.18) พบว่า pH และปริมาณ sucrose ไม่มีผลต่อค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อม ยกเว้นที่ pH 3 ซึ่งเป็น pH ที่ต่ำ ทำให้เกิดการ hydrolysis ของสตาร์ช ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง(Freeman and Verr, 1972; Schoch, 1985) ทำให้ค่า intrinsic viscosity ลดลง เช่นเดียวกับการวัดความหนืดด้วย RVA (รูปที่ 4.16) ค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ให้ผลเป็นไปในทางเดียวกัน โดยพบว่าค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการวัดค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อมพบว่า น้ำตาลไม่มีผลต่อค่า intrinsic viscosity ทั้งนี้อาจเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำตาลในระบบที่ศึกษาน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำอิสระ ซึ่งมีปริมาณมากเกินพอสำหรับการเกิดเจลาติไนเซชัน นอกจากนี้ยังอาจสรุปได้ว่าน้ำตาลไม่ได้ไปจับตัวกับ amorphous region ของเม็ดสตาร์ชซึ่งจะมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน ดังที่ Spies และ Hoseney(1982) กล่าวไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ผลของ pH และความเข้มข้นน้ำตาลต่อค่า intrinsic viscosity ของ สตาร์ช PSTที่ 30 องศาเซลเซียส

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

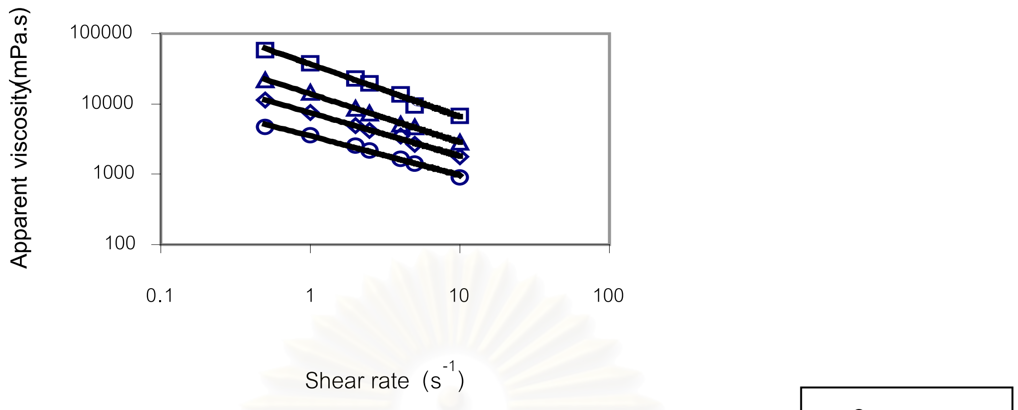
4.3.10 ผลของความเข้มข้นสตาร์ชต่อลักษณะการไหลของสตาร์ชเท้ายายม่อม

จากการทดลองวัดค่า apparent viscosity ของ paste เท้ายายม่อมที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ช 4 ระดับ คือ 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 ด้วย rotational viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.5 – 10 นาที$^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 30 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะการไหลของแป้งเปียกสตาร์ชเท้ายายม่อม(รูปที่ 4.19) จะมีค่า apparent viscosity ลดลงเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น และเป็นไปตาม Power law ซึ่งมีค่า flow behavior index ต่ำกว่า 1 เป็นลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic ดังนี้

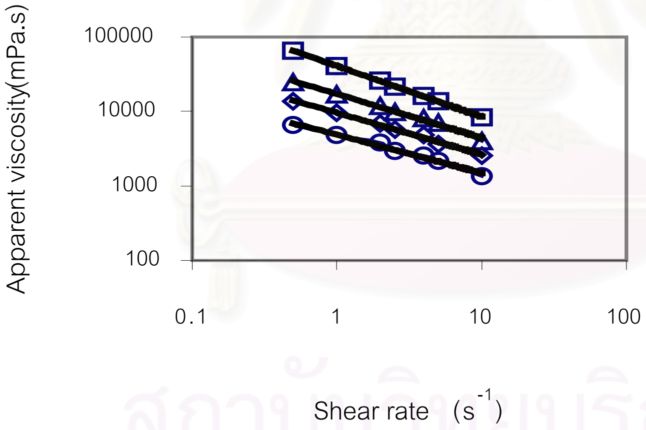
ตารางที่ 4.14 สมการการไหลของสตาร์ชเท้ายายม่อมตาม Power law

ความเข้มข้น	สมการการไหลของสตาร์ช	
g/$dl_{solution}$	สตาร์ช GST	สตาร์ช PST
2.5	345.33 $\gamma^{--0.60}$	388.44$\gamma^{-0.55}$
3.0	637.78$\gamma^{-0.62}$	744.11$\gamma^{-0.57}$
3.5	1295.22$\gamma^{-0.70}$	1422.78$\gamma^{-0.63}$
3.5	3450.56$\gamma^{-0.74}$	3659.78$\gamma^{-0.68}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a



b

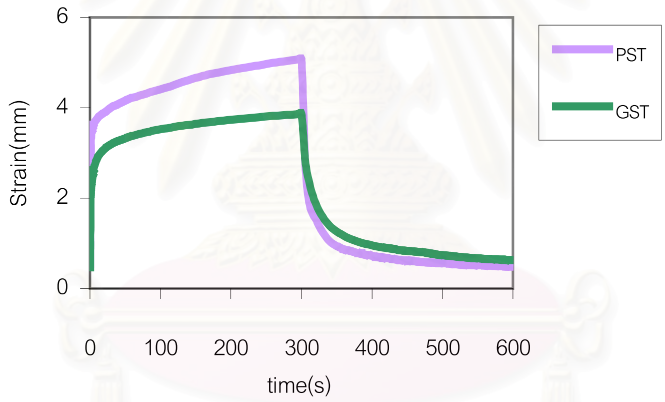
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ Apparent viscosity ของแป้งเปียกสตาร์ช เท้ายายม่อมที่ความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 2.5 – 4 % ในสารละลาย pH 7

a. สตาร์ช GST b. สตาร์ช PST

4.3.11 **ลักษณะทาง viscoelasticity ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม**

เมื่อกดเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 20 กรัมต่อเดซิลิตร ด้วยแรงเค้นคงที่ 20 N โดยเจลมีพื้นที่หน้าตัด 2003 ตารางมิลลิเมตร นาน 300 วินาที เพื่อหาความสัมพันธ์ของ response strain กับ เวลา (รูปที่ 4.20) พบว่าค่า strain ของสตาร์ช GST ต่ำกว่าสตาร์ช PST แสดงว่าเจลสตาร์ช GST มีแรงต้านต่อการเปลี่ยนรูปจากแรงเค้นที่ให้มากกว่า นั่นคือเจลสตาร์ช GST มีความแข็งและยืดหยุ่นของเจลดีกว่า หรืออีกนัยหนึ่งคือสตาร์ช GSTแสดงถึงสมบัติทาง elasticity มากกว่าสตาร์ช PST หรือมีสมบัติทาง viscosity น้อยกว่าสตาร์ช PST เมื่อเปรียบเทียบเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมกับเจลสตาร์ชถั่วเขียวที่ศึกษาโดย นภมณี มงคลประเสริฐ (2544) พบว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวมีค่า elasticity สูงกว่าสตาร์ชเท้ายายม่อม ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งของเจลสตาร์ชขึ้นกับปริมาณอะมิโลส โดยสตาร์ชถั่วเขียวมีอะมิโลสประมาณ 40 % ซึ่งมากกว่าสตาร์ชเท้ายายม่อม



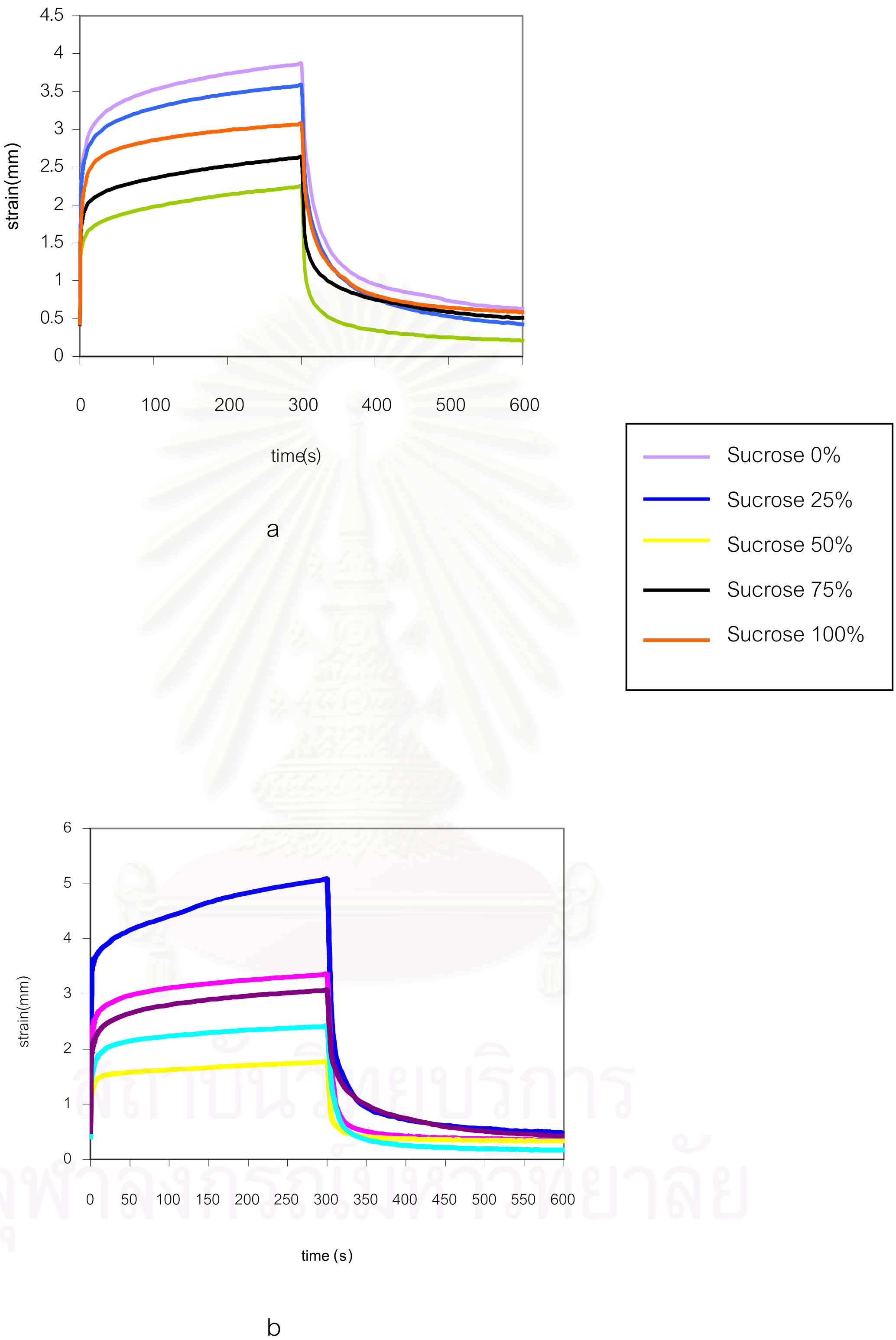
รูปที่ 4.20 Creep recovery ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลของน้ำตาลต่อลักษณะทาง viscoelastic ของสตาร์ชเท้ายายม่อม(รูปที่ 4.21) พบว่าน้ำตาลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเจล ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลมีผลต่อ water activity ของระบบ(Evans and Haisman,1982) เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นน้ำตาลตั้งแต่ 0, 25,และ 50 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง พบว่า ที่ความเข้มข้นน้ำตาล 25 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง เจลมีแรงต้านการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเค้นมากกว่าที่ความเข้มข้น 0 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง และที่ความเข้มข้นน้ำตาล 50 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง เจลมีค่าแรงต้านการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเค้นมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลซูโครสมากขึ้น น้ำอิสระในระบบลดลง

ส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชใกล้กันมากขึ้น จึงจับตัวกันง่ายขึ้น ทำให้เจลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลซูโครสเป็น 75 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง เจลกลับมีค่าแรงต้านการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเค้นน้อยกว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส 50 % แต่มากกว่าที่ความเข้มข้นซูโครส 0 และ 25 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมเจลที่ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งกำหนดให้สูงกว่า final pasting temperature (83 องศาเซลเซียส) (ตารางที่ 4.6) ไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ ตามรายงานของ Beleia, Miller และ Hoseney (1996) ซึ่งกล่าวว่าน้ำตาลทำให้ onset gelatinization temperature เพิ่มขึ้นมากกว่า 2 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลมากขึ้น และ Paredes-Lopez และ Hernandez-Lopez(1991) พบว่าน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกิดเจลาติไนเซชันลดลง เมื่อเกิดการเจลาติไนเซชันได้น้อย อะมิโลสจึงหลุดออกมาน้อยส่งผลต่อการเกิดเจลของสตาร์ชเท้ายายม่อม ทำให้เจลมีค่าแรงต้านการเปลี่ยนรูปน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำตาลสูงกว่า 50 % แต่มากกว่า ที่ความเข้มข้นซูโครส 0 และ 25 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง เช่นเดียวกันกับที่ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครสที่ 100 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ นั่นคือเมื่อปริมาณน้ำตาลเพิ่มจาก 0 – 50 % โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง เจลจะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลซูโครสมากกว่า 50 %เจลจะกลับมีความความแข็งแรงและความยืดหยุ่นลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 Creep recovery ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม ที่ความเข้มข้นน้ำตาลต่างๆ

a สตาร์ช GST b สตาร์ช PST

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีคุณสมบัติด้านต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน โดยมี % yield ในการสกัดอยู่ในช่วง 20 - 24 % มีคาร์โบไฮเดรต 99.58 % โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ฟอสฟอรัส มีอยู่ในปริมาณต่ำและมีอะมิโลสประมาณ 21 – 24 % เม็ดสตาร์ชมีรูปไข่และถ้วยคล้ายสตาร์ชมันสำปะหลัง เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัว ไม่เกาะกลุ่มกัน ที่พื้นผิวของสตาร์ชจะไม่มีรอยแตก ยกเว้นที่รอยตัดรูปถ้วยของเม็ดสตาร์ชที่มีพื้นผิวไม่เรียบ เม็ดสตาร์ชเท้ายายม่อมจัดว่ามีขนาดปานกลาง โดยขนาดอยู่ในช่วง 11 - 33 ไมครอน ขนาดเฉลี่ย 21 ไมครอน

2. สตาร์ชเท้ายายม่อมมี birefringence ที่เห็นได้ชัดเจน และมีไฮลัมที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แสดงว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมีผลึกอยู่ โดยผลึกมี X-ray diffraction pattern เป็นแบบ C ซึ่งเป็นรูปแบบผลึกที่พบในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว

3. สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีการดูดน้ำที่ 30 องศาเซลเซียสในปริมาณเท่ากัน คือ 1.89 g น้ำ/g สตาร์ช แต่สตาร์ช PST มีการละลายน้ำได้มากกว่าสตาร์ช GST

4. สตาร์ช PST มีกำลังการพองตัวที่ 95 องศาเซลเซียส เท่ากับ 65.15 % สูงกว่าสตาร์ช GST ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.55 %แต่มีค่าร้อยละการละลายไม่แตกต่างกัน สตาร์ชเท้ายายม่อมมีกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่นๆ พบว่า มีค่ากำลังการพองตัวและการละลายสูงกว่าสตาร์ชจากข้าวฟ่าง แต่ต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง และค่ากำลังการพองตัวและการละลายใกล้เคียงกับสตาร์ชมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมีการเปลี่ยนแปลงกำลังการพองตัวอย่างรวดเร็วที่ช่วงอุณหภูมิ 65 – 70 องศาเซลเซียส

5. สตาร์ชเท้ายายม่อมมีการเกิดเจลาติไนเซชันในช่วงอุณหภูมิ 67 – 83 องศาเซลเซียส(วัดด้วย DSC) เมื่อวัดด้วย RVA พบว่ามีการเกิดเจลาติไนเซชัน 72 – 74 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่วัดด้วย DSC

6. สมบัติด้านความหนืดเมื่อวัดด้วย เครื่อง RVA พบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์ มีความหนืดสูง โดยสตาร์ช PST มีค่า peak viscosity เท่ากับ 340 RVU ซึ่งสูงกว่าสตาร์ช GST(308 RVU) แต่สตาร์ชทั้งสองพันธุ์มีค่า final viscosity ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของแป้งเปียกและกราฟที่ได้จากเครื่อง RVA คล้ายกับสตาร์ชมันสำปะหลัง แป้งเปียกของสตาร์ชเท้ายายม่อมมีลักษณะใส และมีความทนทานต่อความร้อนและแรงเฉือนได้ต่ำ

7. สตาร์ชเท้ายายม่อมมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ทันทีเมื่อเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน โดยสตาร์ช GST เกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ 13.46 % ซึ่งดีกว่าสตาร์ช PST(8.89 %) เมื่อเก็บเป็นเวลา 7 วัน สตาร์ช GST มีการเกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ 35.80 % ซึ่งมากกว่าสตาร์ช PST (30.69%) เมื่อเก็บเป็นเวลา 14 วัน สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันคงที่ การเก็บที่ -20 องศาเซลเซียส จะช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยเจลที่เก็บ 1 วันจะไม่มีการเกิดรีโทรเกรเดชัน และเมื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี freeze-thaw stability พบว่าเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมเกิดโครงสร้างคล้ายฟองน้ำ แสดงว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี

8. ที่ pH 3 สตาร์ชเท้ายายม่อมมีเสถียรภาพของความหนืดต่ำ ดังนั้น ในการนำสตาร์ชเท้ายายม่อมไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือ การดัดแปรแป้งจะต้องระมัดระวังค่าความเป็นกรดของอาหาร และพบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมมีเสถียรภาพของความหนืดดีที่ความเข้มข้นต่ำ(4 – 5 %) โดยมีค่าความหนืดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ตลอดช่วง heating-cooling ที่ศึกษา และความเข้มข้นยิ่งสูงขึ้นยิ่งทำให้เสถียรภาพของความหนืดต่ำลง

9. น้ำตาลและ pH ไม่มีผลต่อค่า intrinsic viscosity ซึ่งเป็นการวัดความหนืดที่มีความเข้มข้นเจือจาง(มีน้ำอยู่มาก) ยกเว้นที่ pH 3 ค่า intrinsic viscosity ลดลงต่ำกว่าที่ pH อื่นๆ

10. สตาร์ชเท้ายายม่อมทั้งสองพันธุ์มีการไหลแบบ pseudoplastic

11. น้ำตาลซูโครสที่น้อยกว่า 50 %โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง มีผลทำให้เจลมีแรงต้านต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น($\leq$ 50 % โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) แต่ถ้าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจะทำให้

water activity ในระบบลดลง ทำให้เจลสตาร์ชเท้ายายม่อมเกิดเจลาติไนเซชันได้ไม่สมบูรณ์ อะมิโลส จึงหลุดออกมาได้น้อย ทำให้เจลมีแรงต้านในการเปลี่ยนรูปลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาสมบัติการย่อยของสตาร์ชเท้ายายม่อมเพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ ซึ่งควรจะควบคุมสภาวะให้คล้ายกับการย่อยของมนุษย์ จากการที่ผู้ทดลองทำการทดลองเบื้องต้น โดยทำการทดลองแบบ enzyme susceptibility พบว่าสตาร์ชเท้ายายม่อมถูกย่อยด้วย α-amylase ที่สกัดจากตับอ่อนหมู ที่ pH 7 พบว่าไม่มีการย่อยได้น้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชถั่วเขียว และข้าวโพด ทั้งนี้อาจเนื่องจาก pH ที่ใช้ไม่ใช่สภาวะกรดในกระเพาะอาหาร ซึ่งน่าจะมีผลต่อการย่อยสตาร์ช

2. ควรมีการศึกษาการนำสตาร์ชเท้ายายม่อมไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เส้นหมี่ ก๋วยเตี๋ยว หรือ วุ้นเส้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากสตาร์ชเท้ายายม่อมมีการรีโทรเกรเดชันได้ดี และอาหารจำพวกซุป ซอส เพื่อให้ความข้นหนืด ซึ่งสตาร์ชเท้ายายม่อมมีเสถียรภาพดีที่ความเข้มข้นต่ำ เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. *เทคโนโลยีแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช. 2544. เท้ายายม่อม พืชเสริมรายได้ใหม่. *BOTANY&WEED* แหล่งที่มา : http://www.disc.doa.go.th/botany/foot.htm. (9 กันยายน 2544).

จีระวรรณ อานามวงศ์. 10 พฤศจิกายน 2544. ผู้วิจัยงานวิชาการเกษตร ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องในพระราชดำริ อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี. สัมภาษณ์.

เจริญศรี พลเวียง. 2543. เคล็ดลับการทำขนมไทย. *แม่บ้าน : อาชีพแก้จน ขนมไทย พร้อมเทคนิกการห่อขนมด้วยใบตอง*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แม่บ้าน จำกัด.

นันทวัน บุณยะประภัศร และ อรนุช โชคชัยเจริญพร. 2541. *สมุนไพร-ไม้พื้นบ้าน(2)*. กรุงเทพมหานคร: สำนักข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

นภมณี มงคลประเสริฐ. 2544. *สมบัติการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากถั่วเขียว สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประนอม บุญช่วย. 6 ตุลาคม 2544. เกษตรกรผู้ผลิตแป้งเท้ายายม่อม จ.ชลบุรี.สัมภาษณ์

ศิริพรรณ หวังอารีย์ และ นพรัตน์ แซ่อึ้ง. 2528. *การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแป้งที่ผลิตในประเทศ*. รายงานการวิจัยตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภาภรณ์ ภัทรสุทธิ. 2543. เท้ายายม่อม พืชหัวที่น่าสนใจ. *ข่าวพฤกษศาสตร์และวัชพืช* . กรุงเทพมหานคร: กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. 2545. *สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศ*. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2521. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง มอก-274-2521*. กรุงเทพ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F., and Griffin, E.L.1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*. 14: 4-12.

A.O.A.C. 1995. Official Methods of Analysis. *Association of Official Analytical Chemists.*16thed. Washington D.C. AOAC International.

Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback, D.R., Varriano-Marston, E., and Zobel, H.F. 1988. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*. 33: 306 – 311.

Baker, L.A. and Duarte, P.R. 1995. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperatures and the effects of salt and sugars. *Cereal Chemistry*. 75(3): 308 – 314.

Barbosa-Canovas, G.B., Kokini, J.L., Ma, L., and Ibarz, A. 1996. The rheology of semiliquid foods. *Advances in Food and Nutrition Research*. 39: 1 – 69.

Beleia, A., Miller, R.A., and Hoseney, R.C. 1996. Starch gelatinization in sugar solutions. *Starch/Starke*. 48: 259-262.

Bowers, J. 1992. *Food theory and applications*. New York: Macmillian Publishing Company.

Brogracheva, T.Ya., Morris, V.J., Ring, S.G., and Hedley, C.L.1998. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization. *Biopolymers*. 45: 323 – 332.

Casson, N.1959. A flow equation for pigment-oil suspensions the printing ink type. In C.C. Hill (ed.), *Rheology of disperse system*. London: Pergamon Press.

Collison, R.1968. Starch Retrogradation. In J.A. Radley(ed.), *Starch and its derivative.* pp.395-420. London: Chapman and Hall.

Doremus, G.L., Crenshaw, F.A., and Thurber, F.H. 1951. Amylose content of sweet potato starch. *Cereal Chemistry*. 28(4): 308-317.

Doublier, J.L. 1981. Rheological studies on starch-flow behavior of wheat starch pastes. *Starch/Starke*. 33: 415 – 420.

Elsheikh, S.H., Bashir, A.K., Suliman, S.M., and Wassila, M.E. 1990. Toxicity of certain Sudanese plant extracts on cercariae and miracide of Schistosoma mansoni. *International Journal of Crude Drug Research*. 28(4): 241-245.

Evans, I.D. and Haisman, D.R. 1975. Rheology of gelatinized starch suspension. *Journal of Texture Studies*. 10: 347 – 370.

Evans, I.D. and Haisman, D.R. 1982. The effect of sugars on starch gelatinization temperature range of potato starch. *Starch/Starke*. 34: 224 – 231.

Flanch, B.M. and Rumawas, F. 1996. Plants yielding non-seeding carbohydrate. *Plant Research of South - East Asia*. 9: 156-159.

Freeman, J.E. and Verr, W.J. 1972. A rapid procedure for measuring starch paste development and its application to corn and sorghum starches. *Cereal Science Today*. 17(2): 46-53.

French, D. 1975. Chemistry and biochemistry of starch. In W.J. Whelan (ed.), *Bichemistry of carbohydrates*. pp. 267-335. London: Butterworths.

Fruton, J.S. and Simmonds, S. 1958. *General Biochemistry*. 2nd ed. NewYork: John Wiley and Sons.

Furia, T.E. 1972. *CRC Handbook of Food Additive*. pp. 384 – 392, 542 – 545. Vol. I. Ohio: CRC Press.

Gallant, D.J., Bouchet, B., and Baldwin, P.M. 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. *Carbohydrate Polymers*. 32: 177.

Garcia, V., Colonan, P., Bouchet, B., and Gallant, D.J. 1997. Structural change of cassava starch granules after heating at intermediate water contents. *Starch/Starke*. 49: 171 – 179.

Govindasamy, S., Oates, C.G., and Wang, H.A. 1992. Characterization of changes of sago starch components during hydrolysis by a thermostable alpha-amylase. *Carbohydrate Polymers*. 25: 89-100.

Haasse, N.U., Mintus, T., and Weipert, D. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with the Rapid Visco Analyzer. *Starch/Starke*. 47: 123 – 126.

Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. *Carbohydrate Research*. 14: 398-342.

Holdsworth, M. 1969. Modeling of flow properties of starch paste prepared by different procedures. *Journal of Food Process Engineering*. 11(4): 257 – 275.

Hoover, R., Li, Y.X., Hynes, G., and Senanayake, N. 1997. Physicochemical characterization of mung bean starch. *Food Hydrocolloids*. 11(4): 401 – 408.

