

สมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากถั่วเขียว



นางสาวนภมณี มงคลประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0291-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RHEOLOGICAL AND THERMAL PROPERTIES OF MUNG BEAN STARCH



Miss Nopmanee Mongkolprasert

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 2001

ISBN 974-17-0291-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์      สมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากถั่วเขียว  
โดย                              นางสาวนภมณี มงคลประเสริฐ  
สาขาวิชา                      เทคโนโลยีทางอาหาร  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....รองคณบดีฝ่ายบริหาร

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ การเที่ยง) รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ ธีญพิทยากุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรณา ตูลยธัญ)

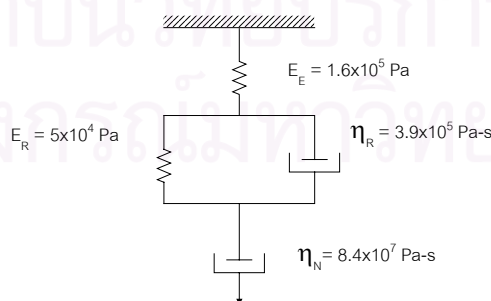
.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเกียรติ)

นมถั่วเขียว มงคลประเสริฐ : สมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจาก ถั่วเขียว (RHEOLOGICAL AND THERMAL PROPERTIES OF MUNG BEAN STARCH) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. พาสวดี ประทีปะเสน, อ.ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ, 80 หน้า. ISBN 974-17-0291-4.

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชถั่วเขียว ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่ามีความชื้น 10.89% เถ้า 0.03% โปรตีน 0.10% ไขมัน 0.31% เส้นใย 0.01% และคาร์โบไฮเดรต 88.66% (w/w) และจากการวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชและอะมิโลสพบว่ามีสตาร์ช 97.98% (w/w) จากคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โดยส่วนที่เป็นสตาร์ชมีอะมิโลส 34.49% (w/w) ผลการทดลองโดยวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าความชื้นมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช คือที่ความชื้น 30% (w/w) ไม่พบ endotherm peak ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความชื้นไม่พอเพียงต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน การเพิ่มความชื้นจาก 40% (w/w) ถึง 80% (w/w) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ต่อค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ( $62.62 \pm 1.45^\circ\text{C}$ ) และอุณหภูมิที่  $\Delta H$  สูงสุด ( $68.42 \pm 0.65^\circ\text{C}$ ) แต่ค่า  $\Delta H$  แสดงแนวโน้มว่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วง 40-80% (w/w) นอกจากนี้ในช่วงค่าความชื้น 50-61% (w/w) พบ endotherm 2 peak ซ้อนกัน ขณะที่ช่วงความชื้นต่ำหรือสูงกว่านี้พบเพียง 1 peak ที่ความชื้น 70% (w/w) สตาร์ชถั่วเขียวเกิดรีโทรเกรดชันทันทีเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$  นาน 1 วัน แต่การเก็บที่  $-20^\circ\text{C}$  ช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรดชันได้ 3 วัน

ค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชถั่วเขียวไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงว่า ขนาดแกรนูลของ สตาร์ชคงที่เมื่อ pH และความเข้มข้นของเกลือ NaCl ในตัวทำละลาย (น้ำ) เพิ่มขึ้นในช่วง pH 3-9 และ 0-0.2 M NaCl paste ถั่วเขียวในตัวทำละลายน้ำ pH 7 และ 0.1 M NaCl ที่ช่วงความเข้มข้นของสตาร์ช 3-5 g/dl<sub>solvent</sub> มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic สามารถอธิบายได้โดยสมการ Ostwald-De Waele ดังนี้  $\eta_{app} = (1.87c^{5.01}) \gamma^{(1-0.14c)}$  เมื่อ  $\eta_{app}$  คือ ความหนืดปรากฏ (mPa.s) c คือ ความเข้มข้นของสตาร์ช (g/dl<sub>solv</sub>) สมบัติทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียวที่ความเข้มข้น 10.18 g/dl สามารถอธิบายได้ด้วย Four Element Model ดังนี้



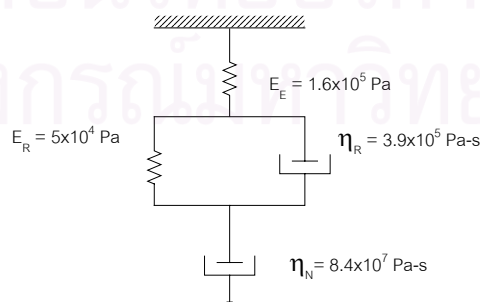
ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....      ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา...เทคโนโลยีทางอาหาร.....      ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา 2544      ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4072440423 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : RHEOLOGICAL PROPERTIES / THERMAL PROPERTIES / MUNG BEAN STARCH  
NOPMANEE MONGKOLRASERT : RHEOLOGICAL AND THERMAL PROPERTIES OF  
MUNG BEAN STARCH. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. PASAWADEE  
PRADIPASENA, Ph.D., AND THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF. SAIWARUN  
CHAIWANICH SIRI, Ph.D., 80 pp. ISBN 974-17-0291-4.

This research investigated the rheological and thermal properties of mung bean starch. From chemical analysis, it was found that the mung bean starch contained 10.89% moisture, 0.03% ash, 0.10% protein, 0.31% fat, 0.01% fiber and 88.66% (w/w) carbohydrate. The starch content was 97.98% (w/w) of carbohydrate with 34.49%(w/w) amylose. From Differential Scanning Calorimetry (DSC), it was found that moisture content affected starch gelatinization. At 30% (w/w) moisture content, the endotherm peak was not found which indicated that the water was not sufficient for gelatinization. Increasing moisture content from 40% to 80% (w/w) did not affect the onset temperatures ( $62.62 \pm 1.45^\circ\text{C}$ ) and peak temperatures ( $68.42 \pm 0.65^\circ\text{C}$ ). However, the increasing moisture content in the range of 40-80% (w/w) increased the enthalpy of gelatinization ( $\Delta H$ ). It was also found that in moisture range of 50 to 61% (w/w) there were two endotherm peaks overlapping each other, while at the other conditions there was only one peak. Retrogradation of mung bean starch having 70%(w/w) moisture content started within one day, and after three days at  $-20^\circ\text{C}$ .

From the intrinsic viscosity measurement of mung bean starch pH 3-9 and concentration of NaCl 0-0.2 M, it showed that the intrinsic viscosity did not change indicating the constant starch granule size. The 3-5 g/dl<sub>solvent</sub> mung bean starch paste at pH 7 and 0.1 M NaCl showed to be a pseudoplastic fluid following the Ostwald-De Waele equation : ( $\eta_{\text{app}}$  = apparent viscosity in mPa.s,  $c$  = starch in g/dl<sub>solvent</sub>,  $\dot{\gamma}$  = shear rate in  $\text{sec}^{-1}$ ). From Creep experiment, Four Element Model as shown below can be used to describe mung bean starch gel having starch concentration of 10.18 g/dl at  $27^\circ\text{C}$ .



Department.....Food..Technology.....

Field of study.....Food..Technology.....

Academic year 2001

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัย รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ รัญพิทยากุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วรธนา ตูลยธัญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ตันตระเชียร ที่ได้ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจแก้ไขรวมทั้งเสนอแนะแนวทางปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ Professor Osato Miyawaki แห่ง The University of Tokyo ที่ให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

### งบประมาณสำหรับการวิจัย

- งบประมาณจากโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งบประมาณแผ่นดิน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งบประมาณแผ่นดิน ชุดโครงการสำรวจเพื่อประเมินและวางแผนการวิจัยเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตร-อุตสาหกรรมอาหาร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### วัสดุดิบและเครื่องมือ

- สตาร์ชถั่วเขียว บริษัท สิทธิพันธ์ จำกัด
- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยี แปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ญาติ พี่ น้อง ซึ่งให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา และขอบคุณ คุณไพรัช อุดสุภรัตน์ คุณนิติ เต็มเวชศยานนท์ และเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 สตาร์ชถั่วเขียว.....	3
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว.....	3
2.3 สมบัติพื้นฐานของสตาร์ชถั่วเขียว.....	4
2.3.1 องค์ประกอบของแกรนูล.....	4
2.3.2 โครงสร้างของแกรนูล.....	5
2.3.3 ขนาดและรูปร่างของแกรนูล.....	6
2.3.4 โครงสร้างพื้นผิวของแกรนูล.....	6
2.4 สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลลาคีโนเซชัน.....	7
2.5 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสตาร์ชถั่วเขียว.....	9
2.5.1 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ช.....	9
2.5.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช.....	11
2.5.3 สมบัติทางการไหลของสตาร์ช.....	38
3 วิธีการทดลอง.....	23
3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว.....	23
3.2 การศึกษาผลของความชื้นต่อการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว.....	23
3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการเก็บสตาร์ชถั่วเขียวที่เจลลาคีโนเซชัน แล้วต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วเขียว.....	24
3.4 การศึกษาผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือต่อขนาดแกรนูล ที่พองตัวของสตาร์ชถั่วเขียวสุก.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อลักษณะการไหล ของ paste ถั่วเขียว.....	25
3.6 การศึกษาลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว.....	26
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	27
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว.....	27
4.2 ผลของความชื้นต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว .....	27
4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาการเก็บสตาร์ชถั่วเขียวที่เจลลิตีในเซชันแล้ว ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วเขียว.....	31
4.4 ผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือต่อขนาดแกรนูลที่พองตัวของ สตาร์ชถั่วเขียวสุก.....	35
4.5 ผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อลักษณะการไหลของ paste ถั่วเขียว.....	36
4.6 ลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว.....	46
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	63
ภาคผนวก ค.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของสสารที่ถั่วเขียว.....	3
4.1	ระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของสสารที่ถั่วเขียวในช่วงความชื้นร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก.....	31



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะมิโลส..... 4
2.2	โครงสร้างของอะมิโลเพคติน..... 4
2.3	แบบจำลองโครงสร้างของแกรนูโลสตาร์ช..... 5
2.4	รูปร่างของแกรนูโลสตาร์ชถั่วเขียว..... 6
2.5	พื้นผิวของแกรนูโลสตาร์ชถั่วเขียว..... 7
2.6	การพองตัวของแกรนูโลสตาร์ช..... 9
2.7	รูปแบบการพองตัวและการละลายของนูลสตาร์ชถั่วเขียว..... 10
2.8	ลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ... 12
2.9	แบบจำลองของ Kelvin..... 17
2.10	Creep สำหรับแบบจำลองของ Kelvin..... 18
2.11	แบบจำลองของ Maxwell..... 19
2.12	Creep สำหรับแบบจำลองของ Maxwell..... 19
2.13	Stress relaxation สำหรับแบบจำลองของ Maxwell..... 20
2.14	แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ..... 21
2.15	Creep สำหรับแบบจำลองของ 4 องค์ประกอบ..... 22
4.1	Endothermic Peak ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก..... 28
4.2	Endothermic Peak ของสตาร์ชถั่วเขียวหลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ -20 องศาเซลเซียส นาน 1 3 7 และ 14 วัน..... 32
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta H_R$ กับเวลาที่เก็บเจลสตาร์ชที่ 4 องศาเซลเซียส..... 34
4.4	ผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือ NaCl ต่อค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชถั่วเขียวสุกที่ 30 องศาเซลเซียส..... 35
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ Apparent viscosity ของ paste ถั่วเขียวที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5% ในสารละลาย pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ วัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..... 37
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ Shear stress ของ paste ถั่วเขียว ที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5% ในสารละลาย pH 7 และ

	ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และวัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	38
ภาพที่ (ต่อ)		หน้า
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Consistency index กับความเข้มข้นของ สตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส.....	39
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Flow behavior index กับความเข้มข้นของ สตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส.....	40
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield stress กับความเข้มข้นของสตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส.....	41
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent specific viscosity กับความเข้มข้น ของสตาร์ชใน paste ถั่วเขียวความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส.....	43
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log } c' [\eta]$ กับ $\text{Log } \eta_{\text{spo}}$ ของสตาร์ช.....	45
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา (ผลการทดลอง creep) ของเจล สตาร์ชถั่วเขียวที่มีความเข้มข้นของสตาร์ช 10.18 g/dl ในสารละลาย เมื่อได้รับแรงเค้น 30 N นาน 300 sec ที่อุณหภูมิ 27°C .....	48
4.13	แบบจำลอง 4 องค์ประกอบของเจลสตาร์ชถั่วเขียว.....	49
ก-1	การดูดกลืนแสงของไอโอดีน อะมิโลส อะมิโลเพคติน และส่วนผสม ของอะมิโลสกับอะมิโลเพคตินที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	60
ค-1	Capillary viscometer.....	75

## บทที่ 1

### บทนำ

สตาร์ชถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมการผลิตกาว และอุตสาหกรรมยาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสตาร์ชมีสมบัติเฉพาะหลังเกิดเจลาตินไนซ์แล้ว คือ เพิ่มความหนืด ความคงตัว สามารถอุ้มน้ำได้ดี ให้โครงสร้างของโครงร่างตาข่าย และการเกิดฟิล์ม (Mariam and Schmidt, 1996) จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำสตาร์ชมาปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารโดยใช้เพิ่มความหนืดของอาหาร เช่น ในผลิตภัณฑ์ซอส เกรวี่ และพุดดิ้ง (Lee *et al.*, 1995) ปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของกระดาษ โดยทำให้เส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ทำกระดาษมีความต้านทานต่อการซึมของหมึก ขึ้นรูปเป็นฟิล์มสำหรับเคลือบเม็ดยา ทำให้เส้นใยผ้ามีความแข็งแรงและเนื้อสัมผัสเรียบ (Brautlecht, 1953) เป็นต้น

สมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญในการใช้ศึกษาพฤติกรรมของสตาร์ช ในระหว่างการแปรรูป สมบัติการไหลของสตาร์ชขึ้นอยู่กับธรรมชาติและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสตาร์ช โครงสร้างทางเคมี โครงร่างและแรงกระทำระหว่างโมเลกุล ความหนืดเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญในอาหารเหลว เช่น ซุป ซอส คาสตาดี เครื่องดื่ม เป็นต้น ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับรูปร่าง กำลังการพองตัวของแกรนูลสตาร์ช การพัวพันระหว่าง amylose-amylopectin, granule-granule, amylose-granule และ amylopectin-granule interaction (Islam and Mohd, 1997) ในการใช้สตาร์ชเพื่อทำให้เกิดฟิล์ม สมบัติที่สำคัญของฟิล์มคือความแข็งแรง ความหนืดก็บ่งชี้ความแข็งแรงของฟิล์ม กล่าวคือความหนืดสูงแสดงว่า intermolecular interaction ระหว่างสตาร์ชสูงทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มสูง และค่า yield stress เป็นค่าที่บ่ง granule-granule interaction ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของสารเคลือบ

สมบัติทางความร้อน เช่น การเกิดเจลาตินไนเซชันและรีโทรเกรเดชัน ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Donovan, 1979; Biliaderis, Maurice and Vose, 1980; Krueger *et al.*, 1987; Yuan, Thompson and Boyer, 1993) วิธีนี้เป็นการวัดปริมาณเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดระหว่างการหลอมผลึกในแกรนูลสตาร์ช (Krueger *et al.*, 1987) อาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบจะเกิดปรากฏการณ์สำคัญ คือมีการเกิดเจลาตินไนเซชันในระหว่างการแปรรูป เช่น กระบวนการอบขนมปังและเค้ก การเอกซ์ทรูชันผลิตภัณฑ์ที่มีธัญพืชเป็นองค์ประกอบหลัก การเกิดเจลในซอส และ

ไส้กึ่งสำเร็จรูปในพาย (John and Shastri, 1998) เนื่องจากเมื่อสารแขวนลอยสตาร์ชได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนคลายตัวแกรนูลสตาร์ชดูดน้ำแล้วพองตัว และเกิดเจลาตินในซันซ์ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิดเจลาตินในซันซ์จะเกิดเป็นช่วงอุณหภูมิไม่ได้เกิดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง และสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในซันซ์ไม่เท่ากัน รวมทั้งที่ความชื้นต่าง ๆ กัน หลังจากการเกิดเจลาตินในซันซ์แล้ว ระหว่างการเก็บโมเลกุลของสตาร์ชเริ่มมีการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบ หรือเรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ (Billaderis and Zawistowski, 1990; Ward, Hosney and Seib, 1994; Kim, Wiesenborn and Grant, 1997) ในการนำสตาร์ชไปทำเป็นผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจำเป็นต้องรู้อุณหภูมิและเวลาที่สตาร์ชเกิดเจลาตินในซันซ์และรีโทรเกรเดชัน เพื่อเป็นตัวกำหนดปัจจัยในกระบวนการแปรรูป

สตาร์ชจากถั่วเขียว มีความสามารถในการพองตัวและการละลายสูง จึงทำให้ paste ที่ได้มีความหนืดสูง ในปัจจุบันมีการผลิตในประเทศไทยไม่มากและมีราคาแพง จึงต้องมีการประเมินเพื่อนำมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชเป็นตัวบ่งชี้หน้าที่ ความเสถียรของสตาร์ช และใช้ในการกำหนดสูตร จึงเห็นได้ว่าลักษณะและสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชมีผลต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นการศึกษาสมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากถั่วเขียว จึงจำเป็นต่อการประเมินหน้าที่และการใช้งานของสตาร์ชจากถั่วเขียว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 สตาร์ชถั่วเขียว (Mung bean starch)

สตาร์ชถั่วเขียว สกัดได้จากเมล็ดถั่วเขียว ชื่อวิทยาศาสตร์ *vigna radiata* (L.) Wilczek (Poehlman, 1991) สตาร์ชที่สกัดได้ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารหลายชนิด เช่น ทำวุ้นเส้น เส้นสลิม และเส้นเซี่ยงไฮ้ สตาร์ชถั่วเขียวเป็นวัตถุดิบที่ผู้บริโภคเห็นว่าเหมาะในการนำมาทำวุ้นเส้นเนื่องจากได้เส้นที่มีความใส มีการพองตัวน้อย มีอะมิโลสสูง มีความคงตัวและการคืนตัวสูง (Singh *et al.*, 1989 ; Kim and Wiesenborn, 1996)

#### 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว

Hoover และคณะ (1997) ได้รายงานองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว (ตารางที่ 2.1) ดังต่อไปนี้

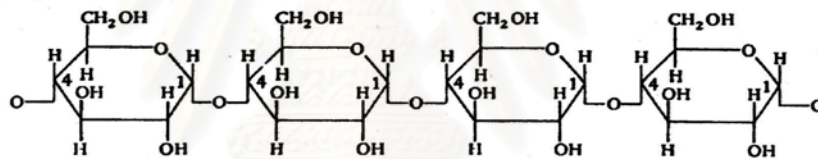
ตารางที่ 2.1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว

องค์ประกอบ	ปริมาณโดยเฉลี่ย
ความชื้น	10.03 ± 0.08
เถ้า	0.11 ± 0.02
ไนโตรเจน	0.05 ± 0.01
ไขมัน	0.04 ± 0.02
อะมิโลส	39.8 ± 0.5

## 2.3 สมบัติพื้นฐานของสตาร์ชถั่วเขียว

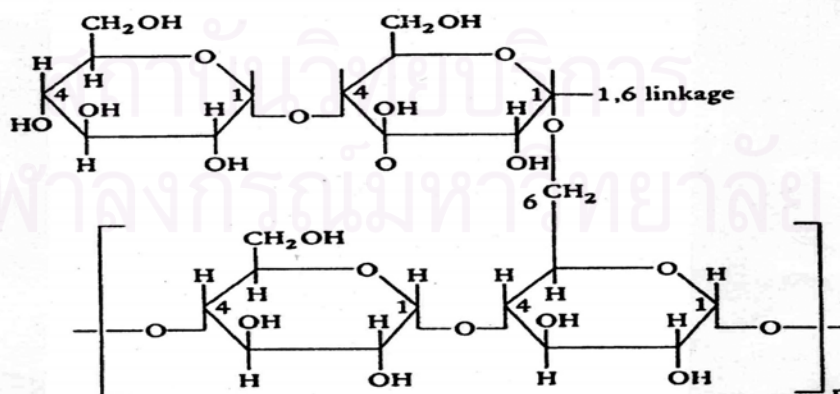
### 2.3.1 องค์ประกอบของแกรนูล

แกรนูลสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะมิโลสและอะมิโลเพคติน อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงประกอบด้วยกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glucosidic linkage ดังภาพที่ 2.1 ปริมาณอะมิโลสขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช สตาร์ชจากธัญพืช เช่น สตาร์ชข้าวโพด ข้าวสาลีและข้าวฟ่างมีอะมิโลสประมาณร้อยละ 28 สตาร์ชจากรากและหัว เช่นสตาร์ชมันฝรั่ง มันสำปะหลัง และสาคุ มีอะมิโลสประมาณร้อยละ 20 อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านและแขนง เป็นส่วนประกอบหลักของสตาร์ช ประกอบด้วยกลูโคสต่อกันเป็นสายสั้น ๆ ด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glucosidic linkage ทุก ๆ 20-30 หน่วยของกลูโคสจะมีกิ่งก้านแยกออกจากสายตรงต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 glucosidic linkage ดังภาพที่ 2.2 อะมิโลเพคตินเป็นโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะมิโลสถึง 1000 เท่า (Swinkels, 1985)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : Penfield และ Campbell (1990)



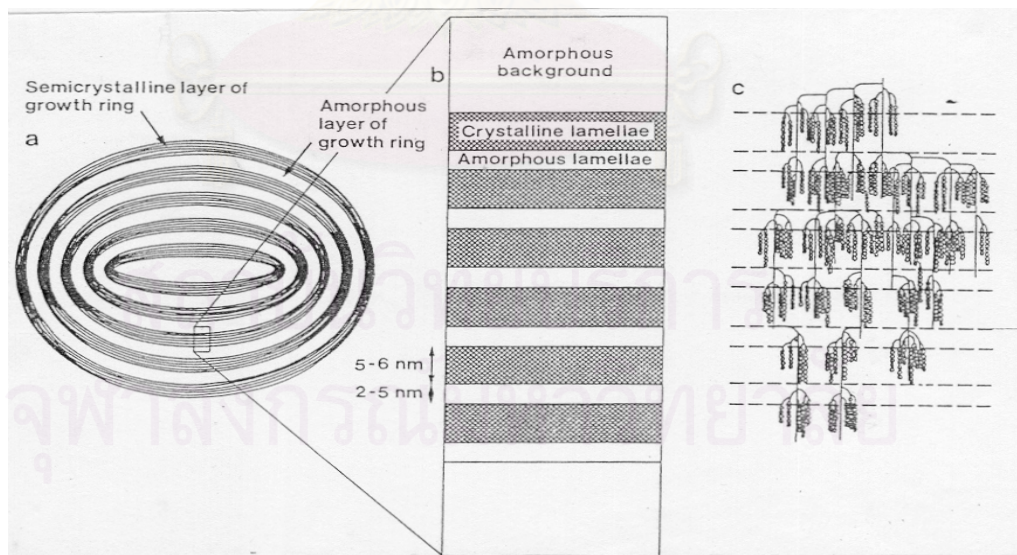
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพคติน

ที่มา : Penfield และ Campbell (1990)



### 2.3.2 โครงสร้างของแกรนูล

สตาร์ชที่พบในธรรมชาติจะพบในรูปแกรนูลสตาร์ชที่มี ขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งกำเนิด มีแบบจำลองโครงสร้างของแกรนูลสตาร์ชแสดงดังภาพที่ 2.3 ภายในแกรนูลสตาร์ชมีลักษณะเป็นวงแหวนหนาแน่น เรียกว่า concentric ring หรือ growth ring ประกอบด้วย semi-crystalline growth ring สลับกับ amorphous growth ring โดยแกรนูลสตาร์ชธรรมชาติมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline growth ring ที่มีอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวอยู่ภายในโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็น crystalline และ amorphous โดยส่วน crystalline เป็นกลุ่มของอะมิโลเพกตินที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบ สายของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวเป็นสายตรงและเกลียวคู่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และส่วน amorphous เป็นโครงสร้างของอะมิโลเพกตินที่มีจุดเชื่อมกิ่ง มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบโดยเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหลวมๆ ดังนั้นภายในแกรนูลสตาร์ชบริเวณ crystalline จะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและยึดโครงสร้างของแกรนูลสตาร์ชไว้ โมเลกุลของอะมิโลสบางส่วนจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดไขมันซึ่งมีผลช่วยเพิ่มความแข็งแรงและช่วยต่อต้านการพองตัวของแกรนูลสตาร์ชด้วย (Leach, McCowen and Schoch, 1959; French, 1975; Oates, 1997)



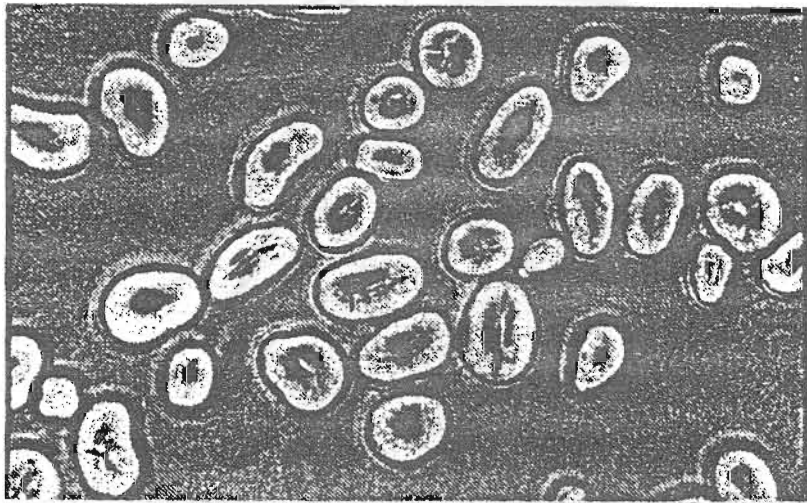
ภาพที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของแกรนูลสตาร์ช

ที่มา : Oates (1997)



### 2.3.3 ขนาดและรูปร่างของแกรนูล

จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าขนาดแกรนูลของสตาโรซ์ถั่วเขียว มีขนาดในช่วง 7.1-26.0 ไมโครเมตร (Hoover *et al.*, 1997) และความกว้างแกรนูลสตาโรซ์ถั่วเขียว และความยาวอยู่ในช่วง 8-16 ไมโครเมตร และในช่วง 12-32 ไมโครเมตร ตามลำดับ (Naivikul *et al.*, 1979) แกรนูลของสตาโรซ์ถั่วเขียวมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีทั้งรูปไข่ รูปกลม และลักษณะคล้ายเมล็ดถั่วดังแสดงในภาพที่ 2.4 (Naivikul and D'Appolonia, 1979; Singh *et al.*, 1989; Hoover *et al.*, 1997)

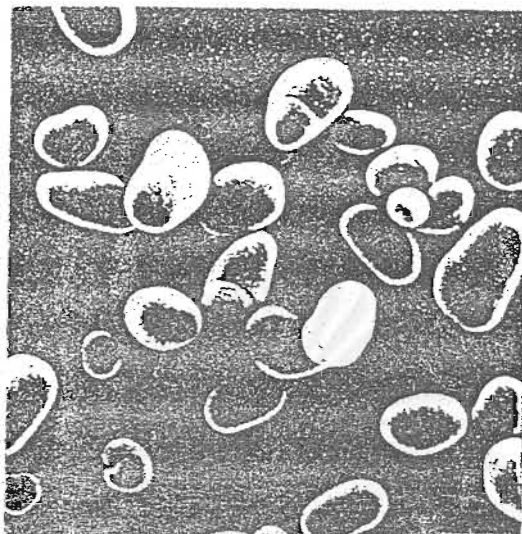


ภาพที่ 2.4 รูปร่างของแกรนูลสตาโรซ์ถั่วเขียว

ที่มา : Naivikul และ D'Appolonia (1979)

### 2.3.4 โครงสร้างพื้นผิวของแกรนูล

ภาพที่ 2.5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าผิวรอบ ๆ แกรนูลสตาโรซ์ถั่วเขียวราบ ไม่มีรอยแยก (Naivikul and D'Appolonia, 1979; Hoover *et al.*, 1997)



ภาพที่ 2.5 พื้นผิวของแกรนูลสตาร์ชตัวเขียว  
ที่มา : Hoover และคณะ (1997)

#### 2.4 สมบัติเชิงความร้อนของการเกิดเจลลิตในเซชัน

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Leach *et al.*, 1959) เมื่อสารแขวนลอยสตาร์ชได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง แกรนูลสตาร์ชดูดน้ำแล้วพองตัว ความหนืดของสารแขวนลอยสตาร์ชเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ แกรนูลสตาร์ชเหลือน้อยลง แกรนูลสตาร์ชเคลื่อนไหวยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยาการเกิดเจลลิตในเซชัน ซึ่งการเกิดเจลลิตในเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิ (Schoch and Maywald, 1968) สตาร์ชตัวเขียวมีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตในเซชันคือ ที่อุณหภูมิ 58-82 องศาเซลเซียส (Hoover *et al.*, 1997)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเกิดเจลลิตในเซชันและการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชสามารถที่จะศึกษาได้ด้วยเครื่อง DSC เนื่องจากวิธีนี้มีข้อดีหลายประการ คือ เป็นวิธีที่สามารถศึกษาการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชกับน้ำในอัตราส่วนที่กว้าง สามารถศึกษาการเกิดเจลลิตในเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสได้ ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อย (ประมาณ 4

มิลลิกรัม) และสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชได้ (Biliaderis *et al.*, 1980; Nakazawa *et al.*, 1985) อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และพลังงานในการเกิดเจลาตินในเซชันของแอมนูลสตาร์ชมีความสัมพันธ์กับ degree of crystalline ของแอมนูลสตาร์ช ความคงตัวของส่วน amorphous หรือส่วนของกิ่งก้านสาขาของ amorphous โดย degree of crystalline ที่สูงมีผลทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูงขึ้นด้วย ซึ่ง degree of crystalline บ่งถึงความคงตัวของโครงสร้างแอมนูลต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน และค่า  $\Delta H$  ที่สูงบ่งว่าโครงสร้างของแอมนูลมีความคงตัว เนื่องจากมีส่วนที่เป็น crystalline มาก (Zeleznaк and Hoseneу, 1987)

Califano และ Anon (1990) ศึกษาผลของความชื้นต่อการเกิดเจลาตินในเซชันของ สตาร์ชถั่วเขียว ด้วยวิธี DSC โดยแปรความชื้นในช่วงร้อยละ 13.60-90.20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อ ปริมาณน้ำสูงกว่าร้อยละ 67 โดยน้ำหนัก ปรากฏ endotherm 1 peak เนื่องจากแอมนูลสตาร์ชได้ รับความร้อนเมื่อมีน้ำมากพอ ทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายตัว แอมนูลสตาร์ชจึงเกิดการพองตัวและ เกิดเจลาตินในเซชันสมบูรณ์ ขณะที่ปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 37.3-67 โดยน้ำหนัก พบ endotherm 2 peak ซึ่งบ่งว่าโครงสร้างส่วนของ amorphous และ ส่วน crystalline ถูกทำลาย บางส่วน และที่ระดับความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 37.3 โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏ peak ของ endotherm เนื่องจากความชื้นไม่พอเพียงต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน

Hoover และคณะ (1997) ศึกษาผลของระยะเวลาที่เก็บต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของเจลาสตาร์ชถั่วเขียวด้วยวิธี DSC ที่ความชื้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก โดยเก็บเจลาสตาร์ชถั่วเขียว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 4 6 8 16 และ 20 วัน พบว่า endotherm ของ การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วเขียว ปรากฏให้เห็นหลังจากเก็บไปแล้วเป็นเวลา 1 วัน โดย อุณหภูมิที่เจลาตินในเซชันเริ่มเกิด (onset temperature,  $T_o$ ) เท่ากับ 44 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่  $\Delta H$  สูงสุด (peak temperature,  $T_p$ ) เท่ากับ 52 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เจลาตินในเซชันสิ้นสุด (final temperature,  $T_f$ ) เท่ากับ 63 องศาเซลเซียส และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการเก็บ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ของอะมิโลเพคตินและสายของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดขึ้น อย่างรวดเร็วและมีความแข็งแรง เมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้น แต่ค่า  $\Delta H_R$  เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาใน การเก็บ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการเก็บ (20 วัน) ค่า  $\Delta H_R$  เท่ากับ 10.5 จูลต่อกรัม เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น

## 2.5 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสตาร์ชถั่วเขียว

### 2.5.1 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงและกิ่งก้านมีการจัดเรียงตัวตามแนวรัศมีของแกรนูลสตาร์ช (ภาพที่ 2.6 A) อย่างไรก็ตาม โมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านและเส้นตรงที่ขนานกันมีแรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนดึงสายของโมเลกุลทั้งสองให้รวมเข้าด้วยกันเป็นกลุ่มผลึกเรียกว่า crystalline bundles หรือ micelles โมเลกุลเส้นตรงที่ยาวอาจจะผ่านเข้าไปในพื้นผิวของกลุ่ม micelles ดังกล่าว หรืออยู่รอบนอกของโมเลกุลส่วนที่เป็นกิ่งก้าน ดังนั้นส่วนที่เป็น crystalline เหล่านี้จะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและยึดโครงสร้างของสตาร์ชเข้าไว้ด้วยกันให้เป็นแกรนูลสตาร์ชอยู่ได้ โดยยอมให้มีการพองตัวได้แต่จะป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่กระจายและการละลายของโมเลกุลสตาร์ชแต่ละโมเลกุล ส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่าง micelles จะมีสายและกิ่งก้านของสายโมเลกุลกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบและรวมตัวอยู่หลวม ๆ เมื่อสารแขวนลอยสตาร์ชได้รับความร้อน บริเวณที่มีรูปร่างไม่แน่นอนดังกล่าวจะเกิด hydration และเกิดการพองตัว ในที่สุดร่างแหจะเริ่มขยายออก (ภาพที่ 2.6 B) ร่างแหนี้ทำให้แกรนูลสตาร์ชมีความยืดหยุ่นและมีความหนืดสูง ซึ่งเป็นลักษณะของ paste (Leach *et al.*, 1959)



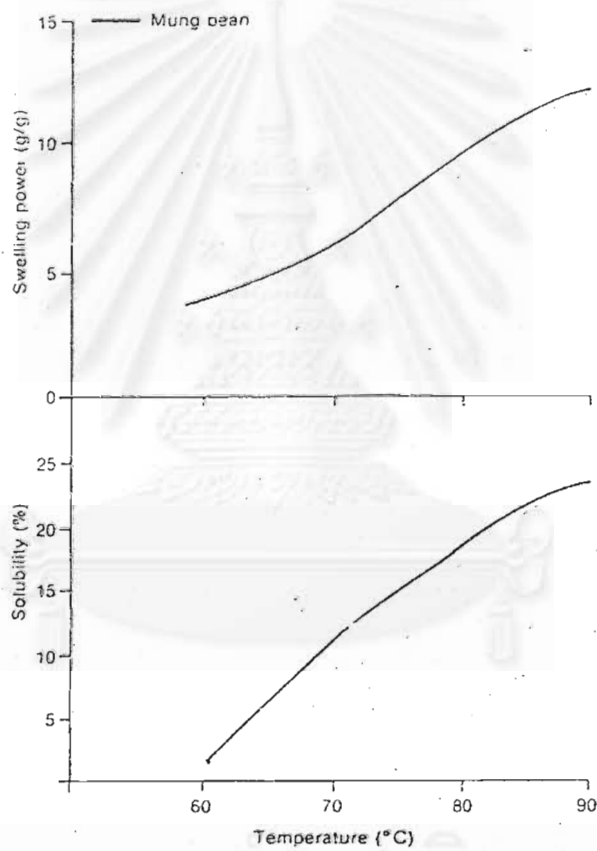
ภาพที่ 2.6 การพองตัวของแกรนูลสตาร์ช

A คือ ลักษณะร่างแหปกติ

B คือ ลักษณะร่างแหที่พองตัว

ที่มา : Leach และคณะ (1959)

Singh และคณะ (1989) ศึกษาการพองตัวและสมบัติการละลายของแกมมุลสตาร์ช ถั่วเขียวพบว่า มีลักษณะการพองตัวแบบ 2 ชั้น (two-stage swelling) คือ ในช่วงแรกการพองตัวจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ต่อมาการพองตัวจะเกิดขึ้นในอัตราที่เร็วขึ้น (ภาพที่ 2.7) พฤติกรรมเช่นนี้ บ่งว่า ภายในแกมมุลสตาร์ชมีแรงของพันธะอยู่สองลักษณะ คือ พันธะที่มีแรงอ่อนกว่าจะพองนคลายที่อุณหภูมิ 65-75 องศาเซลเซียส และพันธะที่แข็งแรงจะพองนคลายที่อุณหภูมิ 85-95 องศาเซลเซียส (Leach *et al.*, 1959)



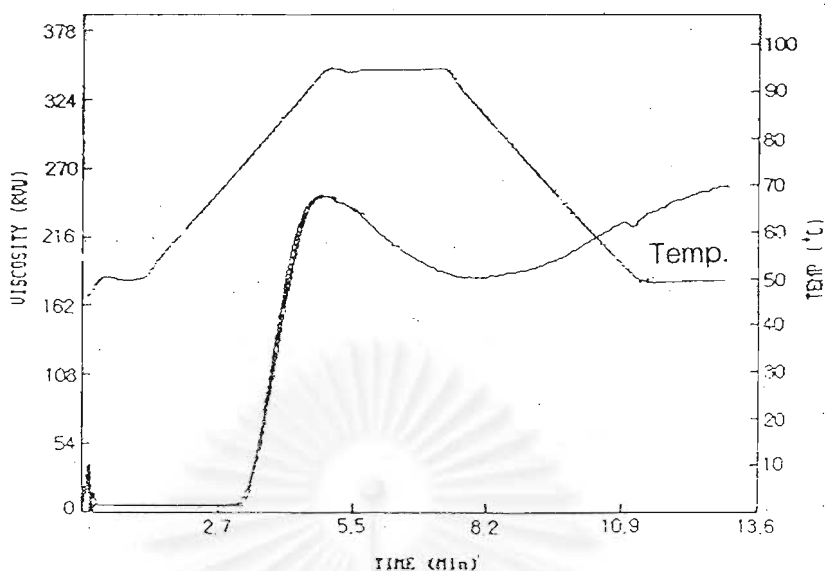
ภาพที่ 2.7 รูปแบบการพองตัวและการละลายของนูลสตาร์ชถั่วเขียว  
ที่มา : ดัดแปลงจาก Singh และคณะ (1989)

## 2.5.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช

สตาร์ชเกิดปฏิกิริยากับน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรกเมื่ออยู่ในน้ำเย็น แกรนูลอสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เมื่อนำไปทำแห้งสตาร์ชจะมีลักษณะเหมือนเดิม (Leach *et al.*, 1959) เนื่องจากส่วนที่เป็น crystalline สามารถยืดหยุ่นได้อย่างจำกัด แกรนูลอสตาร์ชยังคงรูปร่างและสมบัติ birefringence (French, 1975) ระยะที่สองเมื่อให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยสตาร์ชจนถึงอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส (ขึ้นกับชนิดสตาร์ช) ทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายลง แกรนูลอสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เรียกอุณหภูมิที่สารแขวนลอยสตาร์ชเริ่มมีความหนืดว่า pasting temperature แกรนูลอสตาร์ชจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียสมบัติ birefringence โดยแกรนูลอสตาร์ชจะมีการพองตัวสูงขึ้นทำให้ความหนืดสูงขึ้น การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดองค์ประกอบทางเคมีรวมทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในแกรนูลอสตาร์ช (Wurzburg, 1986) เมื่อแกรนูลอสตาร์ชมีการพองตัวสูงสุดที่จุด peak viscosity แล้วแกรนูลอสตาร์ชจะเริ่มแตกออกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะทำให้แกรนูลอสตาร์ชเริ่มเข้าสู่ระยะที่สาม คือมีการแตกตัวของแกรนูลอสตาร์ชอย่างสมบูรณ์ การละลายของสตาร์ชจะสูงขึ้นด้วย โดยโมเลกุลของอะมิโลสที่มีขนาดเล็กจะกระจายออกมาจากแกรนูลอสตาร์ชก่อน ความหนืดของ paste ลดลง เมื่อปล่อยให้ paste เย็นตัว โมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่ละลายน้ำอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นเจล เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดังกล่าวยิ่งแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำภายในเจลจะถูกบีบออก (syneresis) ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการนี้คือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Smith, 1979; Zheng and Sosulski, 1998)

Chung และคณะ (2000) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชพองตัวเท่ากับ 71.9 องศาเซลเซียส ความหนืดเมื่อสตาร์ชพองตัวสูงสุดเท่ากับ 249 RVU ความหนืดเมื่อสตาร์ชเย็นตัวเท่ากับ 260 RVU (ภาพที่ 2.8)





ภาพที่ 2.8 ลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA  
ที่มา: คัดแปลงจาก Chung และคณะ (2000)

Hoover และคณะ (1997) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียว ความเข้มข้นร้อยละ 6 น้ำหนักโดยปริมาตร pH 5.5 ด้วยเครื่อง Brabender Viscoamylograph พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเริ่มเกิดความหนืดคือ 80 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 200 BU เมื่อคงอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียสนาน 30 นาที ความหนืดของ paste เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งให้เห็นว่า paste คอนข้างคงตัว และแกว่งสตาร์ช ไม่แตกระหว่างกวน เมื่อลดอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส ความหนืดของ paste เพิ่มขึ้นเป็น 360 BU โดยรูปแบบความหนืดของสตาร์ชถั่วเขียวเป็นแบบ C คือลักษณะความหนืดไม่ปรากฏเป็น ยอดสูงสุด

### 2.5.3 สมบัติทางการไหลของสตาร์ช

สมบัติทางการไหล มีความสำคัญต่อการทำนายพฤติกรรมของสตาร์ชในระหว่าง กระบวนการแปรรูป โดยลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส สมบัติของ paste และความหนืด ของสตาร์ชเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสตาร์ชเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Islam and Mohd, 1997) สมบัติทางการไหลของสตาร์ชที่เป็นส่วนประกอบในอาหารขึ้นอยู่กับ ธรรมชาติและรูปแบบของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ช โครงสร้างทางเคมี และแรงกระทำ

ระหว่างโมเลกุล (Mani *et al.*, 1992) ความหนืดเป็นสมบัติทางการไหลที่สำคัญสำหรับอาหารเหลว เช่น อาหารจำพวกซूप ซอส คาสตาต และเครื่องดื่ม เป็นต้น (Evans and Haisman, 1979; Islam and Mohd, 1997) สมบัติทางกายภาพของ paste และเจลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ช และปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่แยกออกมาจากแกรนูลสตาร์ชระหว่างที่ให้ความร้อน (Islam, Mohd and Noor, 2001) Morris (1989) รายงานว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของพอลิแซคคาไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง เกิดเนื่องจากการ overlap และ/หรือการแทรกตัว (interpenetrate) ของสายโมเลกุลหนึ่งกับอีกสายโมเลกุลหนึ่ง การ overlap กันของสายโมเลกุลเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม critical concentration หมายถึงความเข้มข้นที่เมื่อพลอตความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นแล้วพบจุดที่ความหนืดมีการเพิ่มขึ้นอย่างทันที ในแง่ของโมเลกุลการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีนี้ก็คือการเริ่มเกิด coil overlap ระหว่างสายโมเลกุลของพอลิเมอร์ในส่วนกระจาย (dispersions) การพันกัน (entanglement) เริ่มเกิดเหนือความเข้มข้น ณ จุดนี้ จุดเริ่มเกิด coil overlap สามารถหาได้จากอัตราส่วนของจำนวนของสายที่มีอยู่กับปริมาตรที่แต่ละสายยึดครอง coil volume สามารถ characterize ได้โดย intrinsic viscosity ซึ่ง intrinsic viscosity เป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งบ่งถึงปริมาตรของพอลิเมอร์เมื่ออุ้มตัวทำละลายไว้แล้วและเคลื่อนที่โดย hydrodynamic และยังบ่งถึงขนาดและรูปร่างของโมเลกุลได้ (Tanglertpaibul and Rao, 1987) สมบัติทางการไหลของสตาร์ชซูกในตัวทำละลายแบ่งเป็น 3 ช่วงซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ชดังนี้

1. Dilute solution ในช่วงนี้สตาร์ชซูกในสารละลายอยู่ห่างจากกันมาก ไม่มี granule-granule interaction ความหนืดของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นแบบ linear เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น

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

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_s}{\eta_0} = (1 + [\eta]c) \quad (2)$$

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 = (\eta_s / \eta_0) - 1 \quad (3)$$

เมื่อ  $\eta_0$  = viscosity ของตัวทำละลาย (mPa·s)

$\eta_s$  = viscosity ของสารแขวนลอยสตาร์ชซูก (mPa·s)

$\eta_{rel}$  = relative viscosity

c = concentration (g/dl)

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

$\eta_{sp}$  = specific viscosity



$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 สามารถหาค่า intrinsic viscosity ที่อัตราเฉือนเข้าใกล้ (zero shear-rate) โดยวัดที่อัตราเฉือนต่ำพอที่สารละลายจะแสดงพฤติกรรมแบบ Newtonian ซึ่งการวัดส่วนใหญ่ใช้ capillary viscometer McMillan (1974) รายงานว่า reduced viscosity เขียนได้ในรูปของสมการของ Huggin ได้ดังนี้

$$\eta_{red} = \eta_{sp}/c = [\eta] + k'[\eta]^2c \quad (5)$$

เมื่อ  $\eta_{red}$  = reduce viscosity

k = ค่าคงที่ของ Huggin ซึ่งบอกถึง gelatinized starch granule-solvent interaction ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าสตาร์ชชอบตัวทำละลาย

จากสมการที่ 5 ค่า intrinsic viscosity สามารถหาได้จากการ extrapolate ค่า reduced viscosity ไปที่ความเข้มข้นของสารละลาย = 0 นอกจากนี้ค่า intrinsic viscosity ยังสามารถหาได้จากการ extrapolate ค่า inherent viscosity ( $\ln\eta_r/c$ ) ที่ความเข้มข้นของสารละลาย = 0 โดยการใส่สมการ Kramer (McMillan, 1974) ดังต่อไปนี้

$$\ln\eta_r/c = [\eta] - k''[\eta]^2c \quad (6)$$

เมื่อ  $k''$  = ค่าคงที่ของ Kramer ซึ่งบอกถึง gelatinized starch granule-solvent interaction

ในตัวทำละลายที่ดีการดึงดูด (attraction) ระหว่างแอมูลสตาร์ชกับตัวทำละลายจะสูงกว่าระหว่างแอมูลด้วยกัน ค่า  $[\eta]$  บ่งถึงขนาดของแอมูลของสตาร์ชซึ่งพองตัวเมื่อมีการดูดน้ำและเกิดเจลาติไนซ์ (Launay, Doublier and Cuvelier, 1986)

Islam และคณะ (2001) ศึกษาค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ช sago สุกโดยใช้ตัวทำละลายเกลือ NaCl ความเข้มข้น 0, 0.009, 0.017, 0.034, 0.085 และ 0.170 โมลาร์ พบว่า

ค่า intrinsic viscosity เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NaCl เพิ่มขึ้น และมีค่าเท่ากับ 0.323, 0.388, 0.420, 0.474, 0.480 และ 0.958 เดซิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากสตาร์ชในสารละลาย NaCl เกิดการ form เป็นเกลือ Na ของสตาร์ช (sodium salt of starch) เนื่องจากในสภาพธรรมชาติสตาร์ชมีความเป็นกรดและมีประจุเป็นลบ ดังนั้น  $\text{Cl}^-$  ถูกผลักโดยโมเลกุลของ สตาร์ชและ  $\text{Na}^+$  แทรกตัวเข้าไปอยู่ในสายโมเลกุลของสตาร์ช แทนที่  $\text{H}^+$  ที่ถูกผลักไปอยู่ใน phase ของน้ำ เป็นผลให้สารละลายเริ่มมีความเป็นกรดมากขึ้น และเกิดการคลายตัวของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้ปริมาตรของสตาร์ชที่อุ้มตัวทำละลาย (hydration volume) สูงขึ้น ความหนืดจึงเพิ่มขึ้น

2. Paste ในช่วงนี้ความเข้มข้นของสตาร์ชสูงพอที่จะทำให้เกิด granule-granule interaction นอกจากนี้ยังมีส่วนของอะมิโลสรอบนอกละลาย (melt) ออกมาจากแกรนูลทำให้ลักษณะการไหลขึ้นกับรูปร่างและกำลังการพองตัวของแกรนูล การพันกันระหว่าง amylose-amylopectin, granule-granule, amylose-granule, และ amylopectin-granule interaction (Ring *et al.*, 1987) วิธีการศึกษาสมบัติการไหลของ paste สตาร์ชที่เป็นที่นิยมคือการใช้ rotational viscometer โดยพฤติกรรมของการไหลของ paste สตาร์ชที่อุณหภูมิกงที่อธิบายได้ด้วยสมการของ power law ดังนี้ (Launay *et al.*, 1986)

$$\tau = k\gamma^n \quad (7)$$

เมื่อ	$\tau$	= shear stress	(mPa)
	k	= consistency index	(mPa·s <sup>n</sup> )
	$\gamma$	= shear rate	(sec <sup>-1</sup> )
	n	= flow behavior index	

ค่า n เป็นค่าที่บ่งถึงลักษณะการไหลของ paste กล่าวคือเท่ากับ 1, มากกว่า 1 และน้อยกว่า 1 การไหลของ paste เป็นแบบ Newtonian, Dilatant และ Pseudoplastic ตามลำดับ

Hoover และ Vasanthan (1994) ศึกษาสมบัติการไหลของ pastes ของสตาร์ช ข้าวสาลี สตาร์ชข้าวโอ๊ต สตาร์ช lentil และสตาร์ชมันฝรั่ง ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายน้ำที่ pH 5.5 โดยทำการเจลาติไนซ์สตาร์ชที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้ววัดค่า apparent viscosity โดยใช้ cone and plate viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 7.5-750 นาที<sup>-1</sup> (Brookfield viscometer spindle CP-40

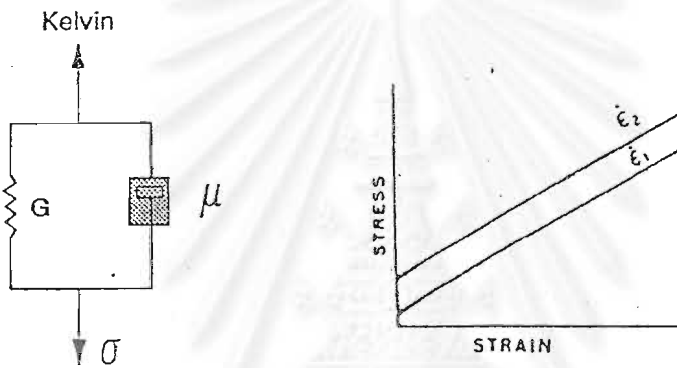
ซึ่งมี conc angle เท่ากับ  $8^\circ$  และรัศมีเท่ากับ 1.2 cm) หรือ 2-400 นาที<sup>-1</sup> (Brookfield viscometer spindle CP-52 ซึ่งมี conc angle เท่ากับ  $3^\circ$  และรัศมีเท่ากับ 2.4 cm) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า paste ของสตาร์ชที่ศึกษานี้มีลักษณะการไหลเป็นแบบ Pseudoplastic โดยค่า flow behavior index (n) ของ paste ของสตาร์ชข้าวโอ๊ตมากกว่าข้าวสาลี มากกว่าสตาร์ช lentil และมากกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง ตามลำดับ ขณะที่ค่า consistency index (k) ของ paste ของสตาร์ชมันฝรั่งมากกว่าสตาร์ช lentil มากกว่าสตาร์ชข้าวสาลี และมากกว่าสตาร์ชข้าวโอ๊ต ตามลำดับ เนื่องจากแกรนูลของสตาร์ชมันฝรั่งมีการพองตัวสูง โดยมีกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เท่ากับ 93.1 ดังนั้นจึงเกิดการชนกันระหว่างแกรนูลที่พองตัวสูงกว่าสตาร์ชอื่น เป็นผลให้ความหนืดสูงกว่าสตาร์ชอื่นที่ศึกษา ค่า k จึงสูงกว่า ขณะที่ค่า n ต่ำ เนื่องจากแกรนูลพองตัวมาก การเคลื่อนที่จึงช้าลง

Bhattacharya และ Bhattacharya (1996) ศึกษาสมบัติการไหลของ paste ของแป้งข้าวโพด (debranned maize flour) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก โดยเจลาติโนสที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้ววัด shear stress โดยใช้ concentric cylinder viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 3-1326 นาที<sup>-1</sup> และพบว่า paste ของแป้งข้าวโพดมีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่า yield stress และค่า consistency index เพิ่มขึ้น แต่ค่า flow behavior ลดลง

3. Gel ในช่วงที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสูงมาก granule-granule interaction สูงพอเพียง พร้อมกับการที่แกรนูลสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เจลาติโนเซชันและมีน้ำมากพอ จนทำให้มีอะมิโลสที่แยกออกมาจากแกรนูลมีปริมาณพอเพียงสำหรับการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติ (Tester and Morrison, 1990a) โดยมีแกรนูลสตาร์ชที่พองตัวถูกตรึงไว้ภายในโครงร่างแหนั้น โดยทั่วไปพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชสูงพอ (มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) paste สตาร์ชจะกลายเป็นเจลที่มีลักษณะของ viscoelastic เมื่อทำให้เย็น (Ring, 1985) การศึกษาลักษณะทาง viscoelastic ของสตาร์ชทำได้โดยการทดลอง creep, stress relaxation และ dynamic methods และมีแบบจำลองทางการไหล (Rheological Model) อย่างง่ายสำหรับเจลสตาร์ชที่เป็น viscoelastic ดังนี้

● แบบจำลองของ Kelvin

แบบจำลองของ Kelvin ประกอบด้วย spring และ dashpot ต่อขนานกัน ดังภาพที่ 2.9 spring ใช้แทนสมบัติความยืดหยุ่นของของแข็ง และ dashpot ใช้แทนสมบัติความหนืดของของเหลว เมื่อให้แรงกระทำ จะทำให้ spring และ dashpot ยืดออกพร้อมกัน เมื่อปล่อยแรงกระทำออก spring จะหดตัวคืน dashpot กลับคืนตัวอย่างช้าๆ การยืดตัวของแบบจำลอง Kelvin เป็นผลรวมมาจากการยืดตัวของ spring และ dashpot เพราะ spring และ dashpot ต่อขนานกันอยู่ จึงทำให้ strain ของ spring และ dashpot เท่ากัน ส่วน stress ทั้งหมดเท่ากับผลรวมของ stress ส่วน spring และ dashpot แบบจำลองนี้แสดงลักษณะ retard elastic ของเจล



ภาพที่ 2.9 แบบจำลองของ Kelvin

ที่มา : Steffe (1992)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของ Kelvin อธิบายได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_v \quad (8)$$

$$\epsilon = \epsilon_s = \epsilon_v \quad (9)$$

$$\sigma = E\epsilon + \eta\dot{\epsilon} \quad (10)$$

เมื่อ  $\sigma$  = stress

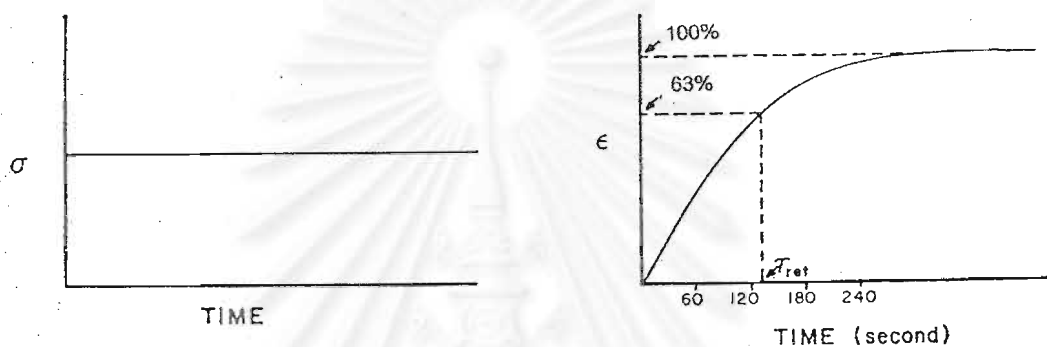
$\epsilon$  = strain

$E$  = สมบัติของส่วนที่เป็น ideal elastic

$\eta$  = สมบัติของส่วนที่เป็น ideal Newtonian fluid

subscript s และ v แทน spring and dashpot ตามลำดับ

การศึกษา creep คือการหาความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา เมื่อให้ stress คงที่ ค่าหนึ่งกับวัสดุนั้นตลอดเวลา พบว่าวัสดุซึ่งมีลักษณะการไหลที่อธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ Kelvin นั้นมีความสัมพันธ์ดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ 2.10 คือเมื่อให้ stress คงที่ค่าหนึ่ง ค่า strain ของ spring ไม่สามารถเกิดแบบทันทีทันใด เพราะถูก dashpot หน่วงไว้ การยืดจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของเวลา จนถึง retardation time ( $\tau_{ret}$ ) คือเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปไป 63% ของ strain สูงสุด และการยืดของวัสดุสูงสุดที่แรงนั้นเท่ากับ  $\sigma/E$



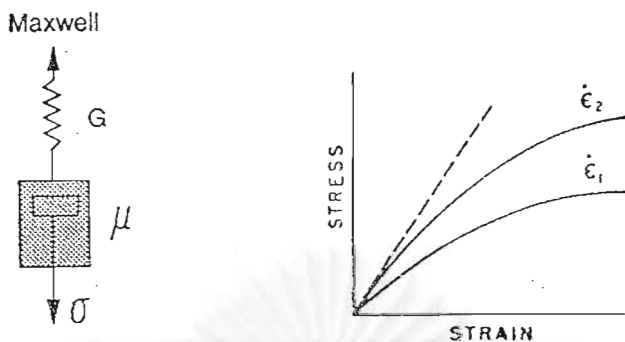
ภาพที่ 2.10 Creep สำหรับแบบจำลองของ Kelvin

ที่มา : Rao (1992)

$$\tau_{ret} = \eta/E \quad (11)$$

● แบบจำลองของ Maxwell

แบบจำลองของ Maxwell ประกอบด้วย spring และ dashpot ต่ออนุกรมกัน ดังภาพที่ 2.11 เมื่อให้แรงกระทำ จะทำให้ spring ยืดออกทันที แล้ว dashpot จึงยืดตามช้าๆ เมื่อปล่อยแรงออก spring จะหดตัว แต่ dashpot ยังคงสภาพสุดท้ายไม่เปลี่ยนแปลง แรงที่ให้ spring เท่ากับแรงที่ให้ dashpot stain ทั้งหมดเท่ากับผลรวมของ strain ของ spring และ dashpot



ภาพที่ 2.11 แบบจำลองของ Maxwell  
ที่มา : Steffe (1992)

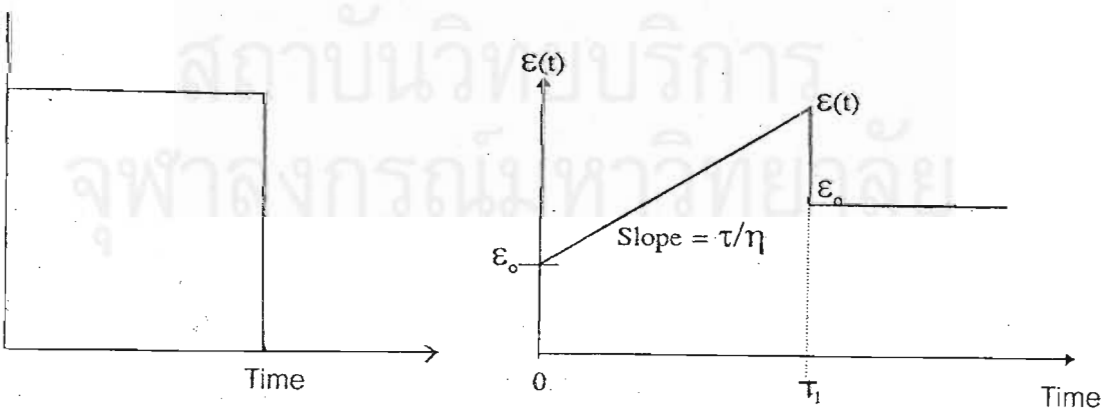
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของ Maxwell คือ

$$\sigma = \sigma_s = \sigma_v \tag{12}$$

$$\epsilon = \epsilon_s + \epsilon_v \tag{13}$$

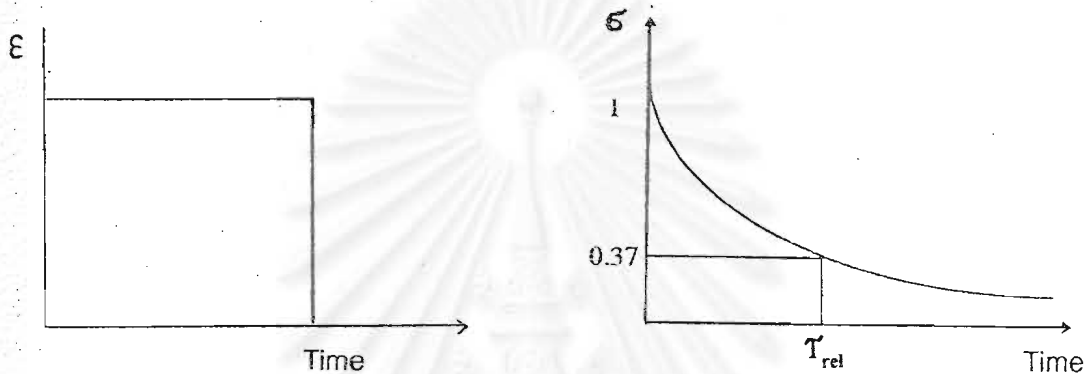
ความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา เมื่อให้ stress คงที่ค่าหนึ่ง แสดงดังภาพที่ 2.12 เมื่อให้ stress คงที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปทันทีเนื่องจาก spring จากนั้นการเปลี่ยนรูปจะเกิดช้าๆ เนื่องจาก dashpot เมื่อเอาแรงออก spring จะหดกลับทันทีด้วยระยะทางเท่ากับระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนรูปครั้งแรก ต่อมาส่วน dashpot ยังคงสภาพสุดท้ายไม่เปลี่ยน

6



ภาพที่ 2.12 Creep สำหรับแบบจำลองของ Maxwell  
ที่มา : มนัส แซ่ตัน (2538)

Stress relaxation ของวัสดุที่มีลักษณะการไหลเช่นเดียวกับแบบจำลองของ Maxwell แสดงดังภาพที่ 2.13 คือเมื่อให้ strain คงที่ค่าหนึ่ง (ยึดแบบจำลองแล้วตรึงไว้) จะเกิดการปล่อยแรงเค้นขึ้น คือ spring จะรับแรงทั้งหมด แล้วค่อยๆดึง spring ออก แล้วปล่อยให้ dashpot รับแรงแทนทีละน้อยและเพิ่มขึ้นจนแรงเค้นทั้งหมดหายไปจาก spring เข้าสู่ dashpot ช่วงเวลาที่ stress ลดลง 63% จาก stress เริ่มต้นเรียกว่า relaxation time



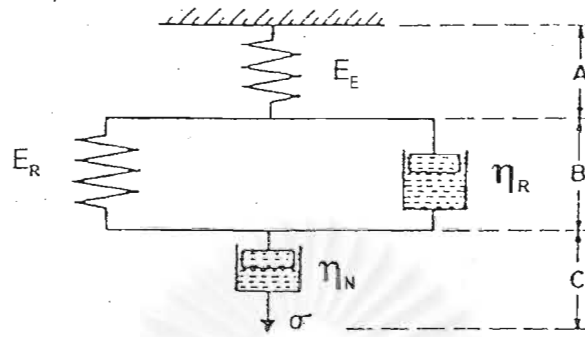
ภาพที่ 2.13 Stress relaxation สำหรับแบบจำลองของ Maxwell  
ที่มา : มนัส แซ่ด่าน (2538)

$$\tau_{rel} = \eta/E \quad (14)$$

เมื่อ  $\tau_{rel}$  = relaxation time

- แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (แบบจำลองของ Burger)

แบบจำลองของ Burger ประกอบด้วยแบบจำลองของ Maxwell และ Kelvin ต่ออนุกรมกัน ดังภาพที่ 2.14 เมื่อให้แรงกระทำจะทำให้  $E_E$  ยึดออกทันที จากนั้น  $E_R$  จะไม่ยึดทันทีทันใดเพราะถูก  $\eta_R$  หน่วงไว้ ช่วงนี้จะเกิด retardation time (ช่วง B) เมื่อปล่อยเวลาผ่านไปพอสมควรการยึดจะขึ้นกับ  $\eta_N$  เมื่อปล่อยแรงกระทำออก  $E_E$  จะหดกลับอย่างรวดเร็ว จากนั้นการหดกลับจะเป็นฟังก์ชันของเวลาเนื่องจากส่วนของ  $E_R$  และ  $\eta_R$  ส่วน  $\eta_N$  จะค้างอยู่ไม่สามารถหดกลับได้



ภาพที่ 2.14 แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ

ที่มา : Steffe (1992)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของ Burger คือ

$$\epsilon = \epsilon_A + \epsilon_B + \epsilon_C \quad (15)$$

$$\sigma = \sigma_A = \sigma_B = \sigma_C \quad (16)$$

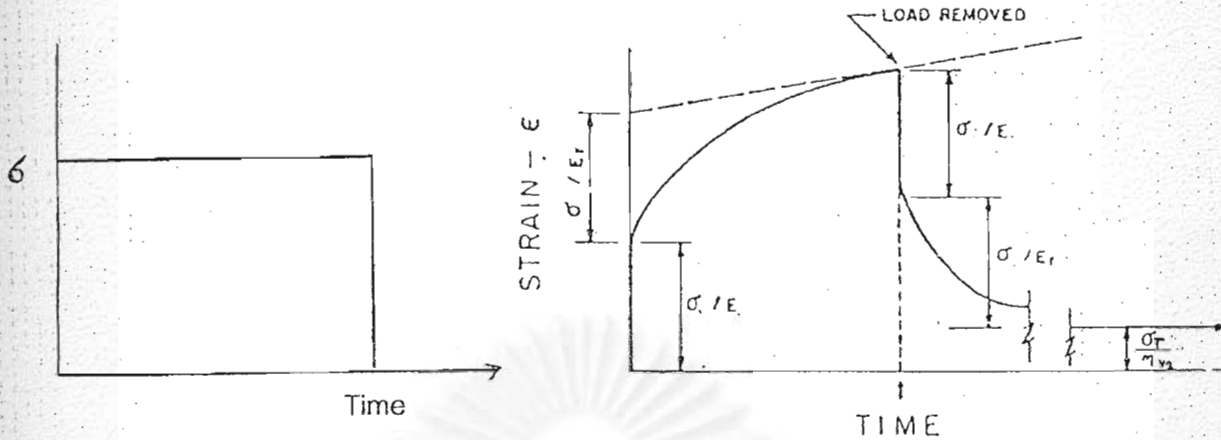
$$\sigma_A = E_E \epsilon_A \quad (17)$$

$$\sigma_B = E_R \epsilon_B + \eta_R \dot{\epsilon}_B \quad (18)$$

$$\sigma_C = \eta_N \dot{\epsilon}_C \quad (19)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา เมื่อให้ stress คงที่ค่าหนึ่ง แสดงดังภาพที่ 2.15 เมื่อให้แรงกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนรูปทันทีเนื่องจาก spring จากนั้นการเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นช้าๆ เนื่องจาก spring และ dashpot ต่อขนานกัน เมื่อเอาแรงกระทำออก spring ส่วนที่ต่ออนุกรมจะหดกลับทันที จากนั้นการหดกลับของ spring และ dashpot ในส่วนของแบบจำลอง Kelvin จะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ส่วน dashpot ที่ต่ออนุกรม จะค้างอยู่ไม่สามารถคืนกลับได้ บ่งถึงส่วนที่เปลี่ยนรูปอย่างถาวร





ภาพที่ 2.15 Creep สำหรับแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ  
ที่มา : Steffe (1992)

Won และคณะ (2000) ศึกษาลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ช cowpea ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 10 น้ำหนักโดยปริมาตร (เจลมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร) โดยเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3 และ 7 วัน แล้วนำเจลมาทดลอง creep ด้วยเครื่อง rheometer โดยใช้แรงเค้น 30 Pa นาน 300 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า สมบัติทาง viscoelastic ของสตาร์ช cowpea อธิบายได้ด้วยแบบจำลองแบบ 4 องค์ประกอบ เมื่อเวลาที่เก็บนานขึ้น การเปลี่ยนรูปของเจลลดลง เนื่องจากโครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีความต้านทานต่อแรงที่มากกระทำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### วัตถุประสงค์

สตาร์ชถั่วเขียว (บริษัท สิทธิพันธ์ จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ ฯ)

#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว

###### 3.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียวดังต่อไปนี้

3.1.1.1 ความชื้นโดยใช้ Hot Air Oven ตามวิธี AOAC 925.10 (1995)

3.1.1.2 โปรตีนโดยวิธี Kjeldahl ตามวิธี AOAC 920.87 (1995)

3.1.1.3 ไขมันโดยวิธี Soxhlet extraction ตามวิธี AOAC 920.85 (1995)

3.1.1.4 เส้นใยโดยหา crude fiber ตามวิธี AOAC 920.86 (1995)

3.1.1.5 เถ้าโดยใช้ Furnace ตามวิธี AOAC 923.03 (1995)

###### 3.1.2 คำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามสมการต่อไปนี้

$$A = 100 - B \quad (20)$$

เมื่อ A = ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)

B = ผลรวมของปริมาณร้อยละขององค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้  
จากข้อ 3.1.1.1-3.1.1.5

###### 3.1.3 สตาร์ชโดยใช้ Polarimeter ตามวิธี AOAC 945.37 (1995)

3.1.4 อะมิโลส วิเคราะห์โดยใช้ Iodine method ตามวิธีของ Juliano (1971) และใช้เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 6 ความยาวคลื่นคือ 520, 530, 565, 592, 700 และ 800 นาโนเมตร ตามวิธีของ Jarvis และ Walker (1993) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.

ทำการวิเคราะห์ 4 ซ้ำ

##### 3.2 การศึกษาผลของความชื้นต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

วิเคราะห์หาค่า onset temperature ( $T_o$ ), peak temperature ( $T_p$ ), final temperature ( $T_f$ ) และ enthalpy of gelatinization ( $\Delta H$ ) ของการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช

ถั่วเขียวด้วยวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC7, Perkin Elmer, Connecticut, USA) ที่ระดับความชื้นต่าง ๆ ในช่วงร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40-120 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

### 3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการเก็บสตาร์ชถั่วเขียวที่เจลาตินในเข้ ชั้นแล้วต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชถั่วเขียว

ทำการ gelatinize สตาร์ชถั่วเขียว 3.4 มิลลิกรัม ที่ระดับความชื้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40-110 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) แล้วนำสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการเจลาตินในเข้แล้วไปบ่ม โดยแปรอุณหภูมิที่เก็บตัวอย่าง 2 ระดับ คือ 4 และ -20 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาที่เก็บตัวอย่าง 4 ระดับ คือ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วนำสตาร์ชไปตรวจสอบการเกิด regelatinize ภายหลังการเก็บด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง และวิเคราะห์หาค่า  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_f$  และ enthalpy of regelatinization ( $\Delta H_R$ ) ของสตาร์ชถั่วเขียว โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40-110 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Baker และ Duarte (1998) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2x4 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

### 3.4 การศึกษาผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือต่อขนาดแกรนูลที่พอง ตัวของสตาร์ชถั่วเขียวสุก

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 0.6 กรัมต่อเดซิลิตร ในสารละลายบัฟเฟอร์ Citric acid-di-Sodium hydrogen phosphate pH 3 และ 5 [Citric acid (Merck, Darmstadt, Germany) และ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (Merck, Darmstadt, Germany)] ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH7 [ $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (Merck, Darmstadt, Germany) และ  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  (Merck, Darmstadt, Germany)] และในสารละลายบัฟเฟอร์ Sodium carbonate-sodium bicarbonate pH 9 [ $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Merck, Darmstadt, Germany) และ  $\text{NaHCO}_3$  (Merck,

Darmstadt, Germany)] ที่ความเข้มข้นของ NaCl ในช่วง 0-0.2 โมลาร์ นำไปเจลาตีไนซ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ใน water bath เป็นเวลา 15 นาที นำไปวัดหาค่า intrinsic viscosity โดยจับเวลาการไหลของตัวทำละลาย ( $t_0$ ) และเวลาการไหลของสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุก ( $t$ ) ที่ผ่าน capillary viscometer แบบ Cannon-Fenske เบอร์ 50 ควบคุมอุณหภูมิที่  $30 \pm 0.1$  องศาเซลเซียส แล้วหาค่า relative viscosity ( $\eta_{rel}$ ) ดังสมการ 21

$$\eta_{rel} = t/t_0 \quad (21)$$

จากนั้นเจือจางสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกด้วยตัวทำละลายที่ใช้ 5 ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชถั่วเขียวสุก ( $c$ ) ให้วัดค่า relative viscosity ได้ในช่วง 1.1-1.5 แล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า relative viscosity กับความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุก จากนั้นหาค่า reduced viscosity ( $\eta_{red}$ ) ดังสมการ 22

$$\eta_{red} = (\eta_{rel} - 1)/c \quad (22)$$

แล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า reduced viscosity กับความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกในช่วงความเข้มข้นของสตาร์ชสุกที่ให้ค่า  $\eta_{rel}$  ในช่วง 1.1-1.5 ลากเส้นกราฟจากการวิเคราะห์ linear regression และ intercept ของเส้นกราฟ (ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสุก = 0 กรัมต่อเดซิลิตร) คือค่า intrinsic viscosity รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

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

### 3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อลักษณะการไหลของ paste ถั่วเขียว

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชที่มีความเข้มข้นของสตาร์ช 5 ระดับ คือ 3, 3.5, 4, 4.5, และ 5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ แล้วนำไปเจลาตีไนซ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส ใน water bath เป็นเวลา 20 นาที ทำให้เย็นถึงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้ววัดค่า apparent viscosity ของ paste ถั่วเขียวด้วย rotational viscometer (Brookfield, DV-II+, Stoughton, USA) ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง  $0.6-12 \text{ นาที}^{-1}$  ภายในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ

30±0.1 องศาเซลเซียส และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ flow behavior index และ consistency index ตามสมการของ Ostwald-De Waele (Launay *et al.*, 1986) ดังนี้

$$\eta_{app} = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (23)$$

$$= \tau/\dot{\gamma} \quad (24)$$

เมื่อ	$\eta_{app}$	=	apparent viscosity	(mPa·s)
	$\tau$	=	shear stress	(mPa)
	k	=	consistency index	(mPa·s <sup>n</sup> )
	$\dot{\gamma}$	=	shear rate	(sec <sup>-1</sup> )
	n	=	flow behavior index	

และประมาณค่า yield stress ของ paste ตามวิธีของ Casson (1959) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

### 3.6 การศึกษาลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว

เตรียมเจลสตาร์ชถั่วเขียว โดยใส่สตาร์ชถั่วเขียวในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ช 10.18 กรัมต่อเดซิลิตร กวนให้เข้ากันแล้วนำไปเจลาตินไนซ์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส ใน water bath เป็นเวลา 20 นาที เทตัวอย่างลงใน petri dish ทิ้งไว้ให้เย็น 2 ชั่วโมง แล้วตัดเจลเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร (พื้นที่หน้าตัด 2124.57 ตารางมิลลิเมตร) สูง 10 มิลลิเมตร นำเจลไปทดลอง creep ด้วยเครื่อง Texture analyzer (Stable Micro System, TA-XT2i) ใช้ Probe ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร กดเจลสตาร์ชถั่วเขียวด้วยแรงเค้น 30 N (ความกด 0.014x10<sup>6</sup> Pa) เป็นเวลา 300 วินาที ที่อุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส บันทึกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา นำผลการทดลองมาประเมินหา Rheological Model และค่าสมบัติ viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียวตาม Rheological Model นั้น รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วเขียว

จากการวิเคราะห์พบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่ศึกษาประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน ถั่ว เส้นใย และความชื้นร้อยละ  $0.10 \pm 0.00$ ,  $0.31 \pm 0.01$ ,  $0.03 \pm 0.01$ ,  $0.01 \pm 0.00$  และ  $10.89 \pm 0.04$  โดยน้ำหนัก\* ตามลำดับ จากการคำนวณได้คาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 88.66 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าในส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วยสตาร์ชร้อยละ  $97.98 \pm 0.46$  โดยน้ำหนัก และในส่วนที่เป็นสตาร์ชมีอะมิโลสร้อยละ  $34.49 \pm 0.89$  โดยน้ำหนัก

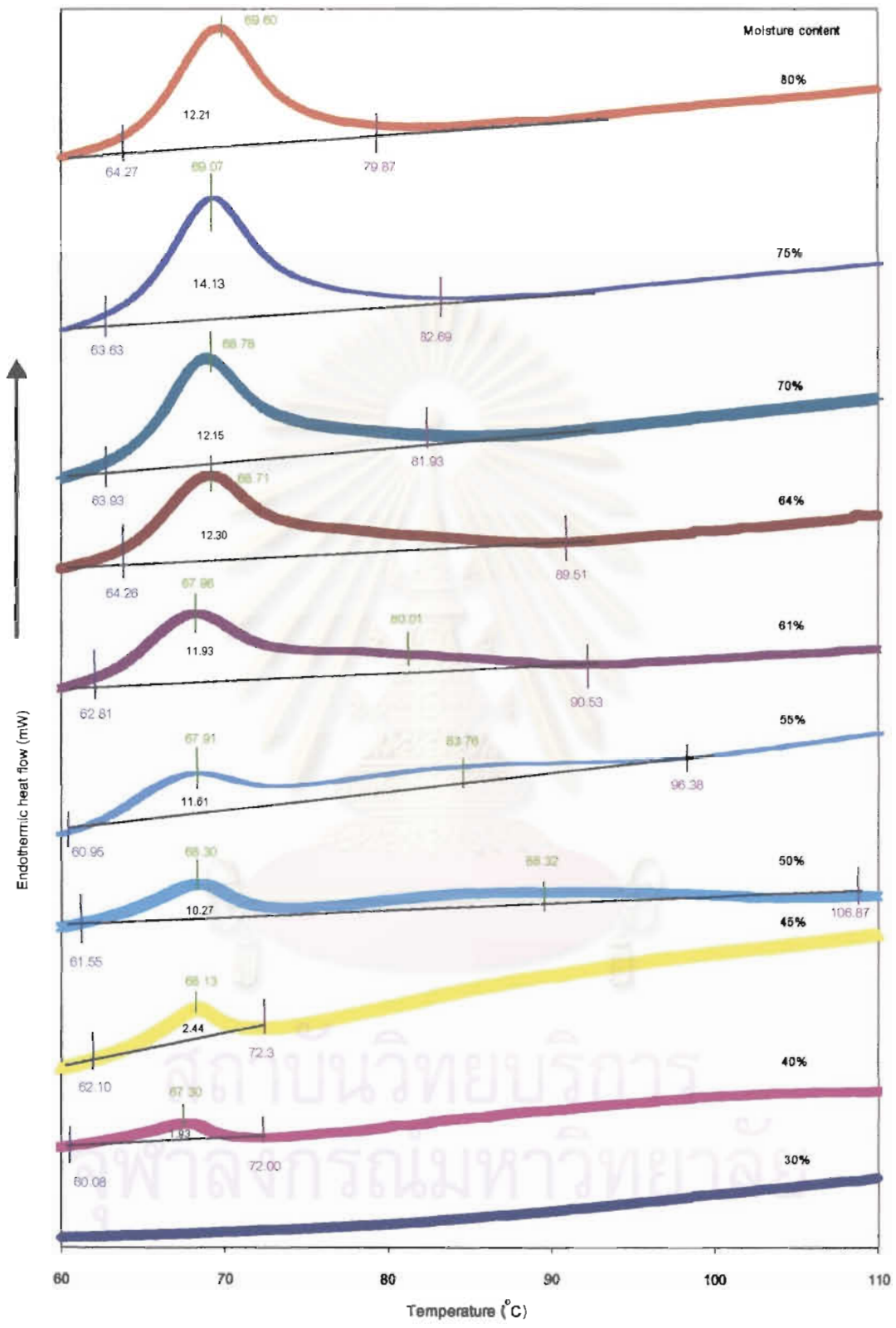
#### 4.2 ผลของความชื้นต่อการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

จากการศึกษาการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวที่ระดับความชื้นในช่วงร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธี Differential scanning calorimetry โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40-120 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า Peak ของการเกิดเจลลิตในเซชันไม่ปรากฏที่ความชื้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แต่ปรากฏในช่วงความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยในช่วงความชื้นร้อยละ 50-61 โดยน้ำหนัก มี 2 peak และในช่วงความชื้นร้อยละ 64-80 โดยน้ำหนัก มี 1 peak (ภาพที่ 4.1) บ่งว่าความชื้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่พอเพียงต่อการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว ในกรณีที่มีการเกิดเจลลิตในเซชันพบว่าอุณหภูมิที่เจลลิตในเซชันเริ่มเกิด (onset temperature,  $T_o$ ) และอุณหภูมิที่  $\Delta H$  สูงสุด (peak temperature,  $T_p$ ) ไม่ขึ้นกับความชื้นและเท่ากับ  $62.62 \pm 1.45$  องศาเซลเซียส และ  $68.42 \pm 0.65$  องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนถึง  $T_o$  ที่ต้องการ สตาร์ชในส่วนที่ดูน้ำไว้พอเพียงก็เกิดเจลลิตในเซชัน ดังในกรณีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากแกรนูลสตาร์ชประกอบด้วยส่วนที่เป็น amorphous และส่วนที่เป็น crystalline ลักษณะโครงสร้างที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าของ amorphous (ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะมิโลสและสายโซ่ยาวกับ

---

\* คำว่าโดยน้ำหนักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หมายถึง โดยน้ำหนักแห้ง





ภาพที่ 4.1 Endothermic Peak ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : | บ่งถึง T<sub>o</sub> = onset temperature, | บ่งถึง T<sub>p</sub> = peak temperature,

| บ่งถึง T<sub>f</sub> = final temperature และค่าตัวเลขภายใต้ peak คือ ΔH

กึ่งก้านของอะมิโลเพคติน) สามารถดูดน้ำและพองตัวได้ง่ายกว่าส่วน crystalline (ซึ่งส่วนใหญ่เป็นบริเวณที่จัดเรียงเป็นเส้นตรงของอะมิโลเพคตินและอะมิโลสที่เป็นเกลียวม้วน) โดยโครงสร้างส่วน amorphous ดูดน้ำและพองตัวได้ เมื่อได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของ

สตาร์ชถูกทำลายบางส่วน ดังนั้นจึงเกิดการเชื่อมพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชและโมเลกุลของน้ำ แทนที่พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ช (Wang, Qu and Chiew, 1994) ส่งผลให้โครงสร้างส่วน crystalline ถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่ายขึ้น ผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความชื้นร้อยละ 40 และ 45 โดยน้ำหนัก peak เจลาติเนชันสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 72.00 และ 72.31 องศาเซลเซียส และค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 1.93 และ 2.44 จูลต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เจลาติเนชันสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 106.87 องศาเซลเซียส และค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 10.27 จูลต่อกรัม โดยมี peak ของเจลาติเนชัน 2 peak แยกกัน บ่งว่าการเกิดเจลาติเนชันแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 3.36 จูลต่อกรัม ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากในช่วงความชื้นร้อยละ 40-45 โดยน้ำหนัก น้ำส่วนใหญ่อยู่ในส่วนของ amorphous ทำให้เกิดเจลาติเนชันเฉพาะในส่วนที่เป็น amorphous และที่ความชื้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีน้ำพอเพียงทำให้เกิดการเจลาติเนชันอย่างสมบูรณ์ของส่วนที่เป็น amorphous และยังมีน้ำพอเพียงให้เกิดเจลาติเนชันในส่วน crystalline ได้ด้วยแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 72 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะภายในผลึกนั้น (Wirakartakusmar, 1981) ดังนั้น peak ที่ 2 จึงเป็นของส่วนที่เป็น crystalline เกิดเจลาติเนชัน (Billaderis *et al.*, 1986) ที่ความชื้นร้อยละ 55 และ 61 โดยน้ำหนัก ปรากฏว่า peak ทั้ง 2 นี้ซ้อนกันและอุณหภูมิที่เจลาติเนชันสิ้นสุด ( $T_f$ ) ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (คือค่า  $T_f$  ลดลงประมาณ 10 องศาเซลเซียสและ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นร้อยละ 50-55 โดยน้ำหนัก และ 55-61 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) ขณะที่ค่า  $\Delta H$  เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 1 การซ้อนกันของ 2 peak นี้ และการที่อุณหภูมิที่สิ้นสุดการเกิดเจลาติเนชันเริ่มลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มความชื้นจะเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนของ crystalline และช่วยในการทำลายโครงสร้าง crystalline (Wirakartakusmar, 1981 and Billaderis, 1998) และเมื่อความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 64 โดยน้ำหนักขึ้นไป เจลาติเนชันเกิดในช่วงอุณหภูมิแคบลง คือ  $T_f$  ลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (Abboud and Hosney, 1984) แต่ค่า  $\Delta H$  คงที่ที่ประมาณ 12.70 จูลต่อกรัม ซึ่งบ่งว่าโครงสร้าง crystalline ถูกทำลายในช่วงความชื้นนี้ และการเกิดเจลาติเนชันของทั้งส่วน amorphous และส่วนที่เคยเป็น crystalline เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนโครงสร้างเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมันถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 120



องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้เครื่องมือมีข้อจำกัดถึงแค่ 120 องศาเซลเซียส จึงสามารถสรุปผลของความสัมพันธ์ต่อการเกิดเจลลิตไนเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวได้ดังนี้

- ความชื้นต่ำกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่เกิดเจลลิตไนเซชัน
- ความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ขึ้นไป เริ่มเกิดเจลลิตไนเซชัน
- ในช่วงความชื้นร้อยละ 50-61 โดยน้ำหนัก ปรากฏ peak ของ Endotherm 2 peak
- ความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 64 โดยน้ำหนัก ขึ้นไป เกิดเจลลิตไนเซชันอย่างสมบูรณ์ และ ค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 12.7 จูลต่อกรัม

ผลของความชื้นต่อค่า  $\Delta H$  พบว่า เมื่อเพิ่มความชื้นจากร้อยละ 30 เป็น 80 โดยน้ำหนัก ค่า  $\Delta H$  ของสตาร์ชถั่วเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับความชื้นสูงโครงสร้าง amorphous สามารถดูดน้ำและพองตัวมากขึ้น ทำให้ส่วน crystalline ซึ่งมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมีการกระจายตัวและมีความเป็นระเบียบลดลง โครงสร้างในส่วนนี้จึงถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่ายขึ้น จึงใช้พลังงานมากในการเปลี่ยนสถานะจากที่มีความเป็นระเบียบให้อยู่ในสถานะที่ไม่มีความเป็นระเบียบสูง ดังนั้นค่า  $\Delta H$  จึงสูงกล่าวคือระดับการเกิดเจลลิตไนเซชัน (degree of gelatinization) เพิ่มขึ้น และที่ระดับความชื้นต่ำทำให้มีน้ำในส่วน crystalline ไม่พอเพียงทำให้การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมีการกระจายตัวน้อย และถูกทำลายด้วยความร้อนได้น้อย ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากที่มีความเป็นระเบียบให้อยู่ในสถานะที่ไม่มีความเป็นระเบียบลดลง ค่า  $\Delta H$  จึงลดลง (Biliaderis et al., 1980) และจากค่า  $\Delta H$  สามารถนำมาวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลิตไนเซชัน (ตารางที่ 4.1) เนื่องจาก  $\Delta H$  และ peak แรกของสตาร์ชที่ความชื้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเท่ากับ 3.36 จูลต่อกรัม และสมมุติได้ว่าเป็น  $\Delta H$  สำหรับการเกิดเจลลิตไนเซชันของส่วนที่เป็น amorphous ในสตาร์ชเกือบทั้งหมด มีส่วนที่เป็น crystalline ที่ถูกทำลายน้อยมาก ดังนั้นปริมาณ amorphous ในสตาร์ชสามารถประมาณได้จากอัตราส่วนของค่านี้กับ  $\Delta H$  ที่ต้องการสำหรับการเกิดเจลลิตไนเซชันอย่างสมบูรณ์ซึ่งเท่ากับ 12.70 จูลต่อกรัม และได้ค่าประมาณของปริมาณ amorphous ในสตาร์ชถั่วเขียวเป็นร้อยละ 26.5 โดยน้ำหนัก

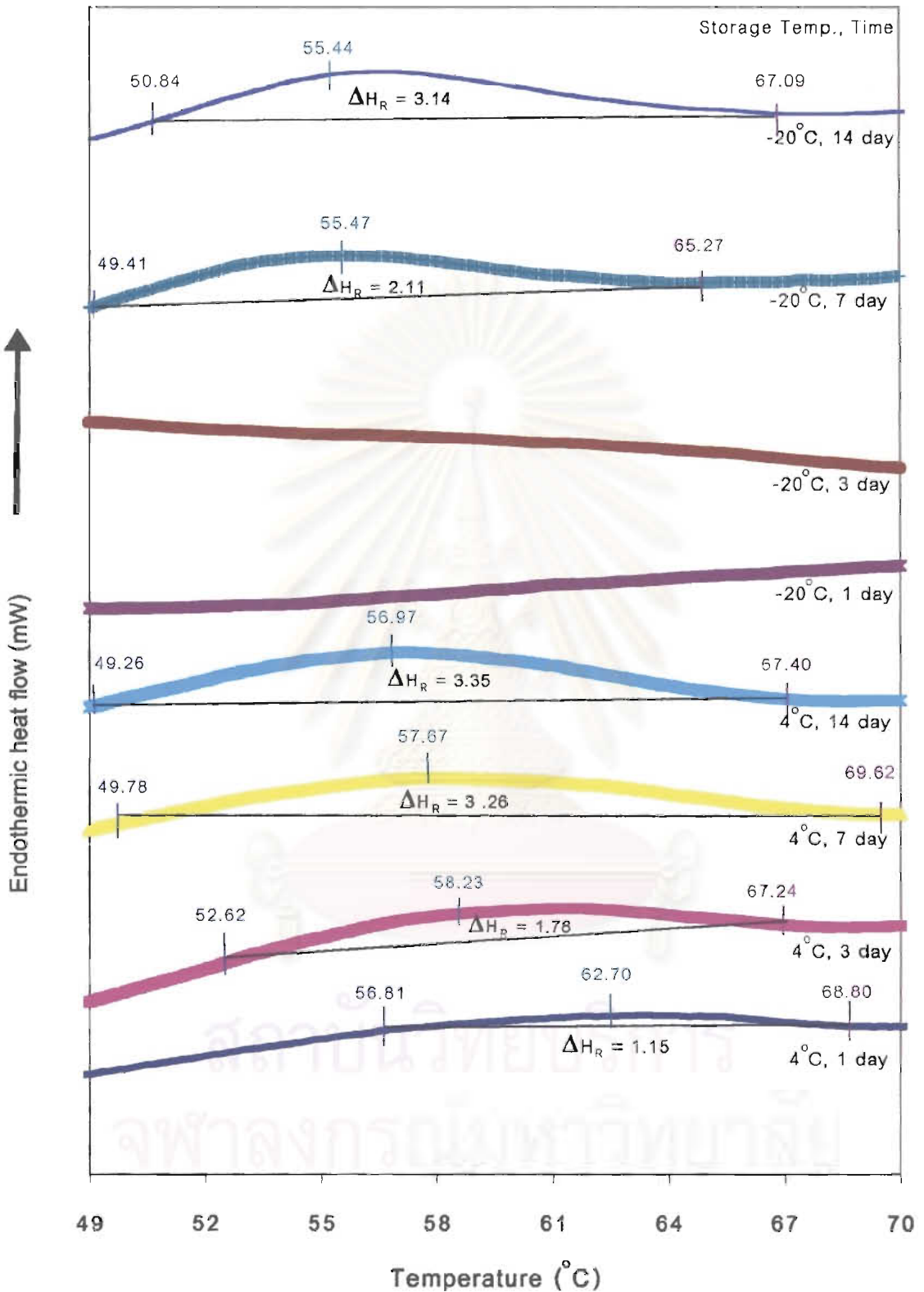
ตารางที่ 4.1 ระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชถั่วเขียวในช่วงความชื้นร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก

ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนัก)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	ระดับการเกิดเจลลาติโนเซชัน
30	0	0
40	1.93	15.20
45	2.44	19.20
50	10.27	80.90
55	11.62	91.50
61	11.93	93.90
64-80	12.70	100.00

#### 4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาการเก็บสตาร์ชถั่วเขียวที่เจลลาติโนเซชันแล้วต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ช

จากการศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชถั่วเขียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธี Differential scanning calorimetry โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจาก 40-110 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที การเกิดรีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชเกิดจากการที่โมเลกุลของสตาร์ช (ซึ่งเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายระหว่างเจลลาติโนเซชัน) จัดเรียงตัวกันใหม่ให้เป็นระเบียบเพิ่มขึ้นเพื่อเข้าสู่โครงสร้างที่เป็นผลึก (Atwell *et al.*, 1988) ดังนั้นเมื่อนำ

สตาร์ชที่เกิดเจลลาติโนเซชันแล้วไปให้ความร้อนอีกภายหลังการเก็บ ถ้าเกิด peak ของ regelatinization ก็บ่งบอกถึงการเกิดรีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชระหว่างเก็บ และ  $\Delta H_r$  ของ peak นี้แสดงปริมาณการเกิดรีโทรเกรดชัน (ภาพที่ 4.2) แสดงว่าการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส เจลสตาร์ชถั่วเขียวเกิดรีโทรเกรดชันทันทีเมื่อเก็บไว้ 1 วัน และเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้นในช่วง 7 วัน เมื่อเก็บต่ออีก 7 วัน รีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชถั่วเขียวไม่เพิ่มขึ้น ส่วนการเก็บที่ -20 องศาเซลเซียส ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชถั่วเขียวให้เกิดภายหลังการเก็บมากกว่า 3 วัน (คือเริ่มเกิดรีโทรเกรดชันในช่วงการเก็บ 4-7 วัน) อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บไว้ 14 วัน การเกิดรีโทรเกรดชันของเจลสตาร์ชก็เท่ากับการเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน เช่น



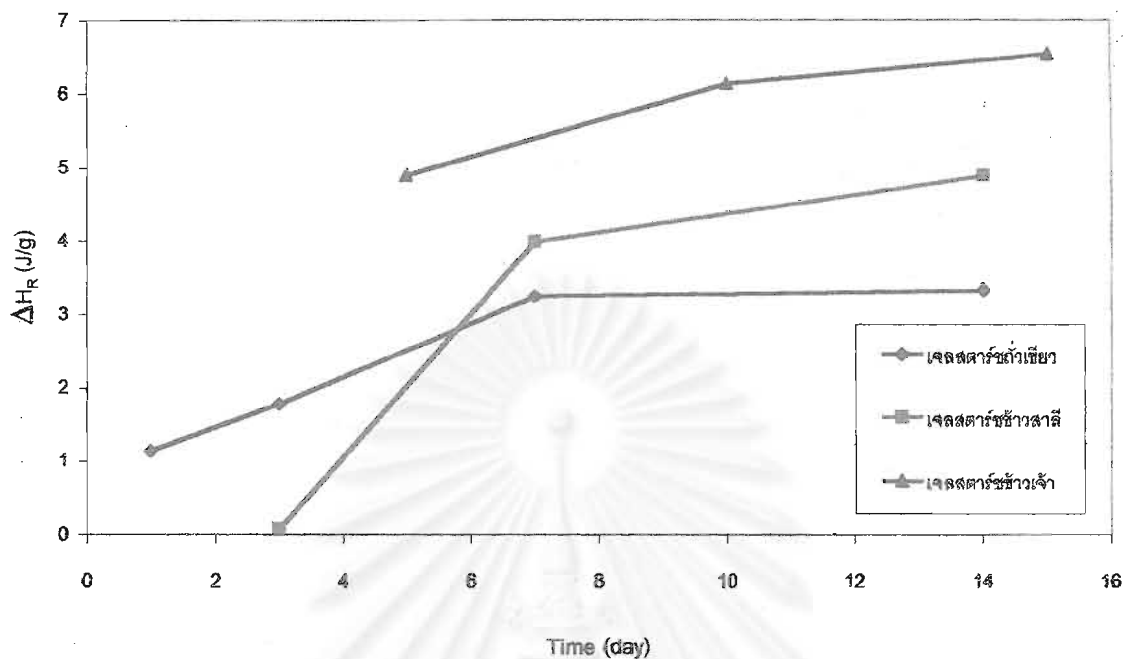
ภาพที่ 4.2 Endothermic Peak ของเจลสตาร์กั่วเขียวหลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ -20 องศาเซลเซียส นาน 1, 3, 7 และ 14 วัน

หมายเหตุ : | บ่งถึง  $T_o$  = onset temperature, | บ่งถึง  $T_p$  = peak temperature,

| บ่งถึง  $T_f$  = final temperature และค่า  $\Delta H_R$  = enthalpy of regelatinization

กัน เนื่องจากการเรียงตัวของสายโมเลกุลของสตาร์ช ต้องการการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลให้มาเรียงตัวกันเป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส การเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลช้ากว่าที่ 4 องศาเซลเซียส ประกอบกับที่ -20 องศาเซลเซียส น้ำเจลสตาร์ชถั่วเขียวบางส่วนเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่และการเรียงตัวของสายโมเลกุลสตาร์ชทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันน้อยกว่าการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียสเมื่อเวลาการเก็บน้อยกว่า 14 วัน (Zeleznaк and Hoseneу, 1987) แต่เมื่อเวลาการเก็บนาน 14 วัน อุณหภูมิที่เก็บก็ไม่มีผลต่อการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชัน นอกจากนี้การทดลองยังพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิด regelatinize ของส่วนที่เกิดรีโทรเกรเดชันนี้ต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชันครั้งแรก แสดงว่าการเรียงตัวและโครงสร้างของสายโมเลกุลของสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชัน ไม่หนาแน่นและแข็งแรงเท่าการเรียงตัวของโครงสร้างเดิมของแกรนูล (White and Abbas, 1989; Yuan, Thompson and Boyer, 1993) ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวเกิดรีโทรเกรเดชันตั้งแต่เก็บไว้นาน 1 วัน และมีค่า  $\Delta H_R$  เท่ากับ 1.15 จูลต่อกรัม เมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้นค่า  $\Delta H_R$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงขึ้นหรือมีปริมาณที่โมเลกุลของสตาร์ชจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น (Hoover *et al.*, 1997)

ภาพที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ  $\Delta H_R$  ของการเกิดของรีโทรเกรเดชันที่ 4 องศาเซลเซียส ในช่วงการเก็บ 14 วัน ของเจลสตาร์ชถั่วเขียวที่มีความชื้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้กับเจลสตาร์ชข้าวสาลีที่มีความชื้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก (Jang and Pyun, 1997) และเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีความชื้นร้อยละ 67 โดยน้ำหนัก (Chatakanonda, Qaravinit and Chinachoti, 2000) พบว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวเกิดรีโทรเกรเดชันทันทีเมื่อเก็บ 1 วัน และค่า  $\Delta H_R$  เพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วในช่วงการเก็บ 1-7 วัน และเริ่มคงที่หลังการเก็บ 7 จนถึง 14 วัน ส่วนเจลสตาร์ชข้าวสาลีเริ่มเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บ 3 วัน และ  $\Delta H_R$  เพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วกว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวและมีค่าสูงกว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวเมื่อเก็บเป็นเวลา 7 วันเท่ากัน ขณะที่เจลสตาร์ชข้าวเจ้าเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าเจลสตาร์ชถั่วเขียวและเจลสตาร์ชข้าวสาลี ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส ไ้เวลานานกว่า 6 วัน การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชถั่วเขียว < เจลสตาร์ชข้าวสาลี < เจลสตาร์ชข้าวเจ้า



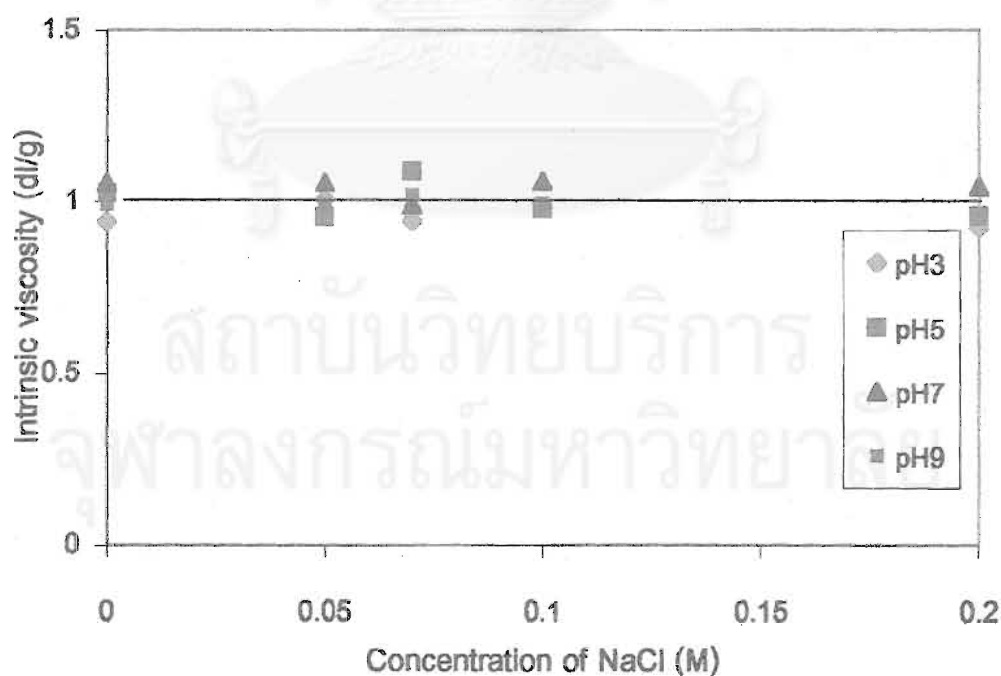
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta H_R$  กับเวลาที่เก็บเจลสตาร์ที่ 4 องศาเซลเซียส

- ◆ เจลสตาร์แก้วเขียว ที่ความชื้นตั้งต้น 70%(w/w)
- เจลสตาร์ข้าวสาลี ที่ความชื้นตั้งต้น 70%(w/w) ข้อมูลจาก Jang และ Pyun (1997)
- ▲ เจลสตาร์ข้าวเจ้า ที่ความชื้นตั้งต้น 67%(w/w) ข้อมูลจาก Chaitakanonda และคณะ (2000)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือต่อขนาดแกรนูลที่พองตัวของสตาร์ชถั่วเขียว

จากการทดลองวิเคราะห์ค่า intrinsic viscosity ของแกรนูลสตาร์ชถั่วเขียวในสารละลายบัฟเฟอร์ Citric acid-di-sodium hydrogen phosphate pH 3 และ 5 ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และในสารละลายบัฟเฟอร์ Sodium carbonate-sodium bicarbonate pH 9 ที่ความเข้มข้นของ NaCl ในช่วง 0-0.2 โมลาร์ (ภาพที่ 4.4) พบว่าค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชถั่วเขียวในตัวทำละลายน้ำมีค่า  $1.00 \pm 0.04$  เดซิลิตรต่อกรัม โดยไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของ pH (ในช่วง 3-9) และความเข้มข้นของเกลือ (ในช่วง 0-0.2 โมลาร์ NaCl) แสดงว่าขนาดแกรนูลของสตาร์ชถั่วเขียวที่พองตัว (อุ่มตัวทำละลาย) มีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตาม pH และความเข้มข้นของเกลือ ช่วงค่า intrinsic viscosity สามารถคำนวณค่าประมาณของ overlap concentration หรือความเข้มข้นต่ำสุดที่เริ่มเกิด interaction ระหว่างแกรนูลของสตาร์ช ( $C_{oh}$ ) ได้เท่ากับ 1 กรัมต่อเดซิลิตรของสารแขวนลอย และที่ความเข้มข้นของสตาร์ชสูงกว่านี้ความสัมพันธ์ระหว่าง relative viscosity (อัตราส่วนระหว่างความหนืดของสารแขวนลอยกับความหนืดของตัวทำละลาย) ไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจาก interaction ระหว่างแกรนูลของสตาร์ชมีผลต่อค่า relative viscosity (Morris, 1995)



ภาพที่ 4.4 ผลของ pH และความเข้มข้นของเกลือ NaCl ต่อค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชถั่วเขียวสุกที่ 30 องศาเซลเซียส



#### 4.5 ผลของความเข้มข้นของสตาร์ชต่อลักษณะการไหลของสตาร์ชถั่วเขียว

จากการทดลองวัดค่า apparent viscosity ของ paste ถั่วเขียวที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ช 5 ระดับคือ 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ ด้วย rotational viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.6-12 นาที่<sup>-1</sup> ที่อุณหภูมิ 30±0.1 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะการไหลของ paste ถั่วเขียว (ภาพที่ 4.5) เป็นไปตาม power law (สมการของ Ostwald-De Waele) ซึ่งมีค่า flow behavior index ต่ำกว่า 1 เป็นลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic ดังนี้

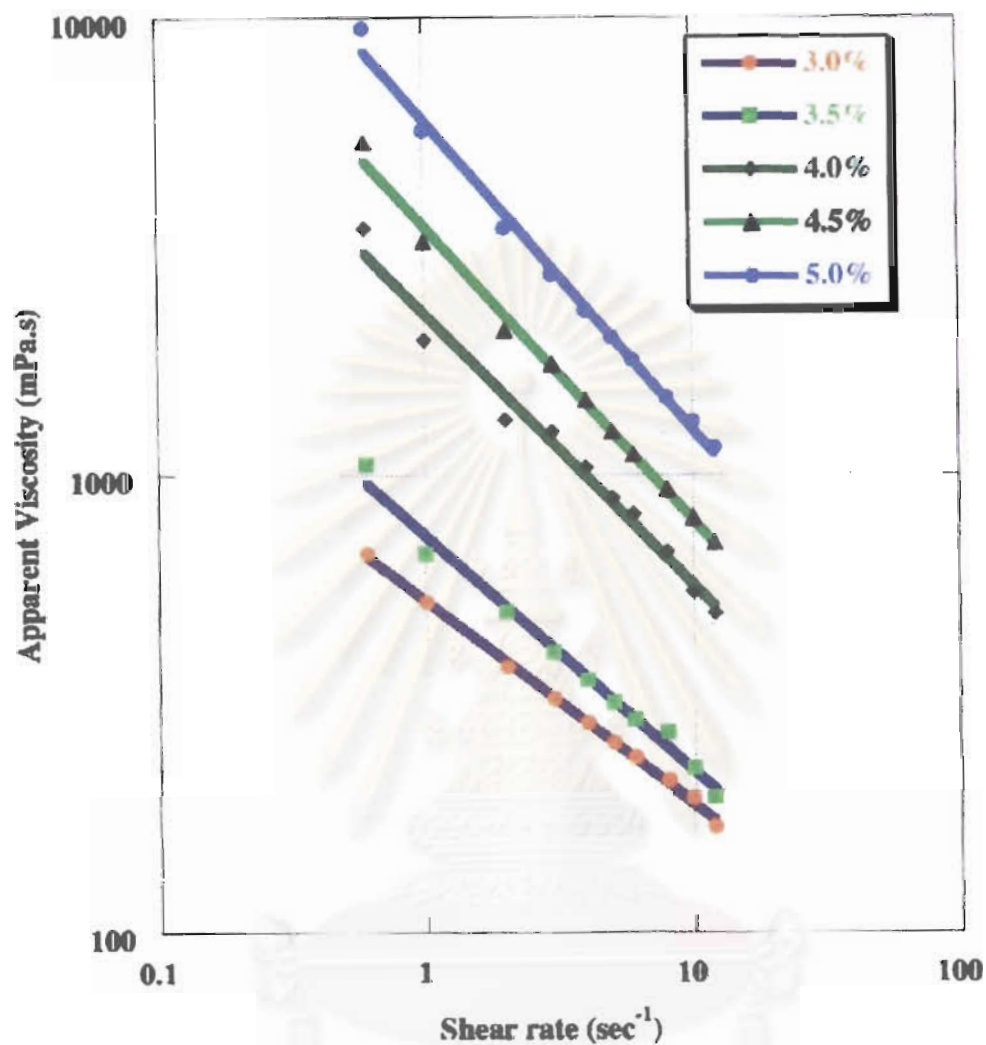
$$\eta_{app} = 531.30 \gamma^{-0.44} \quad \text{สำหรับความเข้มข้น 3.0 g/dl}_{solv} \quad (25)$$

$$= 737.76 \gamma^{-0.52} \quad \text{สำหรับความเข้มข้น 3.5 g/dl}_{solv} \quad (26)$$

$$= 2259.00 \gamma^{-0.59} \quad \text{สำหรับความเข้มข้น 4.0 g/dl}_{solv} \quad (27)$$

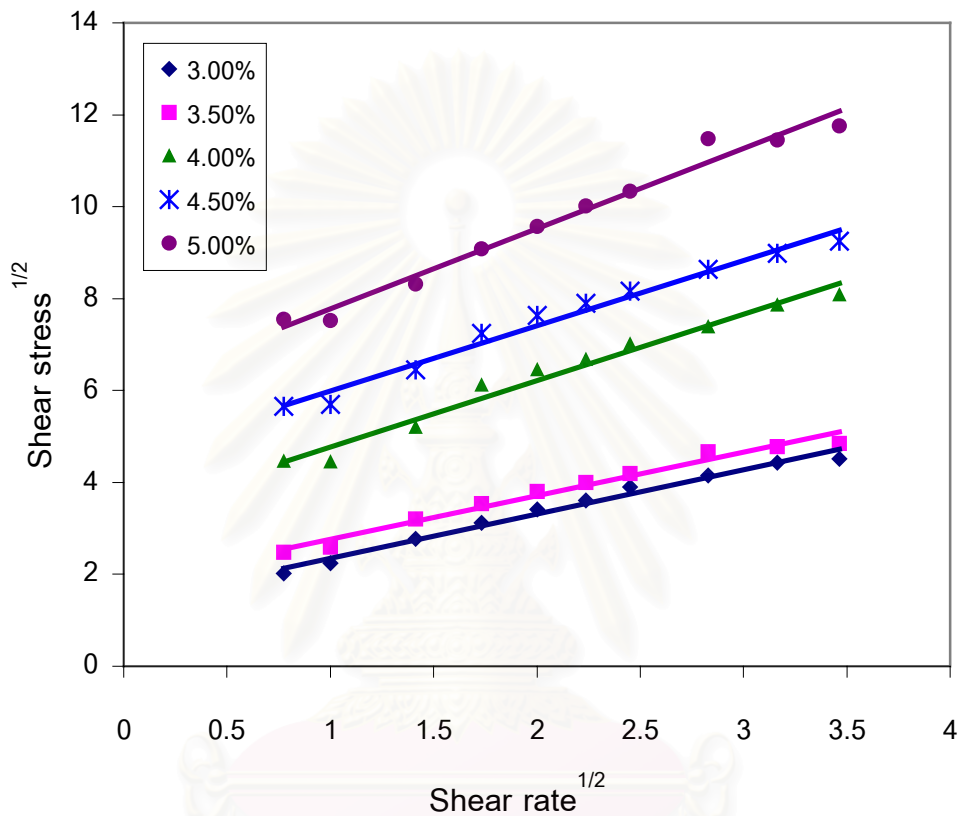
$$= 3504.30 \gamma^{-0.64} \quad \text{สำหรับความเข้มข้น 4.5 g/dl}_{solv} \quad (28)$$

$$= 5991.68 \gamma^{-0.68} \quad \text{สำหรับความเข้มข้น 5.0 g/dl}_{solv} \quad (29)$$



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ Apparent viscosity ของ paste ถั่วเขียว ที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5 % ในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ วัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

และเมื่อประมาณค่า yield stress (ภาพที่ 4.6) ของ paste ถั่วเขียวที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.6-12 นาที่<sup>-1</sup> พบว่า paste ถั่วเขียวในช่วงความเข้มข้นนี้มีค่า yield stress



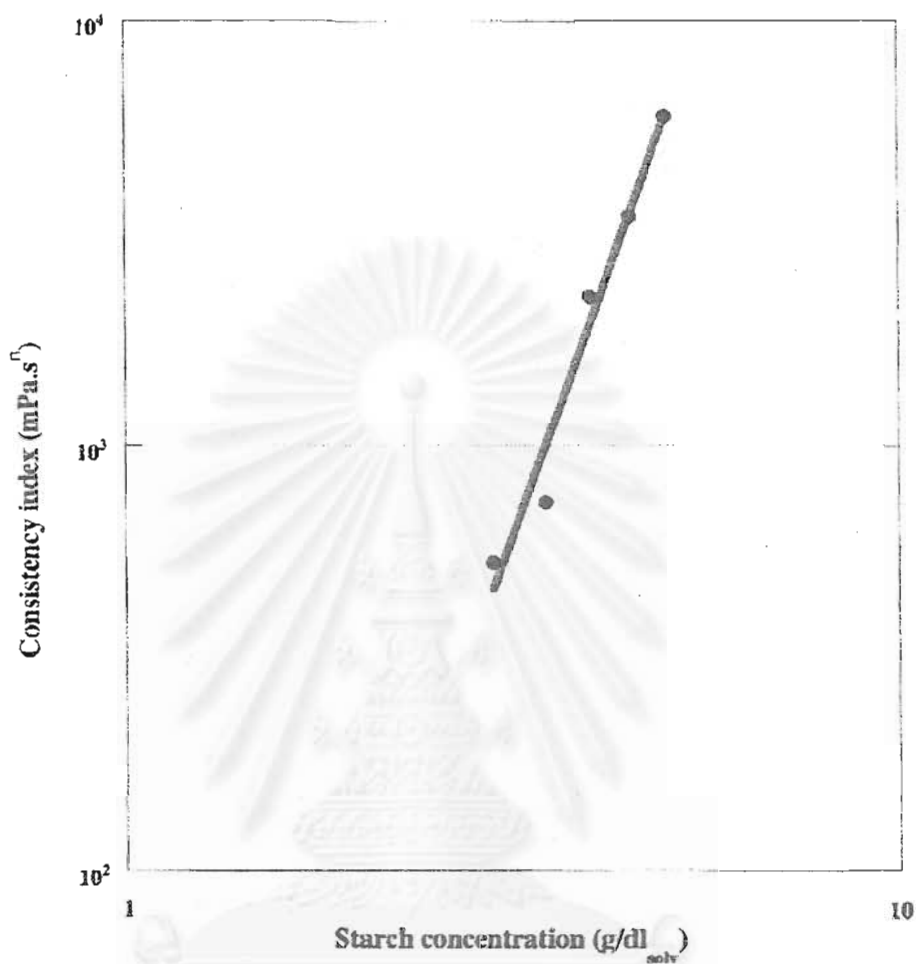
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ Shear stress ของ paste ถั่วเขียวที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5 % ในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ วัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังพบว่า consistency index, flow behavior index และ yield stress แปรตามความเข้มข้นของสตาร์ช (ภาพที่ 4.7-4.9) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

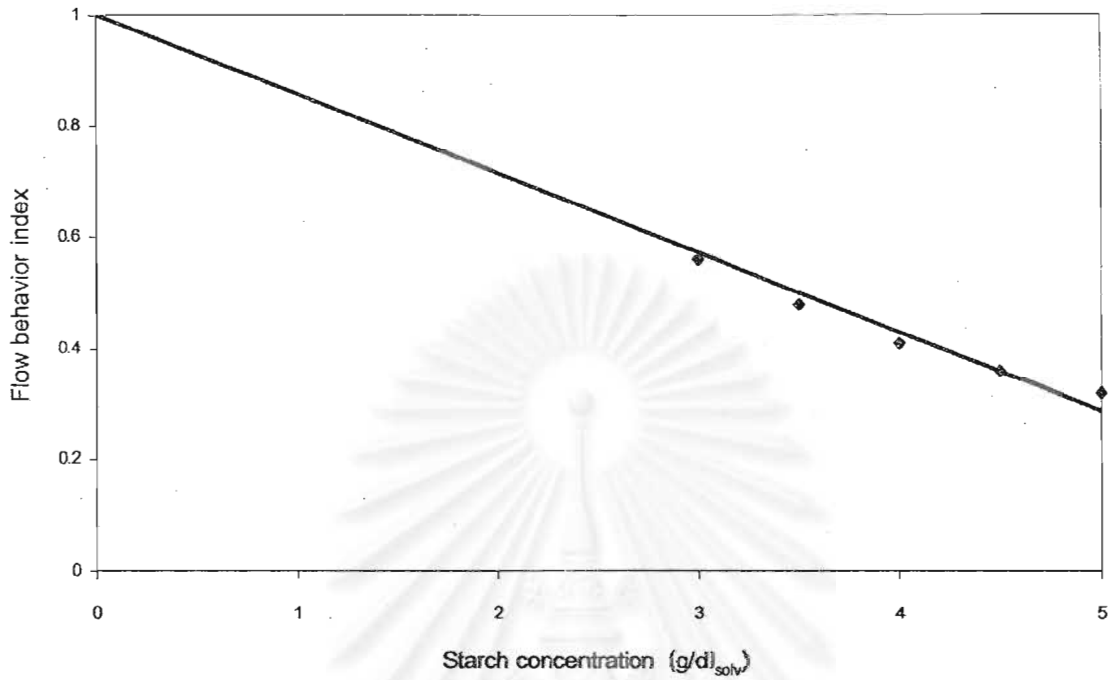
$$k = 1.87c^{5.01} \quad (30)$$

$$n = 1 - 0.14c \quad (31)$$

$$\tau_0 = 0.0021c^{6.09} \quad (32)$$

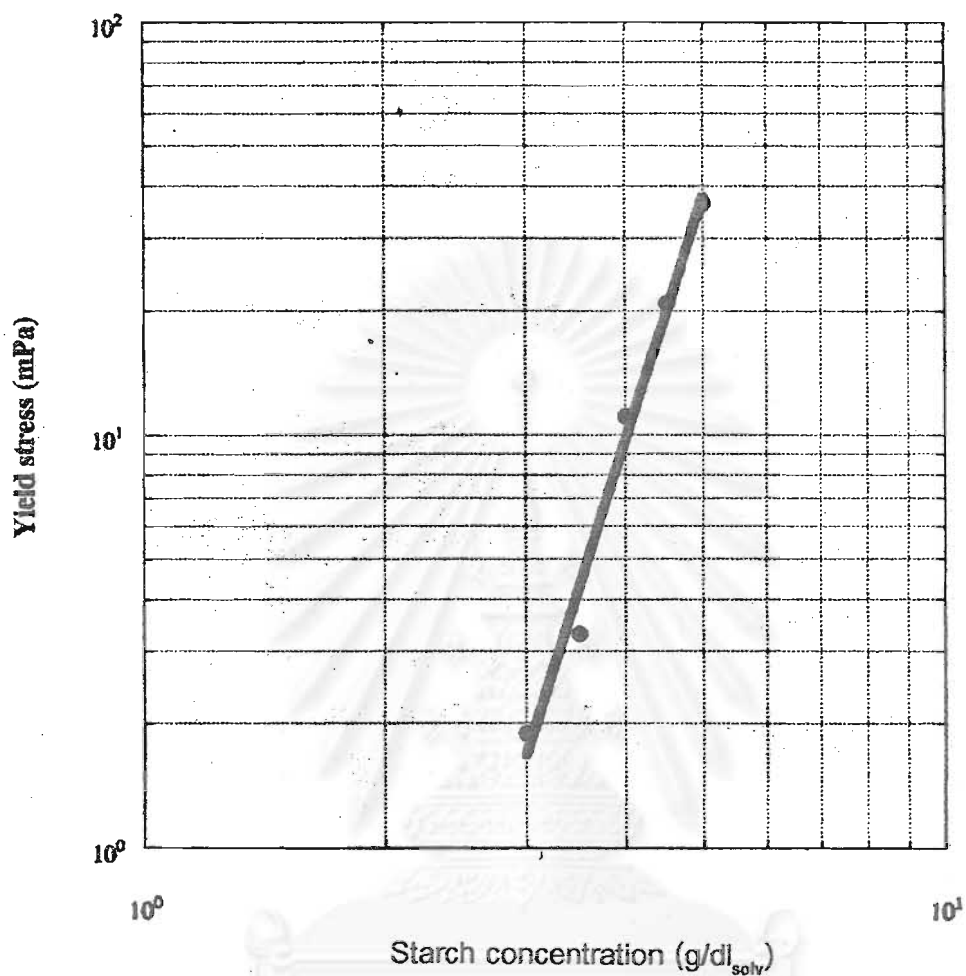


ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Consistency index กับความเข้มข้นของสตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส  
 หมายเหตุ : n คือ ดัชนีที่บ่งถึงลักษณะการไหล  
 solv คือ solvent



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Flow behavior index กับความเข้มข้นของสตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส  
หมายเหตุ : solv คือ solvent

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

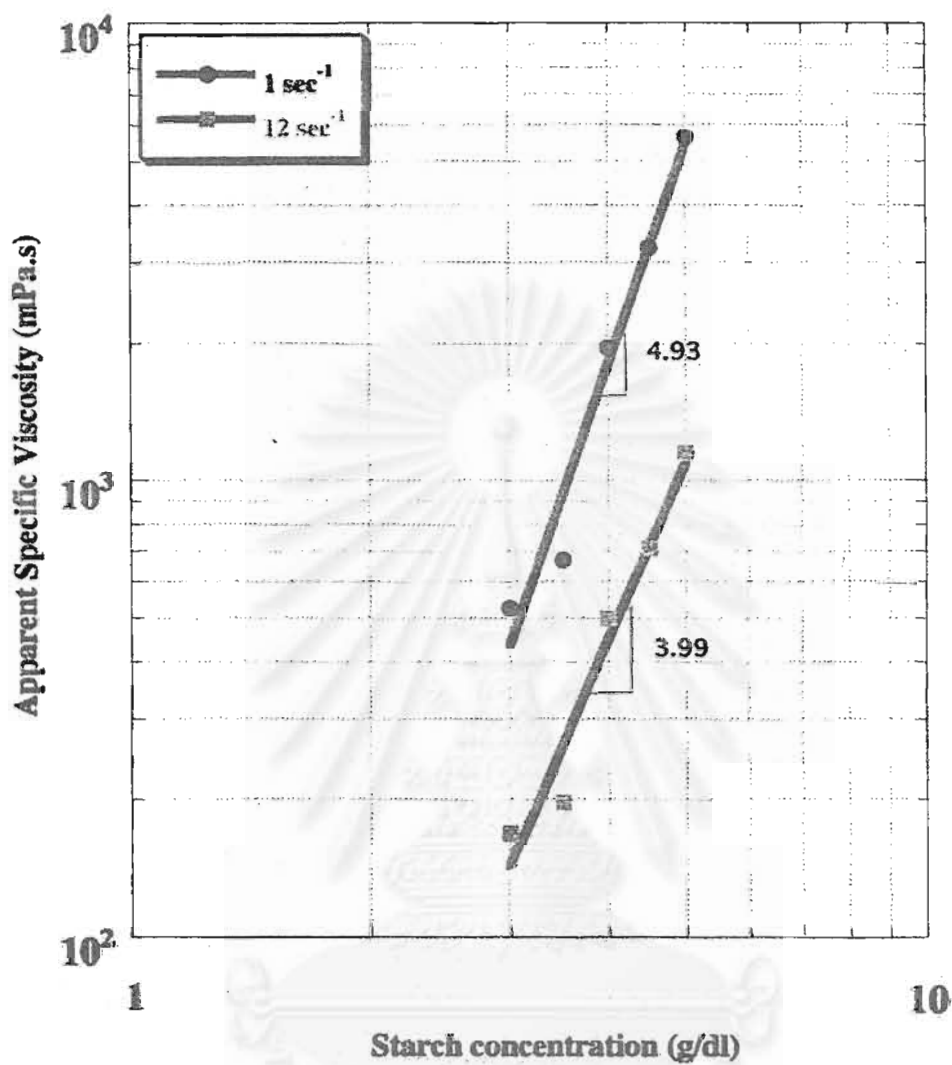


ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield stress กับความเข้มข้นของสตาร์ชใน paste ถั่วเขียว ที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส  
หมายเหตุ : solv คือ solvent

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ช่วงความเข้มข้นที่ศึกษานี้ (ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ชในช่วง 3-5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย) มากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่า ของ overlap concentration ที่ประมาณได้จากค่า intrinsic viscosity ที่วิเคราะห์ได้ (1 กรัมต่อเดซิลิตรของสารแขวนลอยถั่วเขียวสุก  $\approx$  1 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย เนื่องจากค่า density ของสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกที่ความเข้มข้นนี้กับของตัวทำละลายมีความแตกต่างกันน้อยมากและค่า density ของตัวทำละลาย  $\approx$  1 กรัมต่อมิลลิลิตรของสารละลาย) ดังนั้นลักษณะการไหลของ paste ถั่วเขียวนี้จึงถูกควบคุมด้วย granule-granule interaction (Carriere, 1998) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดค่า yield stress ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อนึ่งเนื่องจากค่า yield stress นี้ไม่ได้ประมาณจากอัตราเฉือนที่ใกล้ 0 (คือในช่วง  $\leq 10^{-3}$  นาที่<sup>-1</sup>) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประมาณค่า yield stress ที่อัตราเฉือนในช่วง 0.6-12 นาที่<sup>-1</sup> ดังนั้นค่า yield stress ที่ประมาณนี้จึงมีความคลาดเคลื่อน การเพิ่มอัตราเฉือนมีผลทำให้ granule-granule interaction นี้ลดลง ดังที่ดัชนีปริมาณ granule-granule interaction [ซึ่งคำนวณจากค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง apparent specific viscosity คือ relative viscosity - 1 กับความเข้มข้นของสตาร์ช ดังแสดงในภาพที่ 4.10 (Doublier, 1981)] พบว่าการเพิ่มอัตราเฉือน 11 นาที่<sup>-1</sup> (จาก 1 นาที่<sup>-1</sup> - 12 นาที่<sup>-1</sup>) บ่งว่า granule-granule interaction ลดลงร้อยละ 19 การที่ค่า flow behavior index ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น บ่งว่าการเพิ่มอัตราเฉือนมีผลทำให้การแตกของ granule-granule interaction สูงขึ้นเมื่อปริมาณ granule-granule interaction สูงขึ้น



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent specific viscosity กับความเข้มข้นของสตาร์ชใน paste ข้าวเหนียวที่ pH 7 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส

ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษานี้ค่า specific viscosity ที่อัตราเฉือนใกล้ 0 ขึ้นอยู่กับค่า overlap parameter คือผลคูณของความเข้มข้นของสตาร์ชกับค่า intrinsic viscosity ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_{\text{spo}}$  กับ  $c' [\eta]$  สามารถอธิบายได้ด้วย

$$\eta_{\text{spo}} \propto c' [\eta]^\beta \quad (33)$$

เมื่อ  $\eta_{\text{spo}}$  = specific viscosity ที่อัตราเฉือนใกล้ 0

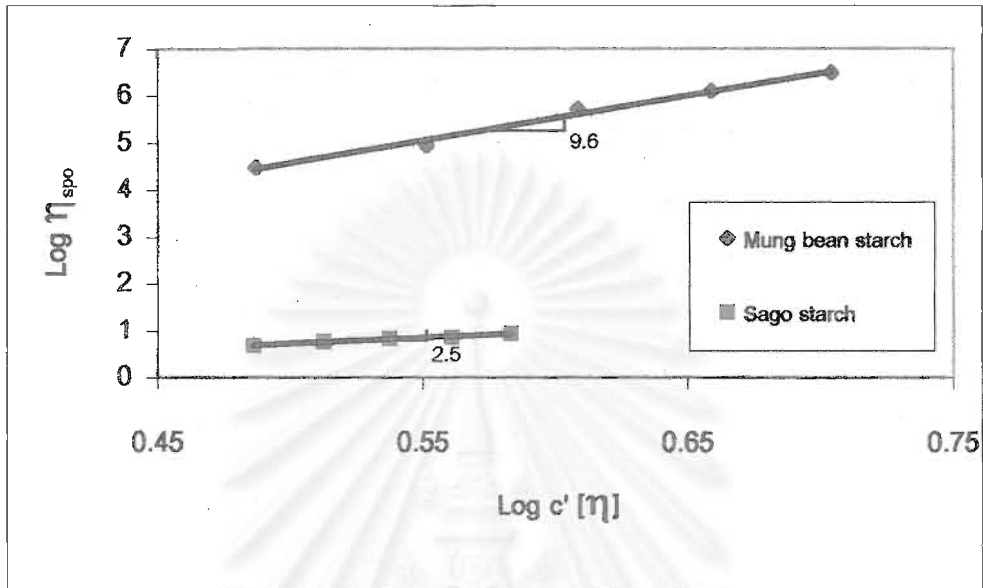
$c'$  = ความเข้มข้นของสตาร์ช (g/dl<sub>solution</sub>)

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

$\beta$  = ค่าคงที่สำหรับ granule-granule interaction

$c' [\eta]$  = overlap parameter

$\beta$  คือค่าที่ใช้บ่งบอกความแข็งแรงของ granule-granule interaction หรือ polymer-polymer interaction (Rao, 1999) โดยถ้าวัดค่า  $\beta$  นี้สูงแสดงว่า interaction ดังกล่าวสูง การวิจัยนี้วิเคราะห์หาค่า  $\beta$  ของสตาร์ชถั่วเขียว พบว่า มีค่าเท่ากับ 9.6 (ภาพที่ 4.11) นอกจากนั้นยังได้นำข้อมูลของสตาร์ช sago (Islam, Mohd and Noor, 2001) มาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พบว่า  $\beta$  มีค่าเท่ากับ 2.5 ดังนั้น granule-granule interaction ของสตาร์ชถั่วเขียวจึงสูงกว่าของสตาร์ช sago มาก แต่เนื่องจากค่า  $\beta$  ของสตาร์ชถั่วเขียวได้วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ส่วนค่า  $\beta$  ของสตาร์ช sago ได้วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จึงอาจเป็นผลให้ค่า  $\beta$  ของสตาร์ชถั่วเขียวสูงกว่าสตาร์ช sago เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ granule-granule interaction แยกได้ ส่วนค่า  $\beta$  นี้สำหรับ polysaccharide อื่น เช่น Locust Bean Gum และ High-Methoxyl Pectin ที่วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีค่าประมาณ 4 (Rao, 1999)



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log } c' [\eta]$  กับ  $\text{Log } \eta_{\text{spo}}$  ของสตาร์ช

- ◆ สตาร์ชถั่วเขียวสุกในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ วัดที่ 30 องศาเซลเซียส
- สตาร์ช sago สุกในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.17 โมลาร์ วัดที่ 60 องศาเซลเซียส

โดย ● ค่า  $\eta_{\text{spo}}$  ของสตาร์ชถั่วเขียวสุก คำนวณจากค่า relative viscosity ที่อัตราเฉือน  $0.0001 \text{ นาทी}^{-1}$  จากสมการที่ 25-29

- ค่า  $\eta_{\text{spo}}$  และ ของ  $c' [\eta]$  ของ สตาร์ช sago สุก คำนวณจากข้อมูลของ Islam และคณะ (2001)

#### 4.6 ลักษณะทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว

เมื่อกดเจลสตาร์ชถั่วเขียว (ความเข้มข้นของสตาร์ช 10.18 กรัมต่อเดซิลิตร) ด้วยแรงเค้นคงที่ 30 N (เท่ากับความกด  $0.014 \times 10^6$  Pa โดยเจลสตาร์ชถั่วเขียวมีพื้นที่  $2124.57 \text{ mm}^2$ ) นาน 300 วินาที ผลความสัมพันธ์ของ respond strain กับเวลา (ภาพที่ 4.12) พบว่าเมื่อมีแรงเค้น เจลที่ถูกกดแสดงพฤติกรรมแบบ Hookian spring สำหรับ ideal elastic คือ บางส่วนของเจลเกิดการเปลี่ยนรูปทันทีที่เวลา 0 วินาที หลังจากนั้นการเปลี่ยนรูปของเจลเป็นฟังก์ชันของเวลา เนื่องจากการยืดหยุ่นแบบ retard elastic พร้อมกับการไหลแบบ Newtonian เมื่อนำแรงเค้นที่กระทำออก ส่วนยืดหยุ่น ideal elastic คืนตัวกลับทันที หลังจากนั้นการคืนตัวกลับจะเป็นฟังก์ชันของเวลาของส่วนที่เป็น retard elastic จนส่วนนี้กลับคืนตัวจนหมด (คิดเป็นร้อยละ 88 ของการเปลี่ยนรูปทั้งหมด) และคงเหลือส่วนที่เปลี่ยนรูปถาวรของส่วนที่เป็นของไหลแบบ Newtonian (คิดเป็นร้อยละ 12 ของการเปลี่ยนรูปทั้งหมด)

สมบัติทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางวิทยาการกระแสหรือวิทยาการไหล (Rheological Model) ซึ่งมีองค์ประกอบขั้นต่ำ 4 ตัวด้วยกันที่เรียกว่า Four Element Model หรือ Berger Model ดังแสดงในภาพที่ 4.13 จากการวิเคราะห์หาค่าของ  $E_E$ ,  $E_R$ ,  $\eta_R$ ,  $\eta_N$  และ  $\tau_{ret}$  ของ retard elastic (ดังรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค) จากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง respond strain กับเวลา จากภาพที่ 4.13 พบว่าค่าเหล่านี้เท่ากับ  $1.6 \times 10^5$  Pa,  $5 \times 10^4$  Pa,  $3.9 \times 10^3$  Pa·s,  $8.4 \times 10^7$  Pa·s และ 7.81 sec ตามลำดับ และความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\text{Creep respond : } \epsilon(t) = \frac{\sigma}{1.6 \times 10^5} + \frac{\sigma}{5 \times 10^4} (1 - e^{-t/7.84}) + \frac{\sigma t}{8.4 \times 10^7} \quad (34)$$

$$\text{Creep recovery : } \epsilon'(t') = \left[ \left( \frac{\sigma}{5 \times 10^4} (1 - e^{-t/7.84}) \right) - \frac{\sigma t}{8.4 \times 10^7} \right] e^{-(t'/7.48)} + \frac{\sigma t}{8.4 \times 10^7} \quad (35)$$

เมื่อ  $\epsilon(t)$  = strain ของ Creep respond

$\epsilon'(t')$  = strain ของ Creep recovery

$\sigma$  = แรงเค้น (N)

t = เวลาที่กด (sec)

t' = เวลาหลังจากปล่อยแรงเค้น (sec)

$\tau_{ret}$  = retardation time (sec)

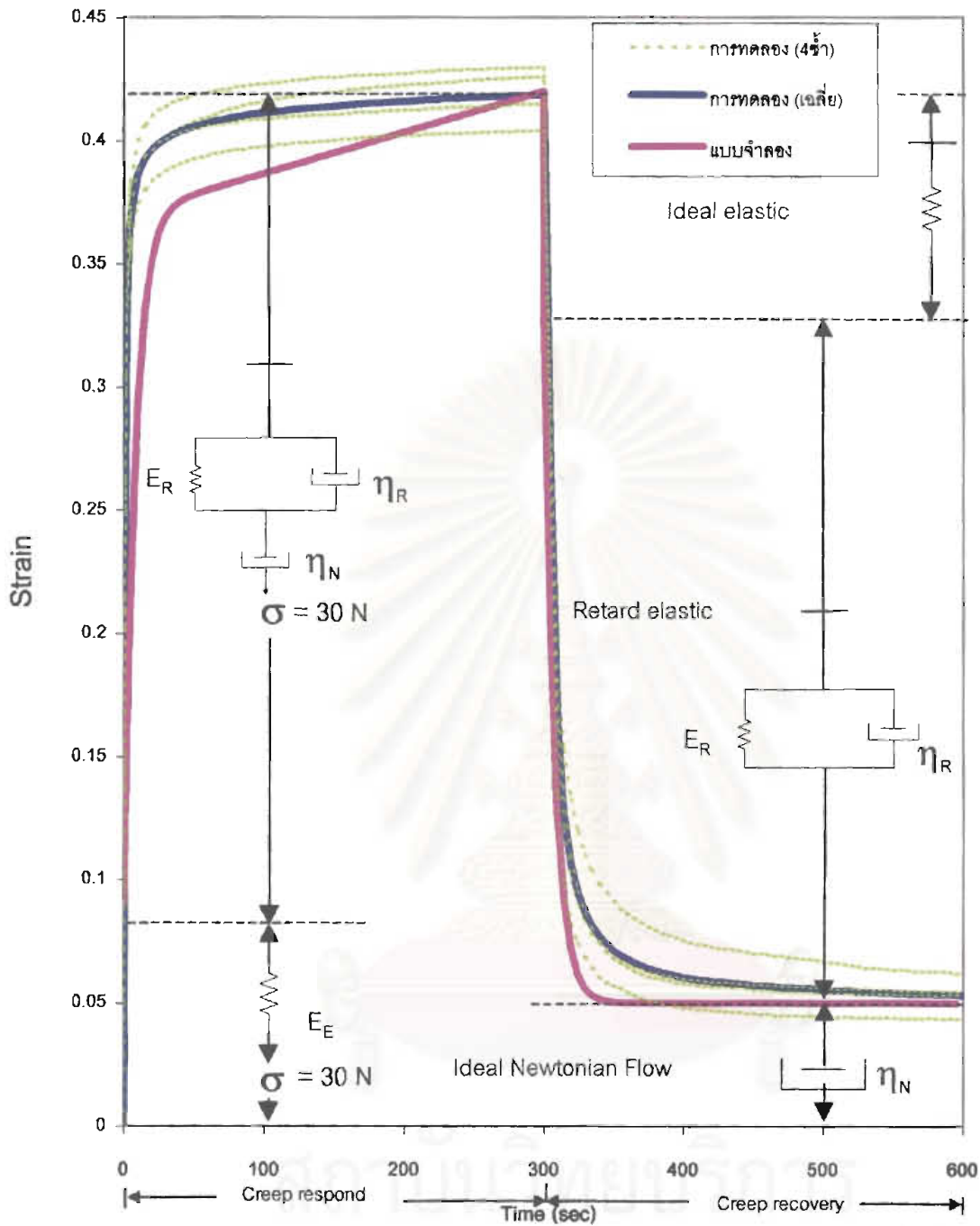
T = เวลาทั้งหมดที่กดเจล (sec)

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง respond strain และเวลาที่ประเมินจากแบบจำลองนี้ เปรียบเทียบกับค่าจากผลการทดลองดังในภาพที่ 4.12 แสดงว่า Berger model ก็สามารถอธิบายและบ่งลักษณะทาง viscoelastic เบื้องต้นของเจลสตาร์ชถั่วเขียวได้ แบบจำลองและค่าสมบัติต่างๆที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้ในการประเมินเบื้องต้นของผลของแรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชถั่วเขียว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา (ผลจากการทดลอง creep) ของเจลสตาร์ซีดีวีเอซีที่มีความเข้มข้นของสตาร์ 10.18 g/dl ในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ เมื่อได้รับแรงเค้น 30 N นาน 300 sec ที่อุณหภูมิ 27 °C

(เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและจากแบบจำลอง)

เมื่อ E = Elasticity (Pa)

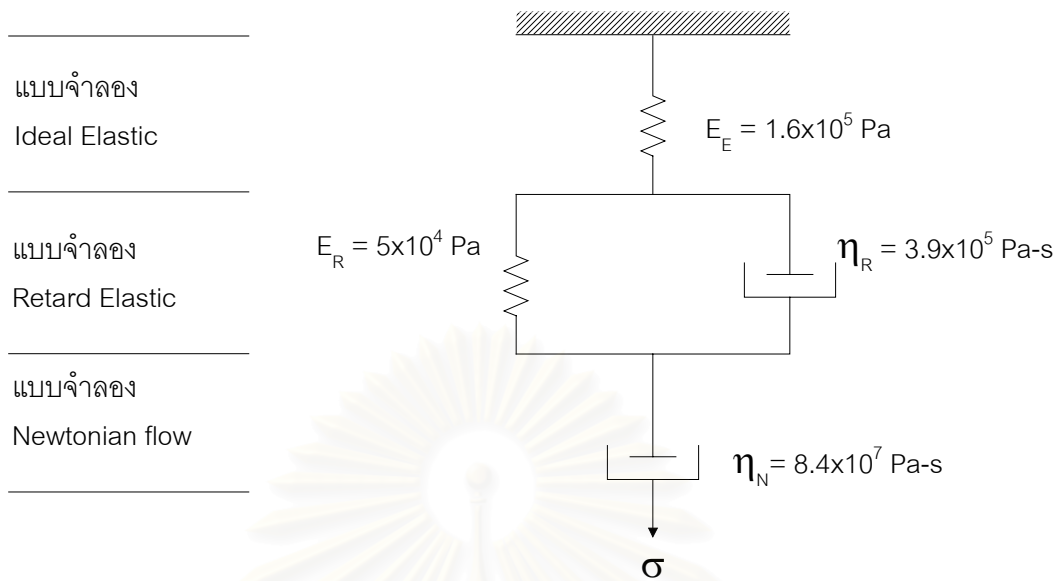
$\eta$  = Viscosity (Pa·s)

$\sigma$  = แรงเค้น (N)

คำห้อย E หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น ideal elastic

R หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น retard elastic

N หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น ideal Newtonian fluid



**ภาพที่ 4.13** แบบจำลอง 4 องค์ประกอบของเจลสตาร์ชด้วเขียว  
 วิเคราะห์จากการทดลอง creep ของเจลสตาร์ชด้วเขียวที่ความเข้มข้น  
 ของสตาร์ช 10.18 g/dl ในสารละลาย pH 7 และความเข้มข้นของ NaCl  
 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 27°C แรงเค้น 30 N เวลาที่ใช้กด 300 sec.

เมื่อ E = Elasticity (Pa)

$\eta$  = Viscosity (Pa-s)

$\tau_{ret}$  = Retardation time (sec)

ตัวห้อย E หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น ideal elastic

R หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น retard elastic

N หมายถึง สมบัติของส่วนที่เป็น ideal Newtonian fluid

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

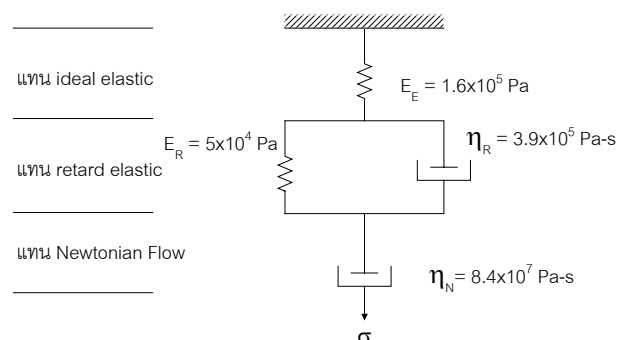
สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชถั่วเขียว (ซึ่งมีปริมาณสตาร์ชร้อยละ 97.98 โดยน้ำหนัก โดยเป็นอะมิโลสร้อยละ 34.5 โดยน้ำหนัก) เป็นดังต่อไปนี้

##### \* สมบัติทางความร้อน

- ไม่เกิดเจลลาติไนเซชันเมื่อความชื้นต่ำกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
- การเกิดเจลลาติไนเซชันพบที่ความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ขึ้นไป โดยช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนเซชันเริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 63 องศาเซลเซียส และ  $\Delta H$  ที่ทำให้เกิดเจลลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์เท่ากับ 12.7 จูลต่อกรัม
- รีโทรเกรดชันเกิดหลังจากเก็บสตาร์ชที่เจลลาติไนซ์แล้วที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน และเกิดซ้ำลงเมื่อเก็บที่  $-20$  องศาเซลเซียส คือ นาน 3 วัน

##### \* สมบัติทางกายภาพ

- Dilute solution : ค่า intrinsic viscosity ของสตาร์ชเท่ากับ 1 เดซิลิตรต่อกรัม ในสารละลายน้ำที่ pH 3-9 ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0-0.2 โมลาร์ และ 30 องศาเซลเซียส
- Paste : ความเข้มข้น 3-5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ที่ pH 7 ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.1 โมลาร์ ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นแบบ Pseudoplastic
- Gel : สมบัติทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว ความเข้มข้น 10.18 กรัมต่อเดซิลิตร อธิบายด้วย Four Element Model



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดข้าวและแรงดันพร้อมเวลาที่ใช้ในการกด เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้และกำหนดสูตร
- ศึกษาลักษณะการไหลของ paste ในช่วงอัตราเฉือนที่กว้างขึ้น ( $\approx 10^{-3}$  -  $10^3$  นาทิ)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

มนัส แซ่ด่าน. 2538. วีโอโดยีเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร.

### ภาษาอังกฤษ

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1995. Official Method of Analysis of AOAC International. 16<sup>th</sup> ed. Washington D.C. AOAC International.
- Abboud, A.M. and Hosney, R.C. 1984. Differential scanning calorimetry of sugar cookies and cookie doughs. Cereal Chem. 61(1): 34-37.
- 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. 1998. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperatures and the effects of salt and sugars. Cereal Chem. 75(3): 308-314.
- Bhattacharya, S. and Bhattacharya, S. 1996. Rheology of cooked debranned maize flour suspensions. J. Food Eng. 27: 97-105.
- Biliaderis, C.G. 1998. Structure and phase transitions of starch polymer. In: Polysaccharide Association Structure in Foods. R.H. Walter (editor). New York: Marcel Dekker.
- Biliaderis, C.G. Maurice, T.J., and Vose, J.R. 1980. Starch gelatinization phenomena studied by DSC. J. Food Sci. 45: 1669-1674.
- Biliaderis, C.G., Page, C.M., Maurice, T.J., and Juliano, B.O. 1986. Thermal characterization of rice starches: a polymeric approach to phase transitions of granular starch. J. Agric. Food Chem. 34: 6-14.
- Biliaderis, C.G. and Zawistowski, J. 1990. Viscoelastic behavior of aging starch gels: effects of concentration temperature and starch hydrolysates on network properties. Cereal Chem. 67: 240-246.
- Brautlecht, C.A. 1953. Starch: Its Sources Production and Uses. New York: Reinhold Publishing Corporation.

- Califano, A.N. and Anon, M.C. 1990. Differential scanning calorimetry of mung bean starch. J. Food Sci. 55(3): 771-773.
- Carriere, C.J. 1998. Evaluation of the entanglement molecular weights of maize starches from solution rheological measurements. Cereal Chem. 75(3): 360-364.
- Casson, N. 1959. A flow equation for pigment-oil suspensions the printing ink type. In: Rheology of Disperse System. C.C. Hill (editor). London: Pergamon Press.
- Chatakanonda, P., Qaravinit, S., and Chinachoti, P. 2000. Relationship of gelatinization and recrystallization of cross-linked rice to glass transition temperature. Cereal Chem. 77(3): 315-319.
- Chung, K.M., Moon, T.W., and Chun, J.K. 2000. Influence of annealing on gel properties of mung bean starch. Cereal Chem. 77(5): 567-571.
- Donovan, J.W. 1979. Phase transition of the starch-water system. Biopolymer. 18: 263-275.
- Doublier, J.L. 1981. Rheological studies on starch-flow behavior of wheat starch pastes. Starch/Starke. 33: 415-420.
- Evans, I.D. and Haisman, D.R. 1979. Rheology of gelatinised starch suspension. J. Texture Studies. 10: 347-370.
- French, D. 1975. Organization of starch granules. In: Starch Chemistry and technology R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall (editors) 2<sup>nd</sup> ed. New York: Academic Press.
- 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 Vasanthan, T. 1994. The flow properties of native, heat-moisture treated, and annealed starches from wheat, oat, potato and lentil. J. Food Biochemistry. 18: 67-82.
- Islam, M.N. and Mohd, B.M.N. 1997. Rheological properties of calcium treated hydroxypropyl rice starches. Starch/ Starke. 49(4): 136-141.
- Islam, M.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 (*Metroxy sagu*). Starch/ Starke. 53: 90-94.

- Jang, J.K. and Pyun, Y.R. 1997. Effect of moisture level on the crystallinity of wheat starch aged at different temperatures. Starch/ Starke. 49(7): 272-277.
- Jarvis, C.E. and Walker, J.R.L. 1993. Simultaneous, rapid, spectrophotometric determination of total starch, amylose and amylopectin. J. Sci. Food Agric. 63: 53-57.
- John, A. and Shastri, P.N. 1998. Studies of food macromolecules by differential scanning calorimetry: A critical appraisal. J. Food Sci. Technol. 35(1): 1-14.
- Julino, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today. 16(10): 334-360.
- Kim, Y.S. and Wiesenborn, D.P. 1996. Starch noodle quality as relate to potato genotypes. J. Food Sci. 61: 248-252.
- Kim, Y.S., Wiesenborn, D.P., and Grant, L.A. 1997. Pasting and thermal properties of potato and bean starches. Starch/ Starke. 49(3) : 97-102.
- Kim, Y.S., Wiesenbom, D.P., Orr, P.H., and Grant, L.A. 1995. Screening potato starch for novel properties using differential scanning calorimetry. J. Food Sci. 60: 1060-1065.
- Krueger, B.R., Walker, C.E., Knutson, C.A., and Inglett, G.E. 1987. Differential scanning calorimetry of raw and annealed starch isolated from normal and mutant maize genotypes. Cereal Chem. 64(3): 187-190.
- Launay, B., Doublier, J.L., and Cuvelier. 1986. Flow properties of aqueous solutions and dispersions of polysaccharides. In: Properties of Food Macromolecules. J.R. Mitchell and D.A. Ledward (editors). 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 Chem. 36: 534-544.
- Lee, J.J., Uebersax, M.A., Zabik, M.E., and Steffe, J.F. 1995. Gelatinization properties of navy bean starch. Starch/ Starke. 47(9): 329-333.
- 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 Chem. 69: 222-225.



- Mariam, T.G. and Schmidt, P.C. 1996. Isolation and physico-chemical properties of enset starch. Starch/ Starke. 48(6): 208-214.
- McMillan, D.E. 1974. A comparison of five methods for obtaining the intrinsic viscosity of bovine albumin. Biopolymers. 13: 1367-1371.
- Morris, E.R. 1989. Polysaccharide solution properties origin, rheological characterization and implication in food system. In: Frontiers in Carbohydrate Research-1. R.P. Millanre, J.N. BeMiller, and R. Chandrasekar (editors). Amsterdam: Elsevier Applied Science Publishers.
- Morris, E.R. 1995. Polysaccharide rheology and in-mouth perception. In: Food Polysaccharides and their Applications. R.H. Walter (editor). New York: Marcel Dekker.
- Naivikul, O. and D'Appolonia, B.L. 1979. Carbohydrates of Legume flours compared with wheat flour. II. Starch. Cereal Chem. 56(1): 24-28.
- Nakazawa, F., Noguchi, S., Takahashi, J., and Takada, M. 1985. Retrogradation of gelatinized potato starch studied by differential scanning calorimetry. Agric. Biol. Chem. 49: 953-957.
- Oates, C.G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. Trends in Food Science and Technology. 8: 375-382.
- Penfield, M.P. and Campbell, A.M. 1990. Starch Experimental Food Science. London: Academic Press.
- Poehlman, J.M. 1991. The Mung Bean. Colorado: Westview press.
- Rao, M.A. 1999. Rheology of food gum and starch dispersions. In: Rheology of Fluid and Semisolid Foods. Maryland: Aspen Publishers.
- Rao, V.N.M. 1992. Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods. In: Viscoelastic Properties of Foods. M.A. Rao and J.F. Steffe (editors). New York: Elsevier Science Publishers.
- Ring, S.G., Collona, O., L'Annon, K.J., Kalichevsky, M.T., Miles, M.J., Morris, V.J., and Orford, P.D. 1987. The gelation and crystallization of amylopectin. Carbohydr Res. 162: 277-293.
- Schoch, T.J. and Maywald, E.C. 1968. Preparation and properties of various legume starches. Cereal Chem. 45: 564-573.

- Singh, U., Voraputhaporn, W., Rao, P.V., and Jambunathan, R. 1989. Physicochemical characteristics of pigeonpea and mung bean starches and their noodle quality. J. Food Sci. 54(5): 1293-1297.
- Smith, R.J. 1979. Food Carbohydrate. Connecticut: The AVI Publishing.
- Steffe, J.F. 1992. Introduction to rheology. In: Rheological Methods in Food Process Engineering. Michigan: Freeman Press.
- Swinkels., J.J.M. 1985. Sources of starch, its chemistry and physics. Starch conversion technology. New York: Marcel Dekker.
- Tanglertpaibul, T. and Rao, M.A. 1987. Intrinsic viscosity of tomato syrup as affected by methods of determination and methods of processing concentrates. J. Food Sci. 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 Chem. 67(6): 551-557.
- Wang, S.S., Qu, D., and Chiew, Y.C. 1994. A study of starch granule aggregation. Starch/ Starke. 46(9): 337-341.
- Ward, K.E.J., Hosney, R.C., and Seib, P.A. 1994. Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. Cereal Chem. 71(2): 150-155.
- 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.
- Wirakartakusumar, M. A. 1981. Kinetics of starch gelatinization and water absorption in rice. Ph.D. Thesis. Department of Food Science, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin. Cited in Lund, D. B.1983. Applications of differential scanning calorimetry in foods. M. Peleg and E.B. Bagley (editors). In: Physical properties of foods. Connecticut: AVI Publishing Company.
- Won, S.Y., Choi, W.S., Lim, H.S., Cho, K.Y., and Lim, S.T. 2000. Viscoelasticity of cowpea starch gels. Cereal Chem. 77(3): 309-314.
- Wurzburg, O.B. 1986. Modified starches : Properties and used. Florida: CRC Press.
- Yuan, 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 Chem. 70(1): 81-89.
- ZeleznaK, K.J. and Hosney, R.C. 1987. The transition in starch. Cereal Chem.

64(2): 121-124.

Zheng, G.H. and Sosulski, F.W. 1998. Determination of water separation from cooked starch and flour pastes after refrigeration and freeze-thaw. J. Food Sci.

63(1): 134-139.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

วิเคราะห์โดยใช้ Iodine method ตามวิธีของ Juliano (1971) และใช้เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 6 ความยาวคลื่นคือ 520, 530, 565, 592, 700 และ 800 นาโนเมตร ตามวิธีของ Jarvis และ Walker (1993)

#### อุปกรณ์

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) (Spectronic รุ่น Genesys 5)
2. เตาให้ความร้อน (hot plate)

#### สารเคมี

1. อะมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (standard potato amylose) ของบริษัท Sigma Chemical
2. อะมิโลเพคตินบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (standard potato amylose) ของบริษัท Sigma Chemical
3. สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยละลายไอโอดีน ( $I_2$ ) 0.20 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.00 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade) ความเข้มข้น 1 N
5. เอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ (หรือ 95%)
6. สารละลายกรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ , AR grade) ความเข้มข้น 1 N

#### การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวัด

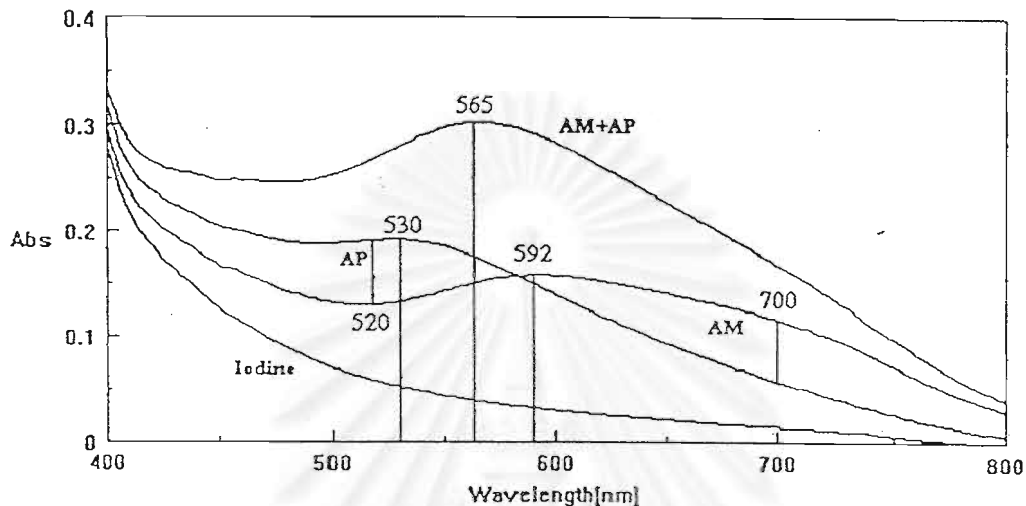
1. เตรียมสารละลาย 4 ชนิด ดังต่อไปนี้
  - iodine reagent blank (20  $\mu\text{g/ml}$ )
  - 8  $\mu\text{g/ml}$  amylose
  - 32  $\mu\text{g/ml}$  amylopectin
  - 8  $\mu\text{g/ml}$  amylose ผสมกับ 32  $\mu\text{g/ml}$  amylopectin ในอัตราส่วน 1:1

หมายเหตุ : วิธีเตรียมสารละลายคู่ได้จากการหาค่า absorptivity ของ อะมิโลสและอะมิโลเพคตินบริสุทธิ์ ปริมาณที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ต้องการเตรียม

2. ใส่สารละลายที่เตรียมได้ลงในคิวเวต 4 อัน

3. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นมากกว่า 500 นาโนเมตร

ตัวอย่างกราฟ



ภาพที่ ก-1 การดูดกลืนแสงของไอโอดีน อะมิโลส อะมิโลเพคติน และส่วนผสมของ อะมิโลสกับอะมิโลเพคติน ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

4. อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังต่อไปนี้

- 520 นาโนเมตร คือ ช่วงที่แตกต่างกันมากที่สุดของอะมิโลส และอะมิโลเพคติน โดยการดูดกลืนแสงของอะมิโลเพคตินจะมีค่าสูงกว่าของอะมิโลส
- 530 นาโนเมตร คือ ความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของอะมิโลเพคติน
- 565 นาโนเมตร คือ ความยาวคลื่นที่อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินเท่ากับ 20:80 ตามลำดับ
- 592 นาโนเมตร คือ ค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของอะมิโลส
- 700 นาโนเมตร คือ ค่าความยาวคลื่นของช่วงที่แตกต่างกันมากที่สุดของอะมิโลส และอะมิโลเพคติน โดยค่าการดูดกลืนแสงของอะมิโลสจะมีค่าสูงกว่าของอะมิโลเพคติน
- 800 นาโนเมตร คือ ค่าความยาวคลื่นขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงของอะมิโลเพคตินเข้าใกล้ศูนย์

การหาค่า absorptivity ของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินบริสุทธิ์

1. ชั่งอะมิโลสบริสุทธิ์น้ำหนักแน่นอน 20 มิลลิกรัม ใส่ใน flask ขนาด 50 มิลลิตรแล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 9 มิลลิตรและเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1 มิลลิตรผสมให้เข้ากัน ให้ความร้อนเป็นเวลา 10 นาที
2. นำสารละลายที่ได้ใส่ใน volumetric flask ขนาด 100 มิลลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
3. ทำการแปรผันความเข้มข้นของอะมิโลสบริสุทธิ์ โดยดูดสารละลายใน volumetric flask ปริมาณต่างๆ กันดังนี้ 3.0, 4.0, และ 5.0 มิลลิตร ใส่ใน volumetric flask ขนาด 100 มิลลิตร ใส่สารละลายกรดอะซิติก 1 N ปริมาตรดังนี้ 0.6, 0.8, และ 1.0 มิลลิตรตามลำดับ จากนั้นเติมสารละลายไอโอดีน 1 มิลลิตรทุกขวด ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิตรด้วยน้ำกลั่นเขย่าให้เข้ากัน
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 6 ความยาวคลื่น ใช้ iodine reagent เป็น blank
5. ทำการทดลองกับอะมิโลเพคตินบริสุทธิ์เช่นเดียวกับข้อ 1 แต่ดูดสารละลายในขวดวัดปริมาตรเป็น 10, 16 และ 20 มิลลิตร ใส่ใน volumetric flask ขนาด 100 มิลลิตร เติมสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 N ปริมาตรดังนี้ 2.0, 3.2 และ 4.0 มิลลิตร ตามลำดับ จากนั้นเติมสารละลายไอโอดีน 1 มิลลิตรทุกขวด ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิตร ด้วยน้ำกลั่นเขย่าให้เข้ากัน
6. ค่า absorptivity ที่ความยาวคลื่นหนึ่งหาได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว คลื่นนั้นหารด้วยค่าความเข้มข้นของอะมิโลสบริสุทธิ์หรืออะมิโลเพคตินบริสุทธิ์ ( $\mu\text{g/ml}$ ) ทำการคำนวณทุกๆ ความเข้มข้นหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่า absorptivity ที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชน้ำหนักแน่นอน 40 มิลลิกรัม แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการหาค่า absorptivity ของอะมิโลสบริสุทธิ์หรืออะมิโลเพคตินบริสุทธิ์ แต่ปริมาณสารละลายที่ดูดออกมาวิเคราะห์ใช้ ปริมาตร 5 มิลลิตร (ในข้อ 3) ใส่สารละลายกรดอะซิติก 1 มิลลิตรและสารละลายไอโอดีน 1 มิลลิตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีคำนวณ

$$C_{am} = \frac{[(A_{bs2} \times E_{oap2} / E_{oap2}) - A_{bs1}]}{(36)}$$

$$C_{ap} = \frac{[(E_{oam2} \times E_{oap1} / E_{oap2}) - E_{oam1}]}{[A_{bs1} - (E_{oam1} \times C_{am} / E_{oap2})] / E_{oap1}} \quad (37)$$

- เมื่อ
- $C_{am}$  คือ ค่าความเข้มข้นของอะมิโลส ( $\mu\text{g/ml}$ )
  - $C_{ap}$  คือ ค่าความเข้มข้นของอะมิโลเพคติน ( $\mu\text{g/ml}$ )
  - $A_{bs1}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นที่ 1 ของคู่ที่คำนวณ
  - $A_{bs2}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นที่ 2 ของคู่ที่คำนวณ
  - $E_{oam1}$  คือ ค่า absorptivity ของอะมิโลสที่ความยาวคลื่นที่ 1 ของคู่ที่คำนวณ
  - $E_{oam2}$  คือ ค่า absorptivity ของอะมิโลสที่ความยาวคลื่นที่ 2 ของคู่ที่คำนวณ
  - $E_{oap1}$  คือ ค่า absorptivity ของอะมิโลเพคตินที่ความยาวคลื่นที่ 1 ของคู่ที่คำนวณ
  - $E_{oap2}$  คือ ค่า absorptivity ของอะมิโลเพคตินที่ความยาวคลื่นที่ 2 ของคู่ที่คำนวณ

ใช้สมการทั้ง 2 สมการนี้ในการหาความเข้มข้นของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน โดยการจับคู่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งจะได้ 15 สมการจากสมการทั้งหมด 6 ความยาวคลื่น แล้วนำค่าที่ได้ในแต่ละสมการมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่แท้จริง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ข

### วิธีวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชถั่วเขียว

#### การเกิดเจลลาตินในเซชันของสตาร์ชถั่วเขียว

ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995)

#### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งสตาร์ชที่ทราบค่าความชื้นประมาณ 3.4 มิลลิกรัม ลงใน pan หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงใน pan โดยคิดเป็นอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำเท่ากับร้อยละ 25:75 โดยน้ำหนัก หรือสามารถคำนวณน้ำหนักสตาร์ชแห้งและน้ำหนักน้ำกลั่นที่จะเติมได้จากสูตร

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

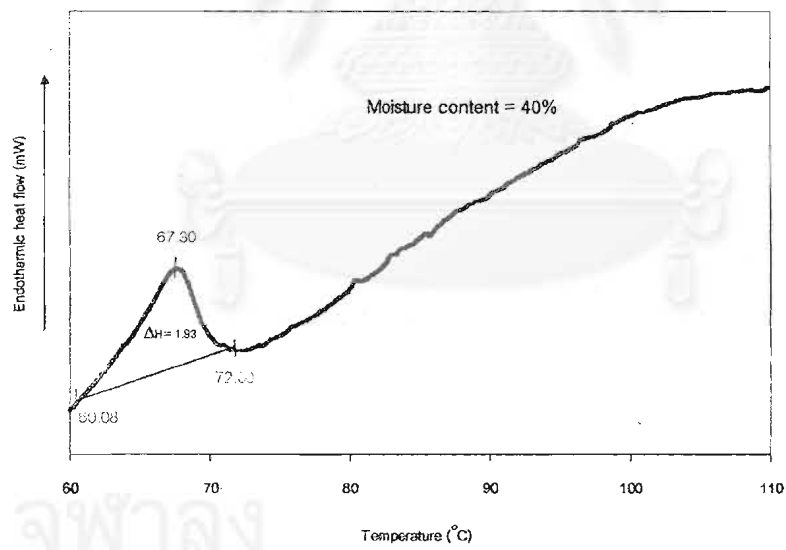
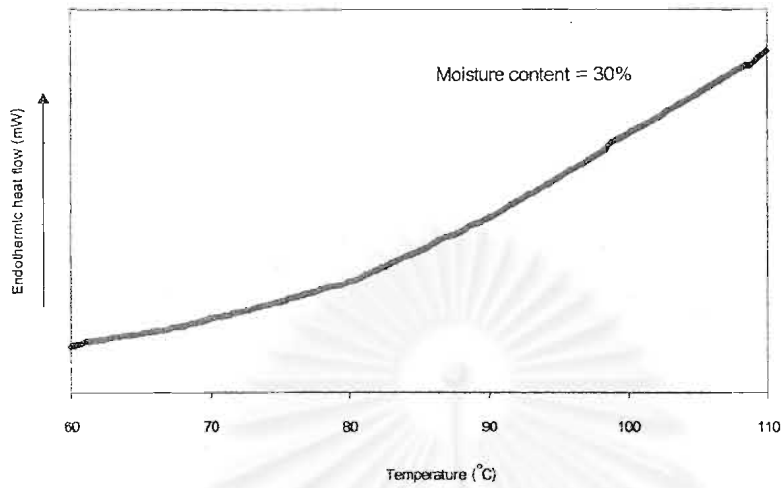
$$1.2 \text{ ปริมาณน้ำที่ควรเติม} = \left[ \frac{(\text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง} \times 75)}{25} \right] - \text{น้ำหนักสตาร์ชที่ชั่ง} + \text{น้ำ}$$

หนักสตาร์ชแห้ง

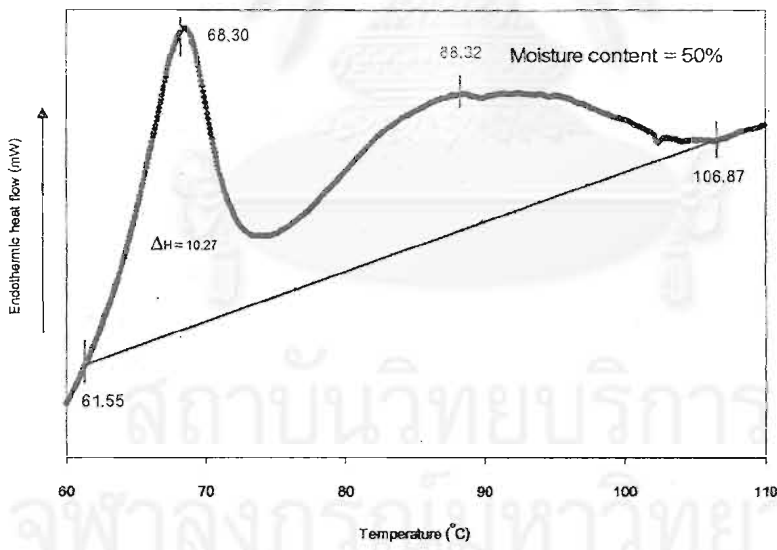
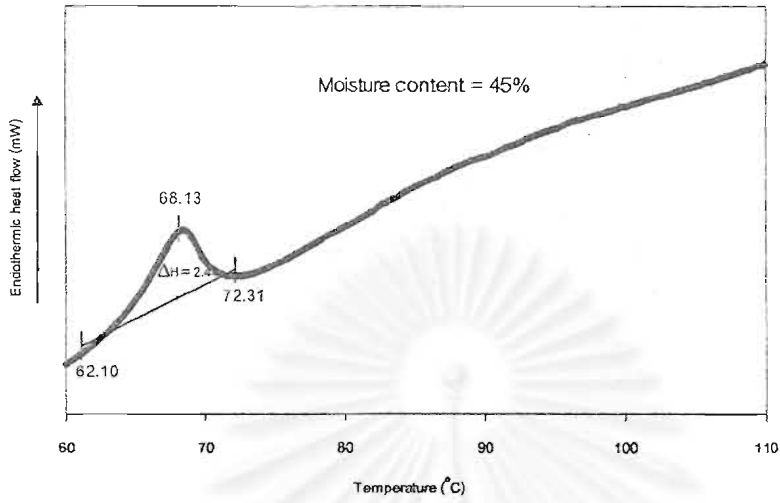
1. ปิดฝา pan ให้สนิทด้วยเครื่องมือปิดฝา บ่ม pan ไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน เพื่อให้ความชื้นภายใน pan เข้าสู่จุดสมดุลความชื้น
2. นำ pan ใส่ในช่อง sample ของเครื่อง DSC-7(Perkin-Elmer) และวาง Reference pan (pan เปล่า) และตั้งค่าของเครื่องในช่วงอุณหภูมิ 40-120 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ Indium ในการ Calibration
3. คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ระบบ Autocalculation และบันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาตินในเซชัน ได้แก่
  - อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (onset temperature,  $T_o$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิที่  $\Delta H$  สูงสุด (peak temperature,  $T_p$  หน่วย °C)
  - อุณหภูมิสิ้นสุดในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (final temperature,  $T_f$  หน่วย °C)
  - พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างเกิดการเกิดเจลลาตินในเซชัน ( $\Delta H$ , หน่วย J/g)

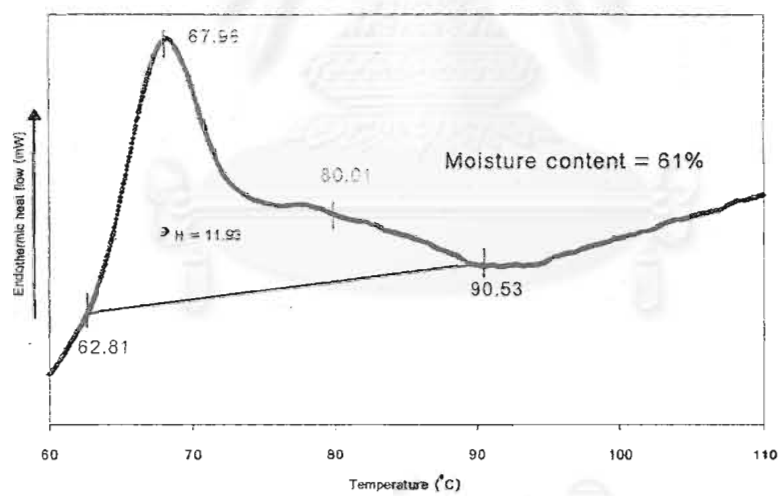
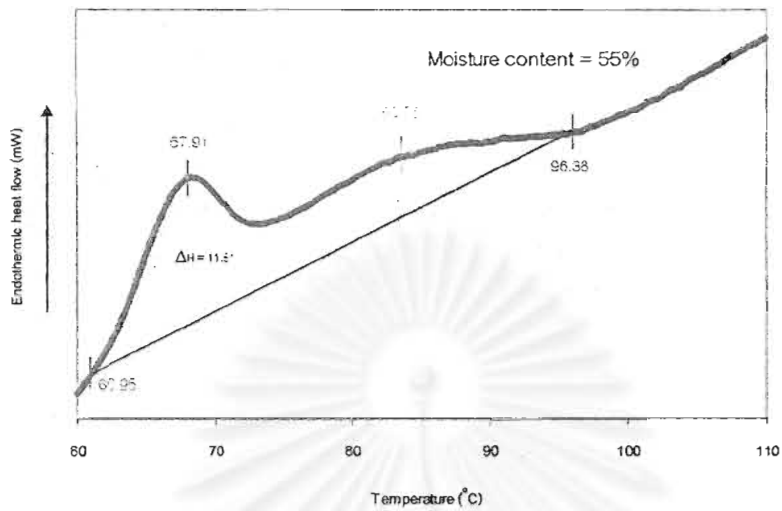
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Endothermic Peak ของสตาร์ชถั่วเขียวที่ระดับความชื้นร้อยละ 30-80 โดยน้ำหนัก

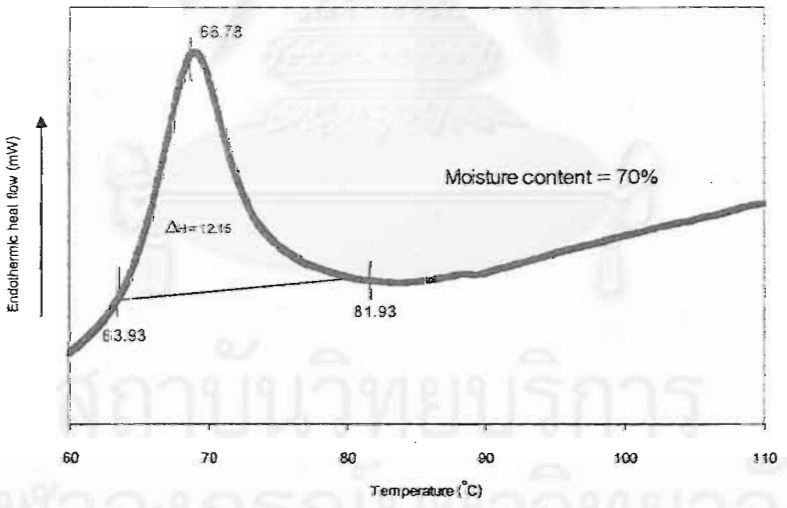
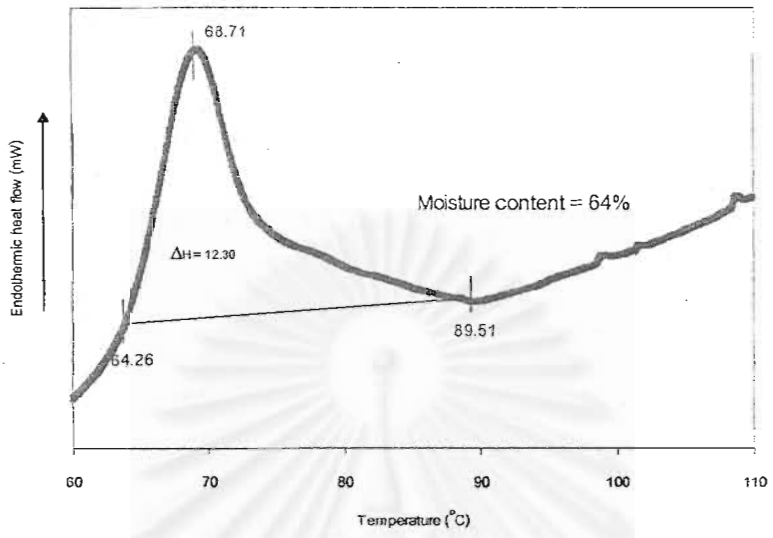


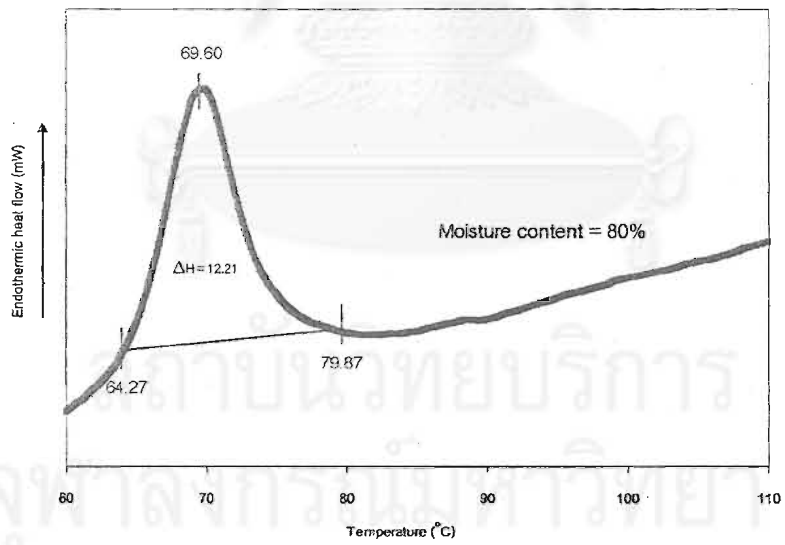
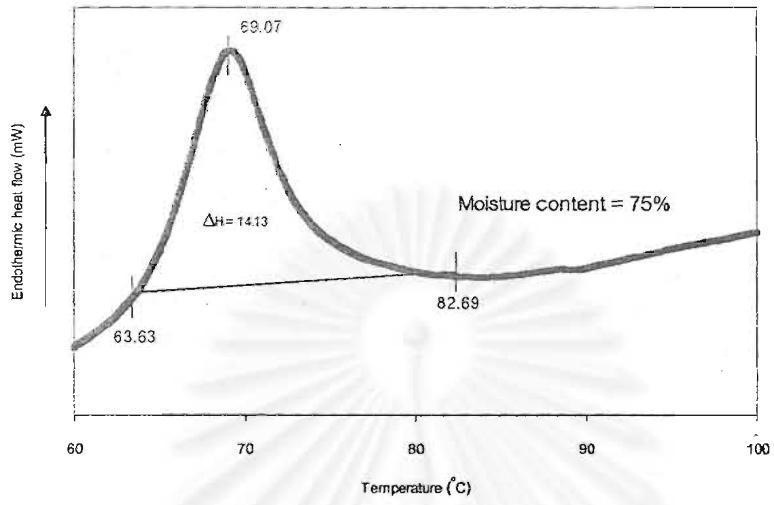
จุฬาลง





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





## การเกิดรีโทรเกรดเรชันของเจลสตาร์ชถั่วเขียว

ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Baker และ Duarte (1995)

วิธีวิเคราะห์

1. ทดสอบการเกิดเจลตาดีในเซชันของเจลสตาร์ชโดยดัดแปลงมาจากวิธีของ Kim และคณะ (1995) โดยตั้งค่าของเครื่องในช่วงอุณหภูมิ 40-110 องศาเซลเซียส แล้วนำ pan ที่ผ่านการทดสอบมาเก็บไว้ในหลอดฝาเกลียว และปิดฝาให้สนิท
2. นำหลอดดังกล่าวมาเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 และ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3, 7 และ 14 วัน และเมื่อเก็บจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดก็นำหลอดที่เก็บ มาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำ pan เข้าเครื่อง DSC และวาง Reference pan (panเปล่า) และตั้งค่าของเครื่องที่ ช่วงอุณหภูมิ 40-110 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ Indium ในการ Calibration

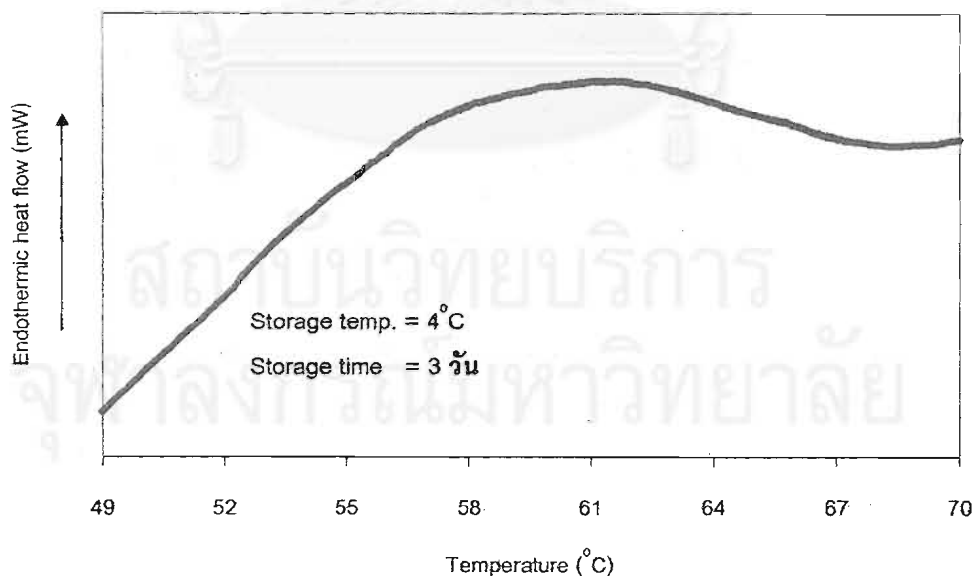
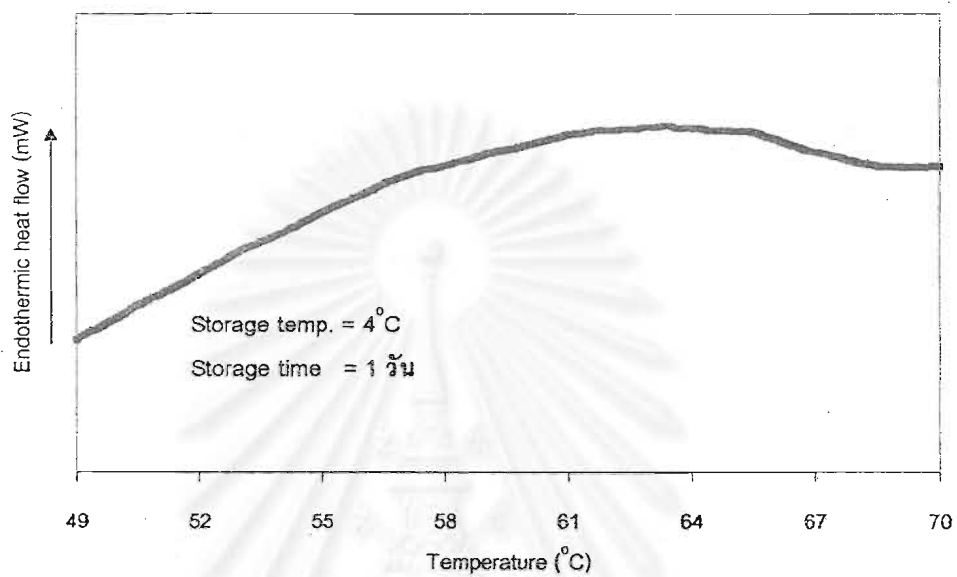
คำนวณค่าเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ระบบ Autocalculation และบันทึกค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลตาดีในเซชันอีกครั้ง ได้แก่  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_f$  และ  $\Delta H_R$

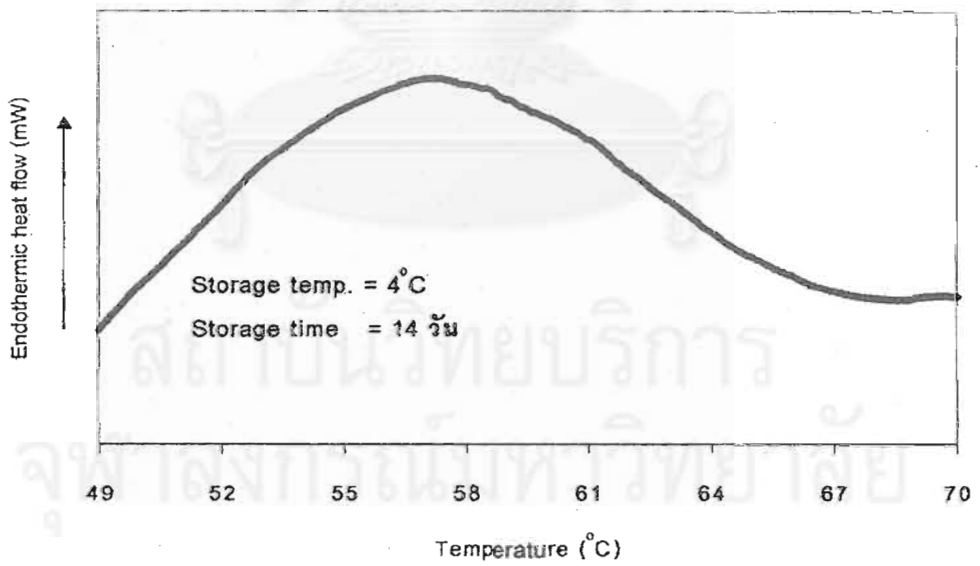
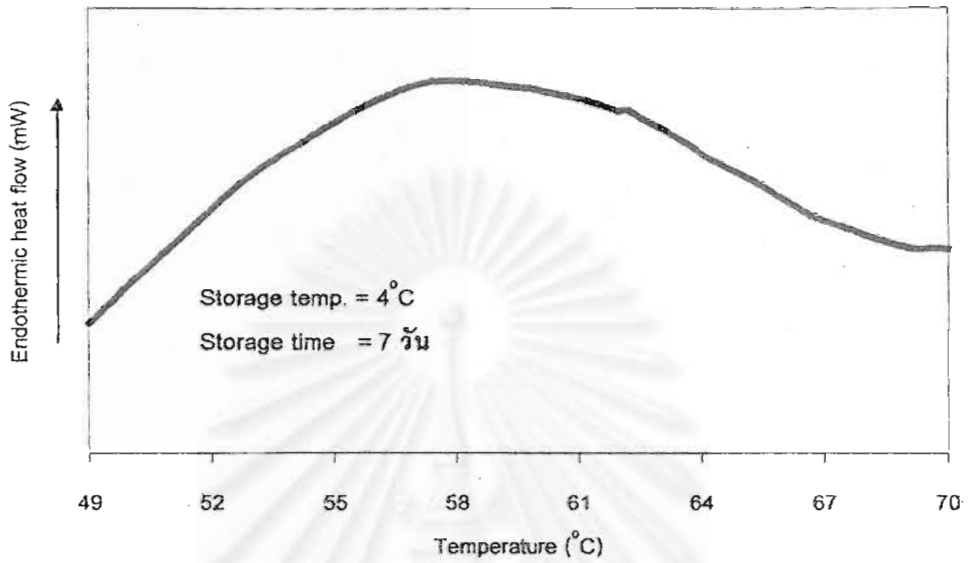


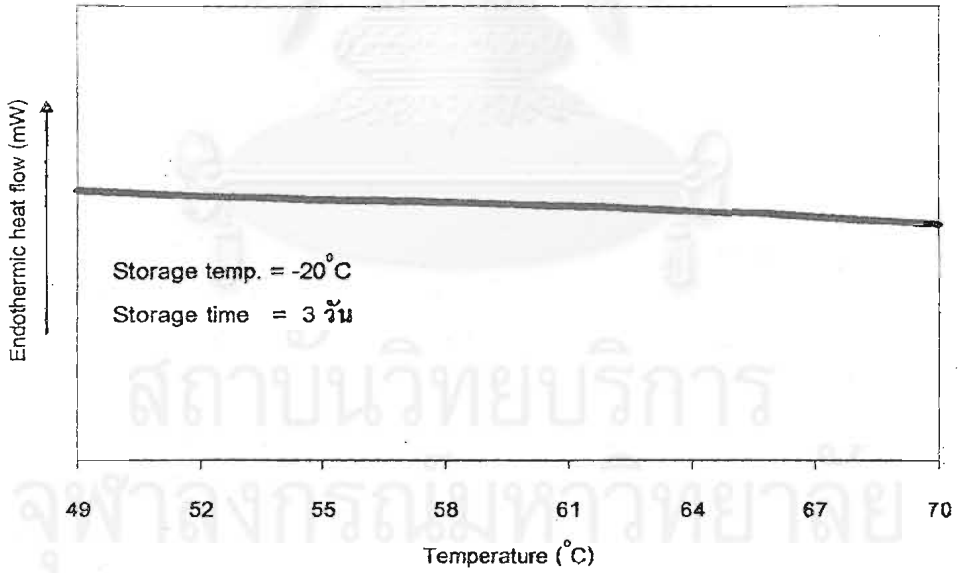
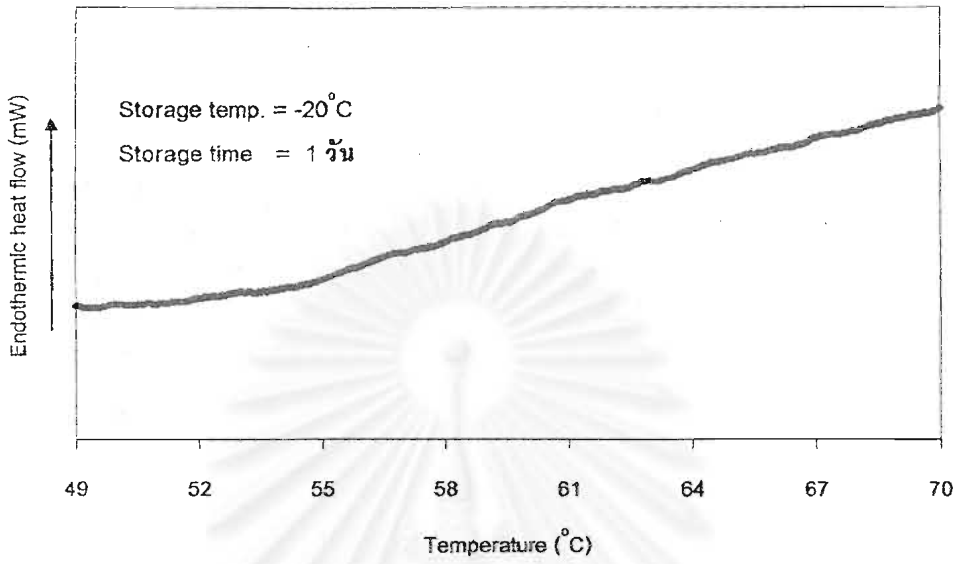
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

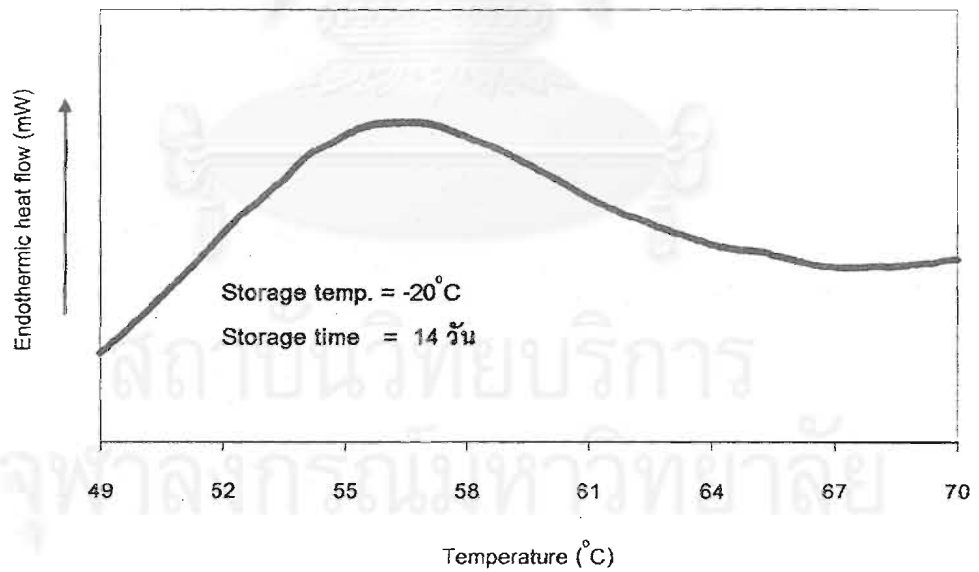
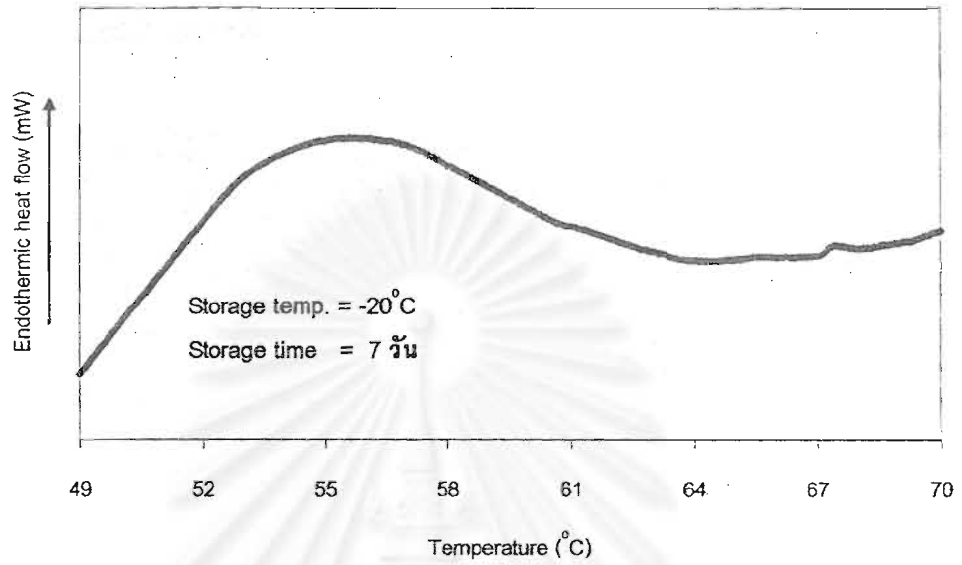


Endothermic heat flow ของสตาร์ชถั่วเขียวหลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ -20 องศาเซลเซียส นาน 1, 3, 7 และ 14 วัน









## ภาคผนวก ค

### วิธีวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วเขียว

#### การวัด Intrinsic viscosity

ด้วย Capillary viscometer

การเตรียมตัวทำละลาย

เตรียมสารละลายเกลือ NaCl ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ คือ 0, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2 โมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ Citric acid-di-Sodium hydrogen phosphate pH 3 และ 5 ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 และในสารละลายบัฟเฟอร์ Sodium carbonate-sodium bicarbonate pH 9

การเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุก

1. ชั่งสตาร์ชประมาณ 0.15 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร ที่มีตัวทำละลายประมาณ 10 มิลลิลิตร
2. เขย่าให้สตาร์ชและตัวทำละลายผสมกัน ใส่ magnetic bar และเติมตัวทำละลายอีก 5 มิลลิลิตร ปิดฝา
3. นำสารแขวนลอยสตาร์ชไปให้ความร้อนใน water bath ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที กวนที่ความเร็วคงที่
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ล้าง magnetic bar ด้วยตัวทำละลายและเอา magnetic bar ออก ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร

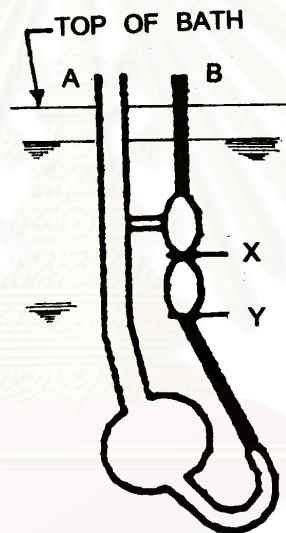
เตรียมอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

เตรียมอ่างน้ำชนิดใสสามารถมองเห็นจากด้านนอกได้ซึ่งในอ่างน้ำต้องมีเครื่องให้ความร้อนที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิและมีเครื่องกวนน้ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## วิธีการ

1. จับยึด viscometer ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ  $30 \pm 0.1$  องศาเซลเซียส
2. เปิดสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุก 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านตัวกรองขนาด  $0.45 \mu$  ใ้ viscometer ทางด้าน A
3. แซ่สารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกเป็นเวลา 15 นาที ดูดสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุก จากทางด้าน B ให้สารตัวอย่างสูงกว่าระดับ X
4. จับเวลา (t) ที่สารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกไหลจากระดับ X มาถึงระดับ Y
5. ทำความสะอาด viscometer โดยเทสารแขวนลอยสตาร์ชถั่วเขียวสุกออกและล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง
6. ล้างด้วยอะซิโตน 5 มิลลิลิตร แล้วเป่าด้วยลมร้อนจนแห้ง
7. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ตัวทำละลาย ( $t_0$ )



ภาพที่ ค-1 Capillary viscometer

ที่มา : Steffe (1992)

### การวัดลักษณะการไหลของสตาร์ช

วัดค่า apparent viscosity ของ paste ถั่วเขียวด้วย rotational viscometer ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.6-12 นาที่<sup>-1</sup> ที่อุณหภูมิ 30±0.1 องศาเซลเซียส

การเตรียมตัวอย่าง

1. เตรียม paste ถั่วเขียวที่ความเข้มข้น 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 กรัมต่อเดซิลิตรของตัวทำละลาย ในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 ความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ โดยทำให้เกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
2. ทำให้เย็นถึงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วนำ paste ถั่วเขียวไปวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Digital Viscometer ที่อุณหภูมิ 30±0.1 องศาเซลเซียส ในช่วงอัตราเฉือนระหว่าง 0.6-12 นาที่<sup>-1</sup> อ่านค่าความหนืดที่เวลา 2 นาที
3. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและ apparent viscosity

การคำนวณ

วิเคราะห์ flow behavior index และ consistency index ตามสมการของ Ostwald-De Waele (สมการที่ 21)

ประมาณค่า yield stress ตามวิธีของ Casson (1959) ดังสมการ

$$\tau^{0.5} = \tau_0 + K (\dot{\gamma}^{0.5}) \quad (38)$$

เมื่อ  $\tau$  = shear stress (mPa)

$k$  = consistency index (mPa·s<sup>n</sup>)

$\dot{\gamma}$  = shear rate (sec<sup>-1</sup>)

$\tau_0$  = yield stress

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การวิเคราะห์สมบัติทาง viscoelastic ของเจลสตาร์ชถั่วเขียว

### การเตรียมเจลสตาร์ชถั่วเขียว

1. เตรียมเจลสตาร์ชถั่วเขียวในสารละลาย phosphate บัฟเฟอร์ pH 7 ความเข้มข้นของ NaCl 0.1 โมลาร์ ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 10.18 กรัมต่อเดซิลิตร โดยทำให้เกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
2. เทตัวอย่างข้างต้นลงใน petri dish (สูง 10 มิลลิเมตร) ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปิดด้วยพลาสติกใสเพื่อกันน้ำระเหย
3. เก็บเจลที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ตัดเจลเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร
5. นำเจลไปทำการทดลอง creep ด้วยเครื่อง Texture analyzer วิเคราะห์หา retardation time และแบบจำลองเชิงกลของเจล

### วิธีการคำนวณ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา ที่บันทึกได้ นำค่ามาคำนวณหาค่า  $E_E$ ,  $E_R$ ,  $\eta_R$ ,  $\eta_N$  และ  $\tau_{ret}$  ดังสมการต่อไปนี้

$$E_E = \sigma / \epsilon_E \quad (39)$$

เมื่อ  $E_E$  = Young's modulus ในช่วงแบบจำลอง Hookian spring

$\sigma$  = stress

$\epsilon_E$  = strain สำหรับ ideal elastic

$$E_R = \sigma / \epsilon_R \quad (40)$$

เมื่อ  $E_R$  = Young's modulus ในช่วงแบบจำลอง Kelvin

$\epsilon_R$  = strain สำหรับ retarded elastic

$$\eta_R = \sigma t / \epsilon_R \quad (41)$$

เมื่อ  $\eta_R$  = ค่าความหนืดในช่วงแบบจำลอง Kelvin

$$\eta_N = \sigma t / \epsilon_p \quad (42)$$

เมื่อ  $\eta_N$  = ค่าความหนืดในช่วงแบบจำลอง Dash pot

และจากความสัมพันธ์ระหว่าง strain กับเวลา (ภาพที่ 4.12) สามารถหาช่วงของเจลที่แสดงพฤติกรรมแบบ Hookian spring ( $E_E$ , time = 0) ซึ่งมีค่าเท่ากับช่วงที่เกิดการยืดตัวออกเมื่อนำแรงเค้นออก ณ ที่เวลา  $t = 300$  วินาที ได้เท่ากับ 0.09 ( $\epsilon_E = 0.09$ )

เมื่อผ่านพ้นพฤติกรรมของ Hookian spring ค่า strain จะเพิ่มขึ้นตามเวลาด้วยพฤติกรรมแบบ Kelvin สำหรับ retarded elastic จนกระทั่งหยุดให้แรงเค้น ( $t = 300$ ) เมื่อนำแรงเค้นออก strain จะลดลง ด้วยพฤติกรรม Hookian spring และ Kelvin ไปพร้อมกัน พฤติกรรมของ Kelvin ในช่วงนำแรงเค้นออกแล้ว หาได้จากช่วง  $\epsilon_0$  ดังสมการ

$$\epsilon_d = \epsilon_{od} e^{(-td / \tau_{ret})} \quad (43)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  = strain ในช่วง downward

โดยค่า  $\tau_{ret}$  หาได้จากช่วงเวลาดังแต่นำแรงเค้นออกจนถึงเวลาที่ค่า strain เท่ากับ 63% ของ maximum strain

ส่วนช่วง upward ค่า strain เกิดจากการนำผลของ Hookian spring, Kelvin และ Dash pot รวมเข้าด้วยกัน โดยค่าของ Hookian มีค่าคงที่ = 0.09 ค่าของ Kelvin แปรตามเวลาดังสมการ

$$\epsilon(t=T) = (\sigma/E_R)(1 - e^{(-td / \tau_{ret})}) \quad (44)$$

T = time

ดังนั้นสามารถหาค่า  $E_R$  ได้ =  $5 \times 10^4$  Pa และสามารถหา  $\eta_R$  ได้ดังนี้

$$\tau_{ret} = \eta_R / E_R \quad (45)$$

$$\eta_R = 3.9 \times 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

และจากสมการ dash pot

$$\sigma = \eta_N \dot{\epsilon} \quad (46)$$

$$\eta_N = \sigma / \dot{\epsilon} \quad (47)$$

เนื่องจาก

$$\dot{\epsilon} = \epsilon/t \quad (48)$$

เมื่อ  $\epsilon = 0.05$

$$t = 300 \text{ sec}$$

$$\sigma = 0.014 \times 10^6 \text{ Pa}$$

ดังนั้น

$$\eta_N = 8.4 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

นำค่า  $\tau_{ret}$ ,  $E_R$ ,  $\eta_R$ ,  $\eta_N$  ไปเป็นค่าคงที่ในแบบจำลอง

การเขียนแบบจำลอง

แบ่งเป็น 2 ช่วง ดังนี้

Upward คือ เวลาตั้งแต่เริ่มกดเจลจนถึงเวลาที่น้ำหนักแรงเค้นออก 300 วินาทีแรก

$$\epsilon(t) = \epsilon_E + \epsilon_r + \epsilon_\eta \quad (49)$$

เมื่อ  $\epsilon_E$  = strain จาก Hookian spring

$\epsilon_r$  = strain จาก Kelvin

$\epsilon_\eta$  = strain จาก dash pot

$$\epsilon_r(t) = (\sigma/E_r)(1 - e^{-t/\tau_{ret}}) \quad (50)$$

$$\epsilon_\eta = (\sigma/\epsilon_\eta) \quad (51)$$

downward คือ เวลาตั้งแต่น้ำหนักแรงเค้นออกจนถึงเวลาสิ้นสุด

$$\epsilon(t) = (\epsilon(300) - \epsilon_E - \epsilon_p) e^{-t/\tau_{ret}} + \epsilon_p \quad (52)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนภมณี มงคลประเสริฐ เกิดวันที่ 15 ธันวาคม 2516 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย เมื่อปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541

### ผลงานทางวิชาการ

- นภมณี มงคลประเสริฐ, พาสวดี ประทีปะเสน และสายวรุฬ ชัยวานิชศิริ สมบัติทางการไหลและสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากถั่วเขียว. การเสนอผลงานวิชาการแบบโปสเตอร์. การประชุมวิชาการครั้งที่ 10 ประจำปี 2545 "ก้าวที่ 85". 20-22 มีนาคม. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย