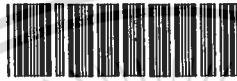


## ปัญหาพิเศษ

~~เรื่อง~~ การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันในข้าวต้มมัดแช่แข็ง  
(Study on Retrogradation Frozen of KhaoTom Mud)



T096552

โดย

นายกฤษณะ	วัชระเกียรติศักดิ์	รหัสประจำตัว	43040674
นางสาวจตุพร	สอนศรีนุสรณ์	รหัสประจำตัว	43040679
นายอนิรุธ	บุญมาเลิศ	รหัสประจำตัว	43040698

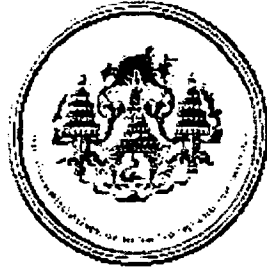
ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร  
 ๑/พ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
 ก 281 ก พ.ศ. 2547  
 ๒54๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... ๑๑๕๕๒

วันเดือนปี..... ๑๑/๑๑/๒๕๔๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวต้มมัดแช่แข็ง  
( Study on Retrogradation Frozen Khao Tom Mud )

โดย

นายกฤษณะ	วัชรเกียรติศักดิ์	รหัสประจำตัว	43040674
นางสาวจตุพร	สอนศรีอนุสรณ์	รหัสประจำตัว	43040679
นายอนิรุช	บุญมาเลิศ	รหัสประจำตัว	43040698

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

..... ๒๗ / ๕๐ / ๕๗

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

(ดร. พอใจ งามากร)

โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

.....  
(ผศ.ดร.ระติพร หาเรือนกิจ)

คณบดีโครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นายกฤษณะ วัชรเกียรติศักดิ์, นางสาวจตุพร สอนศรีนุสรณ์ และนายอนิรุท บุญมาเลิศ. 2547 : การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันในข้าวต้มมัดแช่แข็ง ( Study Retrogradation on Frozen of KhaoTom Mud ) ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร โครงการจัดตั้งคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อาจารย์ที่ปรึกษา : คร.พอใจ ถามากร , 28 หน้า

การศึกษาถึงการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวต้มมัดแช่แข็งที่เก็บที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  ,  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  โดยทำการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีแบล็กเอ็กซ์ทรูชัน ( Back Extrusion ) และทดสอบความแข็งและการยอมรับโดยรวมทางประสาทสัมผัส (Hedonic Scaling Test) ในวันที่ 3 , 6 , 15 , 22 และวันที่ 28 ของการแช่แข็ง จากการทดลอง วัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีแบล็กเอ็กซ์ทรูชันพบว่า ในช่วง 6 วันแรกของการแช่แข็งเกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นการเกิดรีโทรกราเดชันยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงแรก โดยการแช่แข็งขณะร้อนและเย็นการเกิดรีโทรกราเดชันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การแช่แข็งข้าวต้มมัดที่  $0^{\circ}\text{C}$  พบว่า เกิดรีโทรกราเดชันมากกว่าที่  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  สำหรับการแช่แข็งข้าวต้มมัดที่  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  เกิดรีโทรกราเดชันใกล้เคียงกันในช่วงระยะเวลาการแช่แข็ง 22 วัน แต่หลังจากการแช่แข็งมากกว่า 22 วัน ที่อุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  มีแนวโน้มเกิดรีโทรกราเดชันสูงขึ้น ในขณะที่ข้าวต้มมัดที่เก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ยังมีการเกิดรีโทรกราเดชันที่คงที่ จากการทดสอบความแข็งและการยอมรับโดยรวมทางประสาทสัมผัส (Hedonic Scaling Test) พบว่า ข้าวต้มมัดที่เก็บที่อุณหภูมิต่างกันและมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันนั้นมีค่าคะแนนความแข็งและค่าการยอมรับทางประสาทสัมผัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตลอดช่วงเวลาการเก็บ 28 วัน

นางกฤษณะ วัชรเกียรติศักดิ์  
นางสาวจตุพร สอนศรีนุสรณ์  
นาย อนิรุท บุญมาเลิศ

27/03/47

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

วัน เดือน ปี

## กิตติกรรมประกาศ

การนำเสนอปัญหาพิเศษในหัวข้อเรื่อง การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวต้มมัดแช่แข็งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ดร.พอใจ ถาமாகกร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาคอยแนะนำ ให้คำปรึกษาและดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา รวมทั้งแก้ไขรายงานฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ของข้าพเจ้า ที่ให้กำลังใจทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีและคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

นายกฤษณะ วิชระเกียรติศักดิ์

นางสาวจตุพร สอนศรีบุญธรรม

นายอนิรุทธ บุญมาเลิศ

16 มีนาคม พ.ศ.2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	2
2.1 การเกิดรีโทรกราเดชัน	2
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรกราเดชัน	9
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	11
3.1 วัสดุคืบและวิธีการทำขั้วคัมมัด	11
3.2 การทดลอง	11
บทที่ 4 ผลการทดลอง	13
4.1 ผลจากการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี back extrusion	13
4.2 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส	15
บทที่ 5 สรุปผล	18
ข้อเสนอแนะ	19
เอกสารอ้างอิง	20
ภาคผนวก	21
ภาคผนวก ก. การวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี back extrusion	22
ภาคผนวก ข. ค่าความแข็งและความชอบโดยรวม	24
ภาคผนวก ค. แบบประเมินผลทางประสาทสัมผัส	27
ประวัติผู้เขียน	28

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงสูงสุด (นิวตัน) ของข้าวต้มมัดที่เก็บ $0^{\circ}\text{C}$ , $10^{\circ}\text{C}$ และ $-20^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิเริ่มต้นการแช่แข็ง ขณะร้อนและเย็น	13
ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัด ที่ระยะเวลาเก็บ 3 วัน	24
ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัด ที่ระยะเวลาเก็บ 6 วัน	24
ตารางที่ ข.3 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัด ที่ระยะเวลาเก็บ 15 วัน	25
ตารางที่ ข.4 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัด ที่ระยะเวลาเก็บ 22 วัน	25
ตารางที่ ข.5 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัด ที่ระยะเวลาเก็บ 28 วัน	26

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดรีโททรานเคชันของสตาร์ชข้าวพันธุ์ Akihikari	3
ภาพที่ 2.2 การรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลเพกตินสายสั้น (A และ B1) ในสารละลายสตาร์ชเมื่อเก็บที่อุณหภูมิค่าเป็นเวลานานและหลัง จากการอิมิตัวระหว่างพันธะไฮโดรเจนของอะไมโลสและ อะไมโลเพกติน	4
ภาพที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันและ รีโทรทรานเคชัน	5
ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความแข็งของโครงสร้างแสดงค่าเป็น โมดูลัสเมื่อ เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	6
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการเกิดผลึก	7
ภาพที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของข้าวต้มมัดเก็บที่อุณหภูมิ 0 °C , -10 °C และ -20 °C เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยวิธี Back Extrusion	14
ภาพที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความแข็ง	15
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวม	16
ภาพที่ ก.1 ตัวอย่างของการวัดความแข็งของข้าวต้มมัดด้วยเครื่อง texture analysis วิธี Back Extrusion	23

# บทที่ 1

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตเกษตรโดยเฉพาะข้าวและข้าวเหนียวในปริมาณมาก การบริโภคทั้งในรูปของสดและการแปรรูปจึงควรมีการส่งเสริม การแปรรูปจะทำให้สามารถเพิ่มช่องทางในการจัดจำหน่ายสินค้าเกษตรนั้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยยืดอายุการเก็บของผลผลิต การแปรรูปข้าวเหนียวเป็นข้าวต้มมัด เป็นของหวานไทยที่ได้รับความนิยมและมีรสชาติอร่อย นอกจากจะแปรรูปเพื่อรับประทานภายในประเทศแล้ว การส่งออกเพื่อให้ชาวต่างชาติได้มีโอกาสชิมอาหารของไทยจึงเป็นการช่วยเศรษฐกิจของประเทศด้วย การแช่แข็งนับเป็นแนวทางหนึ่งในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาข้าวต้มมัด ไม่ให้เสื่อมเสียระหว่างการขนส่ง

ผลิตภัณฑ์จำพวกแป้งจะเกิดรีโทรกราเดชันในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เนื้อสัมผัสแข็ง ไม่อ่อนนุ่ม การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมส่วนประกอบและสถานะที่มีต่อการแช่แข็งข้าวต้มมัด เพื่อให้เกิดรีโทรกราเดชันน้อยที่สุด ผลิตภัณฑ์สามารถได้รับการยอมรับสูงหลังการคั้นรูป (thawing) มีรสชาติและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ผ่านการนึ่งใหม่ๆ

### วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการแช่แข็ง โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิเริ่มต้นในการแช่แข็ง อุณหภูมิการแช่แข็งและระยะเวลาการแช่แข็งที่มีต่อการเกิดรีโทรกราเดชันและเนื้อสัมผัสของข้าวต้มมัดหลังจากการคั้นรูป

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 การเกิดรีโทรกราเดชัน

##### 2.1.1 ความหมายการเกิดรีโทรกราเดชัน

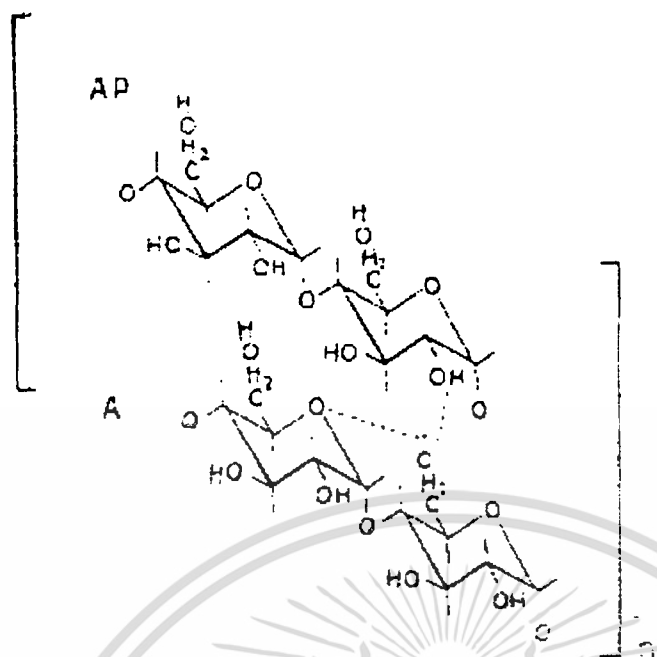
ปัจจุบันการเกิดรีโทรกราเดชันได้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดรีโทรกราเดชันมีบทบาทสำคัญในการเกิดความเก่า ( Staling) ของขนมปัง ข้าวสุก และอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งเป็นปรากฏการณ์ ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิซึ่งจะนำไปสู่การเกิดผลึก (Crystallization) บางส่วนในองค์ประกอบของสตาร์ช

Atwell *et al.* (1988) ให้คำจำกัดความของการเกิดรีโทรกราเดชันว่า การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลแป้งที่เกิดเจลลาคีในเซชันแล้ว มารวมกันในลักษณะ โครงสร้างที่เป็นระเบียบซึ่งเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในระหว่างโมเลกุล หรือภายในโมเลกุลเอง เกิดโครงสร้างเป็นเกลียวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดผลึก

##### 2.1.2 กลไกการเกิดรีโทรกราเดชัน

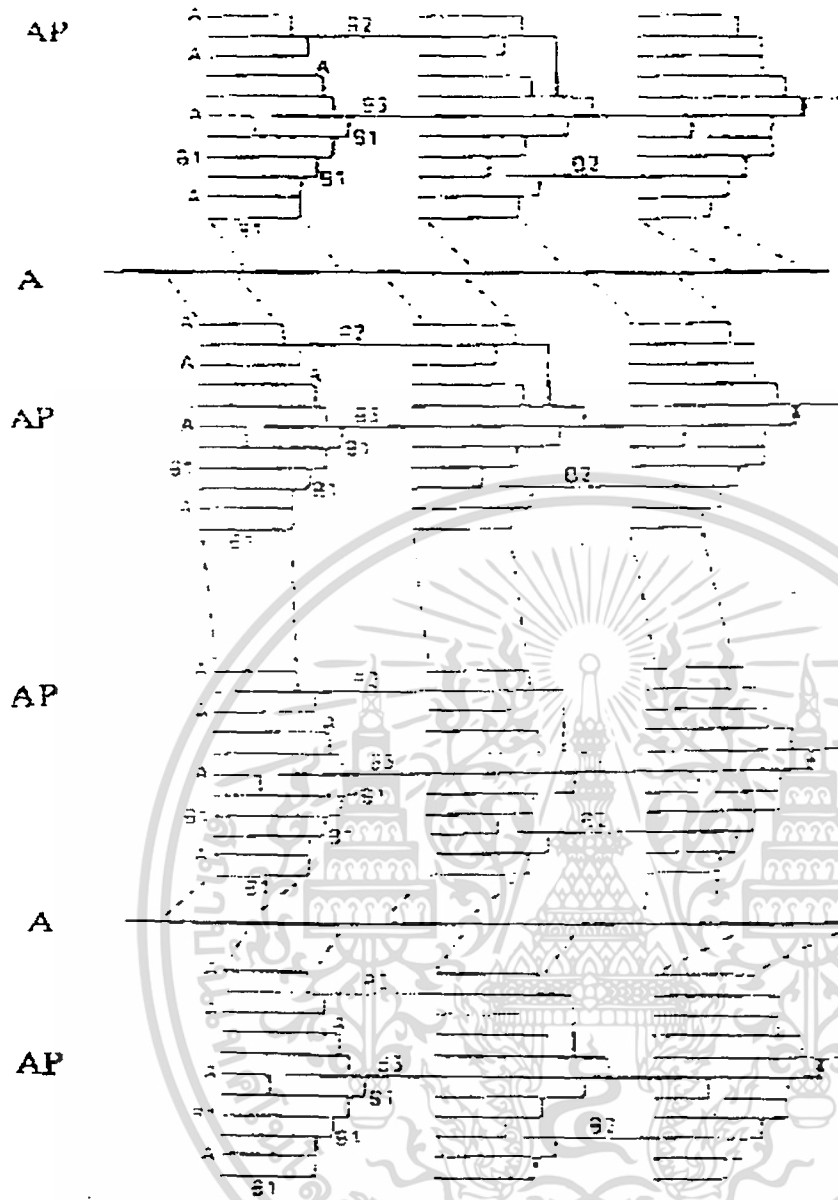
กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกของแป้งที่เกิดเจลลาคีในเซชันแล้วเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยพันธะไฮโดรเจนมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสในน้ำแป้งจากเดิมที่เป็นอสัณฐานไปเป็นผลึก หลังจากนั้นโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงและจับกันเป็นผลึก การจับกันนี้มีผลทำให้น้ำที่เคยจับกันอยู่ก่อนตอนที่โครงสร้างร่างแหต้องถูกกำจัดออกไป ผลลัพธ์ที่พวกเขาจะเกิดการแยกน้ำ (Syneresis) ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีน้ำซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เจลมีความชื้นลดลง

การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการเกิดเจลลาคีในเซชันเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังนั้นการเกิดเจลลาคีในเซชันจึงมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง Tako and Hizukuri (2000) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารละลายสตาร์ชข้าวพันธุ Akihikari ความเข้มข้นร้อยละ 4 ซึ่งเกิดเจลลาคีในเซชันแล้ว มาเก็บที่อุณหภูมิ 25°C และ 40°C นาน 24 ชั่วโมง พบว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ซ์ข้าวพันธุ Akihikari  
ที่มา : Tako and Hizukuri (2000)

จากภาพที่ 2.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนในสารละลายสตาร์ชนอกจากจะเกิดระหว่างออกซิเจนอะตอมที่ 6 ของอะไมโลสอะตอมหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลเพคตินแล้วการเกิดพันธะไฮโดรเจนอาจเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลสกับโมเลกุลอื่นหรืออาจเกิดกับออกซิเจนตำแหน่งที่ 6 ของอะไมโลเพคตินสายสั้น ( A และ B1) เมื่อเก็บสารละลายสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลอะไมโลเพคตินด้วยพันธะไฮโดรเจน แสดงดังภาพที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนนี้เกิดขึ้นจากกรลดลงของ Brownian motin และพลังงานจลน์ของอะไมโลเพคตินและ โมเลกุลของน้ำระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 40°C (Tako and Hizukuri. 2000)

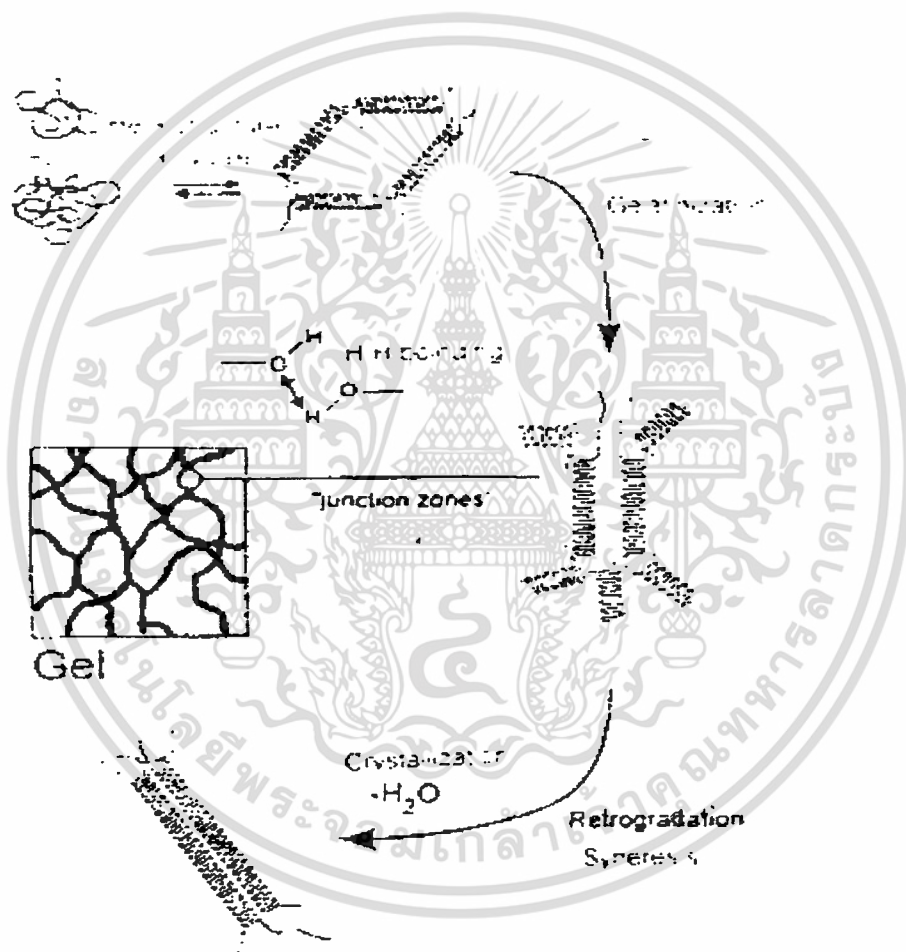


ภาพที่ 2.2 การรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลเพคตินสายสั้น (A และ B1) ในสารละลายสตาร์ชเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานและหลังจากการอิมิตวาระหว่างพันธะไฮโดรเจนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

ที่มา : Tako and Hizukuri (2000)

Klucinac and Thomson (1999) พบว่าในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน โมเลกุลของอะไมโลสจะฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่ (Double-helical) เกิดจากการรวมตัวของกลูโคสประมาณ 40-70 หน่วย และ โมเลกุลของอะไมโลเพคตินก็จะฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่เช่นเดียวกันแต่สั้นกว่า เนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาจากนั้นเกลียวคู่ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวเป็นผลึก ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน แสดงดังภาพที่ 2.3

นอกจากนี้การเกิดรีโทรกราเดชันยังมีผลทำให้ผลึกของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินการหักเหแสงเป็นแบบบี (B-pattern) เมื่อศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยที่ผลึกของอะไมโลเพคตินสามารถเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ สูงกว่า  $70^{\circ}\text{C}$

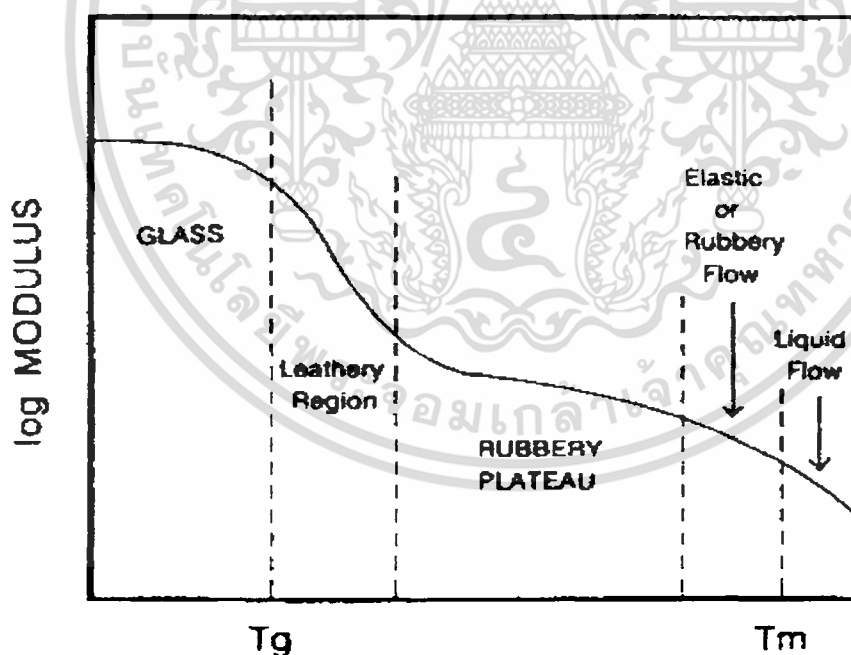


ภาพที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรกราเดชัน  
ที่มา : Borchard (1996)

### 2.1.3 การเกิดผลึกระหว่างการเกิดการรีโทรกราเดชัน

การเกิด โพลีเมอร์หรือการเกิดรีโทรกราเดชันของสสารสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีกลไกการเกิดผลึก (Theory of crystallization kinetics) ของสสาร โดยที่ความแข็งแรงของโครงสร้างของสสารหรืออาหารจะแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของโครงสร้างโดยแสดงค่าเป็น โมดูลัส (Modulus) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิของอาหารต่ำกว่า  $T_g$  อาหารจะเปราะและแตกง่าย  $T_g$  เป็นอุณหภูมิเฉพาะของอาหารแต่ละชนิด ดังนั้นอาหารแต่ละชนิดจึงมี  $T_g$  ไม่เท่ากัน  $T_g$  เป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของสารซึ่งเป็นของแข็งที่มีความหนืดสูงมากคล้ายแก้วหรือมีค่าโมดูลัสสูง เป็นสสารที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น (แสดงเป็นค่าโมดูลัสที่ลดต่ำลง) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอาหารให้สูงกว่า  $T_g$  สสารจะเป็นของแข็งที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้นแต่ยังไม่สามารถไหลได้เหมือนของเหลว มีลักษณะเหนียวคล้ายหนัง (Leathery) หรือเหนียวเป็นยาง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารจนสูงกว่า  $T_m$  สสารจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับของเหลว (Liquid-like) คือไหลได้และเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาชนะ เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรงลดลง (ค่าโมดูลัสลดต่ำลง) เพราะแรงยึดเกาะภายในของอาหารลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จึงทำให้อาหารเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเหมือนของเหลว

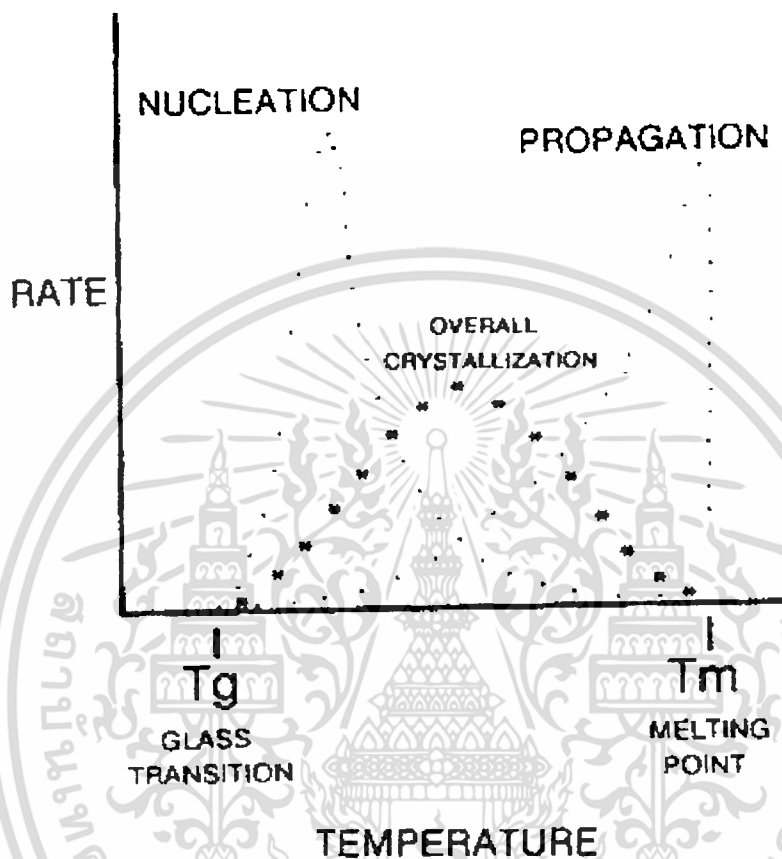


ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างแสดงค่าเป็น โมดูลัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่มา : Slade and Levine (1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดผลึกของสสารในระหว่างการเกิดรีโทรกราชัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1) การเกิดนิวคลีโอซัน (Nucleation) หรือการเกิดอนุภาคใหม่ของผลึกและเติบโตขึ้นจนมีขนาดหนึ่ง และ 2) โพรพาเกชัน (Propagation) คือการจำนวนและการขนาดของผลึก ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการเกิดผลึกของสสาร



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการเกิดผลึก

ที่มา : Slade and Levine (1991)

อัตราการเกิดผลึกของสสารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยผลึกจะขึ้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ  $T_g < T < T_m$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สสารมีสภาพเหนียวเป็นยาง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในภาพที่ 2.6 ดังนั้นการเกิดผลึกของสสารจึงสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพเหนียวเป็นยางเท่านั้น และจากการทดลองพบว่า สารละลายอะไมโลเพคติน ที่มีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 27 สามารถเกิดผลึกได้ในช่วง  $T_g$  เท่ากับ  $-50^{\circ}\text{C}$  และ  $T_m$  ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  จากภาพที่ 2.5 การเกิดนิวคลีโอซันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งทำให้สสารเคลื่อนตัวตลอดเวลาและฟอร์มตัวเป็นนิวคลีโอ (Nuclei) จำนวนการเกิดนิวคลีโอซันขึ้นอยู่กับอัตราการทำความเย็น นิวคลีโอเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วมากจึงเรียกว่า หน่วยเคลื่อนที่ (Kinetic unit) ซึ่งแต่ละหน่วยอยู่ในตำแหน่ง เวลา ความเร็ว พลังงานและ

ความเข้มข้นแตกต่างกันมาก เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอหน่วยเคลื่อนที่ 2 อนุภาค อาจมาเชื่อมต่อกันและอาจมีอนุภาคที่ 3 และอนุภาคอื่นๆ มาเชื่อมต่อกัน การรวมกันในลักษณะนี้เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) และเจริญเติบโตเป็นเอมบริโอ (Embryo) และนิวเคลียส (Nucleus) ถ้านิวเคลียสรับเอมบริโอและคลัสเตอร์เข้ามาเพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึก นิวเคลียสจะไม่เกิดขึ้นถ้า  $T < T_g$  ซึ่งโมเลกุลของสสารส่วนใหญ่จะไม่เคลื่อนที่ในสถานะของแข็งที่  $\eta = 10^{-12}$  PaS อัตราการเกิดนิวเคลียสจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารเท่ากับ  $T_m$  และเมื่ออุณหภูมิของสสารสูงกว่า  $T_g$  เล็กน้อยอัตราการเกิดนิวเคลียสจะสูงที่สุด

สำหรับการเกิด โพรพาเกชันจะเกิดขึ้นเมื่อสสารมีสถานะเป็นของเหลว ดดยอัตราการเกิด โพรพาเกชันเท่ากับศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารมีค่าเท่ากับ  $T_g$  เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเกิด โพรพาเกชันจะมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของสสารต่ำกว่า  $T_m$  เล็กน้อย ดังนั้น จากภาพที่ 2.5 การเกิดผลึกของสสารในระหว่าง การเกิด โพรพาเกชัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียสและ โพรพาเกชันจะเกิดสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิตรงกลางระหว่าง  $T_g$  และ  $T_m$  และอัตราการเกิดผลึกจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารเท่ากับ  $T_g$  และ  $T_m$

#### 2.1.4 ผลจากการเกิดรีโทรกราเดชันที่มีต่อเจลของแป้ง

การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปผลจากการเกิดรีโทรกราเดชันที่มีต่อเจลของแป้ง มีดังนี้

1. ทำให้เจลแป้งสลายตัว ได้ยาก เมื่อสัมผัสกับกรดหรือเอนไซม์ เนื่องจากการเรียงตัวระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะ ไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างแน่นและแข็งเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเจล

2. ทำให้เจลของแป้งขุ่น เนื่องจากเกิดผลึกมากมายและหลายขนาด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง แป้งที่เกิดผลึกใหญ่กว่า 250 นาโนเมตร แสงจะสามารถผ่านไม่ได้ และสะท้อนออกมาออกมาเจลที่ได้จึงมีลักษณะขุ่นแต่ถ้าผลึกมีขนาดเล็กกว่า 250 นาโนเมตร แสงผ่านได้เจลที่ได้จะมีลักษณะใส

3. เจลของแป้งที่เกิดรีโทรกราเดชันจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้น้อย

4. ทำให้แป้งที่เกิดรีโทรกราเดชันละลายน้ำได้น้อยลง แต่ยังละลายได้ดีในสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรกราเดชัน

Wang และ Janc (1994) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทรานซิชัน (glass transition temperature :  $T'_g$ ) และการรีโทรกราเดชันของแป้งที่มีน้ำตาลและมอลโทเด็กซ์ทรินซึ่งน้ำตาลประกอบด้วยกลูโคส ฟรุคโทส มอลโทสและซูโครสที่มีความเข้มข้น 6% และ 9% โดยนำตัวอย่างไปวัดค่า  $T'_g$  ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ  $2^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  พบว่า การเกิดรีโทรกราเดชันของตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  น้อยกว่าที่  $2^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นการเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิแช่แข็งต่ำกว่า  $T'_g$  ของตัวอย่าง ( $T'_g$  ของตัวอย่างอยู่ในช่วง  $-11.1^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-18.2^{\circ}\text{C}$ ) จะทำให้ตัวอย่างมีความเสถียรในการเก็บและเกิดการรีโทรกราเดชันน้อย และตัวอย่างแป้งที่มีฟรุคโทสเกิดรีโทรกราเดชันมากกว่ากลูโคส มอลโทสและซูโครสทั้งที่เก็บที่  $2^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  โดยที่ 9% ฟรุคโทสที่เก็บที่  $-20^{\circ}\text{C}$  นาน 21 วัน ทำให้เกิดรีโทรกราเดชันมากที่สุด (57%) และถึงแม้ว่ามอลโทเด็กซ์ทรินจะเพิ่มความเสถียรในการเก็บแต่ก็ยังคงพบว่าทำให้เกิดรีโทรกราเดชันในอาหารพวกแป้ง ฉะนั้นเมื่อวัดค่า  $T'_g$  ของตัวอย่างแล้วจะช่วยให้สามารถเลือกใช้อุณหภูมิแช่แข็งที่เหมาะสมและเกิดการรีโทรกราเดชันน้อยที่สุด

Leon และคณะ (1997) ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการแช่แข็งและอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่แข็งต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของโดขนมปังที่  $-18^{\circ}\text{C}$  โดยอบโดขนมปัง (dough) ที่ผ่านการแช่แข็งและโดที่ไม่ผ่านการแช่แข็ง ทำการเก็บที่อุณหภูมิต่างกัน จากนั้นนำมาให้ความร้อนอีกครั้ง โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter : DSC) เพื่อศึกษาว่าผลของการแช่แข็งและสภาวะการเก็บโดที่มีผลต่อการเกิดเจลาคีโนซิสและรีโทรกราเดชันของขนมปัง จากการศึกษพบว่า โดที่เก็บไว้ที่  $-18^{\circ}\text{C}$  หลังจากเก็บโดไว้ 50 วัน มีการเพิ่มขึ้นของค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลาคีโนซิส ( $\Delta H_g$ ) และหลังจากเก็บโดไว้ 230 วัน พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมละลายผลึก ( $T_0$ ) ของแป้งที่เกิดรีโทรกราเดชันลดลง และช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลาคีโนซิส ( $\Delta T_g$ ) เพิ่มขึ้น จากการทดลองยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของปฏิกริยารีโทรกราเดชันในแป้งเกี่ยวข้องกับระยะเวลาในการแช่แข็ง

Silverio และคณะ (2000) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของอะไมโลเพกติน (amylopectin) ในแป้งตัวอย่างแป้ง 10 ชนิดได้แก่ รัญพีซ 6 ชนิดคือข้าวสาลี, ข้าวไร, ข้าวบาร์เลย์ (ชนิดนอมอลอะไมโลส: normal — amylose, ไฮอะไมโลส: high — amylose และ แวกซี: waxy) มันฝรั่ง 3 ชนิดคือ ดีซีรี (Desiree), พริวเวนต์ (Prevalent), ไฮอะไมโลเพกติน (high — amylopectin) และถั่ว 1 ชนิดคือ ซิงเกิลพี (single pea)

โดยตรวจวัดการเกิดรีโทรกราเคชัน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC) ในวันที่ 2 และ 4 ของการเก็บตัวอย่างเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $6^{\circ}\text{C}$  ในวันแรก (24 ชม.) เพื่อเหมาะแก่การเกิดนิวคลีเอชัน (nucleation) วันที่ 2 เก็บไว้ที่  $30$  หรือ  $40^{\circ}\text{C}$  เพื่อเหมาะแก่การเกิดกระบวนการโพรพาเกชัน (propagation) และนำไปตรวจวัดส่วนการเก็บตัวอย่างในวันที่ 3 และ 4 จะทำการเก็บเช่นเดียวกับ 2 วันแรก โดยทำซ้ำอีก 1 รอบ

วงจรอุณหภูมิ (temperature cycling) มีผลอย่างมากต่อการกลับมารวมตัวเป็นผลึกใหม่ (รีคริสตัลไลเซชัน: recrystallization) ของอะไมโลเพกติน ตัวอย่างที่ผ่านวงจรอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแป้งชนิดเดียวกันซึ่งผ่านการเก็บที่  $6^{\circ}\text{C}$  2 วันพบว่าพลังงานความร้อน (เอนทัลปี: enthalpy:  $\Delta H$ ) ในการหลอมละลาย recrystallized amylopectin ลดลง และอุณหภูมิที่อะไมโลเพกตินเกิดกระบวนการโพรพาเกชัน (propagation) มีผลกระทบอย่างมากต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการหลอมละลาย (onset temperature:  $T_0$ )



## บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

## 3.1 วัตถุประสงค์และวิธีการทำข้าวต้มมัด

## 3.1.1 ส่วนผสมของข้าวต้มมัด

1.1.1 ข้าวเหนียว	800	กรัม
1.1.2 หัวกะทิจากมะพร้าวขูด	1	กิโลกรัม
1.1.3 น้ำตาลทราย	300	กรัม
1.1.4 เกลือ	20	กรัม
1.1.5 กล้วยน้ำว่า	1	หวี
1.1.6 ใบตอง		

## 3.1.2 วิธีทำข้าวต้มมัด

- 1.2.1 แช่วข้าวเหนียวทิ้งไว้ 3-4 ชั่วโมง เสร็จแล้วพักไว้ให้สะเด็ดน้ำ
- 1.2.2 ตั้งกระทะทองเหลือง นำกะทิ น้ำตาลทรายและเกลือมาคนให้เข้ากัน ใส่ข้าวเหนียวลงไป กวนต่อไปจนแห้ง ใช้ไฟอ่อนข้างอ่อน
- 1.2.3 ฉีกใบตองกว้าง 5 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว ตัด 2 ชั้น ให้ขนาดใกล้เคียงกัน
- 1.2.4 วางข้าวเหนียวแล้วจึงใส่กล้วย เอาข้าวเหนียวทับอีกครั้ง แล้วห่อจับหัวท้ายพับเข้าหากัน นึ่ง 40 – 45 นาที

## 3.2 การทดลอง

## 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส รุ่น TA-XT2i
- หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร พร้อมก้านต่อ
- กระบอกพลาสติก
- ฐานรอง
- ค้อนน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม
- เครื่องชั่ง

### 3. 2.2 วิธีการทดลอง

ปัจจัยมีศึกษามี 2 ปัจจัย คือ

1. อุณหภูมิการเก็บที่  $0^{\circ}\text{C}$  ,  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$
2. อุณหภูมิเริ่มต้นการแช่แข็งขณะร้อน(อุณหภูมิประมาณ  $50^{\circ}\text{C}$  ) และขณะเย็น (อุณหภูมิห้อง)

#### 3.2.2.1 การวัดลักษณะเนื้อสัมผัส

วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวโดยใช้เครื่อง Texture analyser แบบ Back extrusion (BE) ของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่แข็ง ( $0^{\circ}\text{C}$  ,  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  ) แต่ละตัวอย่าง ๆ ละ 2 ครั้ง ใน วันที่ 3 , 6 , 15 , 22 และวันที่ 28 ของการแช่แข็ง โดยละลายน้ำแข็งของข้าวต้มมัดจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำมาวัดในแต่ละตัวอย่างค่าแรงที่อ่านได้มีหน่วยเป็น “นิวตัน” นำค่าแรงสูงสุดที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าความแข็ง

#### 3.2.2.2 การทดสอบประสาทสัมผัส

นำข้าวต้มมัดแช่แข็งมาละลายน้ำแข็ง (thaw) แล้วนำไปนึ่งนาน 15 นาที ทั้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง หั่นข้าวต้มมัดเป็นชิ้น ๆ นำไปให้ผู้ทดสอบ (tester) ทำการทดสอบ ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 12 คนและให้ผู้ทดสอบประเมินคุณภาพทางด้านความแข็งและความชอบโดยรวม ทำการวิเคราะห์ในวันที่ 3 , 6 , 15 , 22 และวันที่ 28 ของการแช่แข็ง

ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS แบบ Factorialระดับ  $3 \times 2$  และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี back extrusion

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงสูงสุด (นิวตัน) ของข้าวต้มมัดที่เก็บ 0 °C, -10 °C และ -20 °C และอุณหภูมิเริ่มต้นการแช่แข็งขณะร้อนและเย็น

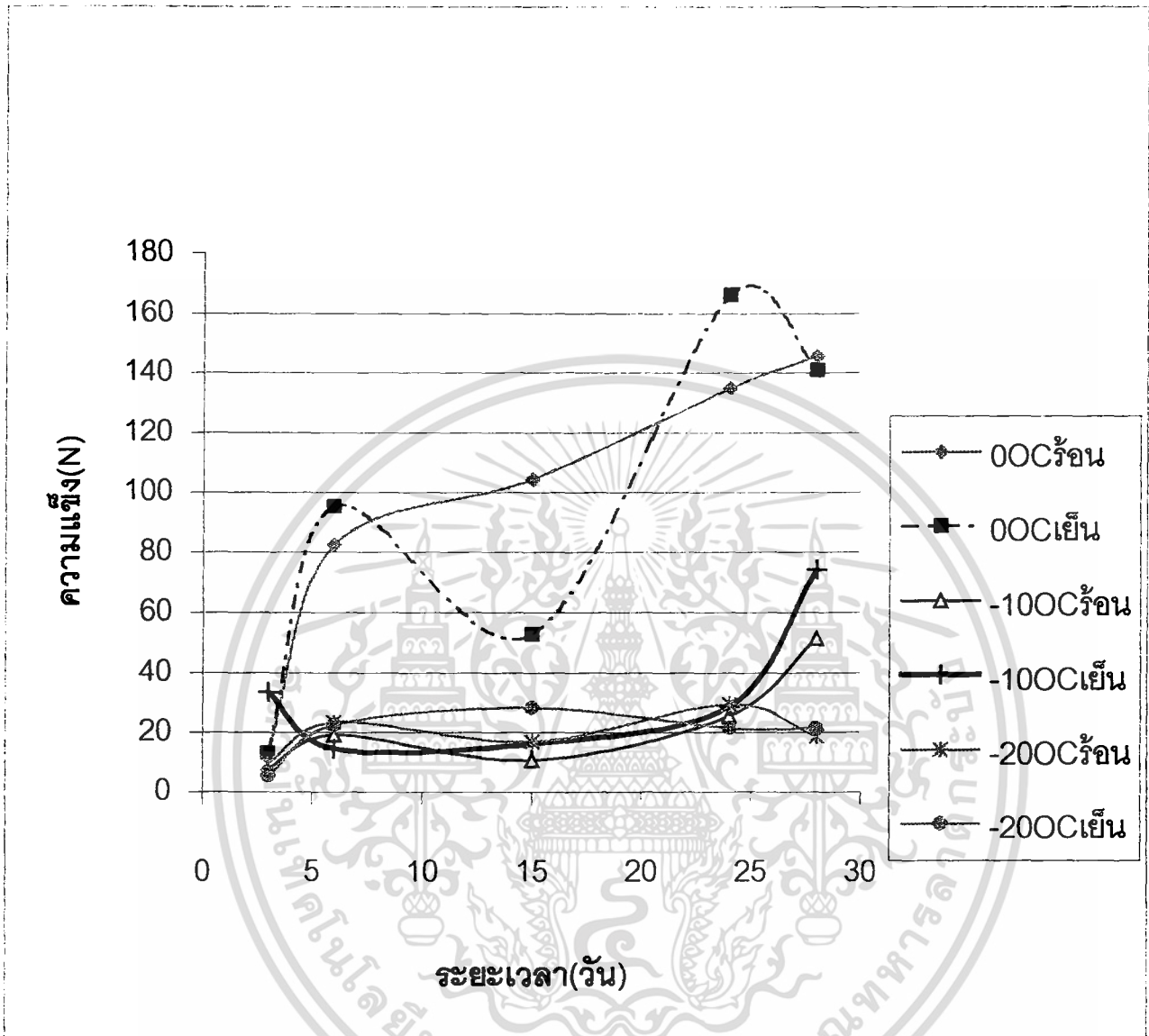
ระยะเวลา แช่แข็ง (วัน)	แรง(นิวตัน)					
	0 °C		-10 °C		-20 °C	
	ร้อน	เย็น	ร้อน	เย็น	ร้อน	เย็น
3	13.14	13.14	7.88	33.46	9.51	5.4
6	82.46	95.26	19.12	14.58	23.41	22.41
15	104.33	52.93	10.75	16.24	16.91	28.27
24	134.86	166.27	25.43	28.73	29.33	21.4
28	145.83	141.11	51.4	74.26	18.63	21.41

จากผลการทดลองพบว่า

เมื่อระยะเวลาการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ผลลักษณะข้าวต้มมัดจะแข็งขึ้น แต่พบว่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นในช่วง 3 – 6 วันแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเห็นได้ชัดเจนในข้าวต้มมัดที่มีอุณหภูมิแช่แข็งที่ 0 °C

หลังจากแช่แข็ง 6 วัน ที่อุณหภูมิ -10 °C มีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในอัตราที่ต่ำและค่อนข้างคงที่จนถึงวันที่ 22 หลังจากนั้นความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ -20 °C มีความแข็งเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำและค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1

อย่างไรก็ตามพบว่าที่อุณหภูมิแช่แข็งเดียวกัน ไม่พบความแตกต่างของค่าความแข็งของข้าวต้มมัดที่เก็บที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกัน

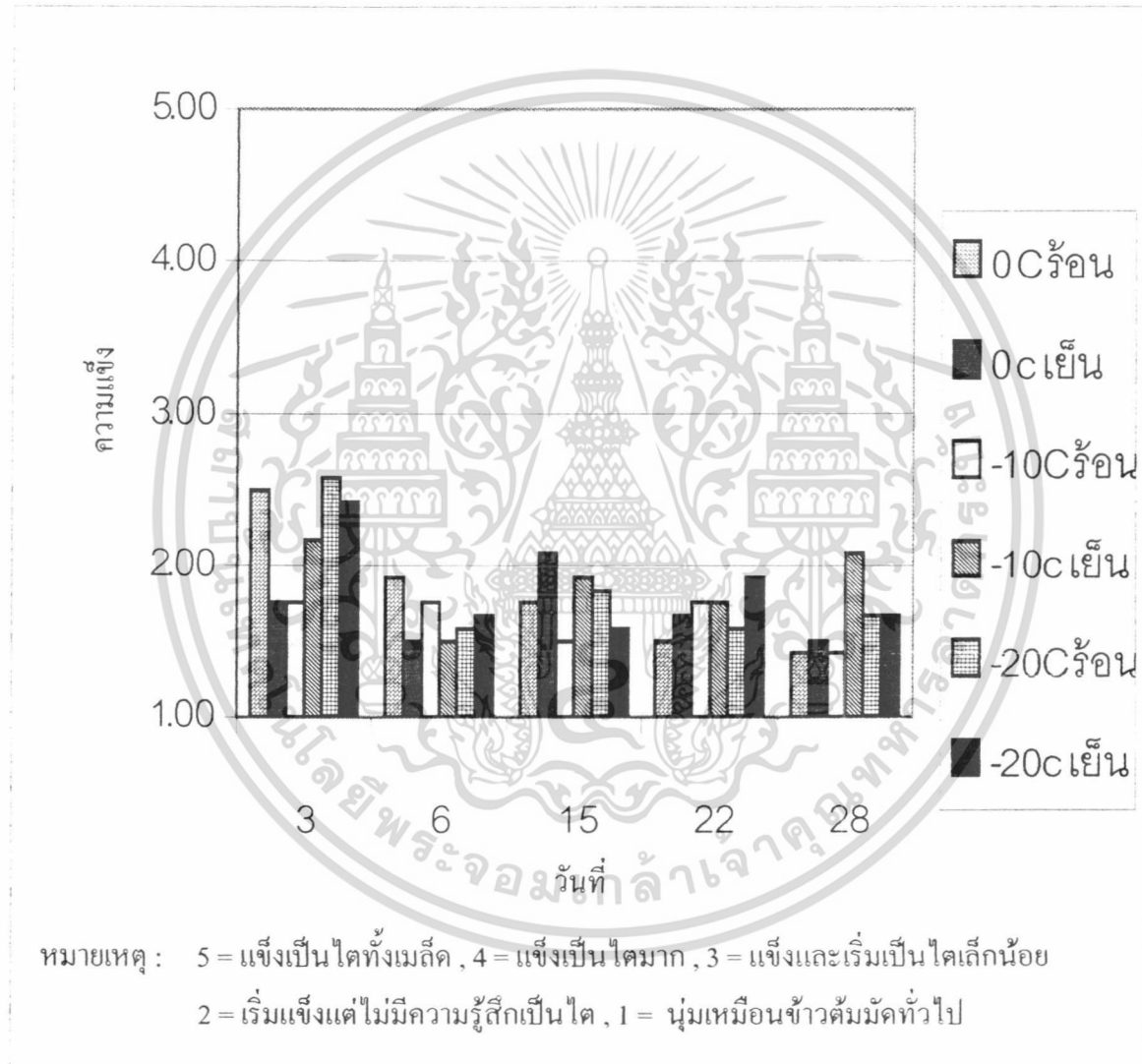


ภาพที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของข้าวต้มมัดเก็บที่อุณหภูมิ 0 °C .-10 °C และ -20 °C เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยวิธี Back Extrusion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

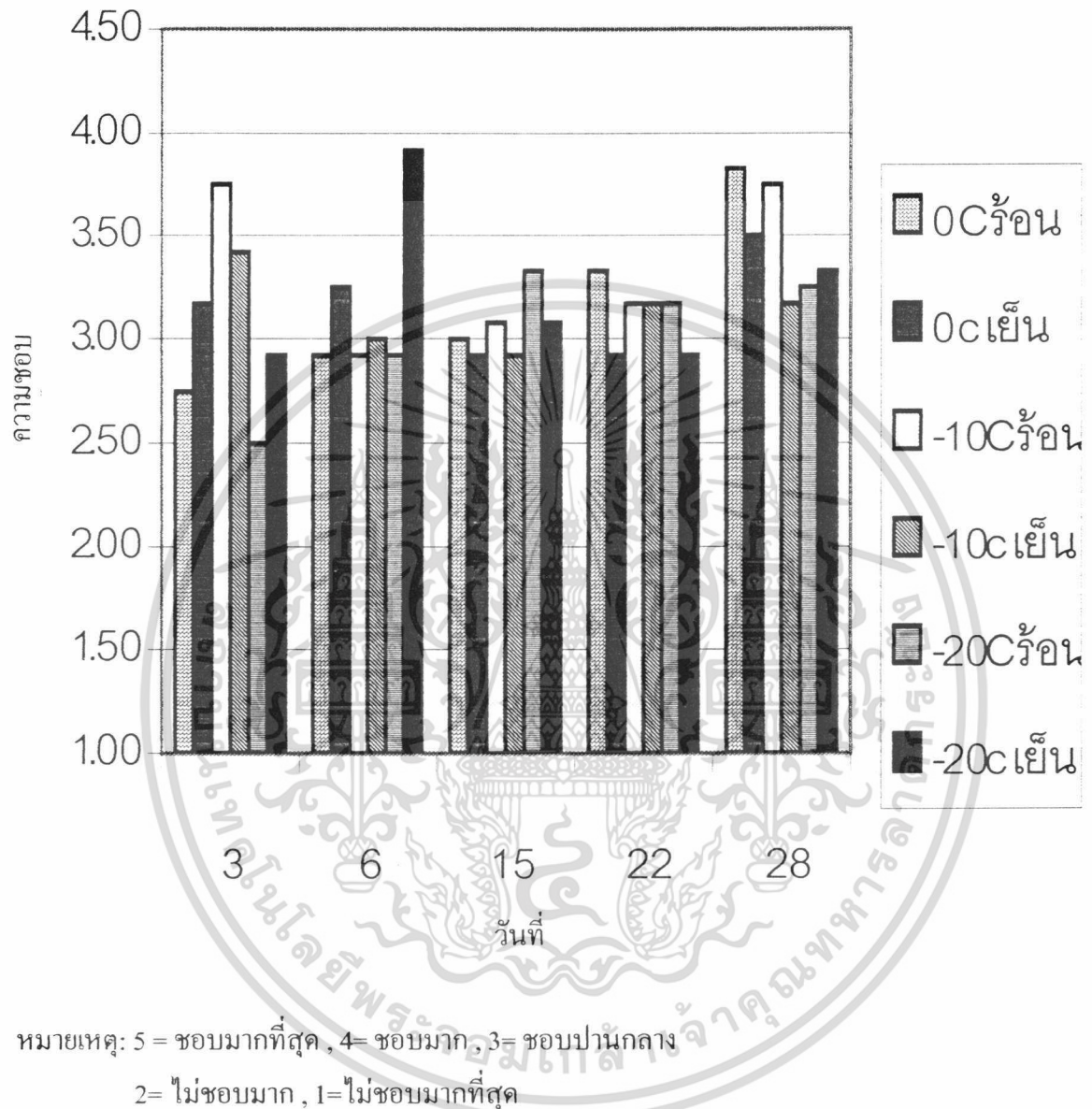
## 4.2 ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส

ข้าวต้มมัดที่เก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระยะเวลาต่างกัน นำมาละลายน้ำแข็งและนำไปนี้ึ่งเสิร์ฟพร้อมกันให้ผู้ทดสอบทำการทดสอบทางด้านความแข็งโดยใช้การทดสอบแบบ Scoring ให้คะแนน 5 ระดับ โดย 5 คือ แข็งเป็นไต่ทั้งเมล็ด และ 1 คือ นุ่มเหมือนข้าวต้มมัดทั่วไป และการยอมรับโดยรวม โดยใช้การทดสอบแบบ Hedonic scale 5 ระดับ โดย 5 คือ ชอบมากที่สุด และ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด



ภาพที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความชอบโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง พบว่า

ค่าคะแนนความแข็งในช่วง 1.5-2 แสดงว่า ผู้ทดสอบรู้สึกว่าการอัดเม็ดเริ่มแข็งแต่ไม่มีความรู้สึกเป็นไต

ค่าคะแนนความชอบ โดยรวมอยู่ในช่วง 3-4 แสดงว่า ผู้ทดสอบชอบปานกลางถึงชอบมาก ที่ทุกอุณหภูมิการเก็บและระยะเวลาเก็บ

จากการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี back extrusion พบว่าข้าวต้มมัดมีความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งชี้ให้เห็นว่าเกิดรีโทรกราเดชันขึ้น แต่เมื่อนำไปให้ความร้อนอีกครั้ง (reheat) โดยใช้นาน 15 นาที พบว่าข้าวต้มมัดที่เกิดรีโทรกราเดชันจะมีเนื้อสัมผัสเหมือนข้าวต้มมัดทั่วไป อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบไม่สามารถรับรู้ได้



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการแช่แข็งไม่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชัน แต่อุณหภูมิในการแช่แข็งมีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันคือ ที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  เกิดรีโทรกราเดชันมากที่สุด และที่  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  มีการเกิดรีโทรกราเดชันที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีอัตราการเกิดที่น้อยกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  ส่วนระยะเวลาการแช่แข็ง 6 วันแรกจะเกิดรีโทรกราเดชันอย่างรวดเร็วของทุกอุณหภูมิ และเมื่อเวลาในการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ที่  $0^{\circ}\text{C}$  เกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มขึ้น ส่วนที่  $-10^{\circ}\text{C}$  และ  $-20^{\circ}\text{C}$  การเกิดรีโทรกราเดชันค่อนข้างคงที่ หลังจากนำข้าวต้มมัดมาคืนรูปแล้วนำมาทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ผ่านการนึ่งใหม่ๆ



### ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าต้องการเก็บข้าวต้มมัดในระยะไม่เกิน 28 วัน สามารถเก็บที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  ได้ เพื่อประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย เนื่องจากเมื่อนำข้าวต้มมัดมาทดสอบทางประสาทสัมผัสแล้วเนื้อสัมผัสไม่ต่างไปจากข้าวต้มมัดที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ
2. ถ้าต้องการเก็บข้าวต้มมัดในระยะเวลาเกินกว่า 28 วัน ควรจะเก็บข้าวต้มมัดที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  เพราะอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันยังคงที่และเกิดน้อย
3. ควรมีการศึกษาการแช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลาเกินกว่า 28 วัน เพื่อตรวจสอบการเกิดรีโทรกราเดชัน



## เอกสารอ้างอิง

- 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 Food World. 33 : 306-311.
- Borchard, W. 1996. Rheologische untersuchungen zum einfluß von hydrokolloiden auf die  
Geffrier-tau-stabilitat von starkek leistem. Starch/Starke. 48 : 52-57.
- Kluciniec, J.D. and Thomson, D.B. 1999. Amylose and amylopectin interact in retrogradation  
of dispersed high-amylose starch. Cereal Chem. 76(2) : 282-291.
- Leon, A. E. 1997. Effect of freezing and frozen storage on the gelation retrogradation  
of amylopectin in dough baked in a differential scanning calorimetry. Food  
Research International. 36 : 357-368.
- Silverio, J. Et al. 2000. The effect of temperature cycling on the amylopectin  
retrogradation of starches with different amylopectin unit chain length distribution.  
Carbohydrate Polymer. 42 : 175-184.
- Slade, L. and Levine, H. 1991. Beyond water activity : recent advavces based on and alternative  
approach to the assessment of food quality and safety. Crit. Rev. Food Sci. Nutri. 30 : 115-  
360
- Tako, M. and Hizukuri, S. 2000. Retrogradation mechanism of rice starch. Cereal Chem.  
77(4): 473-477.
- Wang Y. J. and Jane J. 1994. Correlation between glass transition temperature  
and starch retrogradation in the presence of sugars and maltodextrin. Cereal  
Chem. 71(6) : 527-531.



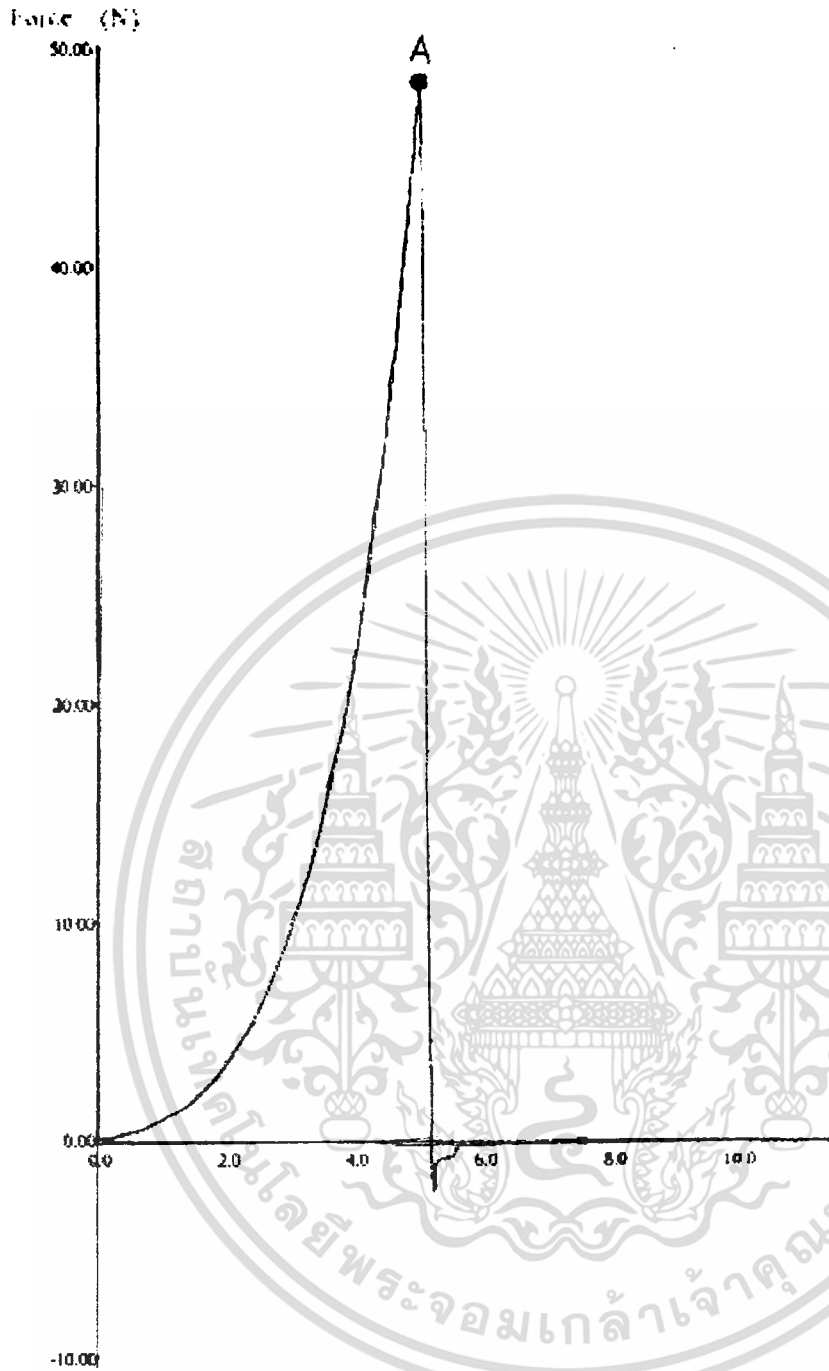
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี back extrusion

วัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Back Extrusion (BE) เพื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวต้มมัดโดยใช้ Back Extrusion รุ่น TA-XT2i ขนาดรับน้ำหนัก 5 กิโลกรัม และอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม ใช้โปรแกรม Back Extrusion ทดสอบความแข็ง (Hardness)

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวต้มมัดแช่แข็งทำโดยนำข้าวต้มมัดที่ผ่านการแช่แข็งมาละลายน้ำแข็ง (thaw) ซึ่งเฉพาะส่วนที่เป็นข้าวเหนียว 10-15 กรัม บรรจุตัวอย่างลงใน test cell รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร นำไปวัดด้วยวิธี Back Extrusion ที่มีหัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ซึ่งต่อกับ load cell ของเครื่อง ความเร็วของหัววัดที่เคลื่อนที่ลงก่อนสัมผัสข้าวเหนียว (Pre-test speed) 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วของหัววัดขณะที่เคลื่อนที่ลงในเนื้อข้าวเหนียว (Test speed) 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วของหัววัดขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจากข้าวเหนียว (Post-test speed) 10.0 มิลลิเมตร/วินาที และระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ลงในเนื้อข้าวเหนียวเท่ากับร้อยละ 50 (50% strain)



ภาพ ก.1 ตัวอย่างผลการวัดความแข็งแรงของข้าวต้มมัดด้วยเครื่องวัด texture analysis วิธี back

Extrusion

A คือ ค่าแรงสูงสุด (นิวตัน) ที่วัดจากข้าวต้มมัดหลังการคืนรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัดที่ระยะการเก็บ 3 วัน

ผลิตภัณฑ์		ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
0 °C	ร้อน	2.50 ± 0.90	2.75 <sup>bc</sup> ± 0.87
	เย็น	1.75 ± 0.87	3.17 <sup>abc</sup> ± 1.11
-10 °C	ร้อน	1.75 ± 0.87	3.70 <sup>a</sup> ± 0.96
	เย็น	2.17 ± 1.03	3.42 <sup>ab</sup> ± 0.10
-20 °C	ร้อน	2.58 ± 0.10	2.50 <sup>c</sup> ± 0.80
	เย็น	2.42 ± 0.67	2.92 <sup>bc</sup> ± 0.67

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งและความชอบ โดยรวมของข้าวต้มมัดที่ระยะการเก็บ 6 วัน

ผลิตภัณฑ์		ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
0 °C	ร้อน	1.92 ± 0.80	2.92 ± 0.79
	เย็น	1.50 ± 0.67	3.25 ± 1.14
-10 °C	ร้อน	1.75 ± 0.62	2.92 ± 0.79
	เย็น	1.50 ± 0.52	3.00 ± 0.95
-20 °C	ร้อน	1.58 ± 0.79	2.92 ± 1.08
	เย็น	1.67 ± 0.65	3.42 ± 0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าความแข็งและความชอบโดยรวมของข้าวคั่วมัดที่ระยะการเก็บ 15 วัน

ผลิตภัณฑ์		ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
0 °C	ร้อน	1.75 ± 0.96	3.00 ± 0.85
	เย็น	2.08 ± 0.79	2.92 ± 0.67
-10 °C	ร้อน	1.50 ± 0.52	3.08 ± 0.67
	เย็น	1.92 ± 0.90	2.92 ± 0.90
-20 °C	ร้อน	1.83 ± 1.11	3.33 ± 1.15
	เย็น	1.58 ± 0.79	3.08 ± 0.90

ตารางที่ ข.4 ค่าความแข็งและความชอบโดยรวมของข้าวคั่วมัดที่ระยะการเก็บ 22 วัน

ผลิตภัณฑ์		ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
0 °C	ร้อน	1.50 ± 0.67	3.33 ± 0.49
	เย็น	1.67 ± 0.65	2.92 ± 0.51
-10 °C	ร้อน	1.75 ± 0.75	3.17 ± 1.11
	เย็น	1.75 ± 0.87	3.17 ± 0.72
-20 °C	ร้อน	1.58 ± 0.10	3.17 ± 0.94
	เย็น	1.92 ± 1.16	2.92 ± 1.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่าความแข็งและความชอบโดยรวมของข้าวคั้ม่มัดที่ระยะการเก็บ 28 วัน

ผลิตภัณฑ์		ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
0 °C	ร้อน	1.42 ± 0.67	3.83 ± 0.94
	เย็น	1.50 ± 0.90	3.50 ± 0.67
-10 °C	ร้อน	1.42 ± 0.51	3.75 ± 0.62
	เย็น	2.08 ± 0.10	3.17 ± 0.94
-20 °C	ร้อน	1.67 ± 1.07	3.25 ± 0.96
	เย็น	1.67 ± 0.78	3.33 ± 0.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## แบบประเมินผลทางประสาทสัมผัส

(Hedonic Scaling Test)

ชื่อผู้ทดสอบชิม ..... วันที่ .....

ชื่อผลิตภัณฑ์ ข้าวต้มมัดแช่แข็ง

คำชี้แจง โปรดทดสอบตัวอย่างต่อไปนี้ และให้ระดับความชอบและไม่ชอบต่อผลิตภัณฑ์ ข้าวต้มมัดแต่ละตัวอย่าง ใช้สเกลที่เหมาะสมเพื่อแสดงให้เห็นว่าท่าน ได้อธิบายความรู้สึกชอบและไม่ชอบในระดับใด โปรดให้เหตุผลในการอธิบายความรู้สึกของท่านด้วย การแสดงความรู้สึกของท่านอย่างแท้จริงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลองเป็นอย่างมาก

กำหนดการให้คะแนน

- |                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| 5 = แข็งเป็นไตทั้งหมด                 | 5 = ชอบมากที่สุด    |
| 4 = แข็งเป็นไตมาก                     | 4 = ชอบมาก          |
| 3 = แข็งและเริ่มเป็นไตเล็กน้อย        | 3 = ชอบปานกลาง      |
| 2 = เริ่มแข็งแต่ไม่มีความรู้สึกเป็นไต | 2 = ไม่ชอบมาก       |
| 1 = นุ่มเหมือนข้าวต้มมัดทั่วไป        | 1 = ไม่ชอบมากที่สุด |

ระดับความชอบ	ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง					
	215	548	102	339	451	289
ความแข็ง	.....	.....	.....	.....	.....	.....
ความชอบรวม	.....	.....	.....	.....	.....	.....

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ประวัติผู้เขียน

1. นายกฤษณะ วัชรเกียรติศักดิ์ เกิดที่ จ. เพชรบุรี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพรหมมานุสรณ์ จ.เพชรบุรี ศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. นางสาวจตุพร สอนศรีนุสรณ์ เกิดที่ จ. ลำพูน จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนส่วนบุญโญปถัมภ์ ลำพูน ศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. นายอนิรุช นุญมาเลิศ เกิดที่กรุงเทพฯ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางกะปิ กทม. ศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้