Hoover, R. and Manuel, H. 1995. A comparative study of the physicochemical properties of starches from two lentil cultivars. *Food Chemistry*. 53: 273 – 284.

Hoseney, R.C.1994. *Cereal science and technology*. NewYork: American Association of Cereal Chemists.

Islam, M.N. and Mohd, B.M.N. 1997. Rheological properties of calcium treated hydroxypropyl rice starches. *Starch/Starke*. 49(4): 136 – 141.

Islam, N., Mohd, A.M.D., and Noor, A.B.M. 2001. Effect of temperature and starch concentration on the intrinsic viscosity and critical concentration of sago starch (*Metroxylon sagu*). *Starch/Starke*. 53: 90-94.

Jane, J.L. and Chen, J.F. 1991. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*. 69(10): 60 – 65.

Jane, J.L., Chen, Y.Y., Lee, L.F., McPherson, A.E., Wong, K.S., Radosavljevic, M., and Kasemsuwan, T. 1999. Effect of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*. 76: 629 - 637

Kerr, R.W. 1950. *Chemistry and Industry of Starch*. 2^{nd}ed. New York: Academic Press.

Kim,Y.S., Wiesinborn, D.P., Orr, P.H., and Grant, L.A..1995. Differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*. 60(5):1060 – 1065.

Kugimiya, M., Donovan, J.W., and Wong, R.Y. 1980. Phase transitions of amylose-lipid complexes in starches: A calorimetric study. *Starch/Starke*. 32: 265.

Kurasawa, H., Kanauchi, Y., and Wakayama, T. 1973. Relation of rheological properties with starch components among glutinous, sticky, less-sticky non-glutinous rice starches. *Agricultural Biological Chemistry*. 37(12): 2913 – 2916.

Launay, B., Doublier, J.L., and Cuvelier, T. 1986. Flow properties of aqueous solutions and dispersions of polysaccharides In J.R. Mitchell and D.A. Ledward(eds.), *Properties of food macromolecules*. London: Elsevier Applied Science Publishers.

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 Chemistry*. 36: 534 – 544.

Madamba, L.S.P., Bustrillose, F.A., and San pedro, E.L. 1975. Sweet potato starch: Physicochemical properties of the whole starch. *The Philippines Agriculturist*. 58 (9-10): 338 – 350.

Magningat, C.C. and Seib, P.A. 1992. Starch : Occurrence, isolation, and properties of starch granules. In AACC Short Course, *Starch : Structure ,properties, and food use*. December 3-4, 1992. Chicago.

Mani, K., Eliasson, A.C., Lindahl, L., and Christianson, T.1992. Rheological properties and breadmaking quality of wheat flour doughs made with different dough mixer. *Cereal Chemistry*. 69: 222 –0 0225.

Marzurs, E.G., Schoch, T.J., and Kite, F.E. 1957. Graphical analysis of brabender viscosity curve of various starch. *Cereal Chemistry*. 34(3): 141-152.

McMilan, D.E. 1974. A comparison of five methods for obtaining the intrinsic viscosity of bovine albumin. *Biopolymers*. 13: 1367 – 1371.

Miles, M.J., Morris, V.J., and Ring, S.G. 1985. Gelation of amylose. *Carbohydrate Research*. 135: 271 – 278.

Morris, E.R. 1989. Polysaccharide solution properties origin, rheological characterization and implication in food system, In R.P.Millanre, J.N. Bemiller, and R. Chandrasekar (eds.). *Frontiers in carbohydrate research, Vol I*. Amsterdam : Elsevier Applied Science Publishers.

Newport Scientific Pty, Ltd. 1995*. Operation manual for the series 4 Raipid Visco Analyzer*. pp. 93. Australia: Newport Scientific Pty, Ltd.

Norbert, U.H., Mintus, T., and Detmold, D.W. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with the Rapid Visco Analyzer. *Starch/Starke*. 47: 123 – 126.

Oates, C.G. 1996. Physical modification of starch. In *Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology*. Jan. 22 – 26 and Feb. 19 – 23, 1996. Bangkok: AIT Center.

Oates, C.G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends in Food Science and Technology*. 8: 375-382.

Odigboh, E.U. and Mohsenin, N.N. 1975. Voscosity characterization of unmodified cassava starch paste. *Journal of Texture Studies*. 5(3): 363 – 377.

Paredes-Lopez, O. and Hernandez-Lopez, D. 1991. Application of differential scanning calorimetry to amaranth starch gelatinization –influence of water, solutes and annealing. *Starch/Starke*. 43: 57 – 61.

Penfield, M.P. and Campbell, A.M. 1990. *Starch Experimental Food Science*. London: Academic Press.

Radley, J.A. 1976. *Examination and Analysis of Starch and Starch Products*. London: Applied Science Pulisher.

Richard, R.M. 1968. Tailoring starches for the baking industry. *The Baker Digest*. 64: 48 – 53.

Ring. S.G., Collona, O., L'Annson, K.J., kalichevsky, M.T., Miles, M.J., Morris, V.J., and Orford, P.D. 1987. The gelatin and crystallization of amylopectin. *Carbohydrate Research*. 162: 277 – 293.

Robin, J.P., Mercier, C., Charbonniere, R., and Guilbot, J.A. 1974. Lintnerized starches, gel filration and enzyatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. *Cereal Chemistry*. 51: 389-406.

Sanders, J.P.M. 1996. Starch manufacturing in the world. In *Advanced Post-Acadamic Course on Tapioca Starch Technology(I).* January 22-26, and February 19-23, 1996. Thailand: AIT.

Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches In R.L. Whistler, R.J. Smith, and J.N.BeMiller (eds.). *Methods in carbohydrates chemistry*, Vol. VI, pp.106-108. New York: Academic Press.

Schoch, T.J. 1968. Effect of freezing and cold storage on pasted starches. In D.K. Tressler, W.B. Van Arsdel, and M.J. Copley (eds.). *The freezing preservation of foods*, Vol. IV, pp. 44 – 56. Westport, CT: The AVI Publishing.

Schoch, T.J. 1985. Food application. In Y. Pomeranz (ed.). Functional properties of food components. pp. 51 – 59. London: Academic Press.

Schoch, T.J. and Maywald, E.C.1968. Preparation and properies of various legume starches. *Cereal Chemistry*. 45: 564 – 573.

Schutz, R.A. 1971. Characterization of starch with respect to their application in industry, especially in textile and paper industry. *Dietary Starke*. 23: 359 – 366.

Smith, J. F. 1979. *Food Carbohydrate*. Connecticut: The AVI Publishing.

Spenneman, D.H.R.1992. Arrowroot production in the Marshall Islands: Past, present, and future. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural*. 20: 97.

Spies, R.D. and Hoseney, R.C. 1982. Effect of sugars on starch gelatinization. *Cereal Chemistry*. 55: 945 – 952.

Sriroth, K., Santisoparsri, V., Petchalanuwat, C., Piyachomkwan, K., and Oates, C.G. 1999. Cassava starch granule structure-function properties: Influence of time and conditions at harvest on four varieties of cassava starches. *Carbohydrate Polymers*. 38: 161-170.

Steffe, J.F. 1992. Introduction to rheology. In *Rheoloical methods in food process engineering*. Michigan: Freeman Press.

Stevens, D.J. and Elton, G.A.H.1971. Thernal properties of starch/water system. I. Measurement of heat of gelatinization by differential scanning calorimeter. *Starch/Starke*. 23: 8 – 11.

Swinkels, J.J.M. 1985a. Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Starke*. 37(1): 1-5.

Swinkels, J.J.M. 1985b. Source of starch, its chemistry and physics. In G.M.A. van Beynum and J.A. Roels (eds.). *Starch conversion technology*. New York: Marcel Dekker.

Tanglertpaibul, T. and Rao, M.A. 1987. Intrinsic viscosity of tomato serum as affected by methods of determination and methods of processing concentrates. *Journal of Food Science*. 52: 1642 – 1645, 1688.

Tester, R.F. and Morrison, W.R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starch. I. effect of amylopectin, amylose, and lipid, *Cereal Chemistry. 67*(6): 551 – 557.

Thiewes, H.J. and Steeneken, P.A.M. 1997. Comparison of the Brabender viskograph and the Rapid Visco Analyser. 1. Statistical evaluation of the pasting profile. *Starch/Starke*. 49: 85 – 92.

Varavinit, S., Anuntavuttikul, S., and Shobsngob, S. 2000. Influence of freezing and thawing techniques on stability of sago and tapioca starch pastes. *Starch/Starke*. 52: 214 – 217.

Varavinit, S., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P., and Naivikul, O. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability of different varieties of rice flour. *Starch/Starke*. 54: 31 – 36.

Visser, R.G.F., Suurs, L.C.J.M., Steeneken, P.A.M., and Jacobsen, E. 1997. Some physicochemical properties of amylose-free potato starch. New York: Academic Press.

Whistler, R.L. and Smart, C.L. 1953. *Polysaccharide Chemistry*. pp. 239 – 245. New York: Acadamic Press.

White, P.J. and Abbas, I.R. 1989. Effect of protein on gelatinization of corn starch as measured by differential scanning calorimetry. *Cereal Foods World*. 34: 778.

Yaun, R.C., Thompson, D.B., and Boyer, C.D. 1993. Fine structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches. *Cereal Chemistry*. 77: 309 – 314.

Zeneznak, K.J. and Hoseney, R.C. 1987. The transition in starch. *Cereal Chemistry*. 64: 121 – 124.

Zobel, H.F. 1964. X-ray analysis of granular starches. In R.L. Whistler, R.L. Smith, J.N. Bemiller, and M.L. Wolform (eds.). *Methods in carbohydrate chemistry, Vol. IV*, pp. 109. New York: Acadamic Press.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก. 1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC 925.10 (1995)

อุปกรณ์

ตู้อบลมร้อน WTE Binder รุ่น E-53

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 – 5 กรัม ใส่ในภาชนะอลูมิเนียมซึ่งอบแห้งและทราบน้ำหนักแล้ว
2. นำตัวอย่างเข้าอบแห้งในตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาไว้ เป็นเวลา 16 – 18 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
3. ปิดฝาภาชนะในขณะที่ยังอยู่ในตู้อบ แล้วทิ้งให้เย็นใน desiccator และชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาความชื้นจากสมการ

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

ก. 2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ AOAC 920.87 (1995)

อุปกรณ์

1. Gerhardt Kjeldatherm Digestion Unit
2. Gerhardt Vapodest

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1.5 กรัม ใส่ใน Kjeldahl tube แล้วใส่ antibumping beads 2 – 3 เม็ด
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา(คอปเปอร์ซัลเฟต 7 กรัม กับ โปแตสเซียมซัลเฟต 100 กรัม) 3 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตร
3. นำไปย่อยด้วยเครื่อง Kjeldahtherm ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในการย่อยเป็น

    ช่วงที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 – 20 นาที

    ช่วงที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 – 2.0 ชั่วโมง หรือจนตัวอย่างใสเป็นสีเขียวอ่อนหรือไม่มีสี แล้วย่อยต่อไปอีก 30 นาที
4. ทิ้งให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ต่อ Kjeldahl tube เข้ากับเครื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Vapodest I เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50 % จนตัวอย่างกลายเป็นสีดำ

5. รองรับสารที่กลั่นด้วยสารละลายกรดบอริกที่มีความเข้มข้น 4 %ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ (เมทริลเรดจำนวน 0.125 กรัม และ เมธิลลีนบูล จำนวน 0.0825 กรัม ในเอธานอล(90 %) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร) 3 – 4 หยด
6. กลั่นตัวอย่างจนในขวดรองรับมีสารละลายปริมาตร 200 มิลลิลิตร
7. หยุดกลั่นแล้วนำสารละลายในขวดรองรับมาไตเตรท ด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 N จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
8. คำนวณหาปริมาณไนโตรเจนและปริมาณโปรตีน

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน(\%)} = \frac{\text{ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้} \times \text{ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลริก(N)} \times 14}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)} \times 10}$$

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

ก. 3 การวิเคราะห์ไขมัน ตามวิธีของ AOAC (1995)

อุปกรณ์

Soxtherm Automatic รุ่น S-226

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 1 ใส่ใน thimble
2. ใส่ thimble ซึ่งมีตัวอย่างผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ในขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักแน่นอน
3. เติม petroleum ether ซึ่งใช้เป็นตัวสกัด 80 มิลลิลิตร ลงในขวดสกัด
4. สกัดไขมันเป็นเวลา 3 – 4 ชั่วโมงโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส
5. ระเหยส่วนของ petroleum ether ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้ แล้วอบขวดสกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
6. ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักขวดสกัด

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

ก. 4 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย ตามวิธีของ AOAC 978.10(1995)

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน(Oven) WTE Binder รุ่น E 53
2. เตาเผา (muffle furnace)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 ml
2. เติมกรดซัลฟุริกความเข้มข้น 1.25 % ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ต้มให้สารละลายเดือดตลอดเวลานาน 30นาที และสังเกตไม่ให้ปริมาตรของสารละลายลดลง หากลดลงให้เติมน้ำร้อนลงไป
3. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรดผ่านกรวยบุชเนอร์เซรามิกที่รองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 mmHg ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์กรด
4. นำกากที่ได้มาย่อยต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25 % ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์โดยต้มให้สารละลายเดือดตลอดเวลานาน 30นาที และควบคุมปริมาตรเช่นเดียวกับข้อ 2
5. กรองตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยด่างผ่านกรวยบุชเนอร์ที่รองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยใช้ความดันสุญญากาศ 25 mmHg ล้างกากด้วยน้ำร้อนจนหมดฤทธิ์ด่าง
6. ละลายตัวอย่างกากที่ติดกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นที่ร้อน แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
7. ล้างกากที่ได้ด้วยแอลกอฮอล์ปริมาตร 25 มิลลิลิตร อีก 2 ครั้ง
8. นำกากที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 130$\pm$2 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่
9. ทิ้งให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักจะได้เป็นน้ำหนักก่อนเผา
10. นำตัวอย่างใส่ใน crucible ที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
11. เผา crucible พร้อมตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600 $\pm$15 $^{\circ}$C จนได้เถ้าเป็นสีขาว
12. ทิ้งให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
13. ชั่งน้ำหนักจะได้น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา นำมาคำนวณหาปริมาณเส้นใยโดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณเส้นใย(\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา(กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา(กรัม)}]\text{x}100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

ก. 5 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC 923.03 (1995)

อุปกรณ์

Muffle Furnace Carbolite รุ่น Mel 11 – 2

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 2 กรัม ใส่ใน crucible ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
2. นำตัวอย่างไปเผาจนหมดควัน
3. นำไปเผาต่อใน muffle furnace ที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จนได้เถ้าสีขาว
4. ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator
5. ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังเผา(กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)}} \times 100$$

ก. 6 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส ตามวิธีของ AOAC 948.09 (1995)

อุปกรณ์

Spectophotometer Mivion Roy รุ่น spectonic 601

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารรีเอเจนต์

    1.1. Sulpho-nitric reagent

    ผสม $H_2 SO_4$ และ HNO_3 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

    1.2. สารละลายวิตามินซี

    สารละลายวิตามินซี 50 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

    1.3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต

    ชั่งแอมโมเนียมโมลิบเดต 10.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิตร เติม $H_2 SO_4$ 10 M จำนวน 500 มิลลิลิตร ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

    1.4. สารละลาย NaOH 10 M

    ชั่ง NaOH 200 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร

    1.5. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

    1.5.1. stock solution

ชั่ง KH_2PO_4 ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส 0.4393 ± 0.0005 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ได้สารละลายฟอสฟอรัสความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

1.5.2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ปิเปต stock solution จำนวน 10 มิลลิลิตร และเจือจางด้วยน้ำกลั่น ให้ได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีฟอสฟอรัส 4 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

2.1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสจำนวน 0, 1 , 2, 3, 4, 5, และ 10 มิลลิลิตร

2.2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 30 มิลลิลิตร

2.3. เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 4 มิลลิลิตร และสารละลายวิตามินซี 2 มิลลิลิตร ใส่ในสารละลายแต่ละขวด

2.4. เขย่าและให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือด 10 นาที ทำให้เย็นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร

2.5. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยายคลื่น 825 นาโนเมตร

3. การเตรียมตัวอย่าง

3.1. ชั่งแป้ง 0.5000 ± 0.0002 กรัม(m_o) ถ่ายใส่ถ้วยกระเบื้อง และเติม sulpho-nitrite reagent จำนวน 15 มิลลิลิตร

3.2. ให้ความร้อนจนเดือดเบาๆ และไอสีน้ำตาลกลายเป็นสีขาว ของเหลวที่ได้สุดท้ายต้องใส ถ้าของเหลวสีดำให้เติม HNO_3 เข้มข้นและย่อยต่อ

3.3. ทำให้เย็น และเติมน้ำกลั่น จำนวน 10 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเพื่อไล่ HNO_3 ส่วนเกิน

3.4. ทำให้เย็นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 45 มิลลิลิตร

3.5. ปรับ pH ให้เป็น 7.00 ด้วย NaOH และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร(V_o)

4. การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในตัวอย่าง

4.1. ปิเปตสารละลายที่เตรียมในข้อ 3 จำนวน 25 มิลลิลิตร(V_1)

4.2. เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 4 มิลลิลิตร และสารละลายวิตามินซี 2 มิลลิลิตร

4.3. เขย่าและนำไปต้มในอ่างน้ำเดือด 10 นาที

4.4. ทำให้เย็นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร

4.5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 825 นาโนเมตร

4.6. นำค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลาย(m_1) ดังนี้

$$\text{ปริมาณฟอสฟอรัส(ร้อยละ)} = \frac{m_1 V_o \times 100}{m_o V_1 \times 10^6}$$

ก. 7 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

วิธีคำนวณ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต(%) = 100 – %(โปรตีน + ไขมัน + เถ้า + เส้นใย)

ก. 8 ปริมาณอะมิโลส ดัดแปลงจากวิธีของ Govindasamy, Oates, และ Wang(1992)

อุปกรณ์

1. เครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography(HPSEC) (CTO-10AS column oven Shimadzu,Japan)
2. เครื่อง ULTRASONIC(high intensity ultrasonic processor, Vibra cell™ Model 501 Sonic & Materials, inc., USA)

วิธีทดลอง

1. ชั่งแป้งประมาณ 0.04 กรัม เติมน้ำ 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแก้ว แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดประมาณ 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
2. นำไป sonicate โดยเครื่อง ULTRASONIC ที่กำลัง 30 % เป็นเวลา 18 วินาที
3. นำตัวอย่างที่ได้มากรองผ่าน membrane(cellulose nitrate filter) ขนาด 8 ไมครอน
4. ตัวอย่างที่กรองได้ นำมาฉีดเข้าเครื่อง HPSEC ที่ประกอบด้วยคอลัมน์ 3 คอลัมน์ ต่อกันเป็นลำดับดังนี้ Ultrahydrogel linear, Ultrahydrogel 120,และ Ultrahydrogel 120(Waters Associates, Milford, MA) อุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 40 องศาเซลเซียส โดยปริมาตรตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 20 ไมโครลิตร และใช้ deionized water ที่กรองผ่านแผ่นกรองของ Millipore ขนาด 0.45 ไมครอน และ degassed แล้วเป็น mobile phase และใช้ flow rate 0.8 มิลลิลิตร/นาที ตรวจสอบสารตัวอย่างที่แยกได้ด้วย differential refractomer detector model 410 (Waters Associates, Milford, MA)

5. นำโครมาโตแกรมที่ได้นำมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสในตัวอย่างโดยเทียบกับสารมาตรฐานเด็กซ์แทรน

ก. 9 pH ตามวิธีของ AOAC 943.02(1995)

อุปกรณ์

เครื่องวัด pH (SCHOTT รุ่น CD840)

วิธีทดลอง

1. ปรับมาตรฐาน(calibrate) เครื่องวัด pH ด้วย standardized pH buffer pH 7.00 และ pH 4.00 ตามลำดับ
2. ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 ml
3. กวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 10 นาที
4. วัดค่า pH ของสารละลายส่วนใส โดยใช้เครื่องวัด pH

ก. 10 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชโดยใช้ Scanning Electron Microscope(SEM)

อุปกรณ์(ตามวิธีการวิเคราะห์ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนเลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

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

วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างแป้งติดบน stub โดยใช้เทปกาวสองหน้าหรือกาว
2. ฉาบด้วยทองหนา 20-30 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง ion sputter โดยใช้เทคนิค Hammer V Sputter Coater
3. บันทึกภาพโครงสร้างของตัวอย่างด้วย SEM ควบคุมที่ 20 kV ใช้กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า
4. วิเคราะห์พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากภาพที่บันทึกได้

ก. 11 ลักษณะ birefringence โดยใช้กล้องจุลทรรศน์(microscope)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์ Olympus รุ่น BX 50
2. อุปกรณ์ถ่ายภาพแบบดิจิตอล Nikon รุ่น coolpix 4500
3. แผ่นฟิล์มโพลารอยด์

วิธีทดลอง

1. เตรียมสารละลายกลีเซอรีนและน้ำในอัตราส่วน1 : 1 แล้วหยดลงบนสไลด์1 – 2 หยด
2. นำตัวอย่างสตาร์ชมาละลายกับสารละลายข้อ 1 บนสไลด์ให้ได้ความหนาแน่นของเม็ดสตาร์ชพอดีกับการถ่ายภาพ
3. ปรับระยะภาพโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายต่ำสุดแล้วเห็นภาพชัดเจนที่สุด จากนั้นเปลี่ยนกำลังขยายให้สูงขึ้นเป็น 400 เท่า
4. ปรับเลื่อนสไลด์ให้ได้องค์ประกอบของภาพที่ต้องการและปรับความคมชัดของภาพโดยดูที่กล้องถ่ายภาพ
5. ตั้งระบบการทำงานของอุปกรณ์ถ่ายภาพเป็นแบบอัตโนมัติและปรับเป็นแบบไม่ใช้ flash
6. นำฟิล์มโพลารอยด์วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์และนำแผ่นฟิล์มอีก 1 แผ่น วางปิดบนสไลด์หรือกั้นระหว่างสไลด์กับอุปกรณ์ถ่ายภาพ
7. หมุนแผ่นฟิล์มโพลารอยด์ที่วางปิดบนแหล่งกำเนิดแสงให้ได้สีของพื้นภาพเป็นสีดำ เพื่อให้เห็นลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ช
8. ปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มโพลารอยด์

ก. 12 ขนาดของเม็ดแป้งสตาร์ชเท้ายายม่อม โดยเครื่อง Laser particle size analyzer ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์

Laser particle size analyzer (Mastersizer S long bed Ver. 2.11)

วิธีทดลอง

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

ก. 13 ศึกษาโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer และวิเคราะห์ pattern ตามวิธีของ Zobel (1964)

อุปกรณ์

X-ray diffractometer (JEOL รุ่น JDX-8030)

วิธีทดลอง

1. นำตัวอย่างสตาร์ชโรยบน sample plate แล้วกด sample plate ให้เม็ดสตาร์ชเรียงตัวอัดกันแน่น
2. นำ sample plate ใส่เข้าเครื่อง X-ray diffractometer ที่ช่อง sample holder แล้วเปิดเครื่อง (warming) ทิ้งไว้ อย่างน้อย 15 นาที
3. วัดค่าในช่วงมุมที่ต้องการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสภาวะโดยมีรายละเอียดดังนี้

Target	:	Cu	
KV	:	45.0	kV
MA	:	35.0	mA
Start angle	:	5.00	deg.
Stop angle	:	45	deg.
Step angle	:	0.040	deg.
M.time	:	1.50	sec.

4. วิเคราะห์ X-ray diffraction pattern โดยเทียบค่า 2θ, d-spacing, และ Intensity ที่ได้กับลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่เป็นpattern มาตรฐานดังตาราง ก 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งที่เป็นแบบ A , B และ C

Starch X-ray diffraction								
A type			B type			C type		
d-Spacing A°	Intensity*	2θ	d-Spacing A°	Intensity*	2θ	d-Spacing A°	Intensity*	2θ
8.72	w-	10.1	15.8	m	5.59	15.4	w	5.73
7.70	w-	11.5	8.90	w-	9.93	8.82	w-	10.0
5.78	s	15.3	7.94	w-	11.1	7.65	w-	11.5
5.17	s	17.1	6.14	m	14.4	5.78	s	15.3
4.86	s-	18.2	5.16	s	17.2	5.12	s	17.3
4.37	m	20.3	4.54	w+	19.5	4.85	m	18.3
3.78	s	23.5	4.00	m	22.2	4.35	w-	20.4
3.30	w+	27.0	3.70	m-	24.0	3.78	m+	23.5
2.88	w	31.0	3.38	w	26.3	3.32	w	26.8
			2.60	w	34.4			

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

ก. 14 ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ ดัดแปลงมาจากวิธีของ Anderson และคณะ(1969)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC MultiRF
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
3. ตู้อบลมร้อน(Oven) (WTE Binder รุ่น E 53)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง(ที่ทราบน้ำหนักหลอดเริ่มต้นแล้ว) เติมน้ำกลั่น 6 ml ผสมให้เข้ากัน
2. บ่มตัวอย่างในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็ว 174 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
3. นำมา centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใส(supernatant) ที่ได้ลงในจานระเหยที่ทราบน้ำหนักแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ระเหยส่วนใสบนอ่างน้ำเดือดจนแห้งและจึงนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำจานระเหยเก็บไว้ใน desiccator ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณส่วนที่สามารถละลายได้ ส่วนตะกอนแป้งที่นอนก้นหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนัก คำนวณความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในกการละลาย ดังสูตรต่อไปนี้

ความสามารถในการละลายน้ำ(%) = $\frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง x 100}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแป้งแห้งเริ่มต้น}}$

ความสามารถในการดูดซับน้ำ(กรัม/กรัม) = $\frac{\text{น้ำหนักตะกอนแป้งหลังการปั่นเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแป้งแห้งเริ่มต้น}}$

ก. 15 กำลังการพองตัวและการละลาย(swelling power and solubility) **ดัดแปลงมาจากวิธีของ** Schoch (1964)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC MultiRF)
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
3. ตู้อบลมร้อน(Oven) (WTE Binder รุ่น E 53)

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม(น้ำหนักแห้ง) ใส่หลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง(ทราบน้ำหนักแล้ว)
2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 ml
3. แช่ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 องศาเซลเซียส กวนตลอดเวลาเป็นเวลานาน 30 นาที
4. นำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที นาน 15 นาที
5. ดูดของเหลวส่วนบนใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และนำไปอบให้แห้งในตู้อบไฟฟ้าอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
6. ชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ ส่วนแป้งเปียกในหลอดนำมาชั่งเป็นน้ำหนักแป้งที่พองตัว แล้วนำมาคำนวณตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

ก. 16 Freeze-thaw stability **ดัดแปลงจากวิธีของ** Hoover **และ** Manuel(1995)

อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge Thermo IEC รุ่น IEC MultiRF)
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
3. ตู้อบลมร้อน (WTE Binder รุ่น E 53)

วิธีทดลอง

1. เตรียมเจลสตาร์ช 6 % โดยน้ำหนักแห้ง ใน water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
2. เทเจลสตาร์ช 10 กรัม ใส่หลอด centrifuge ที่ทราบน้ำหนักแล้ว
3. นำหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
4. นำหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงไปแช่เยือกแข็งต่อที่ –16 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
5. thaw เจลสตาร์ชในหลอด centrifuge ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา2 ชั่วโมง
6. ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เป็นเวลา 20นาที วัดปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจล (syneresis) เป็นปริมาตร ml
7. ทำซ้ำ ข้อ 3 – 5 เป็น cycle ต่อไป ทำจนครบ 5 cycle

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 17 การเกิดเจลาติไนเซชันโดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995)

อุปกรณ์

เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-7 Perkin-Elmer)

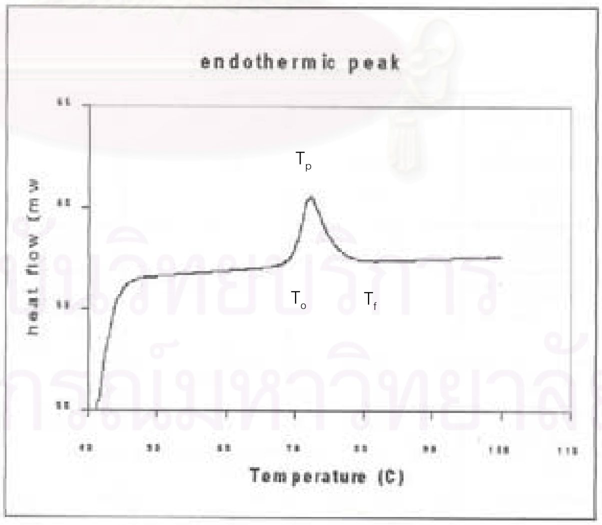
วิธีทดลอง

1. ชั่งสตาร์ชที่ทราบค่าความชื้นประมาณ 3.4 มิลลิกรัม ใส่ลงใน pan อะลูมิเนียม เติมน้ำกลั่นใน pan โดยคิดเป็นอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเท่ากับร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก หรือสามารถคำนวณน้ำหนักสตาร์ชแห้งและน้ำหนักน้ำกลั่นที่จะเติมได้จากสูตร

1.1 น้ำหนักสตาร์ชแห้ง = $\dfrac{\text{(100 – เปอร์เซ็นต์ความชื้น) x น้ำหนักสตาร์ชที่ชั่ง(กรัม)}}{100}$

1.2 ปริมาณน้ำที่ควรเติม = [(น้ำหนักสตาร์ชแห้ง x 75)/25] – น้ำหนักสตาร์ชที่ชั่ง +น้ำหนักสตาร์ชแห้ง

2. ปิดผนึกฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องมือปิดผนึก บ่ม pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืนเพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่ภาวะสมดุล
3. นำ pan ใส่ในช่อง sample ของเครื่อง DSC และวาง reference pan(pan เปล่า) และตั้งค่าของเครื่องที่ช่วงอุณหภูมิ 40 – 110 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ Indium ในการ calibration
4. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลาติไนเซชัน(รูปที่ ก 1) ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาติไนเซชัน (onset temperature, T_o °C) อุณหภูมิที่ ΔH สูงสุด(peak temperature, T_p °C) อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลาติไนเซชัน(final temperature, T_f °C) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน(ΔH, หน่วย J/g)



รูปที่ ก 1 ลักษณะThermogram ที่ได้จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งด้วยเครื่อง DSC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 18 การวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนเซชันและสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer(RVA) (Norbert *et al.*,1995)

เครื่องมือ

1. เครื่อง RVA รุ่น 4 D พร้อมด้วย can อลูมิเนียมที่มีใบพัดปัด
2. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่อง RVA

วิธีทดลอง

1. เปิดเครื่อง RVA ทิ้งไว้นาน 30 นาที เพื่ออุ่นเครื่อง RVA
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และรันซอฟแวร์ควบคุม RVA โดยเลือกเงื่อนไขใน profile ป้อนลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ตั้งชื่อไฟล์แล้วเซฟไว้ โดยเลือกเงื่อนไขดังนี้

   Temperature profile
   1. ให้ความร้อนที่ 50 ^{o}C เป็นเวลา 1.25 นาที
   2. ให้ความร้อนที่ 50 ถึง 95 ^{o}C ด้วยอัตราเร็ว 12 องศาเซลเซียสต่อนาที (เป็นเวลา 3.75 นาที)
   3. ให้ความร้อนที่ 95 ^{o}C เป็นเวลา 2.50 นาที
   4. ให้ความร้อนที่ 50 ถึง 95 ^{o}C ด้วยอัตราเร็ว 12 องศาเซลเซียสต่อนาที (เป็นเวลา 3.75 นาที)
   5. ให้ความร้อนที่ 95 ^{o}C เป็นเวลา 1.25 นาที

   โดยความเร็วรอบในการกวนมอเตอร์เท่ากับ 160 รอบต่อนาที
3. ตวงน้ำปริมาตร 25.00 $\pm$ 0.1 ml (สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้น 14 %) ใส่ลงใน can ของ RVA
4. ชั่งตัวอย่าง 3.00 กรัม ใส่ลงใน can ที่มีน้ำอยู่แล้ว ปริมาณตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง โดยทั่วไปแนะนำตามตารางที่ ก. 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 2 ปริมาณตัวอย่างแนะนำในการวัดสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA

ตัวอย่าง	จำนวน(กรัม)
เมล็ดพืชทั้งหมด(บดรวมเปลือก)	4.00
แป้ง(flour)	3.50
สตาร์ชปกติ(native starch)	
จากธัญชาติชนิดไม่มียาง(non-waxy cereal)	3.00
จากธัญชาติชนิดมียาง(waxy cereal)	3.00
มันฝรั่ง	2.00[1]
มันสำปะหลัง	2.50
สตาร์ชดัดแปลง(modified starch)	
Acid modified	2.00 – 4.00[2]
Oxidized	2.00 – 4.00[2]
Substituted	2.50
Cross-linked	2.50

[1] ใช้ 1.2 กรัม ถ้าเป็นสตาร์ชที่ไม่ได้ผลิตมาเพื่อวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์

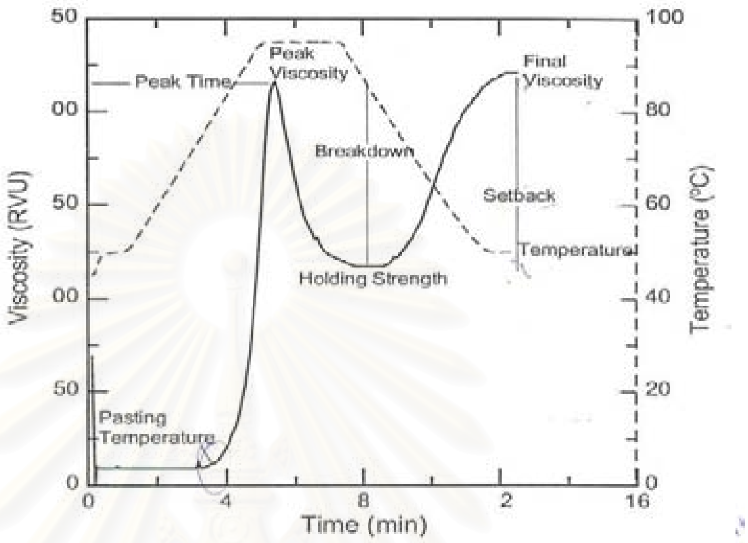
[2] จำนวนที่ใช้ขึ้นอยู่กับ degree of modification

5. ใส่ใบพัดกวน(paddle) ลงใน can หมุนใบพัดกวนไปมาแรงๆ และดึงขึ้นเพื่อกวนตัวอย่างแรงๆ ประมาณ 10 ครั้ง ถ้ามีตัวอย่างจับกันเป็นก้อนที่ผิวน้ำหรือติดที่ใบพัดกวนให้ทำซ้ำอีกครั้ง

6. นำ can ที่ใส่ใบพัดกวนไว้แล้วสอดเข้าไปในเครื่อง RVA กดมอเตอร์เพื่อให้ RVA ทำงาน เสร็จแล้วนำ can ออกมา เครื่อง RVA จะรายงานการวิเคราะห์เป็นค่าต่างๆ (หน่วย RVU) ดังนี้(รูปที่ ก. 2)

1. เวลาที่เกิด peak ของความหนืด(peak time) มีหน่วยเป็นนาที
2. อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืดหรือมีความความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที (pasting temperature) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
3. อุณหภูมิที่เกิด peak (peak temperature) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
4. ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown)มีหน่วยเป็น RVU
5. ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (final viscosity) มีหน่วยเป็น RVU

6. ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุด peak (setback from peak)มีหน่วยเป็น RVU
7. ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (trough) มีหน่วย RVU



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ก. 19 การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ตามวิธีที่ดัดแปลงมาจาก Baker และ Duarte(1995)

อุปกรณ์

เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-7 Perkin-Elmer)

วิธีทดลอง

1. ทดสอบการเกิดเจลาติไนเซชันของเจลสตาร์ชตามวิธีวิธีในภาคผนวก ก.17 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของสตาร์ช ต่อน้ำ เป็น 35 : 65
2. นำ pan ที่ผ่านการทดสอบมาเก็บไว้ในหลอดฝาเกลียว และปิดฝาให้สนิท
3. นำหลอดดังกล่าวมาเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 และ –20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 7 และ 14 วัน และเมื่อเก็บจนครบตามระยะเวลาที่กำหนด ให้นำหลอดที่เก็บ pan มาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. นำ pan เข้าเครื่อง DSC และวาง reference pan (pan เปล่า) และตั้งค่าของเครื่องที่ช่วงอุณหภูมิ 40 – 110 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ Indium ในการ calibration
5. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลาติไนเซชันอีกครั้ง ได้แก่ T_o, T_p, T_f และ ΔH_R(ΔHในการเกิดรีโทรเกรเดชัน)

ก. 20 การวิเคราะห์ค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท้ายายม่อม ดัดแปลงจากวิธีของ Islam, Mohd, และ Noor(2001)

อุปกรณ์

1. Capillary viscometer (Cannon-Fenske เบอร์ 50)
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

วิธีทดลอง

1. การเตรียมสารตัวอย่าง
   1.1. เตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ คือ 0 , 25, 50, 75 และ 100 % ของปริมาณสตาร์ชโดยน้ำหนักแห้งในสารละลายบัฟเฟอร์ Citric acid-di-sodium hydrogen phosphate pH 3 และ 5 ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และในสารละลายบัฟเฟอร์ sodium carbonate-sodium bicarbonate pH 9 ตามลำดับ
   1.2. ชั่งสตาร์ชประมาณ 0.1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร ที่มีตัวทำละลายประมาณ 10 มิลลิลิตร
   1.3. เขย่าให้สตาร์ชและตัวทำละลายผสมเข้ากัน ใส่ magnetic bar และเติมตัวทำละลายอีก 5 มิลลิลิตร ปิดฝา
   1.4. นำสารแขวนลอยสตาร์ชไปให้ความร้อนใน water bath ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที กวนที่ความเร็วคงที่
   1.5. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้าง magnetic bar ด้วยตัวทำละลายและ เอา magnetic bar ออก ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร
2. การวัด intrinsic viscosity
   2.1. จับยึด viscometer ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 30±0.1 องศาเซลเซียส

2.2. ปิเปตสารแขวนลอยสตาร์ชเท้ายายม่อมสุก 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านตัวกรองขนาด 0.45 μ ใส่ viscometer ทางด้าน A (รูปที่ ก. 3)

2.3. แช่สารแขวนลอยสตาร์ชเท้ายายม่อมสุกเป็นเวลา 15 นาที ดูดสารแขวนลอยสตาร์ชเท้ายายม่อมสุกจากทางด้าน B ให้สารตัวอย่างสูงกว่าระดับ X

2.4. จับเวลา (t) ที่สารแขวนลอยสตาร์ชเท้ายายม่อมสุกไหลจากระดับ X มาถึงระดับ Y

2.5. ทำความสะอาด viscometer โดยเทสารแขวนลอยสตาร์ชเท้ายายม่อมสุกออกและล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง

2.6. ล้างด้วยอะซิโตน 5 มิลลิลิตร แล้วเป่าด้วยลมร้อนจนแห้ง

2.7. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ตัวทำละลาย (t_0)

2.8. หาค่า relative viscosity(η_{rel}) ดังสมการ

$$\eta_{rel} = t / t_0$$

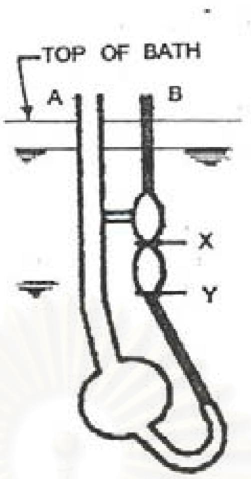
2.9. แปรความเข้มข้นของ paste สตาร์ชเท้ายายม่อมเพื่อหาค่า relative viscosity ที่อยู่ในช่วง 1.1 – 1.5 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการหา relative viscosity

2.10. นำค่า relative vicosity ที่อยู่ในช่วง 1.1 – 1.5 มาหา specific viscosity (η_{sp}) ดังสมการ

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1$$

2.11. พลอตกราฟระหว่าง specific viscosity กับ ความเข้มข้น หาค่า intrinsic viscosity([η]) ได้โดย intercept ตัดกราฟที่ความเข้มข้น 0 % ดังสมาการ

$$[\eta] = \lim_{c \to 0} \frac{\eta_{sp}}{C}$$



รูปที่ ก.3 Capillary viscometer

ที่มา : Steffe (1992)

ก. 21 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของ paste สตาร์ชเท้ายายม่อม

อุปกรณ์

Rotational Viscometer (Brookfield, DV-II+,Stoughton, USA)

วิธีทดลอง

1. เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 4 ระดับ คือ 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลายในสารละลาย phosphate buffer pH 7
2. นำไปเจลาติไนซ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ใน water bath เป็นเวลา 20 นาที
3. ทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
4. นำมาวัดค่า apparent viscosity ด้วย rotational viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.5 - 10 นาที$^{-1}$ ภายในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียส
5. นำข้อมูลมา plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ apparent viscosity
6. วิเคราะห์ flow behavior index และ consistency index ตามสมการ Ostwald-De Waele (Launay *et al.,* 1986) ดังนี้

$$\eta_{app} = k\gamma^{n-1}$$
$$= \tau / \gamma$$

เมื่อ η_{app} = apparent viscosity (mPa*s)

τ = shear stress (mPa)

k = consistency index (mPa*s^{n})

γ = shear rate (sec^{-1})

n = flow behavior index

ก. 22 การวิเคราะห์ลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชเท้ายายม่อม

อุปกรณ์

Texture analyzer (Stable Micro System TA-XT21)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมเจลสตาร์ชเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 20 กรัมต่อเดซิลิตร ในสารละลาย phosphate buffer pH 7 และเติม sucrose ความเข้มข้น 0, 25, 50, 75, 100 % ของปริมาณ สตาร์ชโดยน้ำหนักแห้ง ทำให้เกิดเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
2. เทตัวอย่างข้างต้นลงใน petri dish (สูง 10 มิลลิเมตร) ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปิดด้วยพลาสติกใสเพื่อกันน้ำระเหย
3. เก็บเจลที่เตรียมได้ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ตัดเจลเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.5 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร
5. นำเจลไปทำการทดลองด้วยเครื่อง texture analyzer
7. ติดตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ากับเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส
8. Calibrate force ก่อนการวัดทุกครั้ง
9. ประกอบหัว probe เบอร์ 100 กับเครื่อง texture analyzer
10. Calibrate probe ก่อนการวัด โดยตั้งระยะ probe 20 เซนติเมตร
11. เลือก program การวัดเป็น Creep recovery และตั้งการทดสอบโดยใช้แรงกด 20 N เป็นเวลา 300 วินาที ตั้งอุณหภูมิเครื่องไว้ที่ 27 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียส
12. นำเจลที่เตรียมได้ วางไว้ตรงกลางที่ probe กด สั่งเครื่อง texture analyzer ให้ทดสอบ
13. แปรผล % strain ให้เป็น strain(mm) จากสูตร strain(mm) = % strain x L / 100 วิเคราะห์ผลกราฟระหว่าง strain (mm) กับ เวลา

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทัศนัย อรรถพรพิทักษ์ เกิดวันที่ 14 พฤษภาคม 2521 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย