



วิทยานิพนธ์

ผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทาง
เคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF SUCROSE AND SODIUM CHLORIDE ON PHYSICO-CHEMICAL
PROPERTIES OF CASSAVA STARCH

นางสาวสุจิตรา วงษ์ประยูร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพ

สาขา

เทคโนโลยีชีวภาพ

ภาควิชา

เรื่อง ผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ
ของแป้งมันสำปะหลัง

Effect of Sucrose and Sodium Chloride on Physico-chemical Properties of
Cassava Starch

นามผู้วิจัย นางสาวสุจิตรา วงษ์ประยูร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด, Dr.Ing.)

กรรมการ (นางคุณ เจริญพร
อาจารย์เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, Ph.D.)

กรรมการ (ดร. อ. ๒๓
อาจารย์ปรจมา จาตกานนท์, Ph.D.)

กรรมการ (ดร. อ. ๒๓
รองศาสตราจารย์วิไล สันติโสภาสรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา (อ. ๒๓
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัตน์ วาณิชศรีรัตน, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 22 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

Effect of Sucrose and Sodium Chloride on Physico-chemical Properties of Cassava Starch

โดย

นางสาวสุจิตรา วงษ์ประยูร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

พ.ศ. 2550

สุจิตรา วงษ์ประยูร 2550: ผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ
ของแป้งมันสำปะหลัง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด,
Dr. Ing. 156 หน้า

ส่วนประกอบอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งจะมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของแป้ง ปริมาณน้ำ และสภาวะในการเก็บรักษา (อุณหภูมิและระยะเวลา เป็นต้น) รวมทั้งชนิดและความเข้มข้นของส่วนประกอบดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหารต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้ง โดยตรวจสอบลักษณะการพองตัว สมบัติความหนืด สมบัติวิทยาการไหล การเกิดเจลในเซชัน รีโทรเกรเดชัน การเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็ง อุณหภูมิกลาสรานติชัน (T_g) ลักษณะโครงสร้างผลึกและลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ โดยพบว่าแป้งมันสำปะหลังพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 30 และความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 สอดคล้องกับอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยาการไหลขณะให้ความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ ค่าความหนืดต่ำสุดค่าความหนืดสุดท้ายและค่าการคืนตัวของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลและเกลือเพิ่มขึ้น เจลแป้งมันสำปะหลังรีโทรเกรดได้ดีที่สุดเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และไม่พบการรีโทรเกรดที่ทุกระดับความเข้มข้นของน้ำตาลและเกลือเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และพบว่าน้ำตาลซูโครสมีแนวโน้มในการส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่เกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลในการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้ง โดยการยับยั้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น การยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบอาจเป็นผลมาจากพันธะระหว่างอออนของเกลือกับโมเลกุลแป้งและน้ำ T_g ของเจลแป้งมันสำปะหลังและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้มีค่าลดลงในสภาวะที่มีน้ำตาลหรือเกลือ โดยน้ำตาลมีแนวโน้มที่จะทำให้ T_g ของเจลแป้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่เกลือมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อ T_g ของเจลแป้งในระหว่างการเก็บรักษา และพบว่าค่าความแข็งของเจลแป้งมีความสัมพันธ์กับระดับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้ง อิทธิพลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อการกระบวนการแปรรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์จากแป้ง ซึ่งจะมีบทบาทต่อคุณภาพและความคงทนระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบ

สุจิตรา วงษ์ประยูร
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

20 / มี.ค. / 50

Suchitra Wongprayoon 2007: Effect of Sucrose and Sodium Chloride on Physico-chemical Properties of Cassava Starch. Master of Science (Biotechnology), Major Field: Biotechnology, Department of Biotechnology. Thesis Advisor: Associate Professor Klanarong Sriroth, Dr. Ing. 156 pages.

Physico-chemical properties of starch can be markedly altered by the addition of other ingredients. Their effects are greatly dependent on starch types and concentrations, water contents, storage conditions (e.g. temperature and time) as well as their types and concentrations. This research aimed to analyze physico-chemical properties of cassava starch and its gel as influenced by sucrose and NaCl widely used as common ingredients in a variety of processed foods. Investigations of swelling characteristic, pasting properties, rheological properties, gelatinization, retrogradation, freezable water, glass transition, x-ray diffraction and textural properties of cassava starch suspensions and gels in various concentrations of sucrose solution (0, 10, 20 and 30%) and NaCl solution (0, 5, 10 and 15%) were performed. Swelling of cassava starch granules was observed at a higher temperature in the presence of increasing sucrose and NaCl. Increasing concentration of sucrose progressively shifted a pasting temperature of cassava starch to a higher temperature. When heated in NaCl solution up to 10%, pasting temperature of cassava starch increased and then decreased as NaCl concentration was further raised to 15% corresponding with rheological changes and gelatinization transition temperatures. Trough, final viscosity and setback of cassava starch were also raised with respect to increasing concentration of sucrose or NaCl. The maximum extent of retrogradation was observed in starch gels aged at 4°C, while significantly less change was found in sample aged at 25°C. Moreover, no retrogradation was detected in all samples kept at -18°C. Sucrose tended to slightly promote retrogradation of cassava starch aged at 4°C and 25°C whereas NaCl effectively prevented the retrogradation with increasing concentration. Inhibition of starch recrystallization by NaCl was possibly contributed to partial ionic bonds of ions with starch molecules and water. Glass transition temperature (T_g') of cassava starch gels was depressed and decreasing amount of freezable water was detected progressively by both sucrose and NaCl. Sucrose tended to increase, while NaCl slightly affected T_g' of cassava starch gels during storage. Hardness of starch gels was also found to increase relatively with increasing retrogradation extent. These effects of sucrose and NaCl on thermal transition and physico-chemical properties are of importance to the processing and properties of starch-based products and can play major roles in the quality and storage stability of cassava starch containing products.

Suchitra Wongprayoon
Student's signature


Thesis Advisor's signature

20 / 03 / 07

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ ดร. ปฐมา จาตุกานนท์ กรรมการสาขาวิชาเอก รศ.ดร. วิไล สันติโสภาสรี กรรมการสาขาวิชารอง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนทั้งตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง และขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ปริศนา สุวรรณาภรณ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และมูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบันพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ หน่วยแป้งทุกท่านที่ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ จนงานสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมด้านการศึกษาของข้าพเจ้าด้วยดีมาตลอด รวมทั้งขอขอบคุณผู้มีพระคุณที่มีได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

สุจิตรา วงษ์ประยูร

ตุลาคม 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและการวิจารณ์	53
สรุปผลการทดลอง	131
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	134
ภาคผนวก	143
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	144
ภาคผนวก ข Linear Viscoelastic Range	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	7
2 คุณลักษณะที่ต้องการสำหรับแป้งมันสำปะหลัง	12
3 ความหมายของคุณลักษณะเนื้อสัมผัสต่าง ๆ ในเชิงคุณภาพทางกายภาพจาก การทำ Texture Profile Analysis และในเชิงคุณภาพทางประสาทสัมผัส	27
4 ประโยชน์ของเกลือบางชนิดในอุตสาหกรรมอาหาร	39
5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	53
6 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส เข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	61
7 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	63
8 ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ $\tan \delta$ ของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 95 และ 25 องศาเซลเซียส	65
9 ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ $\tan \delta$ ของแป้งมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 95 และ 25 องศาเซลเซียส	68
10 อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลังใน สถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	71
11 อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลังใน สถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	73
12 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่ มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	76
13 ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มี น้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	ค่าคงที่สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-21 วัน จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami	80
15	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	83
16	ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	84
17	ค่าคงที่สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami	86
18	อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	88
19	ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	90
20	ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	92
21	อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	94
22	ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-21 วัน	98
24	อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	101
25	อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-21 วัน	102
26	อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	104
27	อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ของเจลเป็งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-21 วัน	106
28	สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	111
29	สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	123

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของอะมิโลส (ก) และอะมิโลเพกทิน (ข)	5
2 ลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด รวมทั้งส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน	7
3 วงแหวน (growth ring) ภายในเม็ดแป้ง (starch granule)	9
4 การจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้ง	10
5 รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของเม็ดแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน	11
6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนอสัณฐานและโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง ที่เกิดขึ้นขณะให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง	15
7 ระยะในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของเม็ดแป้ง	16
8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งกับน้ำ (30:70) (T_o = onset temperature, T_p = peak temperature, T_c = conclusion temperature)	18
9 ลักษณะกราฟความหนืดและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดด้วยเครื่อง RVA	20
10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด Recrystallization กับอุณหภูมิ กลาสทรานสิชันและอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก	22
11 กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)	26
12 Linear Viscoelastic (LVE) Range	29
13 แบบจำลอง Two-Plate-Model	30
14 แบบจำลอง Two-Plate-Model สำหรับการทดสอบ oscillatory test	31
15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบ oscillatory test ของวัสดุประเภทต่าง ๆ	31
16 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ที่แสดงพฤติกรรมของ viscoelastic materials	33
17 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	โครงสร้างผลึกของเกลือโซเดียมคลอไรด์และการละลายของเกลือโซเดียมคลอไรด์ ในน้ำในรูปของโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-)	40
19	กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำในเจลแข็ง และอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแข็งมันสำปะหลัง (T_g') ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	50
20	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา ที่กำลังขยาย 20 เท่า	54
21	ค่าร้อยละการกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	55
22	ลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%	56
23	การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น	57
24	ลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%	58
25	การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น	59
26	ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	60
27	ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	62
28	ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อน	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลัง ขณะทำให้เย็น	65
30	ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลัง ขณะให้ความร้อน	67
31	ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลัง ขณะทำให้เย็น	68
32	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	70
33	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	72
34	ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	75
35	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	77
36	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	79
37	ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือ โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน	84
39	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	86
40	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวของผลึกน้ำแข็งในน้ำแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	88
41	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	90
42	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป็งมันสำปะหลังหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	91
43	ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	92
44	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%	93
45	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	94
46	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ใน เจลแป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ-18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	97
48 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป็ง มันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	98
49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%	99
50 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	101
51 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%	103
52 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	105
53 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%	106
54 ลักษณะ X-ray diffraction pattern ของเม็ดแป็งมันสำปะหลังและเจลแป็ง มันสำปะหลังในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	107
55 ลักษณะของเจลแป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	110
57	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อค่าความแข็งของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	115
58	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ ของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	116
59	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความยืดหยุ่นของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	117
60	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความสามารถเกาะรวมตัวกันของ เจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	118
61	ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อค่าความเหนียวเป็นยางของ เจลแป้งมันสำปะหลังหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	119
62	ลักษณะของเจลแป้งมันสำปะหลังในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	120
63	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อค่าความแข็งของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	126
65	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	127
66	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความยืดหยุ่นของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	128
67	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความสามารถเกาะรวมตัวกันของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	129
68	ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อค่าความเหนียวเป็นยางของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน	130
ภาพผนวกที่		
ข1	Linear Viscoelastic Range ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ	155

ผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของ แป้งมันสำปะหลัง

Effect of Sucrose and Sodium Chloride on Physico-chemical Properties of Cassava Starch

คำนำ

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบกิ่งผลึกซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนในสถานะที่มีน้ำ โมเลกุลของเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและความหนืดเพิ่มขึ้น และเกิดการสูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกภายในโมเลกุล เมื่อได้รับความเย็น โครงสร้างโมเลกุลที่ถูกทำลายจะสามารถกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดเป็นแป้งเปียกหรือเจลซึ่งมีลักษณะขุ่น ใสและมีความหนืดเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพดังกล่าวทำให้มีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมแป้งตัดแปรรูป เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากแป้งในอุตสาหกรรมอาหารนอกจากจะนำมาเป็นวัตถุดิบในประกอบอาหารเพื่อการบริโภคโดยตรงแล้ว แป้งยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของแป้งในการเป็นสารให้ความหนืด ความคงตัวและให้เนื้อสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏและมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นโดยสามารถทำหน้าที่เป็น สารยึดติด (adhesive) สารยึดเกาะ (binding) สารทำให้อาหารขุ่น (clouding) สารทำให้เกิดฟิล์ม (film forming) สารป้องกันการคิ่นตัว (antistaling) สารทำให้เกิดเจล (gelling) สารให้ความคงตัว (stabilizer) และสารปรับเนื้อสัมผัส (texturizing agents) เป็นต้น (นิธิยา, 2545) นอกจากนี้ยังใช้ในการป้องกันการเสีรูปร่างของเนื้อสัมผัสอันเนื่องมาจากระบวนการในการผลิตต่าง ๆ เช่น กระบวนการแช่แข็ง (freezing) การคืนรูปร่างจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw) สถานะที่เป็นกรด กระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน (pasteurization) และสเตอริไรเซชัน (sterilization) เป็นต้น และใช้ป้องกันการเสีรูปร่างของเนื้อสัมผัสในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (shelf life) ให้นานขึ้น

เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งส่วนใหญ่มีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำ น้ำตาล กลีโกลิไซมัน โปรตีน รวมทั้งสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชผสมอยู่ด้วย โดยเฉพาะน้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่มักใช้ผสมในผลิตภัณฑ์เพื่อปรุงแต่งรสชาติและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของอาหาร น้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์จะมีผลต่อสมบัติของแป้งโดยเฉพาะสมบัติทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น ลักษณะการพองตัว การเกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization) และการเปลี่ยนแปลงความหนืด รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาเจลแป้งหรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) นอกจากนี้อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษายังมีผลต่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งในผลิตภัณฑ์ โดยส่งผลให้ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถือเป็นประเด็นหลักที่ต้องคำนึงถึงในการประกอบอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งนี้รายงานการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของน้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งที่ผ่านมายังไม่เป็นที่แน่ชัด และมีความขัดแย้งกันขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของน้ำตาลและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์ โครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง ปริมาณน้ำในระบบ รวมทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเจลแป้ง การศึกษาอิทธิพลของน้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ รวมทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งที่ได้ จะช่วยให้เกิดความเข้าใจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้คงคุณภาพตามต้องการอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งมันสำปะหลัง
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสและกลีโกลิไซเดียมกลอไรด์

การตรวจเอกสาร

1. แป้งมันสำปะหลัง

คำว่าแป้ง (starch) ในกระบวนการผลิตหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

แป้งมันสำปะหลัง (tapioca, cassava, manihot flour/starch) หมายถึง แป้งที่ทำจากหัวมันสำปะหลัง (*Manihot utilissima*) ลักษณะของแป้งเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (microscopic appearance) ประกอบด้วยเม็ดแป้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5 ถึง 35 ไมโครเมตร (0.005 ถึง 0.035 มิลลิเมตร) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521)

1.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) ที่เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส, amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน, amylopectin) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกันจึงทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

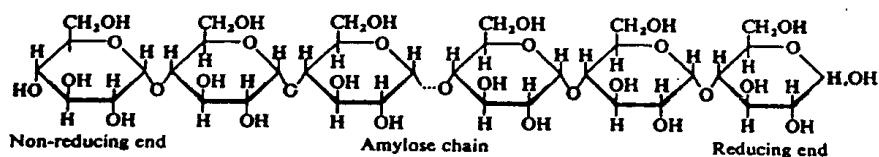
1.1.1 อะมิโลส (Amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส ประมาณ 200 ถึง 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - (1,4) glucosidic linkage ดังภาพที่ 1 (ก) น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 คาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันออกไป ขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ของอะมิโลสขึ้นกับชนิดของแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลังจะมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 หน่วย ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 0.3 ถึง 0.5 ของพันธะทั้งหมด

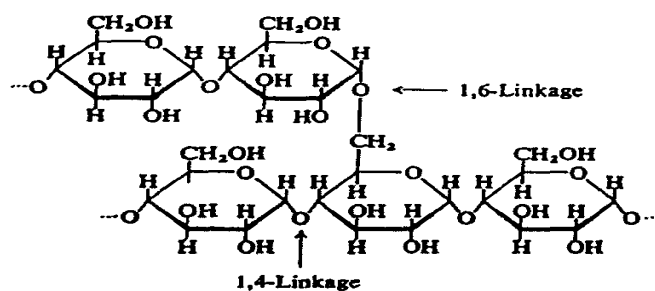
อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน ฟีนอล สารลดแรงตึงผิวหลายชนิดและไฮโดรคาร์บอน โดยสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำเนื่องจากอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) การที่อะมิโลสจะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิ และขนาดโมเลกุล สำหรับตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยอะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) และส่วนผลึก (crystalline regions) อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง (Oates, 1997)

ก)



ข)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะมิโลส (ก) และอะมิโลเพกทิน (ข)

ที่มา : Freach (1979)

1.1.2 อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)

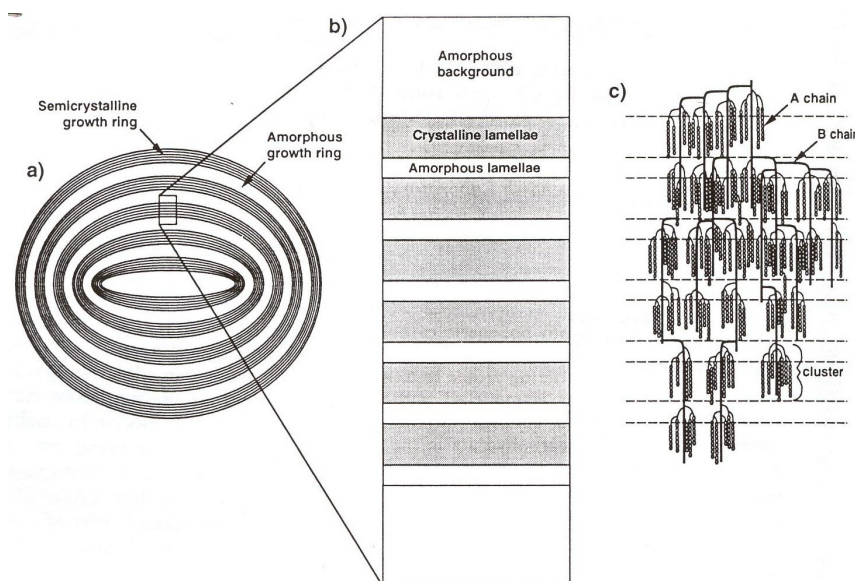
อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - (1,4) glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - (1,6) glucosidic linkage ดังภาพที่ 1 (ข)

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคินตัวต่ำเนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ A chain เป็นสายโซ่ที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) B chain มีโครงสร้างแบบกิ่ง เชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า C chain เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ที่เป็นอิสระและถูกแทนที่เพียงจุด C-6 (primary hydroxyl group) ซึ่งในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น เนื่องจากการเชื่อมต่อ A chain, B chain และ C chain ภายในโมเลกุลของอะมิโลเพกทิน ด้วยพันธะ α -(1,6) glucosidic linkage ซึ่งมี C chain เพียงหนึ่งสายโซ่ต่อโมเลกุล ดังนั้นอัตราส่วนของ A chain และ B chain จึงมีความสำคัญเนื่องจากการแสดงถึง degree of multiple branching ของโมเลกุล ซึ่งอะมิโลเพกทินจะมีอัตราส่วนของ A chain ต่อ B chain ประมาณ 1.5-2.6 : 1

ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า ส่วนผลึก (crystalline regions) และบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) โครงสร้างของอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด รวมทั้งส่วนผลึก และส่วนอสัณฐาน แสดงดังภาพที่ 2

อะมิโลเพกทินในแป้งมันสำปะหลัง สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80-90 ประกอบด้วยกลุ่ม (cluster) เดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10-20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สายทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งการเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน (Oate, 1997) สำหรับสมบัติที่แตกต่างกันของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด รวมทั้งส่วนผลึก และส่วนอสัณฐาน

ที่มา : Waigh *et al.* (1996)

ตารางที่ 1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α - (1,4)	α - (1,4) และ α - (1,6)
ขนาดโมเลกุล	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะ จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

1.1.3 สารตัวกลาง (Intermediate material)

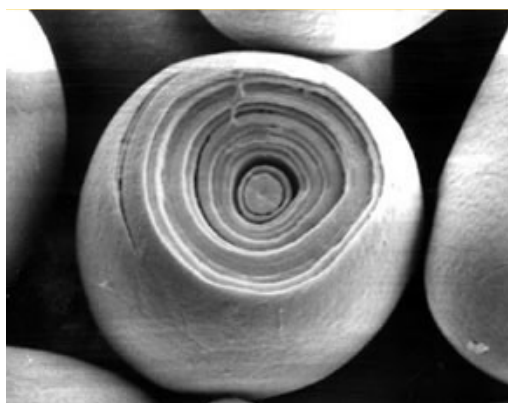
โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักภายในแป้งจะประกอบด้วยอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ในส่วนของสารตัวกลางนี้จะพบในแป้งบางชนิดเท่านั้น ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทินแต่มากกว่าอะมิโลส (Rupp and Schwartz, 1988) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่เป็นกึ่งก้ำกึ่งปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช (Guilbot and Mercier, 1985)

1.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน (growth ring) หยาบแน่น ดังภาพที่ 3 ซึ่งสังเกตได้จากการตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) ลักษณะเม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย จากโครงสร้างของวงแหวนดังภาพที่ 4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากจุดศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนปลายที่มีหมู่วิถีเชิง (reducing end) ของโมเลกุลแป้ง มีส่วนปลายที่ไม่มีหมู่วิถีเชิง (non-reducing end) ของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแผ่กระจายออกไป (Oates, 1997) จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะมิโลเพกทินอยู่ในส่วนอสังฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก โดยขนาด รูปร่าง และลักษณะของเม็ดแป้งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

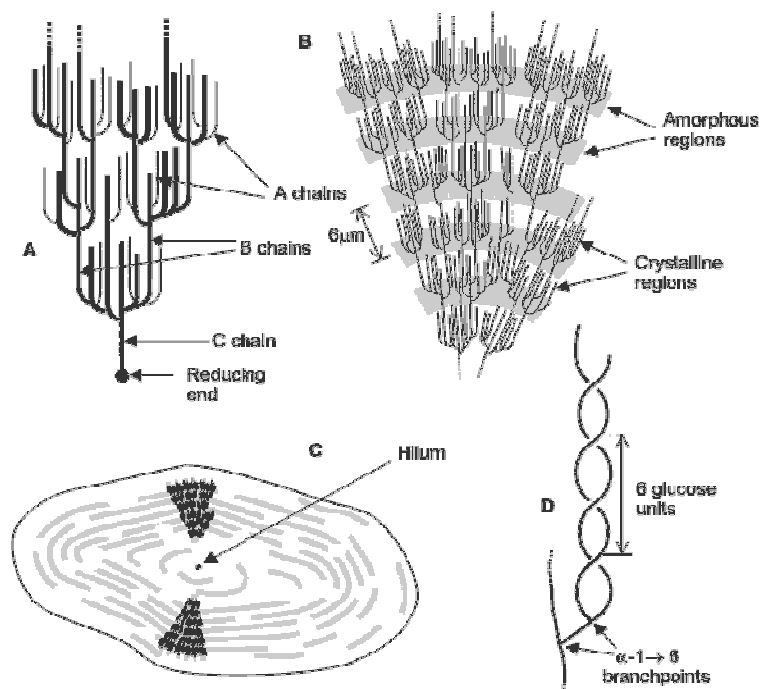
เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนผลึกและส่วนอสังฐาน สายโซ่สั้นของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ ซึ่งบางส่วนของเกลียวเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนอสังฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) โครงสร้างผลึกนี้จะเป็นส่วนที่ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงคงรูปร่างของเม็ดแป้งไว้ ส่วนอสังฐานจะเป็นส่วนที่ยืดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกัน และเป็นส่วนที่สร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดแป้ง (ปิติพร, 2546) ดังนั้นโครงสร้างผลึกของสายอะมิโลเพกทินจึงเป็นส่วนหลักในการแสดงค่าความเป็นผลึกให้แก่เม็ดแป้ง (วรารัตนา, 2544) ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ได้แก่ อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน น้ำหนักโมเลกุล ระดับกึ่งก้ำก้ำ และความยาวของสายโซ่ภายนอกของอะมิโลเพกทิน โดยขึ้นอยู่กับ

แหล่งของแป้ง ซึ่งแป้งดิบมีโครงสร้างผลึกร้อยละ 15-45 สำหรับแป้งมันสำปะหลังมีโครงสร้างผลึกร้อยละ 24 เนื่องจากโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างแน่น ดังนั้นการเคลื่อนที่ของสารเคมีเข้าไปภายในเมล็ดแป้งจึงยาก ส่วนนี้จึงเกิดปฏิกิริยาต่ำ อย่างไรก็ตามบริเวณพื้นผิวของเมล็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยช่องเล็ก ๆ จำนวนมากทำให้สารเคมีสามารถแทรกเข้าไปภายในเมล็ดแป้งได้ เนื่องจากส่วนอณูฐานซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ และส่วนกลางของเมล็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกเล็กน้อย ทำให้สารเคมีแทรกเข้าไปภายในโมเลกุลได้ง่ายกว่า จึงเป็นไปได้ที่สารเคมีสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากและเร็วกว่าบริเวณพื้นผิวของเมล็ดแป้ง แต่ถ้าเมล็ดแป้งไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ สารเคมีจะไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในโมเลกุลได้ ดังนั้นน้ำจะทำให้เมล็ดแป้งพองตัวและช่วยให้สารเคมีแทรกเข้าไปภายในเมล็ดแป้งได้ (วชิราพรณ, 2543)



ภาพที่ 3 วงแหวน (growth ring) ภายในเมล็ดแป้ง (starch granule)

ที่มา : Oates (1997)



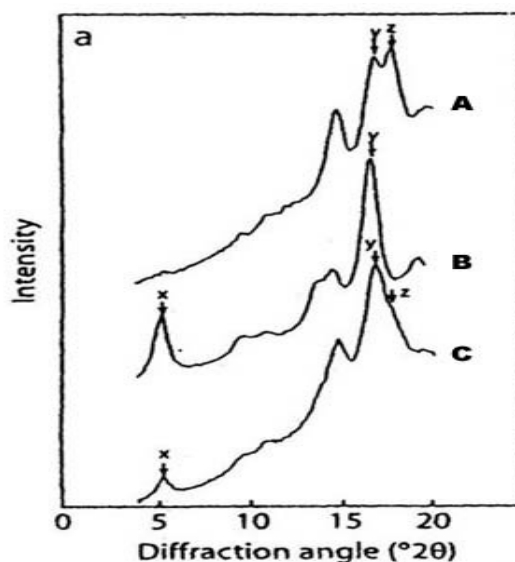
ภาพที่ 4 การจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้ง

ที่มา : Coultate (2002)

เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (A-type) เช่น แป้งจากธัญพืชและราก ถ้าเรียงตัวกันหลวม ๆ จะเกิดผลึกแบบ B (B-type) เช่น แป้งจากพืชหัว ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (C-type) เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว (กล้านรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) นอกจากผลึกแบบ A, B และ C แล้ว บางครั้งยังปรากฏลักษณะผลึกแบบ V (V-type) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนที่เกิดจากการจับกันของอะมิโลสกับแอลกอฮอล์ที่เป็นเส้นตรง ไอโอดีน หรือกรดไขมัน ลักษณะผลึกแบบ V จะพบในแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 เช่น ในแป้งข้าวโพดที่มีการดัดแปลงพันธุกรรม (ปีติพร, 2546) แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 แบบ เช่น แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกที่ต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน และสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ (wide angle x-ray diffraction, WAXS) ซึ่งแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (x-ray diffraction) ต่างกัน ดังภาพที่ 5

แป้งที่มี x-ray diffraction pattern ชนิด A-type ไม่มีพีคที่มุมหักเห (diffraction angle) 5.6° แต่มีพีคที่มุมหักเห 17° และ 17.9° และมีพีคเดี่ยว (singlet) ที่มุมหักเห 23° แป้งที่มี x-ray diffraction pattern ชนิด B-type จะมีพีคขนาดเล็กที่มุมหักเห 5.6° มีพีคที่มุมหักเห 17° แต่ไม่มีพีคที่มุมหักเห 17.9° และมีพีคคู่ (doublet) ที่มุมหักเห 23° ส่วนแป้งที่มี x-ray diffraction pattern ชนิด C-type จะมีลักษณะของกราฟอยู่ระหว่าง A-type และ B-type คือ จะมีพีคขนาดเล็กที่มุมหักเห 5.6° และมีพีคที่มุมหักเห 17° และ 17.9° (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546; นิตี, 2543)

เม็คแป้งจะมีคุณสมบัติในการทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (polarized light) และเกิด cross pattern ที่เรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) แขนของ cross pattern จะตัดกันที่ตำแหน่ง hilum สายของพอลิเมอร์จะตั้งฉากกับพื้นผิวของเม็คแป้ง พื้นที่มืดที่เห็นเมื่อส่องเม็คแป้งด้วย cross-nicol prism ภายใตแสงโพลาไรซ์ เป็นตำแหน่งเฉื่อยของสายพอลิเมอร์ของแป้งเมื่ออยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับแสงโพลาไรซ์ แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็คแป้งเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีสายพอลิเมอร์บางสายที่ไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับแสงโพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิดระนาบแสง และจะเห็นการส่องสว่างของแสงผ่านทาง nicol prism ตัวที่สอง (Wivinis and Maywald, 1986)



ภาพที่ 5 รูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ของเม็คแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน
ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

1.3 ลักษณะของเป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะทั่วไปของเป้งมันสำปะหลัง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 27-2521 กำหนดไว้ว่า เป้งมันสำปะหลังต้องเป็นผงละเอียดมีสีขาวหรือสีครีมอ่อน ไม่เกิดการหมัก ไม่เหม็นอับหรือไม่มีกลิ่นน่ารังเกียจ ไม่มีแมลง สารแปลกปลอมอื่น ๆ ปะปน และยังต้องมีลักษณะต่าง ๆ ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเป้งมันสำปะหลังกำหนด ซึ่งแบ่งตามคุณภาพของเป้งมันสำปะหลังได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะที่ต้องการสำหรับเป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะ		ชั้น	ชั้น	ชั้น
		คุณภาพ 1	คุณภาพ 2	คุณภาพ 3
ความชื้น ร้อยละ	ไม่เกิน	13	14	14
เป้ง ร้อยละ (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	ไม่น้อยกว่า	97.5	96	94
เถ้า ร้อยละ (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	ไม่เกิน	0.15	0.30	0.50
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด (acid insoluble ash)				
ร้อยละ (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	ไม่เกิน	0.05	0.10	0.15
โปรตีน ร้อยละ (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	ไม่เกิน	0.3	0.3	0.3
เชื้อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อน้ำหนักเป้ง				
50 กรัม ก่อนอบแห้ง	ไม่เกิน	0.2	0.5	1.0
ความเป็นกรด-ด่าง		4.5-7	3.5-7	3.0-7
ความละเอียด เป้งที่ตกค้างบนตะแกรงขนาด				
150 ไมโครเมตร ร้อยละ	ไม่เกิน	1	3	5

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม (2521)

2. สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

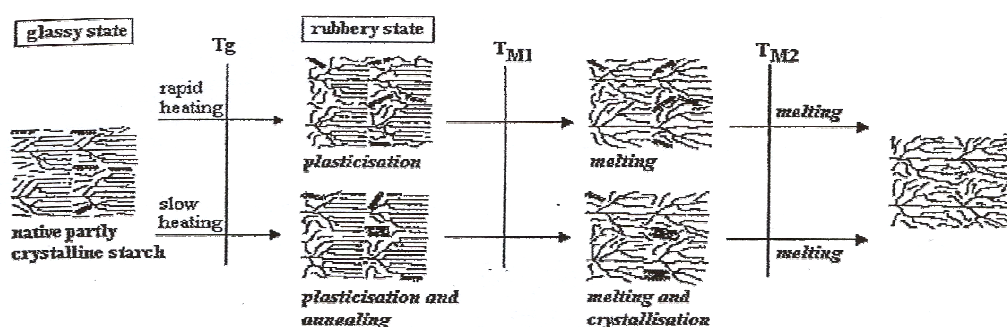
น้ำเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในอาหารทั่วไป คือมีอยู่ระหว่างร้อยละ 7-95 และมักเรียกน้ำที่อยู่ในอาหารว่า ความชื้น น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (chemically bound water) น้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่น (physically bound water) และน้ำในรูปอิสระ (free water) น้ำในผลึกเป็นน้ำที่มีความคงตัวมาก สามารถถูกยึดเกาะได้อย่างเหนียวแน่น มีระเบียบและเคลื่อนที่ได้จำกัด น้ำในรูปแบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวทำละลายได้และเป็นน้ำที่ไม่แข็งตัว (unfreezable water) เมื่อนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิใด ๆ น้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นเป็นน้ำที่ถูกดูดซับอยู่เป็นชั้นที่ผิวนอกของส่วนประกอบในอาหารเป็นการรวมกันทางกายภาพ และน้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของอาหาร อาจมีการเกาะตัวกับองค์ประกอบของอาหารบ้างด้วยพันธะที่ไม่แข็งแรง และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายได้ น้ำอิสระในอาหารนี้มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการเก็บรักษาอาหารอย่างมาก (นิธิยา, 2545 ; วิไล, 2545) โดยน้ำสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ เนื่องจากเม็ดแป้งมีรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำให้หน้าที่เป็นตัวค้ำขนาดโมเลกุล รูพรุนเหล่านี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้องจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้นร้อยละ 10 ถึง 17 จากการทดลองของ Leach (1965) พบว่าแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณ 42.9 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลสและกิ่งสาขาของอะมิโลเพกทิน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวในแนวรัศมี ส่วนที่เป็นเส้นสายของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงหรือกิ่งสาขาที่เกิดขึ้นนานกัน พันธะไฮโดรเจนจะเป็นตัวดึงให้โมเลกุลทั้งสองสายรวมเข้าด้วยกันเกิดเป็นกลุ่มผลึก สายโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงยาว ๆ อาจเป็นไปได้ที่จะผ่านบริเวณส่วนที่เป็นผลึกนี้ หรือส่วนที่เป็นกิ่งรอบ ๆ ของกิ่งสาขาอาจเป็นตัวช่วยในการแยกส่วนที่เป็นผลึกได้ ดังนั้นการที่เม็ดแป้งอยู่รวมกันจึงมีบางส่วนเป็นผลึกและบางส่วนไม่เป็นผลึก ในบริเวณที่เป็นผลึกนี้จะ

เป็นตัวยึดของเม็ดแป้ง ก็ยอมให้มีการพองตัวแต่จะป้องกันการแพร่กระจายและการละลายของเม็ดแป้ง ช่องพื้นที่ว่างระหว่างผลึกจะเต็มไปด้วยสายและกิ่งสาขาที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ และรวมตัวกันอย่างหลวม ๆ ดังนั้นเมื่อสารแขวนลอยของเม็ดแป้งได้รับความร้อน พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง ส่วนออสซิลเลชันจะมีโมเลกุลของน้ำมาเกาะมากขึ้นและเริ่มมีการพองตัวเกิดขึ้น ในที่สุดลักษณะร่างแหจะเริ่มขยายออก พันธะไฮโดรเจนในบริเวณผลึกจะเริ่มถูกทำลายทำให้โครงสร้างร่างแหมีลักษณะที่ช่วยให้เม็ดแป้งพองตัวแล้วมีความหนืดสูงขึ้นและอยู่ในลักษณะข้นเป็นแป้งเปียก (Leach *et al.*, 1959)

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนเซชัน เนื่องจากภายในเม็ดแป้งมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กัน เชื่อมต่อกันอยู่ โดยยึดสายอะมิโลสและอะมิโลเพกทินไว้ด้วยกัน โครงสร้างภายในเม็ดแป้งจะอยู่ในสภาวะกลาส (Glassy state) ดังภาพที่ 6 ซึ่งโมเลกุลมีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature, T_g) ซึ่งเป็นอุณหภูมิจำเพาะซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อน (heat capacity) ของพอลิเมอร์จากลักษณะที่เป็นของแข็งคล้ายแก้วกลายเป็นลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งพบในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งผลึก หรือเกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึกกลายเป็นโครงสร้างอสัณฐานอย่างสมบูรณ์ (Baek *et al.*, 2004; Wang and Jane, 1994; Zeleznak and Hosney, 1987) พันธะไฮโดรเจนในส่วนออสซิลเลชันจะถูกทำลาย หมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นอิสระมากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระเหล่านี้ได้ ส่วนออสซิลเลชันของแป้งจะสามารถพองตัวและละลายน้ำได้มากขึ้น โครงสร้างต่าง ๆ ภายในเม็ดแป้งจะเข้าสู่สภาวะคล้ายยาง (Rubber state) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายแป้งให้มากขึ้นจนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึกของสายอะมิโลเพกทิน (T_{M1}) การพองตัวในส่วนออสซิลเลชันจะทำให้ความเป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกของสายอะมิโลเพกทินถูกทำลาย จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินอุณหภูมิหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (T_{M2}) โครงสร้างที่เป็นระเบียบทั้งหมดภายในเม็ดแป้งจะถูกทำลาย (วรารคณา, 2544) และคุณสมบัติของการบิเคราะห์แสงโพลาไรซ์ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง ลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต การดัดแปรทางเคมี และปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง ซึ่งปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัวมีผลต่อการพองตัวและการละลาย โดยพบว่าการพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาพที่สารละลายมีปริมาณน้ำน้อย สารประกอบอื่น ๆ เช่น ซูโครส กลูโคส

และสารอิเล็กโทรไลต์ เช่นโซเดียมคลอไรด์ มีผลกระทบต่อการพองตัวของแป้ง การเพิ่มความเข้มข้นของซูโครส และลดปริมาณแป้งลงทำให้แป้งสามารถละลายได้เพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนอสัณฐานและโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งที่เกิดขึ้น

ขณะให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง

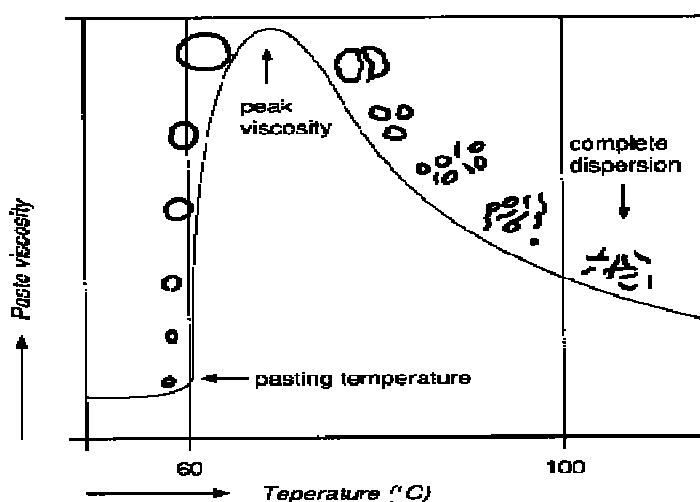
ที่มา : Conde-Petit (2001)

2.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

เม็ดแป้งมีคุณสมบัติชอบน้ำเนื่องจากประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จึงทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นยาก เมื่ออยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เนื่องจากเม็ดแป้งมีโครงสร้างกิ่งผลึกซึ่งมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความชื้นเกินพอ คือมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 63 ดังนั้นอัตราส่วนน้อยที่สุดของโมเลกุลน้ำต่อหน่วยกลูโคสที่ต้องการสำหรับการเกิดเจลาตินในเซชันอย่างสมบูรณ์เท่ากับ 15 ต่อ 1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึก ในช่วงแรกของการเจลาตินในเซชัน น้ำจะแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งในส่วนอสัณฐานก่อนทำให้เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้นเกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดการทำลายส่วนผลึกของเม็ดแป้งโดยลักษณะเกลียวม้วนจะคลายตัวออกจนกระทั่งเม็ดแป้งถูกทำลายเกือบจะสมบูรณ์จะได้ส่วนที่เรียกว่าโซล (sol) ซึ่งส่วนไมเซลล์ยังคงจับกันแน่นไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างการพองตัว อะมิโลสจะถูกชะออกจากเม็ดแป้ง ทำให้ส่วนที่เหลือมีความหนืดและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่

เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546; วชิราพรณ, 2543)

การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรก เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากส่วนที่เป็นผลึกสามารถยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรูปร่างและยังมีสมบัติไบรีฟรินเจนซ์อยู่ เมื่อนำไปทำให้แห้งก็จะได้ลักษณะเหมือนเดิม ระยะที่สอง เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเจลาติไนเซชัน จะทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากแล้วพองตัวอย่างรวดเร็วและผันกลับไม่ได้ ทำให้แป้งมีความหนืดและความใสมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เจลาติไนเซชัน และเรียกอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืดว่า pasting temperature เม็ดแป้งจะมีการเปลี่ยนรูปร่างและสูญเสียสมบัติไบรีฟรินเจนซ์ และมีการพองตัวสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของแป้งสูงขึ้น การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะแตกต่างกันไปในแป้งแต่ละชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ปริมาณไขมันรวมทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง เมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวสูงสุดเม็ดแป้งจะเริ่มแตกออก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะนำไปทำให้เม็ดแป้งเริ่มเข้าสู่ระยะที่สาม คือ เม็ดแป้งจะมีการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ การละลายของแป้งจะสูงขึ้นด้วย ดังภาพที่ 7 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น



ภาพที่ 7 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

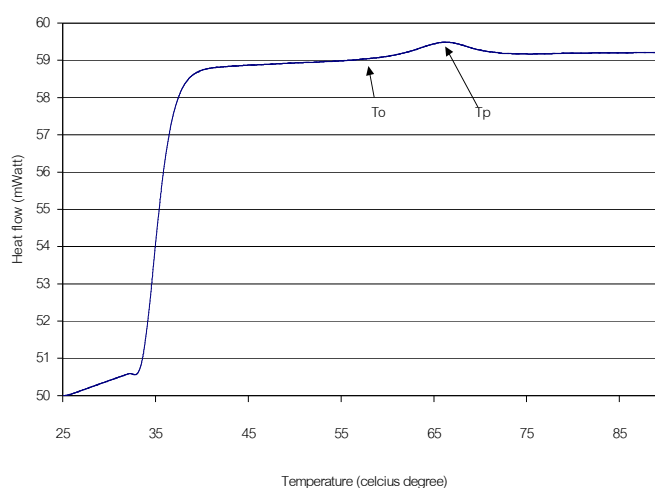
ที่มา : กล้านรงค์ และ เกื้อกุล (2546)

การตรวจสอบกระบวนการเจลาตินในเซชันนอกจากใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการเจลาตินในเซชัน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยอาศัยหลักการที่ว่าทั้งตัวอย่างและสารอ้างอิง (reference) จะต้องคงอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันในกระบวนการให้ความร้อน หรือทำให้เย็นลงที่อัตราที่กำหนดไว้ก่อนค่าหนึ่ง ปริมาณความร้อนจะไหลเข้าสู่ระบบที่ตัวอย่างหรือสารอ้างอิงเพื่อที่จะรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ ($T_s - T_r = 0$) ปริมาณความร้อนดังกล่าวนี้จะบันทึกเป็นฟังก์ชันกับเวลา หรืออุณหภูมิ ปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (ΔH) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔH และพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

$$M \cdot (\Delta H) = K \cdot A$$

เมื่อ	M	=	มวลของตัวอย่าง (g)
	ΔH	=	ความร้อนทั้งหมดของปฏิกิริยา (J/g)
	K	=	calibration constant ของเครื่องมือ (J/J#)
	A	=	พื้นที่ใต้กราฟ (J#)

ในการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการจำเป็นต้องหาพื้นที่ใต้กราฟไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endotherm) หรือคายความร้อน (exotherm) ในกรณีการเกิดเจลในเซชันของแป้งจะเป็นการดูดความร้อน การหาเส้น baseline ที่ถูกต้องแม่นยำสำหรับการหาพื้นที่ใต้กราฟมีความสำคัญมากเนื่องจากมักมีความแตกต่างกันทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการที่ศึกษาส่วนพื้นที่ใต้กราฟสามารถคำนวณได้ 3 วิธี คือ cut and weigh, planimeter และ integrator ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากเครื่อง DSC ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลในเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลในเซชัน (onset temperature; T_o , °C) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลในเซชัน (peak temperature; T_p , °C) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลในเซชัน (conclusion temperature; T_c , °C) และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลในเซชัน (enthalpy; ΔH , J/g) ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่อง DSC แสดงในภาพที่ 8 อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะ โครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งได้ แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแข็งแรง อุณหภูมิในการเกิดเจลในเซชันจะมีค่าสูง และแป้งที่โครงสร้างผลึกมีความสม่ำเสมอ เป็นระเบียบมาก จะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลในเซชันแคบ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันจะมีค่าสูงเพื่อทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนสถานะ



ภาพที่ 8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งกับน้ำ (30:70)

(T_o = onset temperature, T_p = peak temperature, T_c = conclusion temperature)

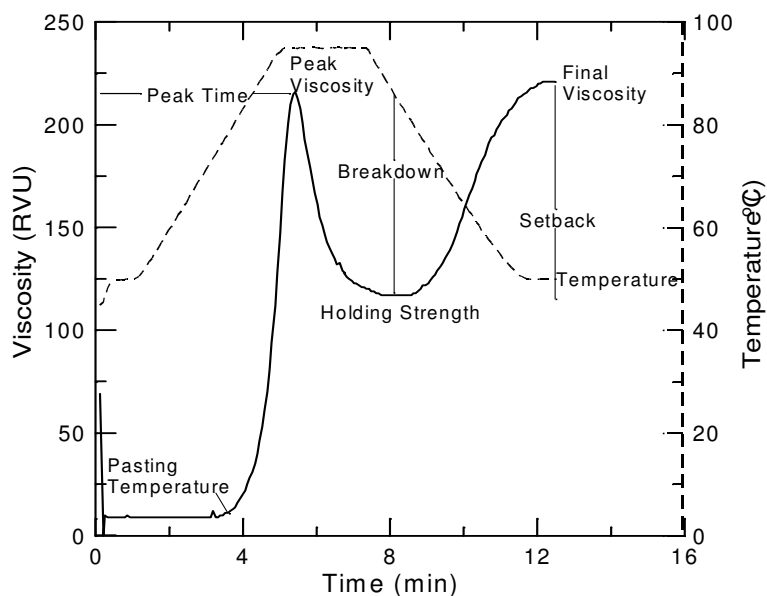
ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล (2546)

2.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้ง ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง การตรวจวัดค่าความหนืดมีความสำคัญในแง่การใช้แป้งทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด และให้เนื้อสัมผัสในอาหาร ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษในขั้นตอน sizing และ coating และใช้ในอุตสาหกรรมกาว เป็นต้น

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องมือหลายชนิดซึ่งมีทั้งแบบปรับอุณหภูมิไม่ได้ เช่น Brookfield viscometer, Capillary viscometer และ Rheometer ซึ่งจะวัดค่าที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น และเครื่องมือแบบปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ เช่น Rapid Visco Analyzer และบราเวนเดอร์วิสโคอะไม โลกราฟแบบปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ ซึ่งมีความสำคัญในการศึกษาทั้งลักษณะของกราฟความหนืดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับน้ำแป้งทำให้ทราบอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตีในเซชัน ค่าความหนืดที่จุดสูงสุด และค่าความหนืดสุดท้ายเมื่อสารละลายแป้งเกิดรีโทรเกรเดชัน (กลั่นรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) มีคุณสมบัติพิเศษคือ ความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ จึงทำให้สามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ภายในเวลาสั้น (13 นาที) ได้เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า (กลั่นรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น ขณะเดียวกันน้ำที่เหลืออยู่รอบ ๆ เหลือน้อยลงทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก และในสภาวะที่มีการกวนภายใต้แรงเฉือน (shear force) ค่าหนึ่ง แป้งจะเปลี่ยนเป็นเจล ซึ่งเป็นการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่เม็ดแป้งมีการพองตัวเต็มที่ การเพิ่มอุณหภูมิและการกวนต่อไปอีก มีผลทำให้โครงสร้างภายในแตกออกทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อลดอุณหภูมิลงจะเกิดรีโทรเกรเดชัน มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง ลักษณะของกราฟความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง RVA (Newport Scientific, 1995) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะกราฟความหนืดและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดด้วยเครื่อง RVA

ที่มา : Newport Scientific (1995)

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สามารถอ่านได้เมื่อวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA ได้แก่

2.3.1 Peak time : เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที

2.3.2 Pasting temperature : อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

2.3.3 Peak temperature : อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

2.3.4 Peak viscosity : ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU

2.3.5 Holding strength : ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU

2.3.6 Breakdown : ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

2.3.7 Final viscosity : ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU

2.3.8 Setback from peak : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU

2.3.9 Setback from trough : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

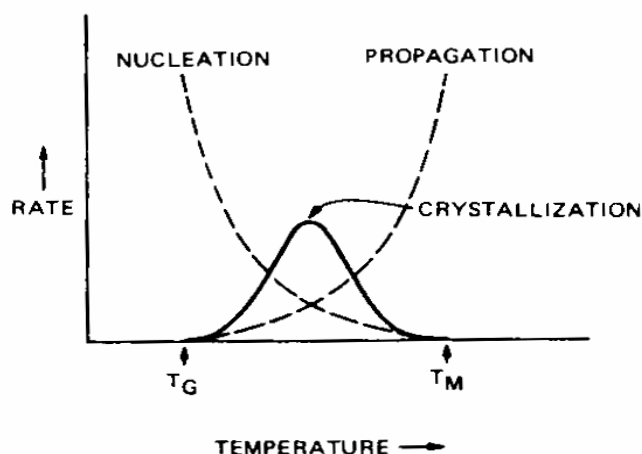
2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแป้งที่ผ่านการเจลาติไนเซชันจากบริเวณส่วนออสชันฐานไปจนถึงส่วนอื่น ๆ รวมทั้งส่วนที่เป็นผลึก การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากเจลแป้งไม่อยู่ในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลง โดยความแน่นและความแข็งแรงของเจลแป้งจะเพิ่มขึ้น เกิดการสูญเสียความสามารถในการเก็บน้ำ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของแป้งที่เรียกว่า recrystallization (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก แป้งมีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกการจัดเรียงโครงสร้างจะยิ่งแน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล เรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองจะทำให้เจลมีลักษณะขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และ โมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล การคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจึงมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

กลไกที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน คือ กลไกการเกิดผลึก (crystallization mechanisms) กลไกการเกิดผลึกที่สมบูรณ์มี 3 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียส (nucleation) เป็นจุดที่โมเลกุลแบ่ง 2 โมเลกุลหรือมากกว่ามาเชื่อมต่อกัน การเติบโตของผลึก (propagation) และการเกิดผลึกอย่างสมบูรณ์ (perfect crystal structure) โดยการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึกจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับอุณหภูมิในการเก็บรักษา อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (melting transition temperature, T_m) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายแบ่งอยู่ระหว่าง T_g และ T_m อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง T_g ขณะที่อัตราการเติบโตของผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง T_m แสดงให้เห็นว่าการเกิดโครงสร้างผลึกจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อจำกัดที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 30 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงไม่เหมาะสมต่อการเกิดเป็นนิวเคลียสของผลึก การเกิดรีโทรเกรเดชันจะสูงที่สุดที่อุณหภูมিরะหว่าง T_g และ T_m เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียส และการเติบโตของผลึกโดยรวมสูงที่สุด ดังภาพที่ 10 ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชันจึงเป็นกระบวนการที่ไม่สมดุล (non-equilibrium recrystallization process) เกิดเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการเก็บเจลแบ่งที่ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 45-50 ที่อุณหภูมิต่ำแต่สูงกว่า T_g จึงเป็นการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง และการเก็บที่อุณหภูมิแช่แข็งที่ต่ำกว่า T_g สามารถยับยั้งการเกิด recrystallization (Eliasson and Gudmundsson, 1996)



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิด Recrystallization กับอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก

ที่มา: Slade and Levine (1987)

ปริมาณน้ำในเจลแป้งมีความสำคัญมากต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน และการเกิด crystallization จะเกิดขึ้นในเจลแป้งที่ประกอบด้วยแป้งระหว่างร้อยละ 10 ถึง 80 และเกิดขึ้นสูงที่สุดในเจลแป้งที่ประกอบด้วยแป้งร้อยละ 50 ถึง 55 การเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำระหว่างบ่ม แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน การเกิดเจลาติไนเซชันทำให้แป้งมีลักษณะเป็นอสัณฐานอย่างสมบูรณ์ และน้ำจะกระจายอย่างสม่ำเสมอ กระบวนการเกิด recrystallization ขึ้นกับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิที่เก็บและ T_g ของเจลที่มีโครงสร้างอสัณฐาน น้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งควบคุม T_g ของเจลที่มีโครงสร้างอสัณฐาน เมื่อปริมาณน้ำต่ำ T_g จะสูงกว่าอุณหภูมิห้องและทำให้เจลที่มีโครงสร้างอสัณฐานมีความหนืดสูงซึ่งมีผลในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุล การเกิด recrystallization จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 45-50 ทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น และในที่สุด T_g จะลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง การเกิด recrystallization จะลดลงเมื่อปริมาณน้ำสูงถึงร้อยละ 90 เนื่องจากโมเลกุลที่สามารถจัดเรียงตัวได้มีปริมาณน้อยลง (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันอาจประมาณได้จากค่าการคืนตัว (setback) ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ RVA นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง DSC โดยนำแป้งดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$) แล้วนำแป้งที่ผ่านการเจลาติไนเซชันนี้ไปบ่มไว้ในสภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่าง ๆ กันเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชัน แล้วนำแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันนี้ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้งหนึ่ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ($\Delta H_{\text{retrogradation}}$) และสามารถคำนวณร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชันได้จากสูตร

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

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล (syneresis) ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของแป้ง ดังนั้นการวัดความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งจึงสามารถใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้ (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

2.5 สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส (Textural Properties)

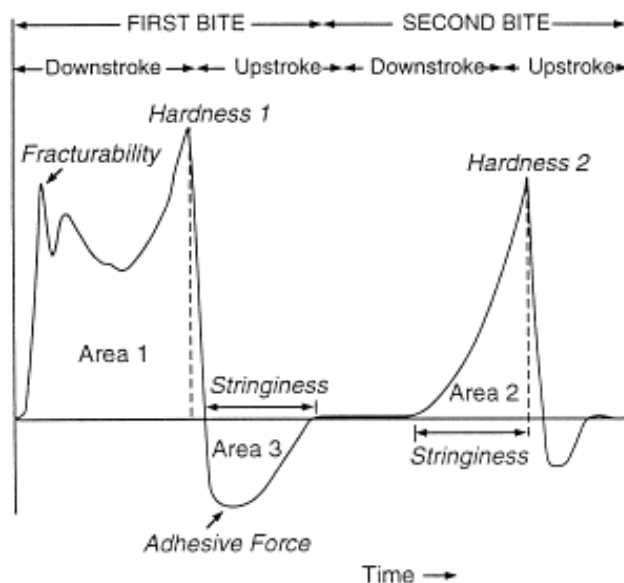
ลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสเป็นผลของการประกอบกันของคุณสมบัติทางกายภาพและด้านเคมี ซึ่งรวมถึงขนาด รูปร่าง จำนวน ธรรมชาติ และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของสารนั้น ๆ ทั้งหมดนี้เป็นผลของโครงสร้างของวัสดุ และจากโครงสร้างของวัสดุเราสามารถทำความเข้าใจคุณสมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางเนื้อสัมผัสได้ จึงนำหลักการนี้มาใช้ในการประเมินลักษณะทางเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือ (ปิติพร, 2546) วิธีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแบ่งสามารถวัดค่าได้โดยการใช้เครื่องมือสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ ดังนี้ (Bourne, 1982)

1. วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ (Fundamental measurement) เป็นวิธีการซึ่งพัฒนามาจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ซึ่งบ่อยครั้งพบว่าข้อมูลไม่สามารถนำมาใช้ในการประเมินความรู้สึกของมนุษย์ในด้านเนื้อสัมผัสขณะเคี้ยวได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถอธิบายค่าที่วัดได้ในเชิงวิทยาศาสตร์ และข้อเสียคือค่าที่ได้ไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส เครื่องมือมีราคาแพงและใช้เวลาในการวัดนาน วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับค่าแรงที่กระทำต่อตัวอย่าง ทั้งนี้แรงที่กระทำต่อตัวอย่างมีหลายรูปแบบ เช่น แรงกดและแรงอัด (Compression-Extrusion) แรงดึง (Tensile) แรงตัดและแรงเฉือน (Cutting and Shearing) เป็นต้น

2. วิธีการวัดค่าแบบประยุกต์ (Empirical measurement) เป็นวิธีการวัดค่าเนื้อสัมผัสที่ถูกออกแบบมาโดยนักประดิษฐ์ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ โดยเฉพาะงานควบคุมคุณภาพและแบ่งระดับชั้นคุณภาพผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อดีของวิธีการนี้คือ เครื่องมือใช้งานง่าย มีความรวดเร็วในการวัด และค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส และข้อเสียคือไม่สามารถอธิบายหลักการวัดค่าที่ได้บนพื้นฐานทางการวัดค่าวัสดุศาสตร์ วัดค่าได้เพียงคุณลักษณะใดคุณลักษณะหนึ่ง วิธีการวัดค่าขึ้นอยู่กับผู้วัด ไม่มีวิธีการวัดที่ได้มาตรฐานแน่นอน และโดยทั่วไปจะวัดค่าที่จุดใดจุดหนึ่ง จึงไม่สามารถให้ข้อมูลที่ต่อเนื่องได้ ตัวอย่างเครื่องมือวัดค่าแบบประยุกต์ได้แก่ Fruit pressure tester, Bloom gelometer, Penetrometer เป็นต้น

3. วิธีการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (Imitative measurement) วิธีการนี้จะออกแบบเครื่องมือให้มีหลักการทำงานคล้ายกับการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเป็นเครื่องมือแบบเดียวกันกับวิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่สามารถหาค่าแรงกับระยะทาง หรือความเค้นกับความเครียดได้ การวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยวิธีการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Texture Profile Analysis (TPA) ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วัดค่าด้วยวิธีการนี้ได้แก่ Texture Analysis, Instron, Lloyd เป็นต้น

การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป็งโดยวิธีการวัดค่าเค้าโครงคุณลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) การวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยวิธีนี้จะคล้ายกับการทำ Texture Profile ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส คือ จะมีการอธิบายพรรณาคำศัพท์เกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของอาหาร เครื่องมือในการวัด Texture Profile นั้นเป็นการวัดค่าพารามิเตอร์ของเนื้อสัมผัสของอาหารที่สามารถเป็นไปได้ หลักการพื้นฐานคือ จะกล่าวถึงคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสที่สามารถทำการวัดค่าได้โดยการใช้เครื่องมือ ซึ่งการออกแบบเครื่องมือเลียนแบบการทำงานของแรงที่ใช้ภายในปาก เครื่องมือประกอบด้วยหัวกด (plunger) ซึ่งมีลักษณะแบนราบหรือมีลักษณะคล้ายฟันมนุษย์ กดตัวอย่างที่มีความสูงที่แน่นอนด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดที่กำหนดไว้ หลังจากหัวกดเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นจะทำการกดตัวอย่างซ้ำลงไปอีกครั้งหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกับเวลา ดังภาพที่ 11 โดยการกดลงและขึ้นในรอบแรก เรียกว่า First bite ในรอบที่สอง เรียกว่า Second bite ค่าแรง เวลา และพื้นที่ใต้กราฟจะนำมาใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรคุณลักษณะเนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)
ที่มา : Bourne (1978)

ค่าตัวแปรคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของแรงที่เกิดขึ้น ณ จุดสุดท้ายของการกดในรอบแรก ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเป็นค่าแรกเรียกว่าค่าการแตกหัก (Fracturability) ซึ่งไม่จำเป็นว่าอาหารทุกชนิดจะพบค่านี้ งานที่ได้จากการกดตัวอย่างในรอบแรกและรอบที่สองจะให้พื้นที่ใต้กราฟ (Area) เท่ากับ A1 และ A2 ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง A1 และ A2 สัมพันธ์กับความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ระยะทางที่ตัวอย่างคืนตัวกลับสัมพันธ์กับค่าความยืดหยุ่น (Springiness) พื้นที่ใต้กราฟที่ให้ค่าเป็นลบ (negative area) เท่ากับ A3 สัมพันธ์กับความสามารถในการเกาะติดผิววัตถุ (Adhesiveness หรือ Stickiness) ค่าความเหนียวเป็นยาง (Gumminess) ได้จากผลคูณระหว่างค่าความแข็งกับความสามารถเกาะรวมตัวกัน และค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) ได้จากผลคูณระหว่างค่าความแข็ง ความสามารถเกาะรวมตัวกัน และค่าความยืดหยุ่น เป็นต้น (Karim *et al.* , 2000)

ตารางที่ 3 ความหมายของคุณลักษณะเนื้อสัมผัสต่าง ๆ ในเชิงคุณภาพทางกายภาพจากการทำ Texture Profile Analysis และในเชิงคุณภาพทางประสาทสัมผัส

คุณลักษณะ	คุณภาพทางกายภาพ	คุณภาพทางประสาทสัมผัส
Hardness (ความแข็ง)	แรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป	แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างฟันกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่าง
Cohesiveness (ความสามารถเกาะรวมตัวกัน)	ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก	ความแข็งแรงของพันธะภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่างแล้วทำให้ตัวอย่างทนต่อแรงที่มากกระทำก่อนที่จะตัวอย่างจะขาดหรือแยกออกจากกัน
Springiness (ความยืดหยุ่น)	อัตราของการคืนรูปของวัสดุหลังจากการถูกกด	ระดับความสามารถในการคืนตัวกลับมาเหมือนเดิมเมื่อมีการถอนแรงกดออกไปจากตัวอย่าง
Adhesiveness (ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ)	งานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุอื่นที่ตัวอย่างสัมผัสอยู่	แรงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวอย่างที่ติดอยู่ในปาก (โดยปกติคือเพดานปาก) ในระหว่างกระบวนการเคี้ยว
Fracturability (การแตกหัก)	แรงที่ทำให้ตัวอย่างแตกหักโดยเป็นตัวอย่างที่มี Hardness สูงและมี Cohesiveness ต่ำ	แรงกดทันทีทันใดในแนวตั้งที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกหักเป็นชิ้นๆ และกระจายออกในแนวราบ
Chewiness (การทนต่อการเคี้ยว)	แรงที่ใช้ในการเคี้ยวบดตัวอย่างจนกระทั่งสามารถกลืนได้โดยเป็นตัวอย่างที่มีลักษณะผสมของ Hardness, Cohesiveness และ Springiness	ระยะเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวบดตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ในอัตราการใช้ที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้
Gumminess (ความเหนียวเป็นยางหรือกาว)	แรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็งจนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้โดยเป็นตัวอย่างที่มี Hardness ต่ำและมี Cohesiveness สูง	พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวตัวอย่างที่เป็นกึ่งของแข็ง ในอัตราการใช้ที่คงที่จนกระทั่งสามารถที่จะกลืนได้

ที่มา : ปีติพร (2546)

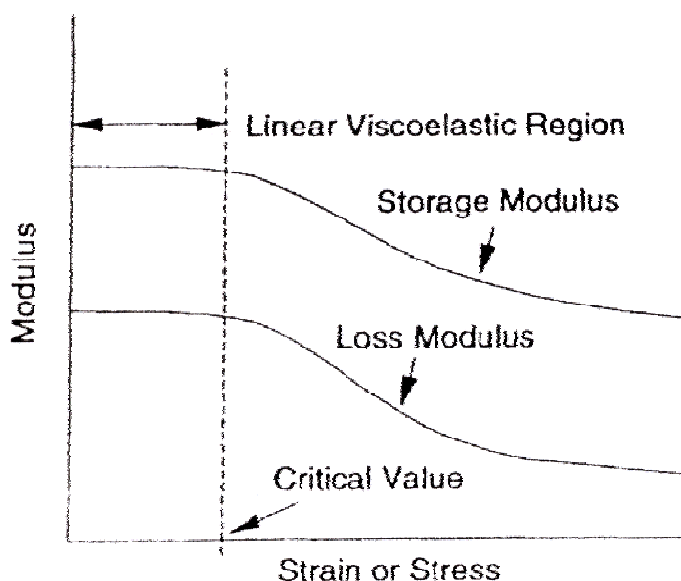
2.6 สมบัติวิทยาการไหล (Rheological Properties)

วิทยาการไหลหรือวิทยากระแส (Rheology) เป็นศาสตร์ที่ศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปทรง (deformation) และการไหล (flow) ของวัสดุเพื่อตอบสนองต่อแรงที่มากระทำ (mechanical force) ในด้านของความยืดหยุ่น (elasticity) และความหนืด (viscosity) วิทยากระแส เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์และพลศาสตร์ โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ พื้นฐานทาง ฟิสิกส์ และเคมีกายภาพในการอธิบายพฤติกรรม การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงเฉือน (shear force)

จากมุมมองของวิทยากระแสสามารถแบ่งพฤติกรรมของวัสดุออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การไหลของวัสดุที่ปั่นของเหลวในอุดมคติ (flow of ideal-viscous liquids) การเปลี่ยนรูปทรงของ วัสดุที่เป็นของแข็งในอุดมคติ (deformation of ideal-elastic solids) และการไหลและการเปลี่ยน รูปทรงของวัสดุที่คล้ายทั้งของแข็งและของเหลว (flow and deformation of viscoelastic materials) ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภท viscoelastic นั่นคือวัสดุมีพฤติกรรมที่คล้ายทั้ง ของเหลว (viscous) และของแข็ง (elastic) ซึ่งเมื่อมีความเค้นเฉือน (shear stress) มากระทำต่อวัสดุที่ ระดับความเครียดหนึ่ง (shear strain) แล้วถอนความเค้นเฉือนออกทันที วัสดุประเภทนี้จะไม่คืนตัว กลับสภาพเดิม ณ จุดเริ่มต้นที่ยังไม่มีความเค้นเฉือนมากระทำเหมือนวัสดุที่เป็นของแข็งทันที หรือ คงอยู่ ณ ตำแหน่งที่ถอนความเค้นเฉือนออกเหมือนวัสดุที่เป็นของเหลว แต่จะค่อย ๆ คืนตัวกลับ ซึ่ง การตรวจสอบด้วยวิธีทางวิทยากระแสจะช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของความหนืด (viscosity) และความยืดหยุ่น (elasticity) ของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ กระบวนการผลิต และตัวแปรต่าง ๆ ในการเก็บรักษาอาหาร

การตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุประเภท viscoelastic จะตรวจสอบในช่วงที่วัสดุ สามารถคืนตัวกลับได้ (Linear Viscoelastic Range) ดังภาพที่ 12 โดยแบ่งเป็น 2 วิธี คือ static methods เป็นวิธีที่ใช้การอ้างอิงเปรียบเทียบเชิงกล (mechanical analogues) ในการอธิบาย ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะที่ตัวอย่างมีความเค้นหรือความเครียดมากระทำในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น การคืบ (creep) การคืนรูป (recovery) และการพักความเค้น (stress relaxation) เป็นต้น อีกวิธี หนึ่งคือ dynamic methods เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบทางด้าน oscillatory test ในการศึกษาตัวอย่างจะถูก กระทำให้ผิดรูป (deformation) โดยการแปรผันการสั่นสะเทือนที่สัมพันธ์กับเวลา เช่น การ สั่นสะเทือนแบบลูกคลื่น (sinusoidal) วิธีการนี้ใช้มากในการศึกษาความแข็งแรงของเจล

(gel strength) การเกิดเจลในเซชันของแป้ง (starch gelatinization) การเปลี่ยนสถานะของผลิตภัณฑ์ (phase transition) และความคงตัวในขณะเก็บรักษา (storage stability) ตัวอย่างวิธีการทดสอบทางด้าน oscillatory test ได้แก่ amplitude sweep, temperature sweep และ frequency sweep เป็นต้น



ภาพที่ 12 Linear Viscoelastic (LVE) Range

ที่มา : Steffe (1996)

แบบจำลอง Two-Plate-Model ดังภาพที่ 13 ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดตัวแปรพื้นฐานสำหรับอธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นของเหลวและของแข็ง โดยกำหนดให้แผ่นที่อยู่ด้านบนมีพื้นที่ A สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแรงเฉือนที่มากระทำ F (shear force) ความเร็วที่วัดได้มีค่าเท่ากับ v และระยะทางที่แผ่นเคลื่อนออกไปมีค่า s สำหรับแผ่นที่อยู่ด้านล่างไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นความเร็วและระยะทางจึงมีค่าเป็นศูนย์ ระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสองมีค่าเท่ากับ h ตัวอย่างจะได้รับแรงเฉือนภายในช่องว่างระหว่างแผ่นทั้งสองนี้โดยมีข้อกำหนดว่าตัวอย่างจะต้องเกาะติดแน่นกับแผ่นทั้งสองโดยไม่ลื่นหรือเลื่อนลงมา และสำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลวจะต้องมีการไหลแบบราบเรียบ (lamina flow) เท่านั้น เนื่องจากสถานะแรงโน้มถ่วงของโลก การวัดค่าทางวิทยาศาสตร์โดยใช้ Two-Plate-Model จึงสามารถกระทำได้ดีต่อเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสองแคบเพียงพอ ตัวแปรทางวิทยาศาสตร์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

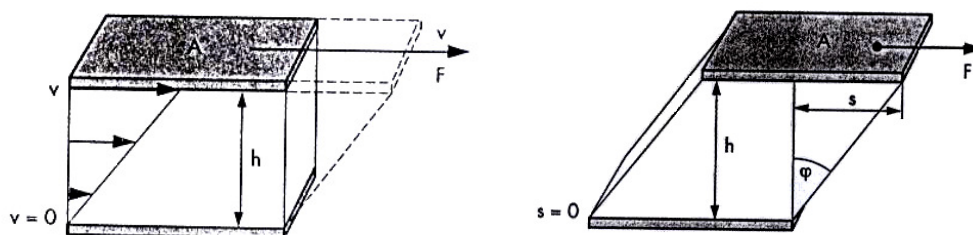
ความเค้นเฉือน (Shear stress) $\tau = F / A$ หน่วย [Pa]

อัตราเฉือน (Shear rate) $\dot{\gamma} = v / h$ หน่วย [1/s]

ความหนืด (Viscosity) $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ หน่วย [Pa·s]

ความเครียดเฉือน (Shear strain) $\gamma = s / h = \tan \varphi$ หน่วย [1]

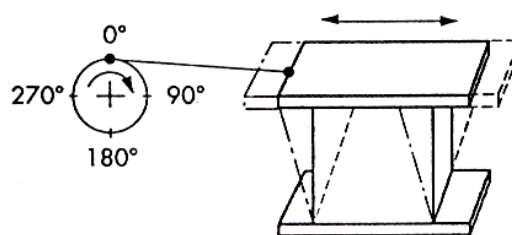
มอดูลัสเฉือน (Shear modulus) $G = \tau / \gamma$ หน่วย [Pa]



ภาพที่ 13 แบบจำลอง Two-Plate-Model

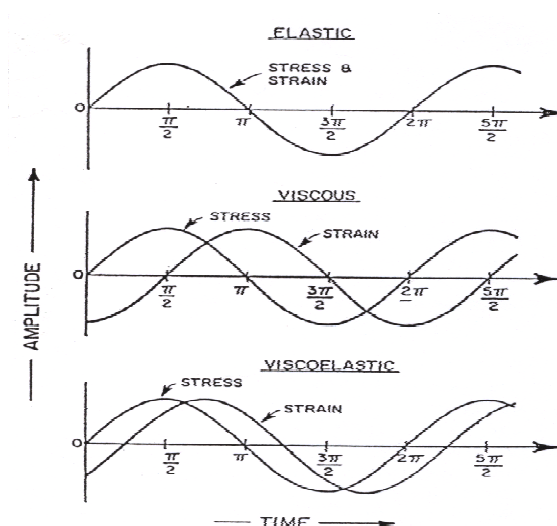
ที่มา : Mezger (2002)

สำหรับการทดสอบทางด้าน oscillatory test ของวัสดุประเภท viscoelastic จะใช้แบบจำลอง Two-plate-Model ดังภาพที่ 14 โดยแผ่นที่อยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนเป็นวง ซึ่งสามารถผลักแกนที่เชื่อมระหว่างแผ่นทั้งสองให้ยับทำมุม $\pm \varphi$ แรงเฉือนที่มากระทำ $\pm F$ จะทำให้แผ่นเคลื่อนไปข้างหน้าและข้างหลังด้วยระยะทาง $\pm s$ ในขณะที่แผ่นที่อยู่ด้านล่างไม่สามารถเคลื่อนที่ได้



ภาพที่ 14 แบบจำลอง Two-Plate-Model สำหรับการทดสอบ oscillatory test
ที่มา : Mezger (2002)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของวัสดุทั้ง 3 ประเภท พบว่า วัสดุที่เป็นของเหลว (viscous materials) ความเค้นและความเครียดจะห่างออกจากกันโดยมีค่ามุมเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน (δ) เท่ากับ 90° ขณะที่วัสดุที่เป็นของแข็ง (elastic materials) ความเค้นและความเครียดจะซ้อนทับกันทำให้ δ มีค่าเท่ากับ 0° ดังนั้นวัสดุประเภท viscoelastic ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายทั้งของเหลวและของแข็ง จะให้กราฟที่มีความเค้นและความเครียดห่างกันโดยมีค่า δ อยู่ระหว่าง 0° และ 90° ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบ oscillatory test ของวัสดุประเภทต่าง ๆ

ที่มา : ธงชัย (2544)

ในการทดสอบ oscillatory test ที่ทำการแปรผันการสั่นสะเทือนแบบ harmonic เช่น sinusoidal จะใช้การประยุกต์กฎของ Hooke ในการกำหนดตัวแปรเพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุประเภท viscoelastic ดังสมการ

$$G^* = \tau(t) / \gamma(t)$$

$$\text{โดยที่ } |G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$$

$$\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega t + \delta)$$

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \cos(\omega t + \delta)$$

$$\therefore G' = (\tau_A / \gamma_A) \cdot \cos \delta$$

$$G'' = (\tau_A / \gamma_A) \cdot \sin \delta$$

$$\tan \delta = G'' / G'$$

เมื่อ G^* คือ Complex shear modulus [Pa]

$\tau(t)$ คือ Shear stress ที่เวลาใด ๆ [Pa]

$\gamma(t)$ คือ Shear strain ที่เวลาใด ๆ [1] หรือ [%]

τ_A คือ Shear stress amplitude หรือความเค้นสูงสุด [Pa]

γ_A คือ Shear strain amplitude หรือความเครียดสูงสุด [1] หรือ [%]

ω คือ angular frequency [1/s]

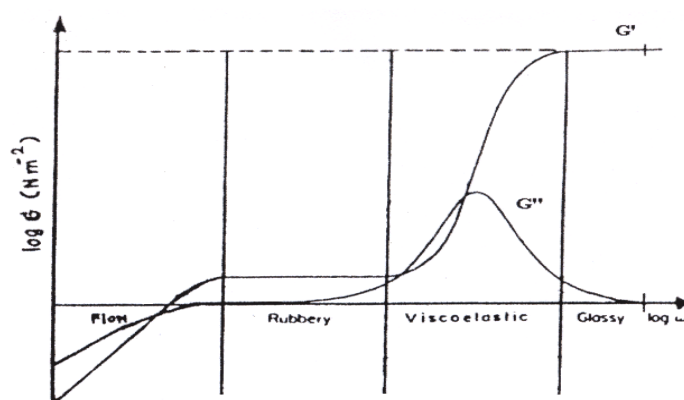
δ คือ Loss angle [$^{\circ}$]

G' คือ Storage modulus [Pa]

G'' คือ Loss modulus [Pa]

$\tan \delta$ คือ Loss factor [1]

ค่า Storage modulus (G') เป็นพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุ (deformation energy stored) ระหว่างกระบวนการให้แรงเฉือน เมื่อถอนแรงออกพลังงานจำนวนนี้จะทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อนให้วัสดุคืนตัวกลับ พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุนี้แสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปที่ผันกลับได้ซึ่งเป็นตัวแทนของวัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายของแข็ง ค่า Loss modulus (G'') เป็นพลังงานที่ถูกใช้ในวัสดุ (deformation energy used) ระหว่างกระบวนการให้แรงเฉือน พลังงานจำนวนนี้ถูกใช้ไปทั้งในส่วนของการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุ และสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมในรูปพลังงานความร้อน พลังงานที่เสียให้กับวัสดุนี้แสดงถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปที่ไม่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นค่า G'' จึงเป็นตัวแทนของวัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายของเหลว ค่า G' และ G'' ขึ้นอยู่กับความถี่ อุณหภูมิ ความเครียด และโครงสร้างของวัสดุ โดยพบว่าถ้าค่า G' มากกว่า G'' วัสดุจะมีพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-like) คือถ้ามีการเปลี่ยนรูปทรงวัสดุจะมีความยืดหยุ่นและสามารถคืนรูปได้ในกรณี ค่า G'' มากกว่า G' วัสดุจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (liquid-like) นั่นคือถ้าวัสดุมีการเปลี่ยนรูปทรงจะสามารถคืนตัวกลับได้เพียงบางส่วน ดังภาพที่ 16 สำหรับ Loss factor (damping factor) หรือ $\tan\delta$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณผลหารของพลังงานที่สูญเสียกับพลังงานที่ถูกเก็บ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปทรงของเหลวต่อของแข็ง โดยพบว่าพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นของแข็งซึ่งมีค่า δ เท่ากับ 0° $\tan\delta$ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ ค่า G' จึงสูงกว่า G'' และพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นของเหลวซึ่งมีค่า δ เท่ากับ 90° $\tan\delta$ จึงมีค่า ∞ ด้วยเหตุนี้ค่า G'' จึงสูงกว่า G' และจุดที่ G' เท่ากับ G'' ค่า $\tan\delta$ จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นค่า δ จึงเท่ากับ 45° ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนที่เท่ากันระหว่างของเหลวและของแข็ง (Mezger, 2002)



ภาพที่ 16 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ที่แสดงพฤติกรรมของ viscoelastic materials

ที่มา : Noosuk (2003)

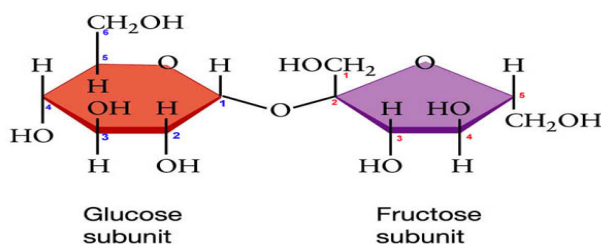
3. อิทธิพลของน้ำตาลและเกลือต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง

ส่วนประกอบในอาหารอาจอยู่ในรูปของวัตถุดิบ สารอาหาร อาหารหลัก หรือสารเจือปน อาหารซึ่งเติมลงไปเพียงเล็กน้อยเพื่อให้อาหารมีคุณสมบัติตามต้องการ คุณสมบัติของส่วนประกอบในอาหารแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิว ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติทางเคมีกายภาพของส่วนผสมในอาหาร ได้แก่ ความสามารถในการกระจายตัว ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการเพิ่มความหนืด ความสามารถในการทำให้เกิดอิมัลชัน และคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ภายหลังจากที่ส่วนผสมในอาหารละลายน้ำ มีผลทำให้คุณสมบัติในการใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น เช่น มีความสามารถในการอุ้มน้ำ การเกิดเจลของอาหาร ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลชัน ซึ่งส่วนประกอบในอาหารที่มักมีการเติมในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำตาลและเกลือ

3.1 น้ำตาลทราย

น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ที่ใช้กันทั่วไปนั้นหมายถึง น้ำตาลซูโครส (Sucrose) ซึ่งเป็นผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สุดมีลักษณะเป็นเกล็ดใส มีสีขาวปราศจากกากน้ำตาล (Molasses) (ศิริลักษณ์, 2525ก) น้ำตาลทรายสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่สำคัญได้แก่ อุตสาหกรรมลูกกวาด ขนมหวาน อุตสาหกรรมน้ำอัดลม อุตสาหกรรมนมข้นหวาน อุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกเนื้อ ผลไม้แช่อิ่ม ผักผลไม้กระป๋อง ซอสน้ำจิ้มไก่ และน้ำปรุงรส เป็นต้น

น้ำตาลซูโครสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ โมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกับน้ำตาลฟรักโทส ลักษณะการจัดเรียงตัวของน้ำตาลซูโครส คือ β -D-Fructofuranosyl- α -D-Glucopyranoside หรือ α -D-Glucopyranosyl-(1 $\rightarrow$ 2) β -Fructofuranoside ดังแสดงในภาพที่ 17 น้ำตาลซูโครสมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342 โดยปกติน้ำตาลบริสุทธิ์จะอยู่ในผลึกรูป monoclinic หรือ phenoidal crystal ไม่มีสี และมีลักษณะโปร่งแสง



ภาพที่ 17 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส

ที่มา : Mallery (2005)

น้ำตาลจัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากเป็นสารให้ความหวานแล้ว ยังมีหน้าที่อื่น ๆ อีกมากที่สารอื่น ๆ ไม่สามารถทดแทนได้ ทั้งนี้เพราะน้ำตาลมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความหนืด ความแวววาม เป็นต้น

คุณสมบัติทางเคมี การแตกตัวของน้ำตาลซูโครสในสภาวะที่มีความร้อนสูง หรือมีน้ำย่อย หรือมีสภาพกรด-ด่างสูง น้ำตาลซูโครสจะเกิดการแตกตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ปัญหาการแตกตัวของน้ำตาลทรายที่อุตสาหกรรมอาหารมักประสบเสมอคือ สภาพการเกิดสี เช่น สีแดง สีน้ำตาล

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ลักษณะการให้ความหวานตามที่กำหนดเป็นมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 100 หน่วย (สารละลายร้อยละ 20) การละลายของน้ำตาลสามารถละลายน้ำได้ดีประมาณร้อยละ 65-70 โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำตาลเป็นสารประกอบประเภทโพลาร์โคเวเลนต์ เมื่อละลายในน้ำจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหมู่โพลาร์ในโมเลกุลของน้ำตาล ได้เป็นสารละลายของน้ำตาลในน้ำ ซึ่งเมื่อน้ำตาลมากขึ้นในสารละลายจะทำให้จุดเดือดของสารละลายนั้นเพิ่มขึ้น คุณสมบัติเกี่ยวกับความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก การที่สารละลายน้ำตาลมีความหนืดสูงทำให้การแพร่กระจายตัวของอากาศหรือออกซิเจนเป็นไปได้ช้า จึงเป็นการป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสนิมของภาชนะที่สัมผัสกับน้ำตาล นอกจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว น้ำตาลยังทำหน้าที่ลดปริมาณน้ำอิสระ เพิ่มแรงตึงผิว แรงดันออสโมติก และลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี (A_w) ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตในอาหารได้

Hodge and Osman (1976) รายงานว่าการลดปริมาณน้ำหรือลดค่า A_w ในสารละลาย แป้งโดยการเติมน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส หรือใช้น้ำปริมาณลดน้อยลงจะทำให้จุดเริ่มต้นของการ เกิดเจลาทีไนเซชันเกิดขึ้นช้าลง และการเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งในสารละลายของน้ำตาล ซูโครสที่ความเข้มข้นต่างกันจะให้ผลต่างกัน ซึ่งพบว่าสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นต่ำ ร้อยละ 0-20 ไม่มีผลทำให้การเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งแตกต่าง แต่เมื่อสารละลายน้ำตาลซูโครส มีความเข้มข้นสูงร้อยละ 30 และร้อยละ 50 จะทำให้การเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งเกิดได้ที่ อุณหภูมิสูงขึ้น

Spies and Hosney (1982) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครส มอลโทโทรโอส มอลโทส และกลูโคส ต่อการเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งสาลี พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการเจลาทีไนซ์แป้งจะเพิ่มขึ้น น้ำตาลทำให้การเจลาทีไนเซชันเกิดได้ช้าลง เนื่องจากน้ำตาลจะไปลดค่า A_w ในสารละลายทำให้น้ำอิสระที่สามารถจับกับแป้งเหลือน้อยลง ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้แป้งพองตัว และพบว่าน้ำตาลที่มีสายยาวจะทำให้การ เจลาทีไนเซชันเกิดได้ช้ากว่าน้ำตาลที่มีสายสั้น การสร้างพันธะระหว่างน้ำตาลและเม็ดแป้งตรง บริเวณส่วนออสติฐานจะทำให้เม็ดแป้งมีความคงตัว ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีไนเซชัน เพิ่มขึ้น

Bean and Setser (1992) พบว่าน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิด เจลาทีไนเซชันของแป้งสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของแป้ง น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือคู่ โดยทำให้การเจลาทีไนเซชันเกิดได้ช้าลง และเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ ใช้ในการเกิดเจลาทีไนเซชันจะเพิ่มขึ้น

Kim and Walker (1992) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งเปียกในสถานะที่มี น้ำตาลและสารอิมัลซิไฟเออร์โดยการวัดค่าความหนืด พบว่า น้ำตาลโมเลกุลคู่ซูโครสและน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยวกลูโคสทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เดกซ์โทรส เนื่องจากน้ำตาลไปรวมตัวกับน้ำ ทำให้น้ำที่จะมารวมตัวกับแป้งมีปริมาณลดลง และทำ ให้การพองตัวของแป้งเกิดขึ้นช้าลง

Wang and Jane (1994) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าวโพดในสถานะที่มีน้ำตาลชนิดต่าง ๆ และ มอลโตเด็คซ์ทริน ด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเติมน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น กลูโคส ฟรักโทส มอลโทส และซูโครส จะทำให้ T_g' ของเจลแป้งลดลงต่ำกว่าการเติมน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น มอลโตเด็คซ์ทริน และจากการวิเคราะห์ผลต่าง (ΔT) ระหว่างอุณหภูมิการเก็บรักษา (T_f) และอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') พบว่าการเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g' ซึ่งจะทำให้ ΔT ($\Delta T = T_f - T_g'$) มีค่าต่ำ จะทำให้ตัวอย่างมีความคงตัวต่อการเก็บรักษาดีกว่า โดยพบว่าการเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จะเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งการเติมน้ำตาลกลูโคสและฟรักโทสทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าการเติม มอลโทส ซูโครส และมอลโตเด็คซ์ทรินเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และพบว่า T_g' ของตัวอย่างที่มีการเติมน้ำตาลจะมีค่าสูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาโดยเพิ่มจาก -0.7 ถึง 4.4 องศาเซลเซียส และ -0.4 ถึง 3.7 องศาเซลเซียส เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 และ -20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 21 วัน

Jang *et al.* (2001) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') การเกิดเจลาติไนเซชัน และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสาลี ด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลและแป้งจาก 0.25:1 ถึง 1:1 ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันของตัวอย่าง ลดลงจาก -7 เป็น -20 องศาเซลเซียส และพลังงานในการหลอมเหลวผลึกน้ำที่แข็งตัวได้เมื่อเทียบ กับตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 29.4 ถึง 413.4 จูลต่อกรัม โดยตรวจสอบภายใต้สภาวะที่มีปริมาณน้ำในระบบทั้งหมด 40 ถึง 60% อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) และ พลังงาน (enthalpy, ΔH) ในการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาล เพิ่มขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำตาลลดลง และพบว่า T_g' ของตัวอย่างที่มีการเติมน้ำตาลจะ เพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญโดยเพิ่มขึ้นระหว่าง 15 และ 18 องศาเซลเซียสใน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำตาลต่อแป้ง 1:1 และเมื่อนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4, 32 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณน้ำ 40% ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลรีโทรเกรดได้สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาล และที่ปริมาณน้ำ 50% และ 60% ให้ผลในลักษณะเดียวกันแต่เกิดได้น้อยกว่า และเจลแป้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 32 และ 40 องศาเซลเซียส จะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ลดลง

Maaurf *et al.* (2001) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสาคุโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสจะส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งสาคุเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อพลังงานความร้อน (ΔH) ของการเกิดปฏิกิริยา ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔT) ของระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสไม่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัด นอกจากนี้การเติมน้ำตาลซูโครสจะมีผลทำให้รูปร่างของพีคเปลี่ยนไป การเจลลิตีในเซชันของแป้งในระบบที่มีปริมาณน้ำจำกัดจะได้พีคคู่ซ้อนทับกัน (double endothermic peak) เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจะเกิดพีคเดี่ยว (single endothermic peak) ซึ่งคล้ายกับพีคที่ได้จากการเจลลิตีในเซชันของแป้งในระบบที่มีปริมาณน้ำที่มากเกินไปแต่จะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากปริมาณน้ำตาลซูโครสแล้วการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและพลังงานยังขึ้นกับอัตราส่วนของน้ำและแป้งอีกด้วย

Baek *et al.* (2004) ศึกษาผลของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนและความคงตัวของเจลแป้งข้าวโพดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำด้วยเทคนิค DSC พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_0) และพลังงาน (enthalpy, ΔH) ที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น และจากการเปรียบเทียบน้ำตาลทั้งหมดพบว่าน้ำตาลโมเลกุลคู่จะให้ค่า T_0 และ ΔH สูงกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน จากการเก็บรักษาเจลที่อุณหภูมิต่ำ (4 และ -20 องศาเซลเซียส) พบว่าน้ำตาลมีผลทำให้การกลับมาจัดเรียงตัวกันของอะมิโลเพกทินเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งการเติมฟรักโทสและไอโซมอลโทสจะให้ระดับการกลับมาจัดเรียงตัวกันสูงกว่าน้ำตาลชนิดอื่น และพบว่าน้ำตาลแอลกอฮอล์ทำให้การจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดได้สูงกว่าน้ำตาลทั่วไป อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของตัวอย่างที่ผ่านการแช่แข็งจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น และพบว่า การเติมซูโครสมีผลทำให้พลังงานการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งลดต่ำลงในขณะที่การเติมไอโซมอลโทส และทรีฮาโลสจะทำให้ค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น การเก็บเจลที่อุณหภูมิต่ำมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันเพิ่มขึ้นในขณะที่พลังงานการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงอันเนื่องมาจากมีน้ำบางส่วนถูกนำไปใช้ในกระบวนการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแป้ง สำหรับเจลที่มีแป้งร้อยละ 40 ในสถานะที่มีน้ำตาลร้อยละ 10 หรือ 30 จะเกิดการการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและอุณหภูมิกลาสทรานสิชันจะลดลงเมื่อเทียบกับในสถานะที่ไม่มีน้ำตาล

3.2 เกลือ

เกลือ เป็นสารประกอบประเภทไอออนิกที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับกรดหรือปฏิกิริยาการทำให้เป็นกลางระหว่างกรดกับด่าง สมบัติของเกลือ คือ มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถตกผลึกได้ เมื่อละลายน้ำสารละลายที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นกลางหรือด่าง ขึ้นกับชนิดของเกลือ ความสามารถในการละลายจะแตกต่างกัน ตัวอย่างเกลือที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแสดงในตารางที่ 4

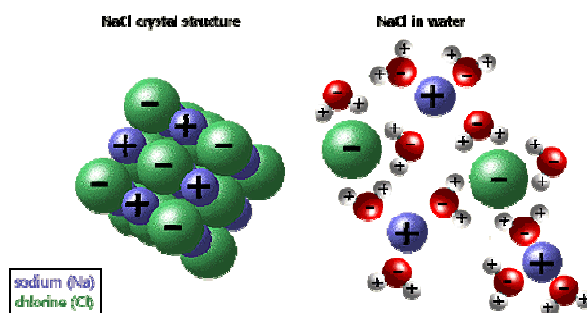
ตารางที่ 4 ประโยชน์ของเกลือบางชนิดในอุตสาหกรรมอาหาร

เกลือของกรดอินทรีย์	การใช้ประโยชน์
โมโนโซเดียมกลูตาเมต (MSG)	สารเพิ่มรสชาติอาหาร
โพแทสเซียมโบรเมต	ปรับปรุงคุณภาพแป้ง
โซเดียมคาร์บอเนต	ทำให้น้ำอ่อน
โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง)	สารให้รสชาติและช่วยถนอมรักษาอาหาร
โซเดียมไนเตรต	ถนอมรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อ

ที่มา : นิธิยา (2545)

เกลือในทางวิทยาศาสตร์การอาหาร หมายถึง เกลือที่ใช้ปรุงอาหาร มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งเป็นเกลือที่บริสุทธิ์มีลักษณะสีขาว เป็นผลึกรูปร่างไม่คงที่ แต่จัดว่าลักษณะของผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ เกลือมีคุณสมบัติในการดูดความชื้น (hygroscopic) และจะดูดความชื้นมากขึ้นถ้าเกลือนั้นไม่บริสุทธิ์

เมื่อเกลือแกงละลายในน้ำ จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่อยู่บนโมเลกุลของน้ำกับ Na^+ ซึ่งจะมากกว่าแรงยึดกันระหว่าง Na^+ และ Cl^- ดังนั้นขั้วบวกของโมเลกุลน้ำจะดึงด้านประจุลบออกจากโมเลกุลเกลือ ขณะที่ขั้วลบของโมเลกุลน้ำจะดึงด้านประจุบวกออกจากโมเลกุลเกลือ ทำให้แรงยึดพันธะระหว่าง Na^+ และ Cl^- ถูกทำลาย ไอออนทั้งสองจึงถูกดึงออกจากกันให้กระจายตัว และถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ เป็นสารละลายเกลือแกงในน้ำ แสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 โครงสร้างผลึกของเกลือโซเดียมคลอไรด์และการละลายของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ
 ในรูปของโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-)
 ที่มา : Pualing (1946)

Oosten (1982, 1990) เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่ออุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของแป้งในน้ำว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของแป้งจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจากนั้นจะเริ่มลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์จะเพิ่มมากขึ้น โดยอธิบายว่าเมื่อแป้งอยู่ในน้ำจะมีความเป็นกรดอ่อนและสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchanger) ได้ โดยหมู่ไฮดรอกซิล (OH-group) ของโมเลกุลแป้งจะปล่อยโปรตอนออกมาในน้ำ ทำให้เม็ดแป้งมีประจุเป็นลบและน้ำมีประจุเป็นบวก ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์คอลลอยด์ (Donnan potential) ระหว่างเม็ดแป้งและน้ำ เม็ดแป้งจะแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นลบโดยสามารถดึงดูดประจุบวกและผลักประจุลบจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ ซึ่งประจุลบนี้เป็นที่ทราบว่ามีคุณสมบัติเป็น gelatinizing agent สามารถก่อให้เกิดการเจลในเซชันของแป้งได้โดยการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลในเม็ดแป้ง ดังนั้นในสารละลายน้ำแป้งที่มีค่าความต่างศักย์คอลลอยด์สูง การเจลในเซชันของแป้งจะเกิดขึ้นช้าลง และเมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีสมบัติในการยับยั้งการพองตัวของแป้งลงในสารละลายน้ำแป้ง โปรตอนบางตัวของหมู่แอลกอฮอล์บนโมเลกุลของแป้งจะเปลี่ยนไปเป็นหมู่แอลกอฮอล์ (alcoholates) โดย Na^+ ซึ่งหมู่แอลกอฮอล์เหล่านี้สามารถแตกตัวได้ดีกว่า จึงทำให้ความต่างศักย์คอลลอยด์ของระบบมีค่าสูงขึ้น แต่การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแป้งกับ Na^+ เป็นไปอย่างจำกัด ดังนั้นอุณหภูมิในการเจลในเซชันจึงเพิ่มขึ้นอย่างจำกัดด้วย ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งอิทธิพลของประจุลบจะเริ่มเด่นขึ้น ทำให้แป้งเจลในเซชันง่ายขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งจึงลดลง

Zobel (1984) รายงานว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งโดยประจุลบ หรือประจุบวกสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันได้ โดยจะมีผลต่อโครงสร้างของน้ำในสารละลาย เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์กลุ่มที่มีความแรงของประจุมากมีแนวโน้มในการเพิ่มโครงสร้างที่เป็นระเบียบของน้ำและลดจำนวนโมเลกุลน้ำอิสระ จึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันเพิ่มขึ้น

Bean and Setser (1992) รายงานว่าประจุบวกของเกลือ เช่น โซเดียมไอออนจะทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความคงตัว ส่วนประจุลบ เช่น คลอไรด์ไอออนทำหน้าที่ในการเจลาตินในแป้ง ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 1 ถึง 3.5 มีผลทำให้ความหนืดของแป้งเปียกเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นร้อยละ 10 อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 10 ความหนืดและอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันจะลดลงแต่ยังคงสูงกว่าในน้ำบริสุทธิ์

Jane *et al.* (1993) รายงานว่ากลไกการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งในสารละลายเกลือเป็นผลมาจากอิทธิพลของการสร้างและการสลายของโครงสร้างน้ำ และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างเกลือและหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง โดยไอออนที่มีความหนาแน่นประจุสูงเช่น Na^+ จะทำให้โมเลกุลน้ำจัดตัวกันอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ปริมาณน้ำอิสระจึงลดลง ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความคงตัวมากขึ้น และไอออนที่มีความหนาแน่นประจุต่ำเช่น SCN^- และ I_3^- ไม่เพียงแต่ทำลายความเป็นระเบียบของโมเลกุลน้ำซึ่งจะทำให้ปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นแต่ยังมีแนวโน้มในการสร้างพันธะกับโมเลกุลแป้งทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้งขึ้น ไอออนลบของเกลือจะสามารถผลักโมเลกุลแป้งซึ่งแสดงศักย์ไฟฟ้าลบตามธรรมชาติได้ ทำให้เม็ดแป้งมีความคงตัวขึ้นโดยแรงผลักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นประจุของไอออนลบ ในกรณีไอออนลบที่มีความหนาแน่นประจุต่ำเมื่อสร้างพันธะกับแป้งแล้วโครงสร้างของเม็ดแป้งจะถูกทำลายบริเวณจุดศูนย์กลางของเม็ดแป้ง ในทางตรงกันข้ามไอออนบวกจะสามารถดึงโมเลกุลของเม็ดแป้งเข้ามาทำปฏิกิริยาได้ โดยไอออนบวกที่มีความหนาแน่นประจุสูงเมื่อสร้างพันธะกับแป้งแล้วโครงสร้างของเม็ดแป้งจะถูกทำลายจากบริเวณปลายสายของเม็ดแป้งเข้ามา และไอออนบวกที่มีความหนาแน่นประจุต่ำเมื่อสร้างพันธะกับแป้งแล้วจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในโมเลกุลของเม็ดแป้ง

Lii and Lee (1993) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนสถานะของเม็ดแป้ง 7 ชนิดด้วยเทคนิค DSC โดยใช้อัตราส่วนของแป้งต่อน้ำเท่ากับ 1:4, 2:3 และ 3:2 ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-5 โมลาร์ (เทียบเท่ากับ 0-29.3% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จากการตรวจลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งทั้ง 7 ชนิดด้วยเครื่อง X-ray diffractometer จะได้แป้งที่มีโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ A, B และ C ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจะทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งซึ่งความเข้มข้นของเกลือที่จุดนั้นจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะ โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง จากนั้นอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันจะลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือจะเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายผลการทดลองด้วยสมมติฐานของ Oosten (1982,1990) และพบว่าเม็ดแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแข็งแรงและหนาแน่น เช่น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืช) จะมีความต้านทานการเกิดเจลลิตในเซชันโดย Cl^- สูง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ทำให้เกิดความต่างศักย์คอนแนกสูงกว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B และ C ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะลดลงน้อยกว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลลิตในเซชันแป้งในระบบที่มีปริมาณน้ำจำกัดไม่แตกต่างกับระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอ

Sudhakar *et al.* (1994) ศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด และอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันในระบบที่มีแป้งและไฮโดรคอลลอยด์อยู่ร่วมกันโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์วิสโคมิเตอร์ ในการทดลองใช้แป้งข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.05-0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าในระบบที่มีแป้งกับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ เกลือจะทำหน้าที่ในการยับยั้งการพองตัวของแป้งจึงทำให้ความหนืดของแป้งเปียกและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันเพิ่มสูงขึ้น และในระบบที่มีแป้งกับแซนแทนกัม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแซนแทนกัม ความหนืดของแป้งเปียกจะเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันจะลดลง ส่วนระบบที่มีทั้งแป้ง เกลือ และแซนแทนกัม พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ ความหนืดของแป้งเปียกจะลดลงแต่อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันจะเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเกลือมีประสิทธิภาพในการลดความหนืดของแซนแทนกัมมากกว่าการเพิ่มความหนืดของน้ำแป้ง

Maaurf *et al.* (2001) ศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งสาคุโดยใช้เทคนิค DSC พบว่าการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งสาคุเมื่อใช้แป้งต่อน้ำในอัตราส่วน 2:3 และ 3:2 และเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โมลาร์ (เทียบเท่ากับ 0-29.3% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งสาคุจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นถึง 2.0 โมลาร์หรือ 11.7% จากนั้นจะลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์จะเพิ่มมากขึ้น พลังงานความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น นอกจากผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์แล้วการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันและพลังงานยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำและแป้งอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมี

- 1.1 หัวมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (Kasetsart 50, KU 50) อายุการเก็บเกี่ยว 9 เดือน จากจังหวัดฉะเชิงเทรา
- 1.2 น้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ตรามิตรผล)
- 1.3 เกลือโซเดียมคลอไรด์ (AnalaR, England)
- 1.4 น้ำกลั่นปราศจากไอออน (ผ่านการกำจัดไอออนด้วยเครื่อง Optima water purifier ELGA, England)

2. อุปกรณ์

- 2.1 อุปกรณ์สำหรับการสกัดแป้ง
- 2.2 เครื่องแก้วชนิดต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์
- 2.3 เครื่องชั่งวิเคราะห์อย่างละเอียด (Precisa 205A, Germany)
- 2.4 ตู้อบไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Mettler UM 500, Germany)
- 2.5 เกล็ดเคเตออร์ที่มีสารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel)
- 2.6 เตาไฟฟ้า (Hot plate)
- 2.7 เตาเผาไฟฟ้าที่ปรับ และควบคุมอุณหภูมิได้ (Electric Muffle Furnace, Carbolite, England)
- 2.8 เครื่องย่อย (Digestion Apparatus) มีชุดควบคุมอุณหภูมิ (Condenser) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย
- 2.9 เครื่องควบคุมอุณหภูมินำหล่อเย็น (Polyscience 9505, USA)
- 2.10 เครื่องโพลาไรมิเตอร์ (Schmidt + Haensch Polartronic MH8, Germany)
- 2.11 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (ประกอบด้วย Sotex system HT 1046 Service unit และ Sotex system HT2 1045 Extraction unit, Tecator, Sweden)

- 2.12 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ประกอบด้วย Kjelttec system 1026 Distilling unit และ 2006 Digester, Tecator, Sweden)
- 2.13 อ่างน้ำไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Memmert WB 14, Germany และ Polyscience, USA)
- 2.14 เครื่อง X-ray diffractometer (Joel X-ray diffractometer JDX-3080, Joel, Japan)
- 2.15 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7 Perkin Elmer, USA)
- 2.16 เครื่องวัดความหนืด Rapid Visco Analyzer (RVA Model Series 4D, Newport Scientific, Australia)
- 2.17 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer Model TA.XT plus, Stable Micro Systems, UK)
- 2.18 เครื่อง Rheometer (Physica MCR Series300, Metrohm Siam Ltd., Germany)
- 2.19 กล้องจุลทรรศน์ (Meiji model Ck 3800, Japan) พร้อมแท่นให้ความร้อน (LTS 120 Hostage, Linkam Scientific, UK)

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

1.1 การสกัดแป้งมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการสกัดแป้งมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการ ตามวิธีการของวันเพ็ญ (2545) โดยนำหัวมันสำปะหลังสดมาตัดหัวท้ายออก ล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก สับเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร ปั่นละเอียดพร้อมน้ำในอัตราส่วนหัวมันสำปะหลังต่อน้ำ (1:2) แล้วนำมากรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นเทผ่านตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 ไมครอน (sieve 170 mesh) เพื่อแยกกากออก แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แป้งตกตะกอน เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ล้างแป้งด้วยน้ำอีก 2 ครั้ง แล้วเทส่วนใสทิ้ง นำแป้งหมาดไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อแห้งแล้วนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดแห้ง (Hammer mill) แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 ไมครอน (sieve 170 mesh) บรรจุในถุงพลาสติก ปิดผนึก เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

- 1.2.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (1990)
- 1.2.2 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ AOAC (1990)
- 1.2.3 ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ AOAC (1990)
- 1.2.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AOAC (1990)
- 1.2.5 ปริมาณเส้นใย ตามวิธีการของ AOAC (1990)
- 1.2.6 ปริมาณแป้งโดยวิธีโพลาริเมตริก ตามวิธีการของ มอก. 52-2516

1.3 การเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังเพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำตาลซูโครส

การศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง เริ่มจากการผสมแป้งมันสำปะหลังกับสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยมีตัวอย่างควบคุมคือแป้งในน้ำ (สารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0) ในสถานะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

1.4 การเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังเพื่อศึกษาอิทธิพลของเกลือโซเดียมคลอไรด์

การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังเริ่มจากการผสมแป้งมันสำปะหลังกับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก โดยมีตัวอย่างควบคุมคือแป้งในน้ำ (สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0) ในสถานะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

2. การตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

2.1 การวัดขนาดและวิเคราะห์การพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนด้วยเทคนิค Thermal microscopy

เตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ จากนั้นนำมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Meiji model Ck 3800, Japan) ในขณะที่ให้ความร้อนแก่แป้งบนแท่นให้ความร้อน (LTS 120 Hotstage, Linkam Scientific, UK) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (PE94 Temperature controller, Linkam Scientific, UK) วิเคราะห์การพองตัวและวัดขนาดของเม็ดแป้งทุก ๆ 5 นาที ในช่วงอุณหภูมิ 55-95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งตามวิธีการของ Sahai *et.al.* (1996) ด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus (Media cybernetics, USA)

2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA Model Series 4D, Newport Scientific, Australia) ตามวิธีการของ Newport Scientific (1995) โดยเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 9.2 โดยน้ำหนักในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ นำไปวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง RVA บันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Temperature, องศาเซลเซียส) ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity, RVU) ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity, RVU) ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity, RVU) ผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด (Breakdown, RVU) และผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดต่ำสุด (Setback from Trough, RVU)

2.3 การวิเคราะห์สมบัติวิทยาการไหล (Rheological properties)

การวิเคราะห์สมบัติวิทยาการไหลด้วยเครื่อง Rheometer (Physica MCR Series300, Metrohm Siam Ltd., Germany) ดัดแปลงจากวิธีการของบุญทิวา (2548) เริ่มจากเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ แล้วนำมาทดสอบทางด้าน Oscillatory test ด้วยการทำ Temperature sweep โดยใช้หัวกดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กำหนดขนาดช่องว่างสำหรับใส่ตัวอย่าง (gap size) เท่ากับ 1000 μm ทำการเทตัวอย่างลงบนแท่นวางตัวอย่าง (rheometer platform) ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 55 ถึง 95 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิลงจาก 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที กำหนดค่าความถี่เท่ากับ 1 Hz และค่าความเครียด (strain) เท่ากับ 1% ซึ่งได้จากการหา Linear Viscoelastic Range (ภาคผนวก ข) กราฟที่ได้จะแสดงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') เทียบกับอุณหภูมิ

2.4 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลที่ในเซชัน

การศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลที่ในเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC7 Perkin Elmer, USA) ดัดแปลงจากวิธีการของ Kim *et. al.* (1995) เริ่มจากการเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่ บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ซึ่งตัวอย่างน้ำแป้ง 40-50 มิลลิกรัม ลงในภาชนะ (DSC pan) และวิเคราะห์การเกิดเจลที่ในเซชันในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในการทดลองจะใช้ indium ซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 156.6 องศาเซลเซียส พลังงานในการหลอมเหลวเท่ากับ 28.45 จูลต่อกรัม และน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส พลังงานในการหลอมเหลวเท่ากับ 333.88 จูลต่อกรัมเป็นสารมาตรฐาน และใช้ภาชนะเปล่าเป็นภาชนะอ้างอิง บันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเกิดเจลที่ในเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลที่ในเซชัน (onset temperature, T_o , องศาเซลเซียส) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลที่ในเซชัน (peak

temperature, T_p , องศาเซลเซียส) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (conclusion temperature, T_c , องศาเซลเซียส) และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (enthalpy, ΔH , จูลต่อกรัม)

2.5 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง เริ่มจากการนำภาชนะ (DSC pan) ที่ผ่านการทดสอบการเกิดเจลลาทีไนเซชันแล้วมาบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้เครื่อง DSC (DSC7 Perkin Elmer, USA) ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้ indium ซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 156.6 องศาเซลเซียส พลังงานในการหลอมเหลวเท่ากับ 28.45 จูลต่อกรัมและน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส พลังงานในการหลอมเหลวเท่ากับ 333.88 จูลต่อกรัมเป็นสารมาตรฐาน และใช้ภาชนะเปล่าเป็นภาชนะอ้างอิง บันทึกค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกับการเกิดเจลลาทีไนเซชัน คำนวณค่าร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชันจากสูตร

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

จากนั้นศึกษาอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยบ่มตัวอย่างเจลแป้งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 1, 2, 3, 7, 14 และ 21 วัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

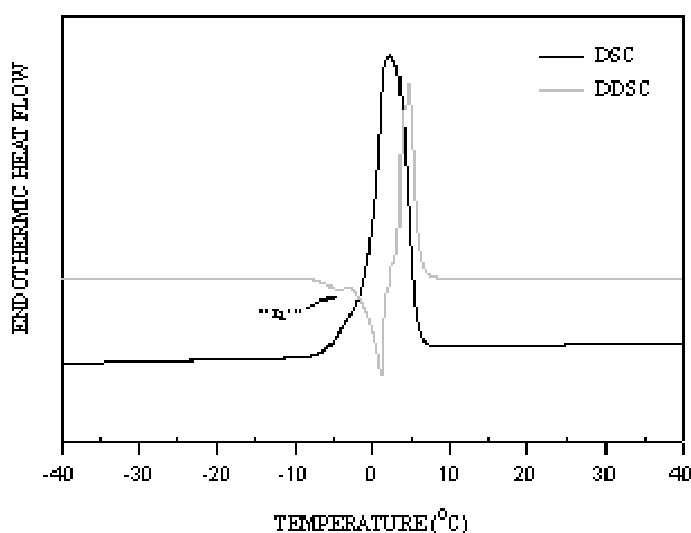
2.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้

การศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำแข็งและเจลแข็งมันสำปะหลัง (ในสภาวะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคงที่) จะตรวจสอบควบคู่ไปกับการวิเคราะห์การเกิดเจลลิตีในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้เครื่อง DSC (DSC7 Perkin Elmer, USA) บันทึกค่าอุณหภูมิและพลังงานในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็ง ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้คำนวณจากสูตร

$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้} = \frac{\text{พลังงานในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในตัวอย่าง}}{\text{พลังงานความร้อนแฝงในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็ง}} \times \frac{1}{\text{ปริมาณน้ำในตัวอย่าง}} \times 100$$

2.7 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแข็งมันสำปะหลัง

ตรวจวัดค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแข็งมันสำปะหลังที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 0 ถึง 21 วัน จากกราฟอนุพันธ์ของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (ภาพที่ 19) โดยใช้เครื่อง DSC (DSC7 Perkin Elmer, USA)



ภาพที่ 19 กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำในเจลแข็ง และอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแข็งมันสำปะหลัง (T_g') ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

2.8 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

นำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดิบและเจลแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน และอบแห้งแบบเยือกแข็งแล้วมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งด้วยเครื่อง X-ray diffractometer คัดแปลงจากวิธีการของ Murthy and Minor (1990) ทำการทดสอบโดยใช้ Target เป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 40.0 kV. ใช้กระแสไฟฟ้า 30.0 mA ในช่วงมุมหักเห 2.00 ถึง 40.00 องศา 2- theta ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศา 2- theta ต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) จากพื้นที่ใต้กราฟ

2.9 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลัง

เตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำคั่งที่ คัดแปลงจากวิธีการของวันเพ็ญ (2545) บรรจุตัวอย่างลงในถุงทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ทำให้แป้งเจลาตินในซอสอย่างสมบูรณ์ในอ่างน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0, 1, 3, 7, 14 และ 21 วัน คัดตัวอย่างให้มีความสูง 1.5 เซนติเมตร ทำการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของ เจลแป้งมันสำปะหลังโดยใช้วิธีการวัดค่าเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์โดยเครื่อง Texture Analyzer (Model TA.XT plus, Stable Micro Systems, UK) ด้วยวิธีการวัดค่าเก้าโครงคุณลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ของเจลแป้งที่ร้อยละการเสียรูป (deformation) เท่ากับ 50 บันทึกค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ความสามารถในการเกาะติดผิววัตถุ (Adhesiveness) และค่าความเหนียวเป็นยาง (Gumminess)

3. การวางแผนการทดลอง

การทดลองใช้การวางแผนแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. สถานที่ทำการวิจัย

หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2547 และสิ้นสุดในเดือนกันยายน พ.ศ. 2549

ผลและการวิจารณ์

1. องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเถ้า ปริมาณเส้นใย ตามวิธีการของ AOAC (1990) และปริมาณแป้งโดยวิธีโพลาไรเมตริก ตามวิธีการของ มอก. 52-2516 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณสตาร์ชอยู่สูง มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้า ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งจัดว่ามีความบริสุทธิ์สูง

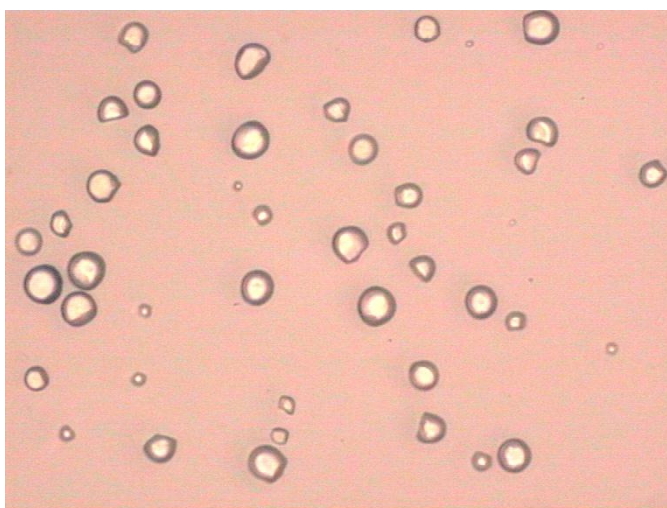
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
โปรตีน	0.05 ± 0.01
ไขมัน	0.08 ± 0.02
เถ้า	0.12 ± 0.00
เส้นใย	trace
สตาร์ช	98.72 ± 0.02

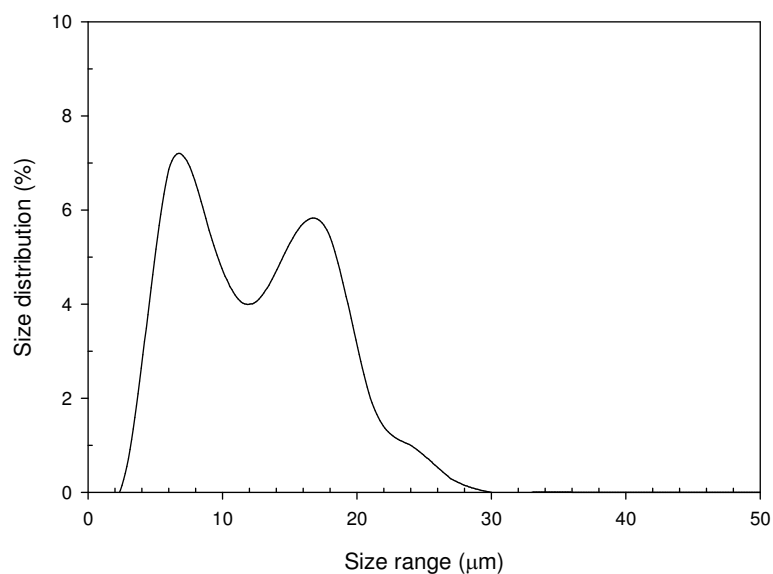
2. สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง

2.1 ขนาดและการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อน

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดากำลังขยาย 20 เท่า พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะรูปร่างกลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด (ภาพที่ 20) ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-29 ไมครอน ดังภาพที่ 21 ประกอบด้วยเม็ดแป้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-10 ไมครอนและ 11-29 ไมครอน ร้อยละ 40 และ 60 โดยประมาณ ตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 11.7 ไมครอน



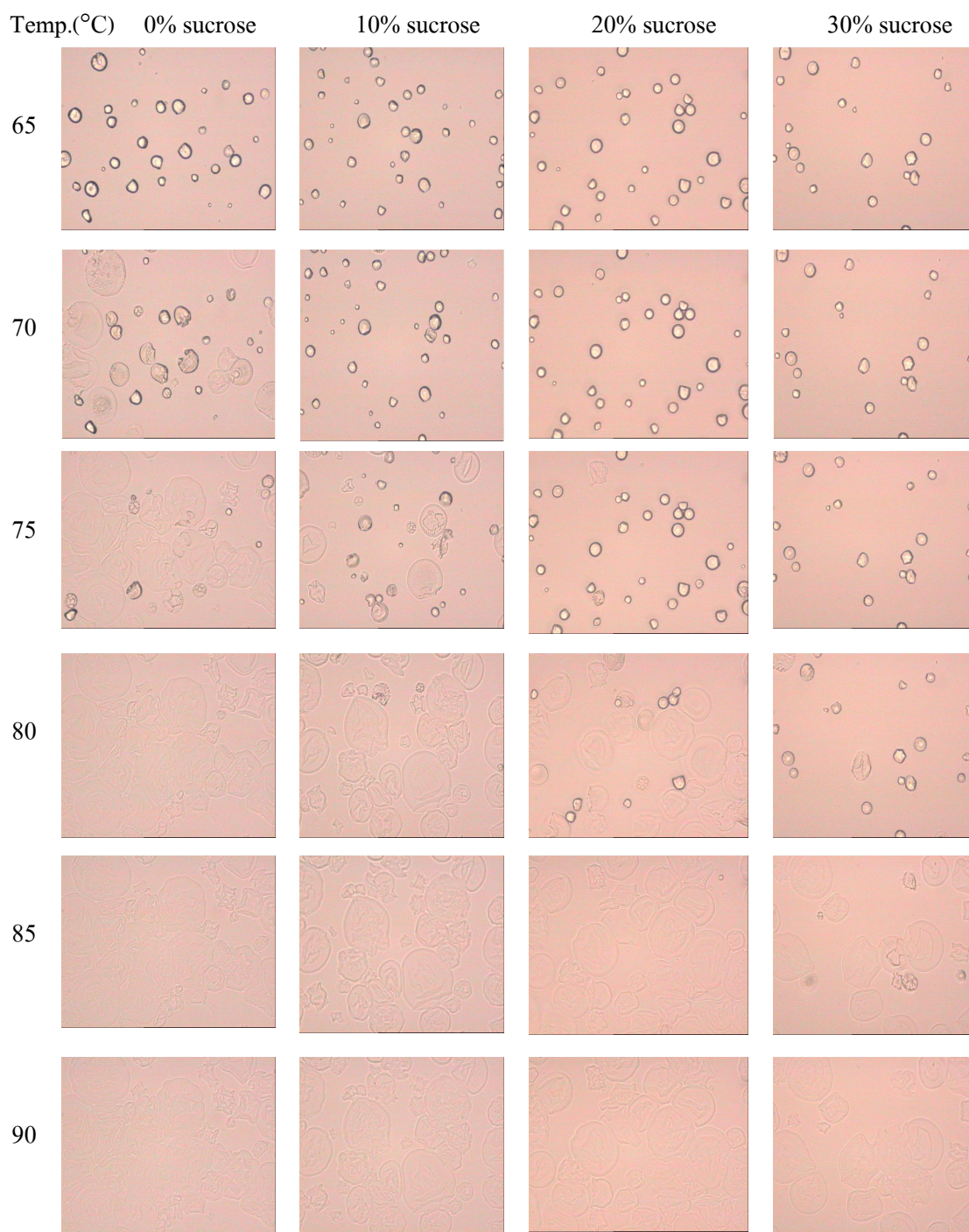
ภาพที่ 20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา ที่กำลังขยาย 20 เท่า



ภาพที่ 21 ค่าร้อยละการกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

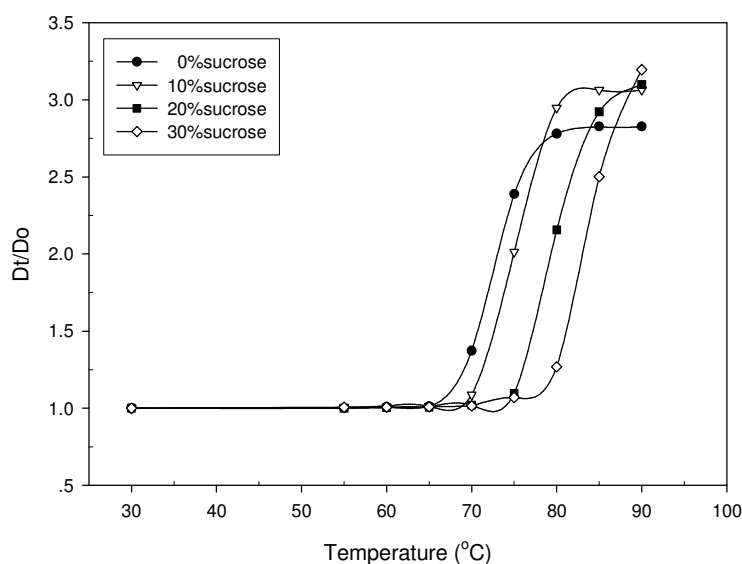
2.1.1 การพองตัวของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครส

ขณะให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 0.5% ในสถานะที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส เม็ดแป้งส่วนใหญ่จะพองตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส โดยเม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่จะพองตัวได้เร็วกว่าเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กกว่า จากนั้นจะพองตัวเต็มที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 80 องศาเซลเซียส และในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเม็ดแป้งจะพองตัวได้ช้าลง โดยพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจนถึง 30% (ภาพที่ 22)



ภาพที่ 22 ลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%

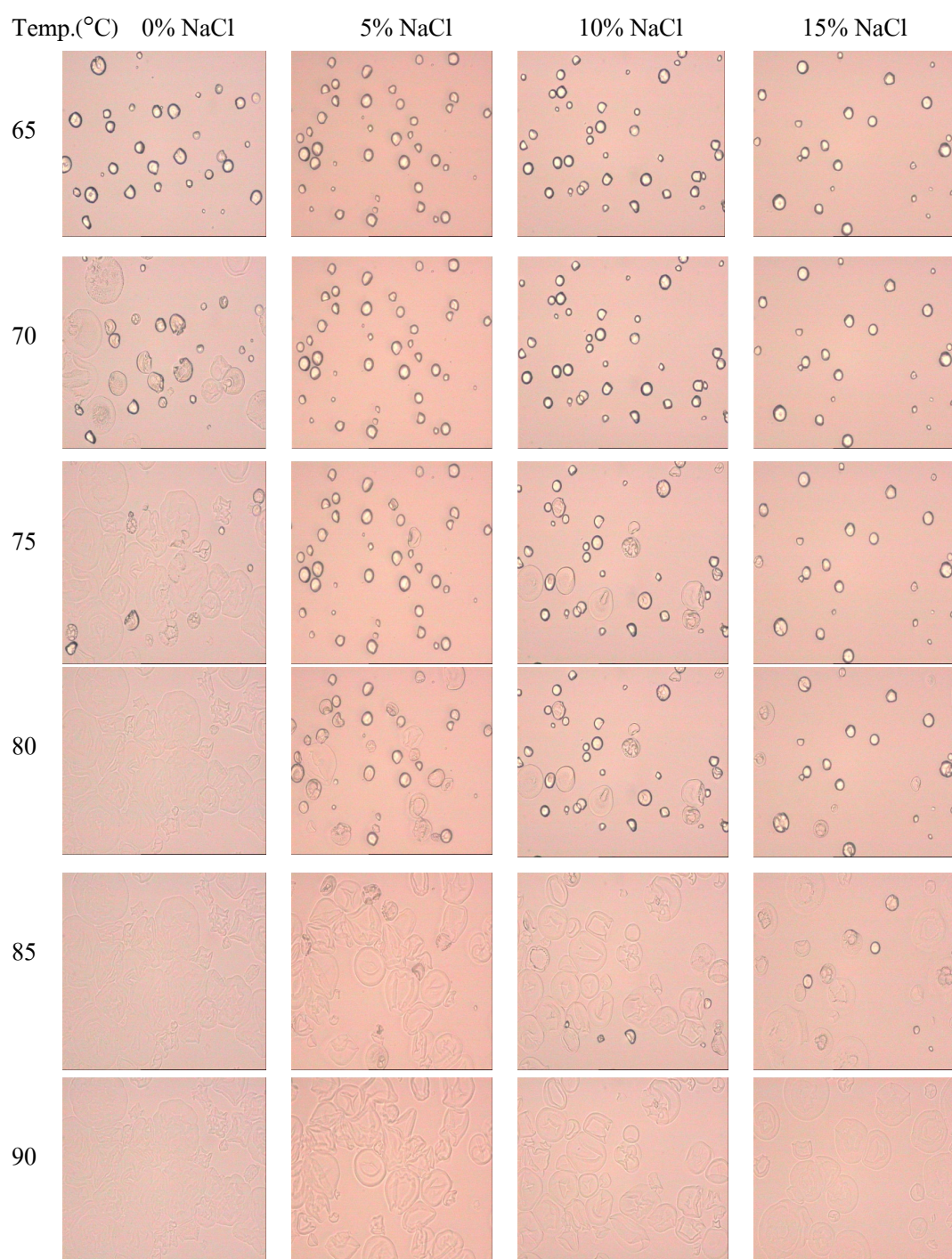
จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น (ภาพที่ 23) พบว่า เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส โดยพองตัวได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเริ่มพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส โดยพองตัวได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 65 ถึง 80 องศาเซลเซียส 70 ถึง 85 องศาเซลเซียส 75 ถึง 90 องศาเซลเซียส และ 75 ถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น 0, 10, 20 และ 30% ตามลำดับ



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น

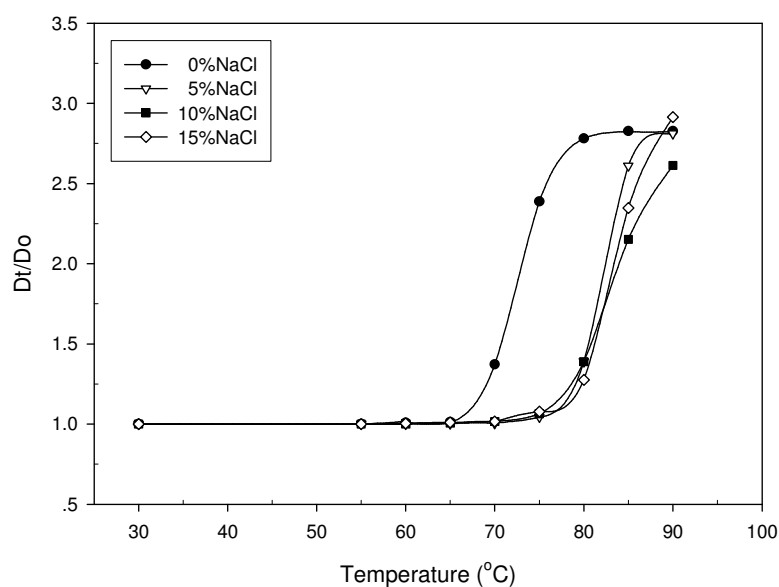
2.1.2 การพองตัวของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

ขณะให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 0.5% ในตัวอย่างที่ไม่มี การเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ เม็ดแป้งส่วนใหญ่จะพองตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นจะพองตัวเต็มที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 80 องศาเซลเซียส และในสถานะที่มีเกลือ โซเดียมคลอไรด์ เม็ดแป้งจะพองตัวได้ช้าลง โดยพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80 ถึง 85 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึง 15% (ภาพที่ 24)



ภาพที่ 24 ลักษณะการฟองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น (ภาพที่ 25) พบว่า เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส โดยพองตัวได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเริ่มพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยพองตัวได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 65 ถึง 80 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ที่ระดับ 0% และพองตัวได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 75 ถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์อยู่ในช่วง 5-15%

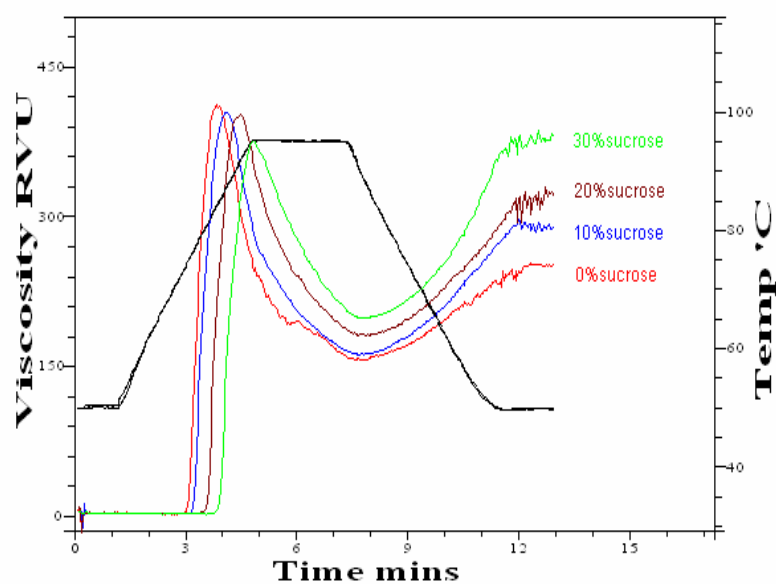


ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น

2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

2.2.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 9.20% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 26 และตารางที่ 6



ภาพที่ 26 ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

ตารางที่ 6 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%
เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

สมบัติความหนืด	Sucrose concentration (%)			
	0	10	20	30
Pasting temperature (°C)	73.0 ± 1.27 ^d	75.7 ± 0.85 ^c	79.8 ± 0.11 ^b	83.8 ± 0.35 ^a
Peak viscosity (RVU)	412 ± 0.18 ^a	405 ± 0.65 ^{ab}	340 ± 3.18 ^b	373 ± 4.01 ^c
Trough viscosity (RVU)	157 ± 0.35 ^c	159 ± 4.48 ^c	180 ± 2.00 ^b	202 ± 4.24 ^a
Final viscosity (RVU)	249 ± 2.36 ^d	284 ± 6.42 ^c	323 ± 2.42 ^b	387 ± 8.13 ^a
Breakdown (RVU)	255 ± 0.53 ^a	246 ± 3.83 ^a	220 ± 1.18 ^b	172 ± 8.25 ^c
Setback from trough (RVU)	92 ± 2.71 ^d	126 ± 1.94 ^c	143 ± 4.42 ^b	186 ± 3.89 ^a

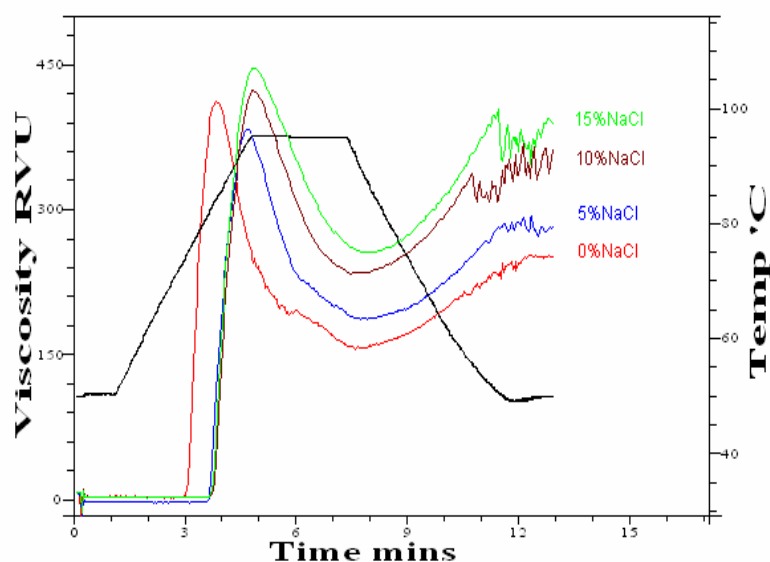
หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (Pasting temperature) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเพิ่มจาก 73 ถึง 83.8 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% เม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูงและพองตัวได้เร็วจะส่งผลให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งถูกทำลาย และสารละลายน้ำแป้งจะเริ่มมีความข้นหนืดที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งที่มีกำลังการพองตัวต่ำและพองตัวได้ช้า (Pomeranz, 1991) ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสซึ่งมีผลทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ช้าลงจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่สารละลายน้ำแป้งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของแป้งในการจับตัวกับน้ำ หรือแรงที่ต้องใช้ในการกวนหรือผสมในอาหาร (Newport Scientific, 1995) พบว่าค่าความหนืดสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นโดยมีค่าลดลงจาก 412 เป็น 373 RVU เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 30% แป้งมันสำปะหลังมีค่าความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) และความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 157 ถึง 202 RVU และ 249 ถึง 387 RVU ตามลำดับ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด (Breakdown) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการคงทนต่ออุณหภูมิและการกวนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในหลายกระบวนการผลิต (Newport Scientific, 1995) จากการทดลองพบว่าค่า Breakdown ของแป้งมันสำปะหลังมีค่าลดลง

เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นโดยมีค่าลดลงจาก 255 เป็น 172 RVU เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่ออุณหภูมิและการกวนได้มากขึ้น ค่าการคืนตัวหรือค่าผลต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้ายและค่าความหนืดต่ำสุด (Setback from trough) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Newport Scientific, 1995) แป้งที่มีค่าการคืนตัวมากหรือมีค่าเป็นบวกจะเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้ดีและมีแนวโน้มที่จะให้เจลแป้งที่แข็งแรงมาก (Beta and Corke, 2001) การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการคืนตัวโดยมีค่าเพิ่มจาก 92 ถึง 186 RVU เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสอาจมีผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ได้ดีขึ้น

2.2.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 9.20 % (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 5, 10 และ 15% ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 27 และตารางที่ 7



ภาพที่ 27 ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

ตารางที่ 7 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

สมบัติความหนืด	NaCl concentration (%)			
	0	5	10	15
Pasting temperature (°C)	73.0 ± 1.27 ^b	81.4 ± 0.42 ^a	83.2 ± 1.27 ^a	82.2 ± 0.39 ^a
Peak viscosity (RVU)	412 ± 0.18 ^c	387 ± 4.66 ^d	427 ± 5.48 ^b	447 ± 0.41 ^a
Trough viscosity (RVU)	157 ± 0.35 ^c	190 ± 4.48 ^b	235 ± 2.53 ^a	248 ± 10.37 ^a
Final viscosity (RVU)	249 ± 2.36 ^c	289 ± 9.43 ^b	364 ± 1.06 ^a	377 ± 15.67 ^a
Breakdown (RVU)	255 ± 0.53 ^a	196 ± 0.18 ^b	191 ± 2.95 ^b	198 ± 9.96 ^b
Setback from trough (RVU)	92 ± 2.71 ^b	99 ± 4.95 ^b	128 ± 1.47 ^b	129 ± 5.30 ^a

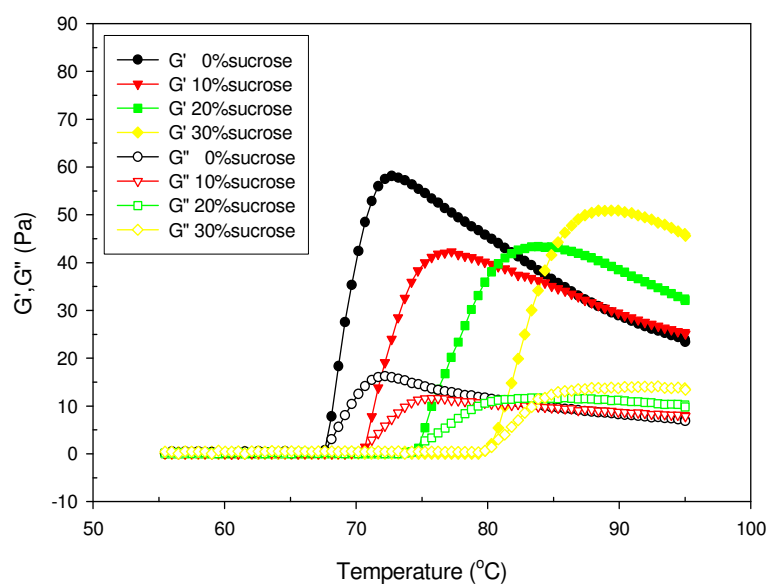
หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (Pasting temperature) จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10% โดยเพิ่มขึ้นจาก 73 ถึง 83.2 องศาเซลเซียส จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเป็น 82.2 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นเป็น 15% ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าลดลงในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% เมื่อเทียบกับในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0% โดยลดลงจาก 412 เป็น 387 RVU จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจาก 387 ถึง 447 RVU เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 15% ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) และค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 157 ถึง 248 RVU และ 249 ถึง 377 RVU ตามลำดับ ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Breakdown ของแป้งมันสำปะหลังลดลงจาก 255 เป็น 198 RVU เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่ออุณหภูมิและการกวนได้มากขึ้นเช่นเดียวกันกับในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครส เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัวพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้ค่าการคืนตัวของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าเพิ่มจาก 92 ถึง 129 RVU เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15%

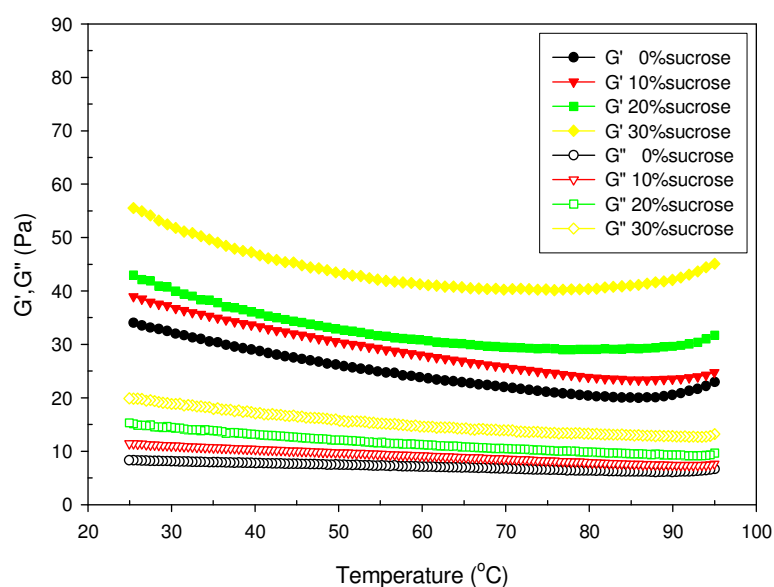
2.3 สมบัติวิทยาการไหล (Rheological properties)

2.3.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลัง

ผลการศึกษาสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 5% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% ขณะให้ความร้อนและทำให้เย็น แสดงดังภาพที่ 28 และ 29 (ตามลำดับ) และตารางที่ 8



ภาพที่ 28 ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อน



ภาพที่ 29 ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังขณะทำให้เย็น

ตารางที่ 8 ผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ $\tan \delta$ ของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 95 และ 25 องศาเซลเซียส

Sucrose concentration (%)	$T_{G'=G''}$ (°C)	95°C			25°C		
		G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$
0	68.13 ^d	23.0 ^c	6.64 ^c	0.29 ^b	34.2 ^c	8.28 ^d	0.24 ^c
10	71.19 ^c	24.8 ^c	7.62 ^c	0.31 ^a	39.2 ^{bc}	11.5 ^c	0.29 ^b
20	75.23 ^b	31.7 ^b	9.62 ^b	0.30 ^a	43.5 ^b	15.3 ^b	0.35 ^a
30	81.30 ^a	45.1 ^a	13.2 ^a	0.29 ^b	55.8 ^a	19.9 ^a	0.36 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

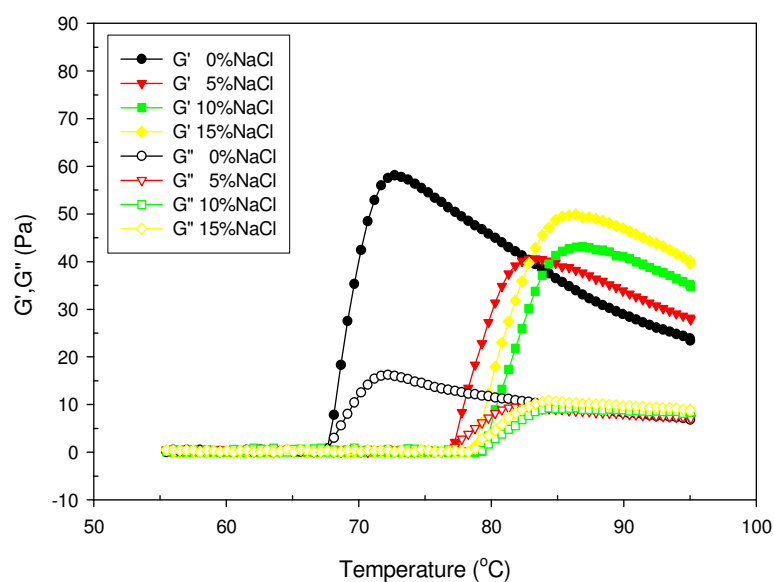
จากภาพที่ 28 ขณะเริ่มต้นให้ความร้อน ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า G' และ G'' เพียงเล็กน้อย เมื่อให้ความร้อนต่อไปค่า G' จะมีค่าเท่ากับ G'' และ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 68.13 องศาเซลเซียส และพบว่าอุณหภูมิที่ G' มีค่าเท่ากับ G'' ($T_{G'=G''}$) จะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในระบบเพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าหาค่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA โดยมีค่าเพิ่มจาก 68.13 ถึง 81.30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% ที่อุณหภูมิดังกล่าว ตัวอย่างเริ่มแสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นเนื่องจาก G' มีค่าสูงกว่า G'' (ตารางที่ 8) เมื่อให้ความร้อนต่อไป ทั้งค่า G' และ G'' จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 10% ค่า $G'_{\max}$ และ $G''_{\max}$ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับในสถานะที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 30% จากนั้นทั้งค่า G' และ G'' จะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สิ้นสุดการให้ความร้อน เมื่อทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงจาก 95 เป็น 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 29) G'' จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ค่า G' เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแป้งโดยเฉพาะอะมิโลส และพบว่าทั้งค่า G' , G'' และ $\tan\delta$ ซึ่งแสดงอัตราส่วนของสมบัติความเป็นของเหลวต่อของแข็งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำตาลซูโครสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิฤภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการให้ความร้อนโดยทำให้เม็ดแป้งพองตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้เจลแป้งมันสำปะหลังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในระหว่างการทำให้เย็น

Chiotelli *et al.* (2002) อธิบายการเพิ่มขึ้นของค่า G' ในขณะที่ให้ความร้อนว่า เกิดจากการเพิ่มปริมาตรของเม็ดแป้งจึงทำให้ตัวอย่างมีความแข็ง (rigidity) เพิ่มขึ้น ผลจากการพองตัวของเม็ดแป้งทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกตามมา น้ำจึงเข้าจับกับเม็ดแป้งได้สะดวกขึ้น เกิดเป็นช่องว่างอันเนื่องมาจากการพองตัวของเม็ดแป้งส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จากการตรวจสอบกลไกการพองตัวในระดับโมเลกุล Waigh *et al.* (2000) รายงานว่าขณะเกิดการพองตัวโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนจากลักษณะ smectic เป็น isotropic สำหรับแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A นั่นคือเกิดการสูญเสียความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ G' มีค่าสูงสุด พลังงานจะไปทำลายโครงสร้างผลึกส่วนที่เหลือในเม็ดแป้งทำให้เกิดขั้วของอะมิโลเพกทินเกิดการคลายตัวจึงสูญเสียความเป็นระเบียบของโครงสร้างในระดับโมเลกุล (molecular order) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ G' มีค่าลดลง และในระหว่างการทำให้เย็นค่า G'

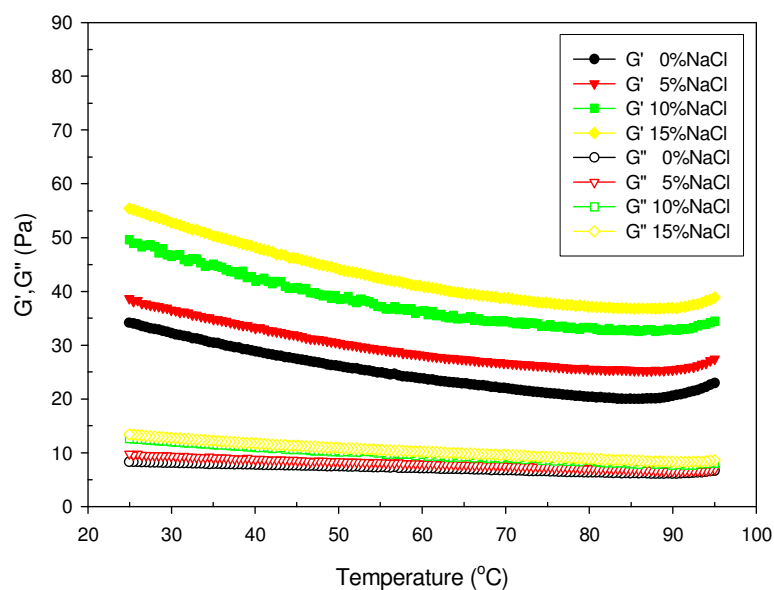
จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะมิโลสที่ละลายออกมาซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างแสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้น

2.3.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลัง

ผลการศึกษาสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 5% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 5, 10 และ 15% ขณะให้ความร้อนและทำให้เย็น แสดงดังภาพที่ 30 และ 31 (ตามลำดับ) และตารางที่ 9



ภาพที่ 30 ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อน



ภาพที่ 31 ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังขณะทำให้เย็น

ตารางที่ 9 ผลของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ $\tan \delta$ ของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 95 และ 25 องศาเซลเซียส

NaCl concentration (%)	$T_{G'=G''}$ (°C)	95°C			25°C		
		G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$
0	68.13 ^c	23.0 ^d	6.64 ^c	0.29 ^a	34.2 ^c	8.28 ^c	0.24 ^{ns}
5	77.77 ^b	27.5 ^c	6.92 ^c	0.25 ^b	38.7 ^c	9.80 ^c	0.25 ^{ns}
10	80.29 ^a	34.5 ^b	8.06 ^b	0.23 ^c	49.6 ^b	12.6 ^b	0.25 ^{ns}
15	79.28 ^a	38.9 ^a	8.60 ^a	0.22 ^d	55.4 ^a	13.4 ^a	0.24 ^{ns}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

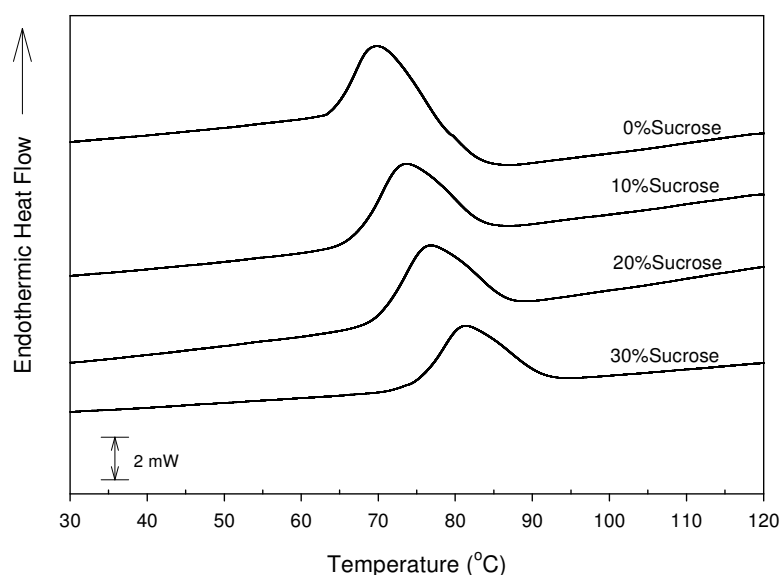
ns = not significant

จากภาพที่ 30 ขณะเริ่มต้นให้ความร้อน ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงค่า G' และ G'' ในลักษณะเดียวกันกับในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส และพบว่าอุณหภูมิที่ค่า G' มีค่าเท่ากับ G'' ($T_{G'=G''}$) มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับ 10% โดยเพิ่มจากอุณหภูมิ 68.13 ถึง 80.29 องศาเซลเซียส และจะมีค่าลดลงเป็น 79.28 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มเป็น 15% ที่อุณหภูมิดังกล่าวตัวอย่างเริ่มแสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นเนื่องจาก G' มีค่าสูงกว่า G'' (ตารางที่ 9) เมื่อให้ความร้อนต่อไปทั้งค่า G' และ G'' จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มเป็น 10% ในสถานะที่มีเกลือเข้มข้น 5% ทั้ง $G'_{\max}$ และ $G''_{\max}$ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับในสถานะที่ไม่มีเกลือ แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นจาก 5% จนถึง 15% จากนั้นค่า G' และ G'' จะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการให้ความร้อน เมื่อมีการลดอุณหภูมิลงจาก 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 31) G'' จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ค่า G' เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส และพบว่าทั้งค่า G' , G'' ที่อุณหภูมิ 95 และ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ $\tan\delta$ มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการให้ความร้อนเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น และทำให้เจลแป้งมันสำปะหลังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในระหว่างการทำให้เย็น (Chiotelli *et al.*, 2002)

2.4 สมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชัน

2.4.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 32 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพิกัดเดียวในช่วงอุณหภูมิ 64-92 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกที่เกิดจากอะมิโลเพกทินในสภาวะที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป (มากกว่า 60%) ในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสพื้จะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 10 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) ในการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นจาก 63.93 ถึง 75.09 องศาเซลเซียส 70 ถึง 81.27 องศาเซลเซียส และ 79.77 ถึง 91.61 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีในเซชันมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 16.26 ถึง 17.97 จูลต่อกรัม



ภาพที่ 32 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 10 อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีนเซชันของแป้งมันสำปะหลังใน
สถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Sucrose concentration (%)	Gelatinization temperature (°C)			ΔH (J/g)
	T_o	T_p	T_c	
0	63.93 ± 0.18^d	70.00 ± 0.00^d	79.77 ± 0.45^d	17.97 ± 1.03^{ns}
10	66.76 ± 0.61^c	73.14 ± 0.47^c	85.97 ± 3.39^c	17.81 ± 1.91^{ns}
20	69.95 ± 0.23^b	76.53 ± 0.00^b	86.79 ± 0.06^b	17.83 ± 0.11^{ns}
30	75.09 ± 0.06^a	81.27 ± 0.00^a	91.61 ± 0.27^a	16.26 ± 0.00^{ns}

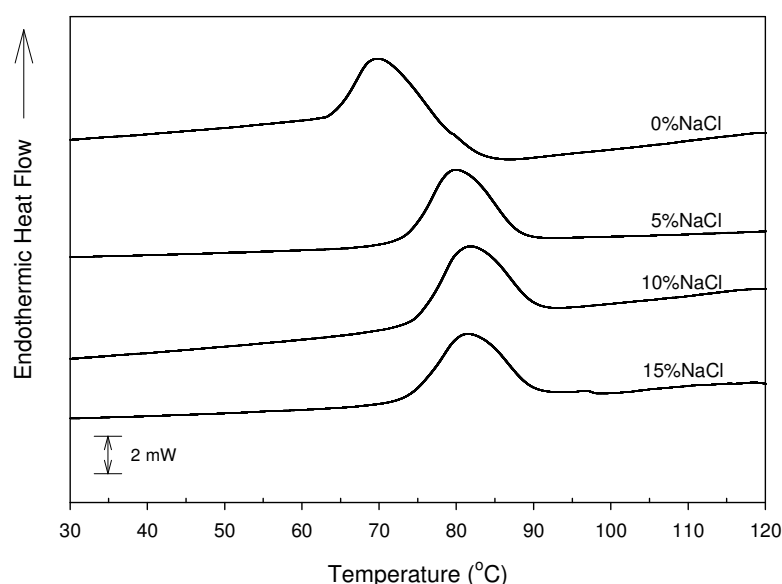
หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

ns = not significant

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนเซชันของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับรายงานการวิจัยซึ่งอธิบายเกี่ยวกับปฏิริยาระหว่างน้ำตาล แป้ง และน้ำ ว่าน้ำตาลและแป้งจะเกิดการแข่งขันในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ โดยน้ำตาลมีสมบัติเป็นสารดูดความชื้นมากกว่าแป้ง (นิธิยา, 2545) น้ำตาลจึงสร้างพันธะกับน้ำได้ก่อนด้วยอัตราส่วนโมเลกุลน้ำตาลซูโครสต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 4.6 (Botlan and Desbois, 1995) ทำให้ปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) ในระบบลดลง (Spies and Hosney, 1982) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเกิดเจลลาทีนเซชัน แป้ง การสร้างพันธะของน้ำตาลยังทำให้สมบัติการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของน้ำลดลง (Chungcharoen and Lund, 1987) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตรอิสระของตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำกับน้ำตาลที่ลดลง และทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของตัวทำละลายร่วมเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้งจึงลดลง นอกจากนี้ น้ำตาลยังสามารถทำปฏิริยากับเม็ดแป้งในบริเวณส่วนอสัณฐานทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้าม (crosslink หรือ sugar bridges) ซึ่งจะช่วยให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น สายโซ่ของอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งจึงเคลื่อนตัวได้อย่างจำกัดและการพองตัวของเม็ดแป้งเกิดได้ช้าลง ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิและพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อทำลายโครงสร้างผลึกของอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้ง (Spies and Hosney, 1982)

2.4.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 33 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 5, 10 และ 15% เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพีคเดียวในช่วงอุณหภูมิ 64-90 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงความเข้มข้นระดับหนึ่ง อุณหภูมิในการเจลลาติโนเซชันแป้งจะลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นสูงกว่าระดับดังกล่าว จากตารางที่ 11 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10% อุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นจาก 63.93 ถึง 75.08 องศาเซลเซียส 70 ถึง 81.40 องศาเซลเซียส และ 79.77 ถึง 89.97 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มเป็น 15% อุณหภูมิจะลดลงจาก 75.08 เป็น 74.69 องศาเซลเซียส 81.40 เป็น 81.40 องศาเซลเซียส และ 89.97 เป็น 89.95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 17.41 ถึง 17.97 จูลต่อกรัม



ภาพที่ 33 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 11 อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้งมันสำปะหลังใน
สถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

NaCl concentration (%)	Gelatinization temperature (°C)			ΔH (J/g)
	T_o	T_p	T_c	
0	63.93 ± 0.18^c	70.00 ± 0.00^c	79.77 ± 0.45^c	17.97 ± 1.03^{ns}
5	73.73 ± 0.02^b	79.87 ± 0.00^b	88.23 ± 0.07^b	18.05 ± 0.50^{ns}
10	75.08 ± 0.21^a	81.40 ± 0.28^a	89.97 ± 0.42^a	18.49 ± 0.65^{ns}
15	74.69 ± 0.31^a	81.40 ± 0.10^a	89.95 ± 0.14^a	17.41 ± 0.11^{ns}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

ns = not significant

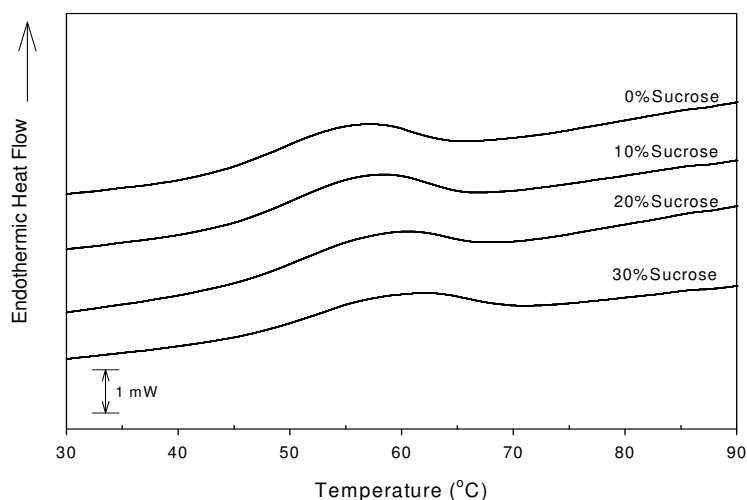
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือมีผลทำให้
อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนในแป้งเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความเข้มข้นเกลือ 10% จากนั้นอุณหภูมิในการ
เกิดเจลลาทีนในเซชันจะลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของเกลือเพิ่มเป็น 15% สอดคล้องกับรายงานการ
วิจัยที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้อุณหภูมิ
การเกิดเจลลาทีนในเซชันเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นกว่านี้อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนในเซชัน
ของแป้งจะลดลง (Evans and Haisman, 1982; Lii and Lee, 1993; Maaurf *et al.*, 2001) Wootton
and Bamunuarachchi (1980) พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนในเซชันจะมีค่าสูงสุดที่ระดับความ
เข้มข้นของเกลือเท่ากับ 9% และการลดลงของพลังงานในการเกิดเจลลาทีนในเซชันเกิดจากอิทธิพลของ
โซเดียมและคลอไรด์ไอออนที่มีต่อน้ำและแป้ง Jane (1993) รายงานว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ
เกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้งในสถานะที่มีเกลือคือโครงสร้างของน้ำ และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่าง
แป้งกับไอออนของเกลือ โดยเกลือกลุ่มที่มีความแรงของประจุมากมีแนวโน้มในการเพิ่มโครงสร้างที่
เป็นระเบียบของน้ำ และลดจำนวนโมเลกุลน้ำอิสระจึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนในเซชันเพิ่มขึ้น
(Zobel, 1984) Oosten (1982) ตั้งสมมุติฐานว่าแป้งมีสภาพเป็นกรดอ่อนเมื่ออยู่ในสารละลาย ทำให้
แป้งสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนของเกลือได้ โดยหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแป้งจะส่ง
ถ่ายโปรตอนให้น้ำ ทำให้เม็ดแป้งมีประจุเป็นลบและน้ำมีประจุเป็นบวก ซึ่งจะทำให้เกิดความต่าง
ศักย์คอลลอยด์ (Donnan potential) ระหว่างเม็ดแป้งและน้ำ โดยเม็ดแป้งจะแสดงศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ
ซึ่งสามารถดึงดูดไอออนบวกและผลักไอออนลบจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ ไอออนบวกจะทำให้
โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความคงตัว ในทางตรงกันข้ามไอออนลบจะทำให้เกิดการเกิดเจลลาทีนในเซชัน

โดยทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ดังนั้นการเกิดค่าความต่างศักย์คอนแนนระหว่างเม็ดแป้งและน้ำที่สูงขึ้น จะทำให้แป้งเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลายน้ำแป้งโปรตอนบางตัวจากหมู่แอลกอฮอล์บนโมเลกุลของแป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่แอลกอฮอล์โดยโซเดียมไอออน หมู่แอลกอฮอล์เหล่านี้มีสมบัติแตกตัวที่ดีกว่า จึงทำให้ความต่างศักย์คอนแนนของระบบมีค่าสูงขึ้น เม็ดแป้งจึงเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโมเลกุลแป้งกับโซเดียมไอออนเป็นไปอย่างจำกัด ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเจลาติไนเซชันจึงเกิดขึ้นในระดับที่จำกัดด้วย เมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง อิทธิพลของคลอไรด์ไอออนจะเริ่มเด่นชัดขึ้น ทำให้แป้งเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลง

2.5 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

2.5.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 34 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพีคเดียวในช่วงอุณหภูมิ 44-70 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียความเป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะมิโลเพกทิน อุณหภูมิและพลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลแป้งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการเกิดเจลาติไนเซชัน แสดงให้เห็นถึงการกลับมาจัดเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกของอะมิโลเพกทินหลังจากเกิดเจลาติไนเซชันแล้ว ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสพีคจะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 12 และ 13 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น (ΔT) ในการทำลายโครงสร้างผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 43.80 ถึง 46.01 องศาเซลเซียส 55.6 ถึง 59.47 องศาเซลเซียส 64.85 ถึง 70.02 องศาเซลเซียส และ 21.05 ถึง 24.01 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 27.18 ถึง 33.09 %



ภาพที่ 34 ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย เครื่อง DSC

จากการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้ง (ภาพที่ 35) ในขณะที่เจลแป้งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน รีโทรเกรดเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเจลแป้งหลังการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส พิกที่ได้จากการให้ความร้อนแก่เจลแป้งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มจาก 0 ถึง 30% อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น (ΔT) ในการทำลายโครงสร้างผลึกจะเพิ่มขึ้นจาก 52.91 ถึง 57.80 องศาเซลเซียส 61.81 ถึง 66.80 องศาเซลเซียส 71.50 ถึง 77.68 องศาเซลเซียส และ 18.60 ถึง 19.88 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.83 ถึง 4.46% และพบว่าอุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บที่ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการเก็บเจลแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรงกว่า แต่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น (ΔT) มีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการเก็บเจลแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีความสม่ำเสมอว่า

ตารางที่ 12 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายโครงสร้างผลึกในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มี
น้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Transition temperature (°C)	Sucrose concentration (%)	Storage temperature (°C)			Average
		-18	4	25	
T _O	0	nd	43.80 ± 0.03	52.91 ± 0.78	48.35 ^C
	10	nd	44.50 ± 0.21	53.44 ± 0.33	48.97 ^{BC}
	20	nd	45.39 ± 0.08	54.88 ± 1.80	50.13 ^B
	30	nd	46.01 ± 0.09	57.80 ± 0.40	51.90 ^A
	Average	nd	44.92 ^b	54.76 ^a	
T _P	0	nd	55.60 ± 0.00	61.81 ± 1.97	58.70 ^C
	10	nd	56.67 ± 0.19	63.20 ± 0.57	59.93 ^{BC}
	20	nd	58.47 ± 0.09	63.67 ± 0.09	61.07 ^B
	30	nd	59.47 ± 0.19	66.80 ± 1.70	63.13 ^A
	Average	nd	57.55 ^b	63.87 ^a	
T _C	0	nd	64.85 ± 0.69	71.50 ± 1.37	68.18 ^C
	10	nd	66.50 ± 0.52	71.34 ± 2.74	68.92 ^{BC}
	20	nd	67.62 ± 0.21	74.15 ± 0.07	70.88 ^B
	30	nd	70.02 ± 0.32	77.68 ± 1.21	73.85 ^A
	Average	nd	67.24 ^b	73.67 ^a	
ΔT	0	nd	21.05 ± 0.66	18.60 ± 2.16	19.83 ^{NS}
	10	nd	22.00 ± 0.73	17.90 ± 2.41	19.95 ^{NS}
	20	nd	22.23 ± 0.28	19.28 ± 1.73	20.75 ^{NS}
	30	nd	24.01 ± 0.23	19.88 ± 1.61	21.94 ^{NS}
	Average	nd	22.32 ^a	18.91 ^b	

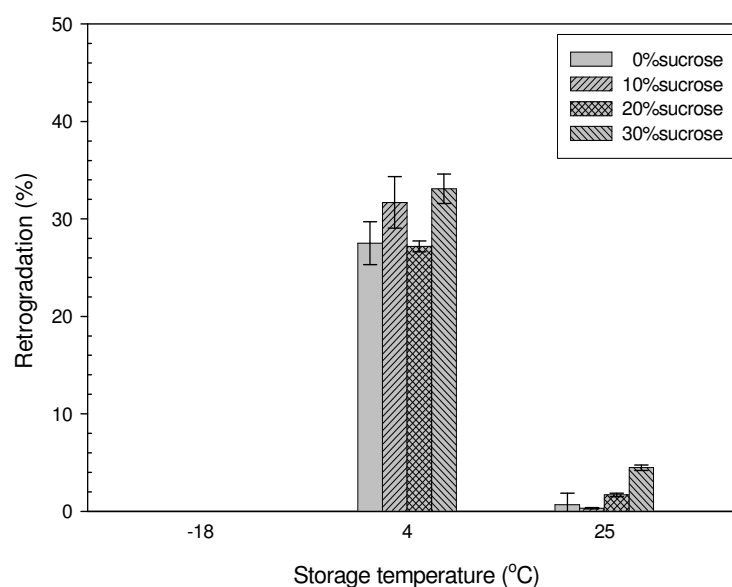
หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์
เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $P \leq 0.05$

$\Delta T = T_C - T_O$ (°C) , nd = not detectable, ns = not significant

ตารางที่ 13 ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

Sucrose concentration (%)	Retrogradation (%)		
	-18°C	4°C	25°C
0	0.00 ± 0.00 ^{b, NS}	27.51 ± 2.20 ^{a, NS}	0.83 ± 1.16 ^{b, B}
10	0.00 ± 0.00 ^{b, NS}	31.69 ± 2.66 ^{a, NS}	0.49 ± 0.06 ^{b, B}
20	0.00 ± 0.00 ^{c, NS}	27.18 ± 0.56 ^{a, NS}	1.68 ± 0.19 ^{b, B}
30	0.00 ± 0.00 ^{c, NS}	33.09 ± 1.52 ^{a, NS}	4.46 ± 0.29 ^{b, A}

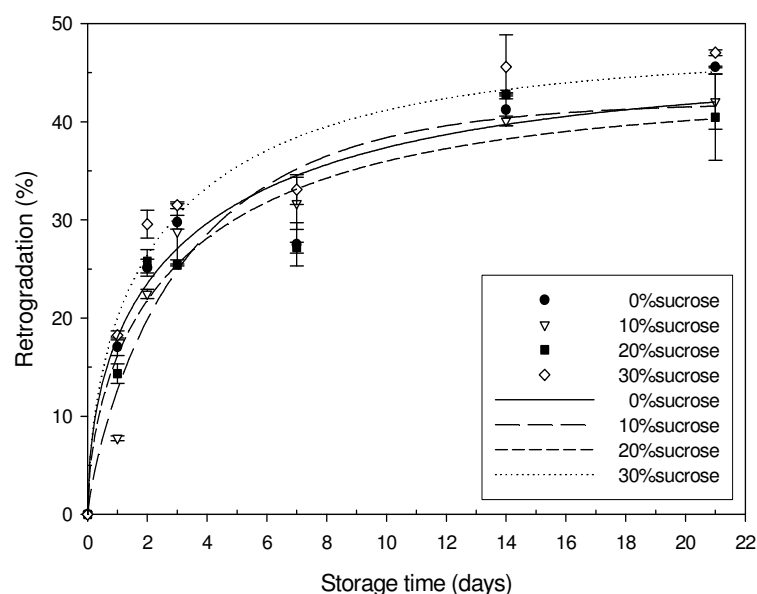
หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



ภาพที่ 35 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

การเก็บรักษาเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิต่างกันมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าเจลแป้งรีโทรเกรดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และไม่มีรีโทรเกรดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเก็บเจลแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิสูงยังมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างผลึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% มีแนวโน้มที่จะทำให้เจลแป้งรีโทรเกรดเพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส การกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ (recrystallization) ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในเจลขึ้นอยู่กับการปฏิริยาระหว่างน้ำตาลกับน้ำ และน้ำตาลกับแป้ง (Prokopowich and Biliaderis, 1995) Hoover and Senanayake (1996) รายงานว่าน้ำตาลจะสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่ของกิ่งอะมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้กัน เจลแป้งจึงเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แป้งรีโทรเกรดได้สูงที่สุดโดยเก็บเป็นระยะเวลา 0-21 วัน พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เจลแป้งรีโทรเกรดได้เพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้นโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 45.58% 0 ถึง 42.05% 0 ถึง 42.79% และ 0 ถึง 47.03% ในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0%, 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ (ภาพที่ 36) และพบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงสองถึงสามวันแรกของการเก็บรักษา



ภาพที่ 36 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป็ง
มันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน
(เส้นกราฟแสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami)

อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลแป็งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการ Avrami (ดังสมการที่ 1) ค่าคงที่ k จะแสดงถึงค่าคงที่ของอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน ค่าคงที่ n หรือ Avrami exponent จะแสดงถึงลักษณะการเกิดโครงสร้างผลึกในเจลแป็ง ค่าคงที่ k และ n ที่ได้จากสมการสามารถนำมาคำนวณหาค่า half-time ($t_{1/2}$) ของการเกิดรีโทรเกรเดชันหรือเวลาที่เจลแป็งรีโทรเกรดได้ 50 % ของการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุด (ดังสมการที่ 2) จากตารางที่ 14 พบว่าเจลแป็งในสถานะที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสจะรีโทรเกรดได้ 50% ภายในเวลา 1.83 วัน เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น เจลแป็งมีแนวโน้มที่จะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับสถานะที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ดังจะเห็นได้จากค่า k ที่เพิ่มขึ้น และค่า $t_{1/2}$ ที่ลดลง

$$\frac{\%R_{\infty} - \%R_t}{\%R_{\infty} - \%R_0} = \exp(-kt^n) \quad (1)$$

เมื่อ $\%R_{\infty}$ หมายถึง ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุด

$\%R_t$ หมายถึง ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เวลาใด ๆ

$\%R_0$ หมายถึง ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เวลาเริ่มต้น (0 วัน)

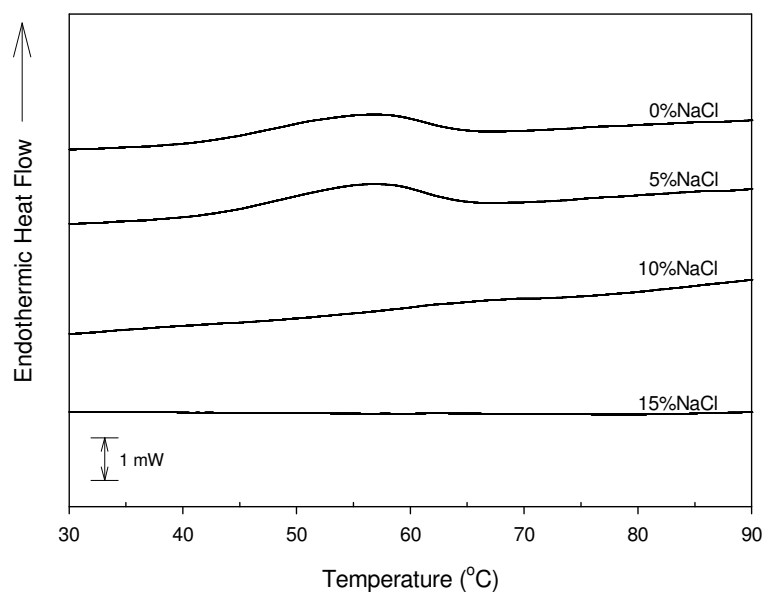
$$t_{1/2} = (-\ln 0.5 / k)^{1/n} \quad (2)$$

ตารางที่ 14 ค่าคงที่สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami

Sucrose concentration (%)	% Maximum retrogradation	Avrami exponent (n)	Rate constant (k, day ⁻¹)	Half-time (t _{1/2} , days)	Coefficient of determination (r ²)
0	45.58	0.53	0.50	1.83	0.946
10	42.05	0.83	0.36	2.21	0.961
20	42.79	0.59	0.47	1.19	0.942
30	47.03	0.57	0.56	1.47	0.967

2.5.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมัน สำปะหลัง

ภาพที่ 37 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลเป็งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 5, 10 และ 15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพีคเดียวในช่วงอุณหภูมิ 44-78 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียความเป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะมิโลเพกทิน อุณหภูมิและพลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลเป็งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกลับมาจัดเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกของอะมิโลเพกทินหลังจากเกิดเจลาทิไนเซชันแล้ว ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์พีคจะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นถึงระดับความเข้มข้นหนึ่งและไม่พบพีคเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงกว่าระดับดังกล่าว จากตารางที่ 15 และ 16 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10% อุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น (ΔT) ในการทำลายโครงสร้างผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 43.80 ถึง 56.89 องศาเซลเซียส 55.6 ถึง 66.07 องศาเซลเซียส 64.85 ถึง 78.12 องศาเซลเซียส และ 21.05 ถึง 21.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และการเกิดรีโทรเกรเดชันจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10% โดยมีค่าลดลงจาก 27.51 เป็น 2.48 % และไม่มีพีคเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มเป็น 15% แสดงให้เห็นว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 15% สามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 37 ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์
เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน
เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

เจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ไม่เกิดรีโทรเกรเดชัน ในขณะที่เจลแป้งในสถานะที่ไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วันเท่านั้นที่รีโทรเกรดเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเจลแป้งซึ่งเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส โดยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในทุกระดับความเข้มข้นมีผลในการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 38)

ตารางที่ 15 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Transition temperature (°C)	NaCl concentration (%)	Storage temperature (°C)		
		-18	4	25
T _O	0	nd	43.80 ± 0.03 ^{b,B}	52.91 ± 0.78 ^a
	5	nd	42.30 ± 0.10 ^C	nd
	10	nd	56.89 ± 0.73 ^A	nd
	15	nd	nd	nd
T _P	0	nd	55.60 ± 0.00 ^{b,B}	61.81 ± 1.97 ^a
	5	nd	56.14 ± 0.19 ^B	nd
	10	nd	66.07 ± 0.28 ^A	nd
	15	nd	nd	nd
T _C	0	nd	64.85 ± 0.69 ^{b,B}	71.50 ± 1.37 ^a
	5	nd	64.82 ± 0.07 ^B	nd
	10	nd	78.12 ± 0.32 ^A	nd
	15	nd	nd	nd
ΔT	0	nd	21.05 ± 0.66 ^{ns,NS}	18.60 ± 2.16 ^{ns}
	5	nd	22.52 ± 0.17 ^{NS}	nd
	10	nd	21.23 ± 1.05 ^{NS}	nd
	15	nd	nd	nd

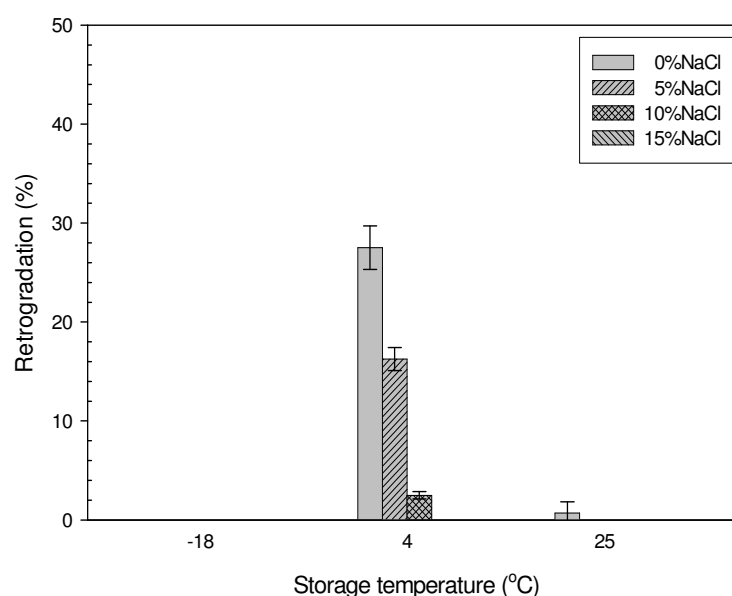
หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $P \leq 0.05$

$\Delta T = T_C - T_O$ (°C) , nd = not detectable, ns = not significant

ตารางที่ 16 ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

NaCl concentration (%)	Retrogradation (%)		
	-18 °C	4 °C	25 °C
0	0.00 ± 0.00 ^{b,NS}	27.51 ± 2.20 ^{a,A}	0.83 ± 1.16 ^{b,NS}
5	0.00 ± 0.00 ^{b,NS}	20.18 ± 1.16 ^{a,B}	0.00 ± 0.00 ^{b,NS}
10	0.00 ± 0.00 ^{b,NS}	2.48 ± 0.37 ^{a,C}	0.00 ± 0.00 ^{b,NS}
15	0.00 ± 0.00 ^{ns,NS}	0.00 ± 0.00 ^{ns,C}	0.00 ± 0.00 ^{ns,NS}

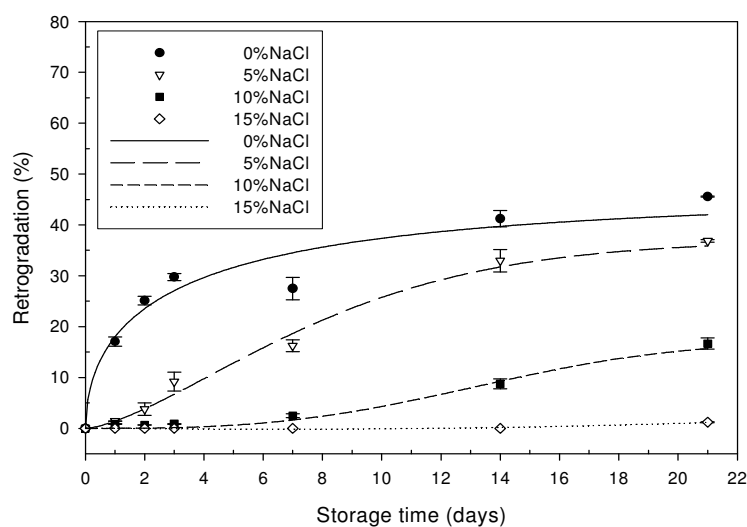
หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



ภาพที่ 38 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลเป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน

การเก็บรักษาเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิต่างกันมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าเจลแป้งรีโทรเกรดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และไม่เกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เจลแป้งมันสำปะหลังรีโทรเกรดได้ลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้น 15% พบว่าสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างสมบูรณ์ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เจลแป้งมันสำปะหลังรีโทรเกรดได้เพียงเล็กน้อยและพบว่าการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในทุกระดับความเข้มข้นจะมีผลยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างสมบูรณ์ และไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Russell and Oliver (1989) ซึ่งรายงานว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์จะยับยั้งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะมิโลเพกทินที่กระจายอยู่ในเจลแป้งในระหว่างการเก็บรักษาโดยโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนอาจมีการสร้างพันธะบางส่วนกับโมเลกุลแป้งและน้ำ ซึ่งจะป้องกันไม่ให้โมเลกุลแป้งกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่

จากการศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดรีโทรเกรเดชันดีที่สุด โดยเก็บเป็นระยะเวลา 0-21 วัน พบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเจลแป้งจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 45.58% 0 ถึง 36.85% 0 ถึง 16.88% และ 0 ถึง 1.22% ในสถานะที่มีเกลือเข้มข้น 0%, 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ (ภาพที่ 39) และพบว่าในทุกระยะเวลาการเก็บรักษา ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเกิดรีโทรเกรเดชันจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 39 ผลของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของ เจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน (เส้นกราฟแสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami)

จากการวิเคราะห์อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยสมการ Avrami (ตารางที่ 17) เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น เจลแป้งจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง และมีค่า half-times ของการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ มีผลทำให้เจลแป้งมันสำปะหลังเกิดรีโทรเกรเดชันได้ช้าลง

ตารางที่ 17 ค่าคงที่สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือ โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Avrami

NaCl concentration (%)	% Maximum retrogradation	Avrami exponent (n)	Rate constant (k, day ⁻¹)	Half-time (t _{1/2} , days)	Coefficient of determination (r ²)
0	45.58	0.53	0.5000	1.83	0.946
5	36.85	1.48	0.0394	6.91	0.989
10	16.88	2.96	0.0003	13.40	0.984
15	1.22	nd	nd	nd	nd

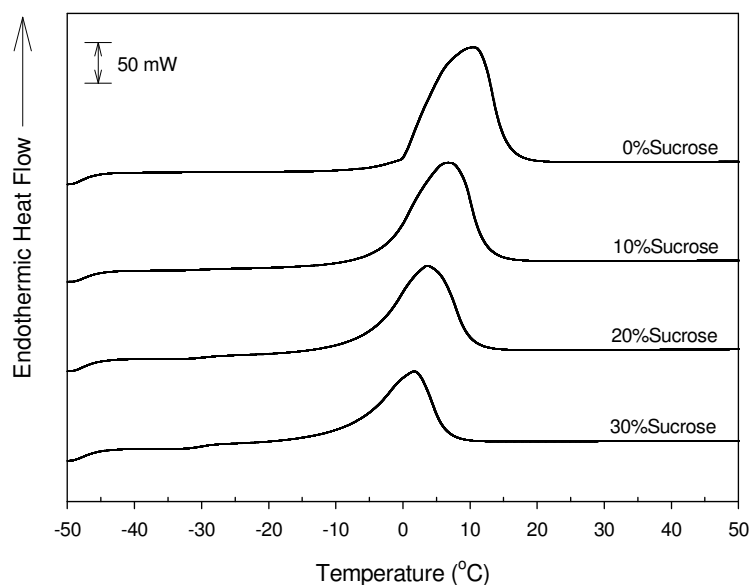
หมายเหตุ nd = not detectable

2.6 การเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้

การเติมตัวถูกละลายลงในน้ำจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของสารละลายที่ได้ ในส่วนของสมบัติทางกายภาพของน้ำที่เปลี่ยนไปตามปริมาณของตัวถูกละลายเรียกว่า colligative properties เช่น จุดเยือกแข็งของน้ำ ซึ่งในระหว่างการแช่เยือกแข็งโมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดพันธะกับตัวถูกละลายจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็งได้ซึ่งจัดเป็นน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) สารละลายที่เหลือจะมีความเข้มข้นมากขึ้นพร้อมกับอุณหภูมิจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายถึงจุดหนึ่ง ของแข็งและน้ำที่ไม่แข็งตัวจะแยกออกมา หรือน้ำและของแข็งจะแข็งตัวพร้อมกัน จากจุดนี้ไปอุณหภูมิของสารละลายจะไม่ลดลงอีก (ณรงค์, 2538; วิไล, 2545)

2.6.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำแป้งและเจลแป้งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 40 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแป้งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพีคเดี่ยวในช่วงอุณหภูมิ -8 ถึง 16 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งหรืออุณหภูมิที่น้ำแข็งตัวได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 18 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ซึ่งคำนวณจากค่าพลังงานที่ใช้หลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงจาก 85.35 เป็น 62.77 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม



ภาพที่ 40 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวของผลึกน้ำแข็งในน้ำแข็งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

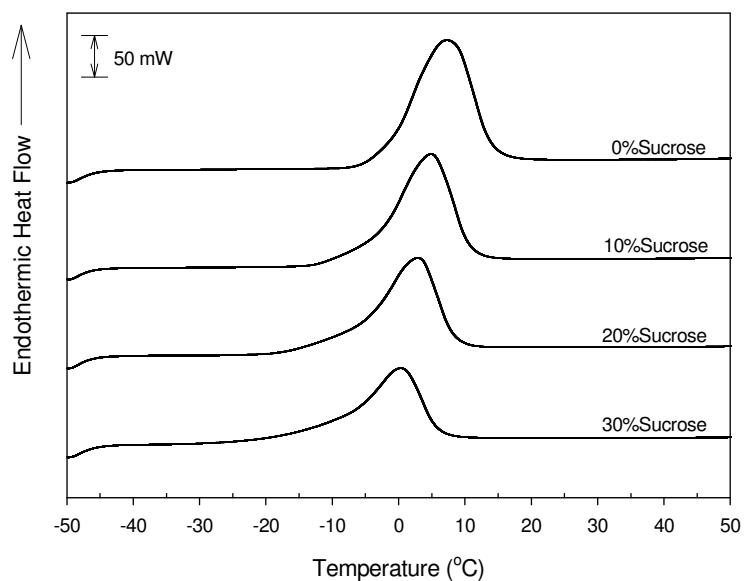
ตารางที่ 18 อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำแข็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Sucrose concentration (%)	Ice melting temperature (°C)			Freezable water (g/100g water)
	T_o	T_p	T_c	
0	-0.17 ± 0.35^a	10.00 ± 0.57^a	16.18 ± 1.13^a	85.35 ± 1.92^a
10	-3.09 ± 0.05^b	7.00 ± 0.47^b	12.70 ± 0.71^b	75.35 ± 2.33^b
20	-5.63 ± 0.02^c	3.80 ± 0.28^c	9.92 ± 0.22^c	71.82 ± 0.34^b
30	-8.28 ± 0.00^d	1.34 ± 0.37^d	6.96 ± 0.70^d	62.77 ± 0.56^c

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิที่น้ำแข็งตัวและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ลดลงอย่างต่อเนื่อง การเติมส่วนประกอบในอาหารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาลซูโครสจะทำให้ปริมาณน้ำที่ไม่แข็งตัว (unfreezable water) ในระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระหรือน้ำที่แข็งตัวได้ลดลงเนื่องจากโมเลกุลน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ที่มีขั้วในโมเลกุลน้ำตาล น้ำที่ถูกตรึงอยู่กับโมเลกุลน้ำตาลจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรวมกันเป็นผลึกน้ำแข็งได้สะดวก น้ำส่วนใหญ่จึงแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง (Slade and Levine, 1991; Spies and Hoseney, 1982)

ภาพที่ 41 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งประกอบด้วยพีคแสดงการหลอมเหลวของน้ำที่แข็งตัวได้ในช่วงอุณหภูมิ -9 ถึง 14 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเจลแป้งเริ่มต้น และพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแป้งประมาณ 1 ถึง 2 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 19 เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 30% ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้จะมีค่าลดลงจาก 82.59 เป็น 71.64 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงจาก 6.74 เป็น 0.34 องศาเซลเซียส หลังการเก็บรักษาเจลแป้งที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป้งเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับการเก็บรักษาเจลแป้งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 42)

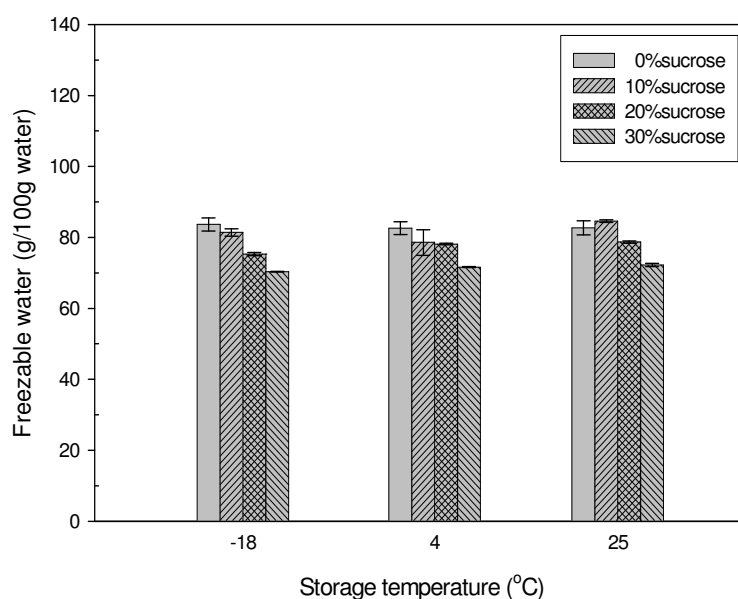


ภาพที่ 41 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวเล็กน้อยในเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

ตารางที่ 19 ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

Sucrose concentration (%)	Freezable water (g/100g water)			Average
	-18°C	4°C	25°C	
0	83.64 ± 1.82	82.59 ± 1.85	82.69 ± 1.98	82.97 ^A
10	81.40 ± 1.04	78.56 ± 3.62	84.55 ± 0.36	81.50 ^A
20	75.27 ± 0.46	78.10 ± 0.22	78.70 ± 0.33	77.36 ^B
30	70.29 ± 0.08	71.64 ± 0.14	72.21 ± 0.48	71.38 ^C
Average	77.64 ^b	77.72 ^b	79.54 ^a	

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$



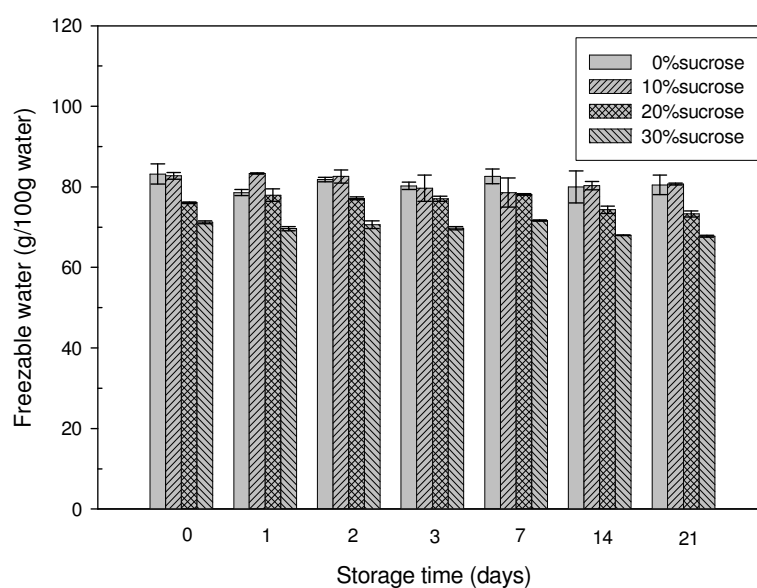
ภาพที่ 42 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาเจลแป้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลิตภัณฑ์น้ำแข็งมีค่าสูงขึ้นและทำให้ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ลดลงเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 20 และภาพที่ 43) การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสจาก 0 ถึง 30% ทำให้ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลิตภัณฑ์น้ำแข็งมีค่าลดลง Baek *et al.* (2004) รายงานว่าการที่ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บเจลแป้งเป็นเวลานานขึ้นเนื่องจากโมเลกุลน้ำบางส่วนถูกนำไปใช้ในระหว่างกระบวนการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลในแป้ง โดยแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A เช่น แป้งมันสำปะหลังจะใช้อัตราส่วนโมเลกุลของน้ำ 4 โมเลกุลต่อการจัดเรียงตัวกันใหม่ของน้ำตาลกลูโคส 12 โมเลกุล (Zobel, 1992) และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครส พบว่าเมื่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้จะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 44

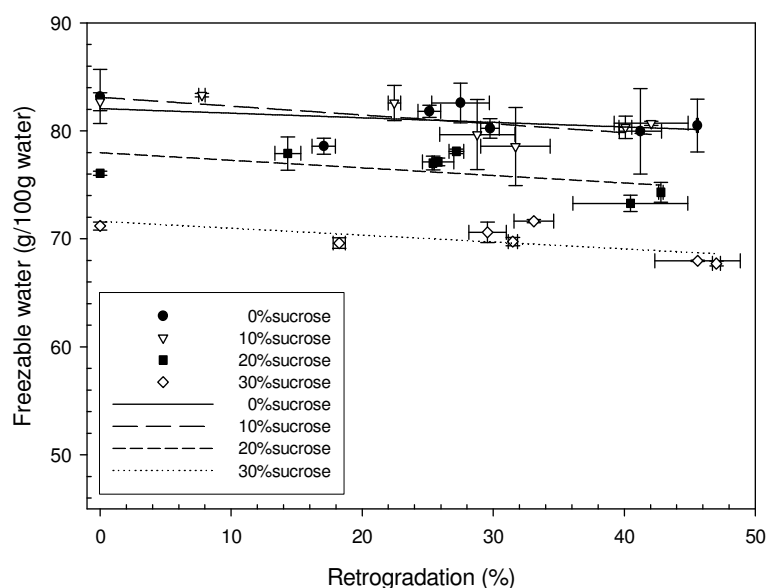
ตารางที่ 20 ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน

Sucrose concentration (%)	Freezable water (g/100g water)							Average
	0 day	1 day	2 days	3 days	7 days	14 days	21 days	
0	83.18	78.58	81.81	80.23	82.59	79.96	80.49	80.97 ^A
10	82.71	83.30	82.57	79.65	78.56	80.32	80.70	81.12 ^A
20	76.07	77.91	77.13	77.02	78.10	74.30	73.28	76.26 ^B
30	71.19	69.60	70.61	69.74	71.64	67.97	67.91	69.78 ^C
Average	78.29 ^a	77.35 ^{ab}	78.03 ^{ab}	76.66 ^{bc}	77.72 ^{ab}	75.64 ^c	75.55 ^c	

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$



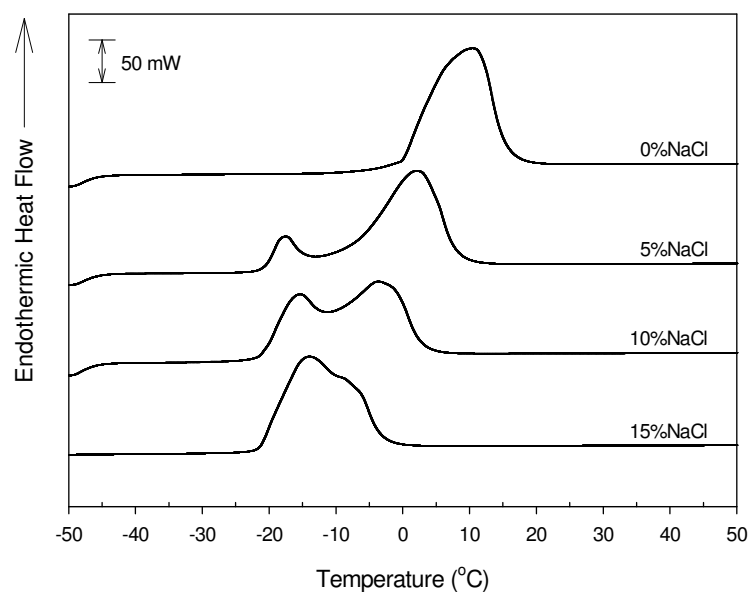
ภาพที่ 43 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%

2.6.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำแข็งและเจลแข็งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 45 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแข็งมันสำปะหลัง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เทอร์โมแกรมที่ได้ประกอบด้วยพีคในช่วงอุณหภูมิ -22 ถึง 16 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์จะเกิดพีคที่มีลักษณะเป็นพีคคู่ซึ่งแสดงถึงโมเลกุลน้ำ 2 กลุ่มที่แข็งตัวได้ไม่พร้อมกัน น้ำที่เป็นอิสระมากกว่าจะแข็งตัวได้ก่อน ต่อมาน้ำที่เคลื่อนที่ได้จำกัดกว่าจะแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง โดยพีคที่เกิดขึ้นใหม่จะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ -10 ถึง -22 องศาเซลเซียส และมีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ค่าพลังงานและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 21 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15% ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ซึ่งคำนวณจากพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงจาก 85.35 เป็น 79.85 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม



ภาพที่ 45 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแข็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

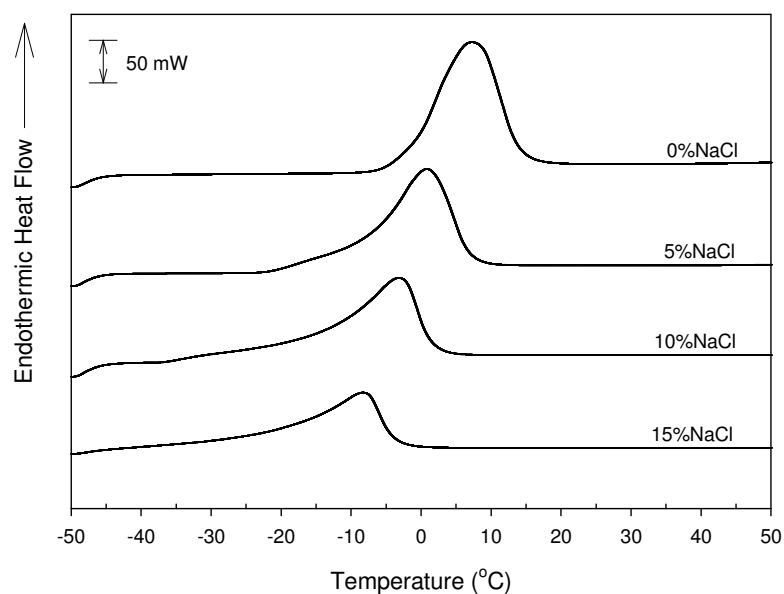
ตารางที่ 21 อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในน้ำแข็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

NaCl concentration (%)	Ice melting temperature (°C)			Freezable water (g/100g water)
	T_o	T_p	T_c	
0	-0.17 ± 0.35^a	10.00 ± 0.57^a	16.18 ± 1.13^a	85.35 ± 1.92^a
5	-20.66 ± 0.04^b	2.20 ± 0.47^b	7.99 ± 0.02^b	83.22 ± 1.35^a
10	-20.85 ± 0.21^c	-3.60 ± 0.18^c	2.61 ± 0.37^c	79.18 ± 0.10^b
15	-21.55 ± 0.09^c	-14.34 ± 0.47^d	-3.27 ± 0.21^d	79.85 ± 0.33^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ มีผลทำให้อุณหภูมิที่น้ำแข็งตัวและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไอออนของเกลือโซเดียมคลอไรด์สามารถเกิดพันธะกับน้ำโดยเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่อยู่บนโมเลกุลของน้ำกับโซเดียมไอออนซึ่งมากกว่าแรงยึดกันระหว่างโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออน ดังนั้นขั้วบวกของโมเลกุลน้ำจะดึงดูดประจุลบออกจากโมเลกุลเกลือ ขณะที่ขั้วลบของโมเลกุลน้ำจะดึงดูดประจุบวกออกจากโมเลกุลเกลือ ทำให้แรงยึดพันธะระหว่างโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนถูกทำลาย ไอออนทั้งสองจึงถูกดึงแยกออกจากกันให้กระจายตัวและล้อมรอบด้วยโมเลกุลน้ำ การเกิดพันธะระหว่างไอออนของเกลือโซเดียมคลอไรด์กับน้ำทำให้ปริมาณอิสระในระบบลดลง พันธะที่เกิดขึ้นจะขัดขวางโมเลกุลน้ำทำให้เคลื่อนไปรวมเป็นผลึกน้ำแข็งได้อย่างจำกัด น้ำจึงแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

ภาพที่ 46 แสดงลักษณะเทอร์โมแกรมของการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งประกอบด้วยฟิสิกส์ที่เกิดจากการหลอมรวมกันของฟิสิกส์ 2 ฟิสิกส์ในสถานะที่เป็นน้ำแข็งในช่วงอุณหภูมิ -22 ถึง 14 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการเก็บรักษา และพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในน้ำแป้งประมาณ 1 ถึง 12 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 22 เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15% ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้มีค่าลดลงจาก 82.59 เป็น 64.33 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงจาก 6.74 เป็น -8.67 องศาเซลเซียส หลังการเก็บรักษาเจลแป้งที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 47)

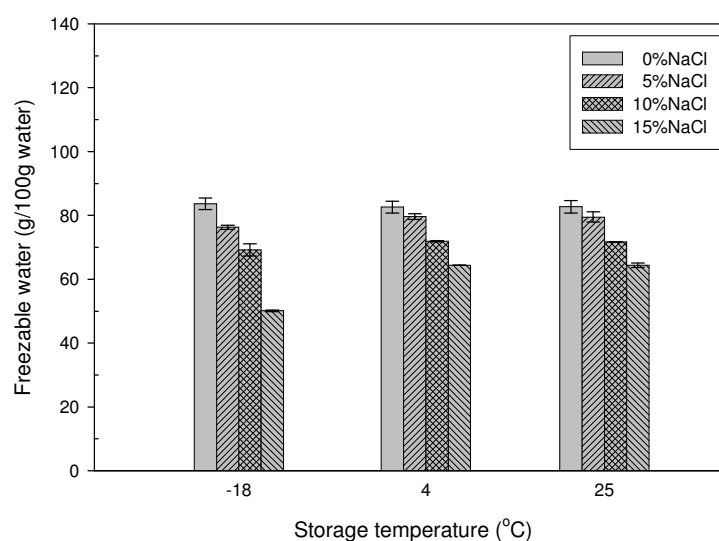


ภาพที่ 46 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

ตารางที่ 22 ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

NaCl concentration (%)	Freezable water (g/100g water)		
	-18°C	4°C	25°C
0	83.64 ± 1.82 ^{ns,A}	82.59 ± 1.85 ^{ns,A}	82.69 ± 1.98 ^{ns,A}
5	76.25 ± 0.61 ^{ns,B}	79.62 ± 0.87 ^{ns,B}	79.48 ± 1.62 ^{ns,A}
10	69.18 ± 1.89 ^{ns,C}	71.88 ± 0.18 ^{ns,C}	71.67 ± 0.08 ^{ns,B}
15	50.13 ± 0.27 ^{b,D}	64.38 ± 0.03 ^{a,D}	64.39 ± 0.68 ^{a,C}

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



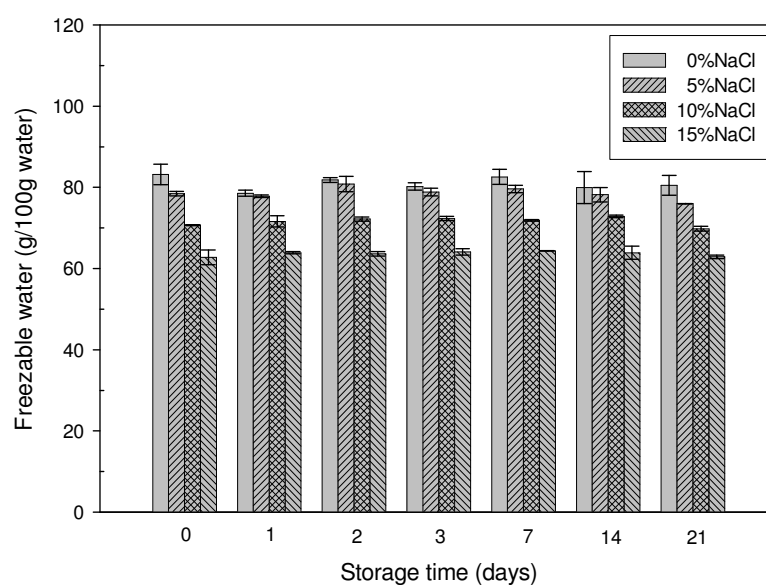
ภาพที่ 47 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ-18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าสูงขึ้นและปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ลดลงเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 23 และภาพที่ 48) การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์จาก 0 ถึง 15% ทำให้ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ พบว่าเมื่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้จะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 49

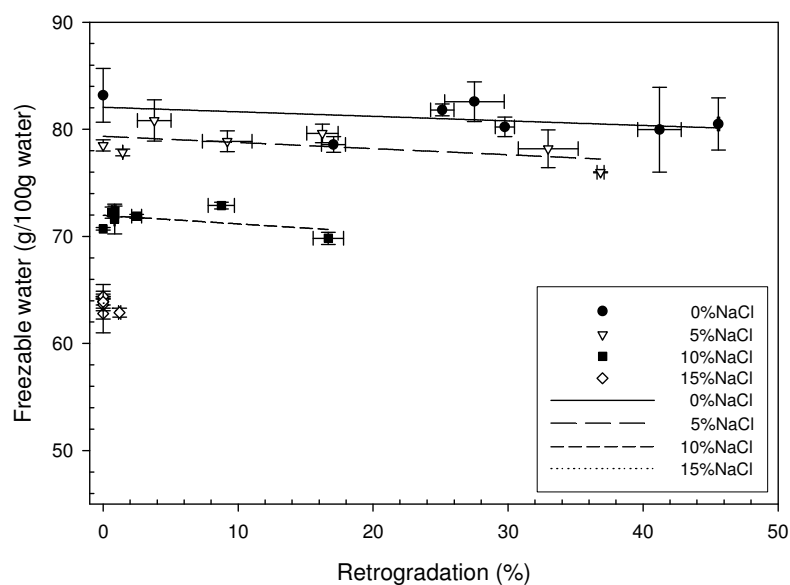
ตารางที่ 23 ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน

NaCl concentration (%)	Freezable water (g/100g water)							Average
	0 day	1 day	2 days	3 days	7 days	14 days	21 days	
0	83.18	78.58	81.81	80.23	82.59	79.96	80.49	80.97 ^A
5	78.49	77.84	82.82	78.88	79.62	78.19	75.98	78.54 ^B
10	70.71	71.61	72.23	72.33	71.88	72.88	69.82	71.63 ^C
15	62.80	63.90	63.63	64.09	64.38	63.88	62.89	63.65 ^D
Average	73.79 ^{ab}	72.98 ^{bc}	74.62 ^a	73.88 ^{ab}	74.62 ^a	73.73 ^{ab}	72.29 ^c	

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$



ภาพที่ 48 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%

2.7 อุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง

เมื่อลดอุณหภูมิของเจลแป้งลงอย่างรวดเร็ว ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็งและแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นของแข็งเข้มข้น (freeze-concentrated matrix) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลในเจลแป้ง น้ำตาลซูโครสหรือเกลือโซเดียมคลอไรด์ และน้ำที่ไม่แข็งตัว เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายเข้มข้นที่ถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจะสามารถตรวจพบอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของระบบที่มีของแข็งเข้มข้นสูงสุด (maximally freeze-concentrated system) หรือเรียกว่า T_g' ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกน้ำแข็ง (Slade and Levine, 1987, 1991)

2.7.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง

จากตารางที่ 24 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% T_g' ของเจลแป้งมันสำปะหลังก่อนการเก็บรักษาจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จาก -4.90 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส เป็น -10.74, -14.41 และ -32.53 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากน้ำตาลซูโครสมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์และทำให้ปริมาณน้ำที่ไม่แข็งตัวในเจลแป้งเพิ่มขึ้นจึงไปเพิ่มปริมาตรอิสระของระบบ โมเลกุลแป้งจึงเคลื่อนตัวได้มากขึ้นส่งผลให้ T_g' ในระบบลดลง (Jang *et al.*, 2001)

T_g' ของเจลแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหลังผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 7 วัน การเก็บรักษาเจลแป้งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำให้ T_g' มีค่าเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2.04 ถึง 12.53 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ T_g' ของเจลแป้งก่อนการเก็บรักษา และพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้ T_g' มีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 24 และภาพที่ 50 T_g' ของเจลแป้งที่เพิ่มขึ้นหลังการเก็บรักษาอาจเป็นผลจากน้ำบางส่วนถูกนำไปใช้ในการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแป้ง (Baek *et al.*, 2004) และ โมเลกุลน้ำตาลซูโครสบางส่วนจะรวมตัวกับกับแป้งในขณะที่เกิดรีโทรเกรเดชัน ส่งผลให้ T_g' เพิ่มขึ้น (Wang and Jane, 1994) และการเก็บรักษาเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g' เช่นอุณหภูมิการแช่เยือกแข็งจะสามารถยับยั้งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่อันเนื่องมาจากน้ำตาลซูโครสและน้ำเคลื่อนที่ได้อย่างจำกัดจึงทำให้ T_g' ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (Slade and Levine, 1987; Wang and Jane, 1994) ซึ่งสอดคล้องกับผลการเก็บรักษาเจลแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ที่พบการเปลี่ยนแปลงของ T_g' เพียงเล็กน้อย

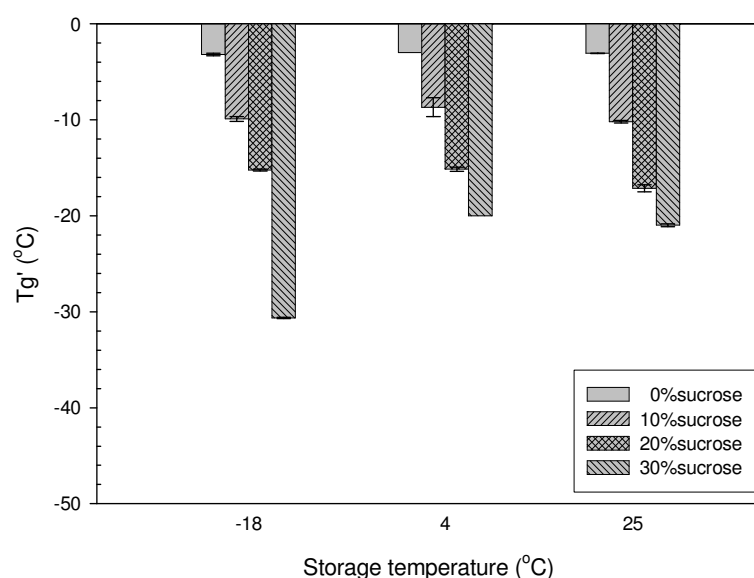
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแป้งมันสำปะหลังก่อนการเก็บรักษาและอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาซึ่งมีผลต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์ Slade and Levine (1987) รายงานว่าความคงตัวของผลิตภัณฑ์เยือกแข็งที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบขึ้นอยู่กับค่า ΔT ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแป้งมันสำปะหลังก่อนการเก็บรักษา ($\Delta T = T_r - T_g'$) ซึ่งการที่ ΔT มีค่าต่ำหรือ T_g' ของของแข็งเข้มข้นมีค่าสูง จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวต่อการเก็บรักษามากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งไม่พบการรีโทรเกรดที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาที่มีผลต่อ

ความคงตัวของผลิตภัณฑ์ T_g' ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสยังมีผลทำให้ความคงตัวของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย

ตารางที่ 24 อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

Sucrose concentration (%)	T_g' of fresh gels ($^{\circ}\text{C}$)	T_g' of aged gels ($^{\circ}\text{C}$)		
		-18 $^{\circ}\text{C}$	4 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$
0	-4.90 $\pm$ 1.65 ^A	-3.20 $\pm$ 0.14 ^{ns,A}	-3.00 $\pm$ 0.00 ^{ns,A}	-3.09 $\pm$ 0.01 ^{ns,A}
10	-10.74 $\pm$ 1.51 ^B	-9.93 $\pm$ 0.25 ^{ns,B}	-8.70 $\pm$ 0.99 ^{ns,B}	-10.20 $\pm$ 0.14 ^{ns,B}
20	-14.50 $\pm$ 0.88 ^C	-15.26 $\pm$ 0.10 ^{a,C}	-15.16 $\pm$ 0.23 ^{a,C}	-17.15 $\pm$ 0.35 ^{b,C}
30	-32.53 $\pm$ 1.61 ^D	-30.65 $\pm$ 0.07 ^{c,D}	-20.00 $\pm$ 0.00 ^{a,D}	-21.00 $\pm$ 0.13 ^{b,D}

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



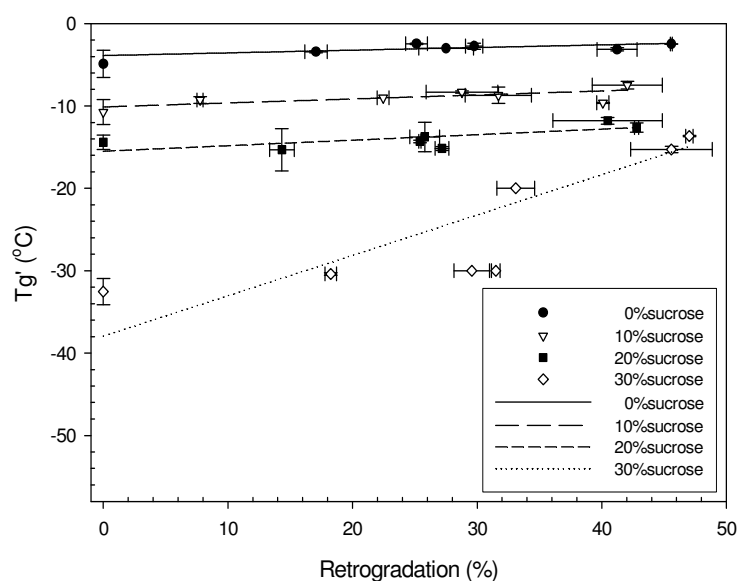
ภาพที่ 50 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

จากตารางที่ 25 ซึ่งแสดงผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ T_g' ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส หลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน พบว่าทั้งระยะเวลาในการเก็บรักษาและความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_g' อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย T_g' ของเจลแป้งมีค่าสูงขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก -4.90 ถึง -2.48 องศาเซลเซียส -10.74 ถึง -7.48 องศาเซลเซียส -14.41 ถึง -11.80 องศาเซลเซียส และ -32.53 ถึง -13.66 องศาเซลเซียส จากวันที่ 0 ถึง 21 ที่ระดับความเข้มข้นน้ำตาล 0%, 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ และมีค่าลดลงจาก -2.48 ถึง -13.66 องศาเซลเซียส ในวันที่ 21 เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30% จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง T_g' และอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครส พบว่า T_g' มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 51

ตารางที่ 25 อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน

Sucrose concentration (%)	T_g' of aged gels ($^{\circ}\text{C}$)						
	0 day	1 day	2 days	3 days	7 days	14 days	21 days
0	-4.90 ^{d,A}	-3.43 ^{c,,A}	-2.45 ^{a,A}	-2.75 ^{ab,A}	-3.00 ^{b,A}	-3.14 ^{bc,A}	-2.48 ^{a,A}
10	-10.74 ^{d,B}	-9.28 ^{bc,B}	-9.00 ^{bc,,B}	-8.31 ^{ab,B}	-8.70 ^{abc,B}	-9.62 ^{c,B}	-7.48 ^{a,B}
20	-14.41 ^{ns,C}	-15.31 ^{ns,C}	-13.77 ^{ns,C}	-14.31 ^{ns,C}	-15.16 ^{ns,C}	-12.62 ^{ns,,C}	-11.80 ^{ns,C}
30	-32.53 ^{e,D}	-30.40 ^{d,D}	-30.00 ^{d,D}	-30.00 ^{d,D}	-20.00 ^{c,D}	-15.29 ^{b,D}	-13.66 ^{a,D}

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30%

2.7.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง

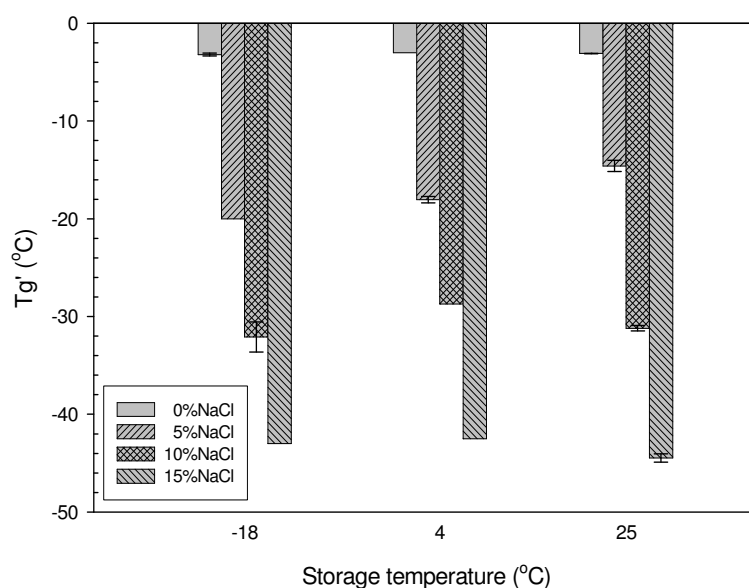
จากตารางที่ 26 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15% T_g' ของเจลแป้งมันสำปะหลังก่อนการเก็บรักษาจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จาก -4.90 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ เป็น -21.21, -32.22 และ -45.18 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เกลือโซเดียมคลอไรด์ทำให้ปริมาณน้ำที่ไม่แข็งตัวในเจลแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น โมเลกุลแป้งจึงมีการเคลื่อนตัวได้มากขึ้นส่งผลให้ T_g' ในระบบลดลง ส่วนประกอบที่เติมลงในอาหารที่มีน้ำหนักรวมต่ำจะมีผลทำให้ T_g' ลดลงต่ำกว่าส่วนประกอบที่มีน้ำหนักรวมสูง (Wang and Jane, 1994) ซึ่งเกลือโซเดียมคลอไรด์มีน้ำหนักรวมต่ำกว่า (58.5 กรัม) เมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส (342 กรัม) รวมทั้งสามารถเกิดพันธะไฮดรอกซิดกับน้ำได้จึงส่งผลให้ค่า T_g' ของระบบโดยรวมลดต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส

T_g' ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ หลังการเก็บที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ T_g' มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 7 วัน และพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ มีผลทำให้ T_g' ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 26 และภาพที่ 52

ตารางที่ 26 อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

NaCl concentration (%)	T_g' of fresh gels (°C)	T_g' of aged gels (°C)		
		-18°C	4°C	25°C
0	-4.90 ± 1.65 ^A	-3.20 ± 0.14 ^{ns,A}	-3.00 ± 0.00 ^{ns,A}	-3.09 ± 0.01 ^{ns,A}
5	-21.21 ± 2.16 ^B	-20.00 ± 0.00 ^{c,B}	-18.04 ± 0.33 ^{b,B}	-14.60 ± 0.57 ^{a,B}
10	-32.22 ± 2.41 ^C	-32.10 ± 1.56 ^{ns,C}	-28.73 ± 0.00 ^{ns,C}	-31.20 ± 0.28 ^{ns,C}
15	-45.18 ± 1.27 ^D	-43.00 ± 0.00 ^{a,D}	-42.50 ± 0.00 ^{a,D}	-44.48 ± 0.42 ^{b,D}

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant



ภาพที่ 52 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่ออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของ เจลเป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

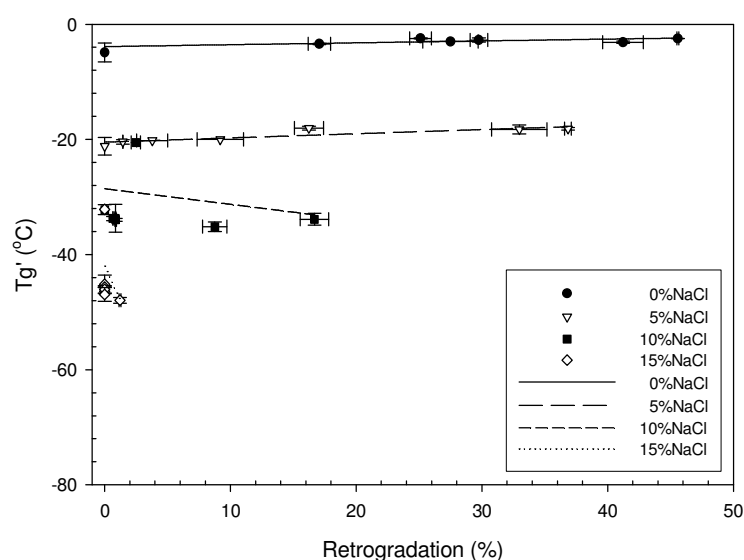
จากตารางที่ 27 ซึ่งแสดงผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อ T_g' ของ เจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ หลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน พบว่าทั้งระยะเวลาการเก็บรักษาและความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_g' อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย T_g' ของเจลเป็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อ เก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก -4.90 ถึง -2.48 องศาเซลเซียส และ -21.21 ถึง -18.16 องศาเซลเซียส จากวันที่ 0 ถึง 21 ในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0% และ 5% ในขณะที่ T_g' มีค่าลดลงเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้นโดยลดลงเล็กน้อยจาก -32.22 ถึง -33.88 องศาเซลเซียส และ -45.18 ถึง -47.94 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10% และ 15% ตามลำดับ และมีค่าลดลงจาก -2.48 ถึง -47.94 องศาเซลเซียส ในวันที่ 21 เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 15% จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง T_g' และอัตราการเกิด ริโทรเกรเดชันในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ พบว่า T_g' มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการ เกิดริโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นในสภาวะที่ไม่มีและมีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% ดังแสดงในภาพที่ 53 อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเกิดริโทรเกรเดชันของเจลเป็งในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ไม่ สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเกิดผลึกเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพันธะไฮออนิกระหว่างไอออนของ

เกลือกับโมเลกุลแป้งและน้ำอาจเป็นอีกปัจจัยที่มีบทบาทในการยับยั้งเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้ง
ร่วมด้วย

ตารางที่ 27 อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g') ของเจลแป้งมันสำปะหลัง ในสถานะที่มีเกลือ
โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 0-21 วัน

NaCl concentration (%)	T_g' storage ($^{\circ}\text{C}$)						
	0 day	1 day	2 days	3 days	7 days	14 days	21 days
0	-4.90 ^{d,A}	-3.43 ^{c,A}	-2.45 ^{a,A}	-2.75 ^{ab,A}	-3.00 ^{b,A}	-3.14 ^{bc,A}	-2.48 ^{a,A}
5	-21.21 ^{b,B}	-20.43 ^{b,B}	-20.20 ^{b,B}	-20.00 ^{b,B}	-18.04 ^{a,B}	-18.27 ^{a,B}	-18.16 ^{a,B}
10	-32.22 ^{a,C}	-33.70 ^{b,C}	-33.75 ^{b,C}	-33.97 ^{b,C}	-20.54 ^{a,C}	-35.16 ^{b,C}	-33.88 ^{b,C}
15	-45.18 ^{b,D}	-46.40 ^{c,D}	-45.69 ^{bc,D}	-46.06 ^{c,D}	-32.17 ^{a,D}	-46.95 ^{cd,D}	-47.94 ^{d,D}

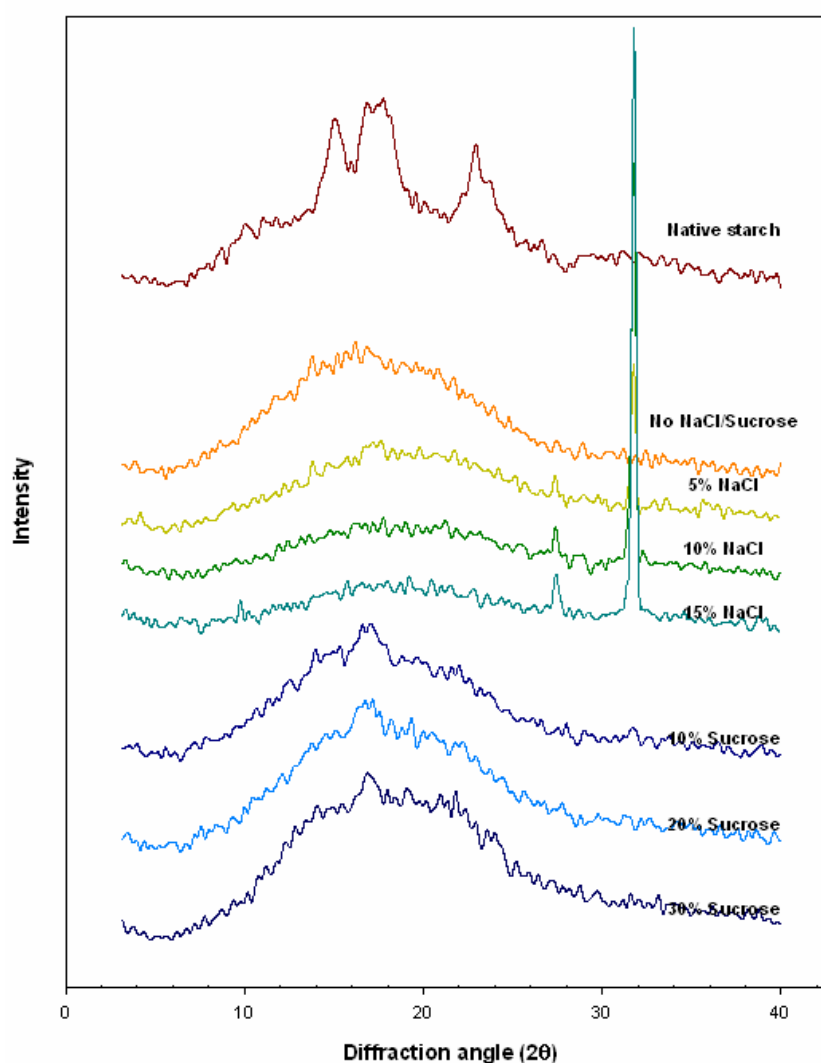
หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์
เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันใน
สถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15%

2.8 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 54 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) ในแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) หลังการเก็บรักษาในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0 ถึง 30% และเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0 ถึง 15% ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน



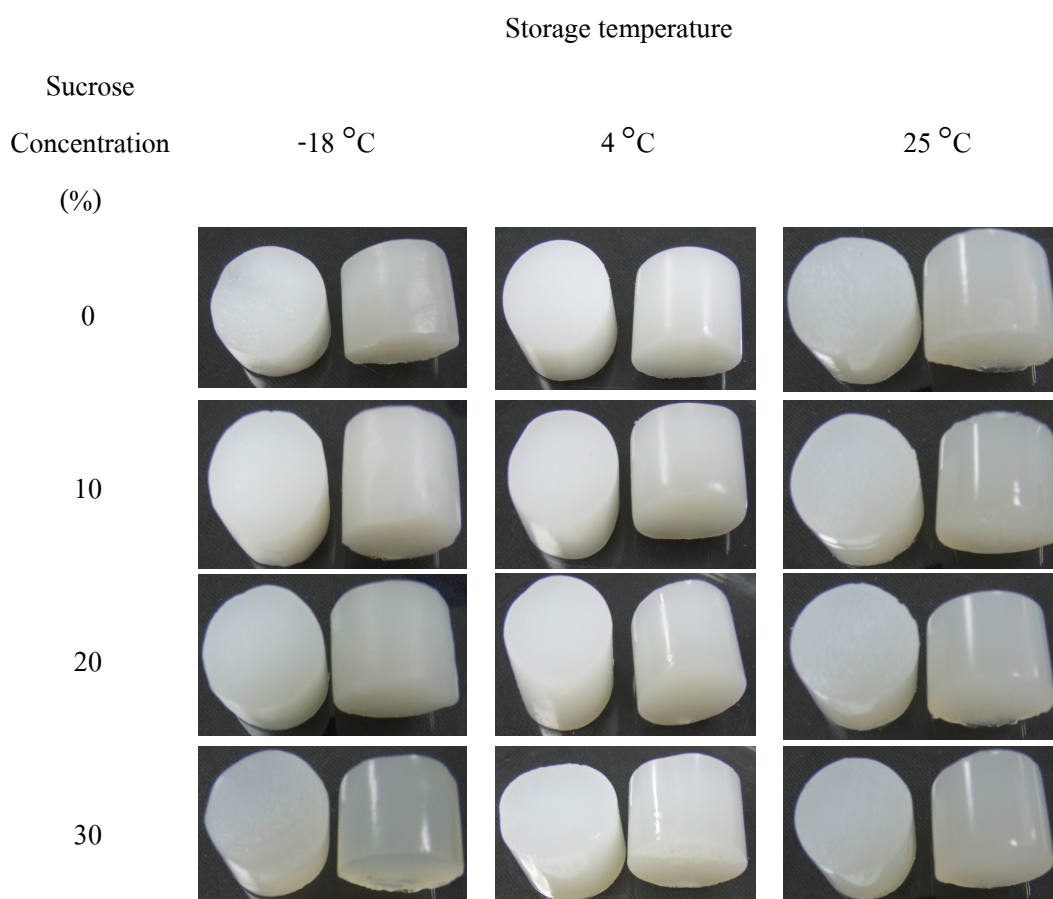
ภาพที่ 54 ลักษณะ X-ray diffraction pattern ของแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งมันสำปะหลังในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะผลึกเป็นแบบ A-type คือ ไม่มีฟลักที่มุมหักเห (diffraction angle) 5.6° แต่มีฟลักที่มุมหักเห 17° และ 17.9° และมีฟลักเดี่ยวที่มุมหักเห 23° เมื่อนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แล้วอบแห้งแบบเยือกแข็ง และนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเพื่อตรวจสอบการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกในเจลแป้ง พบว่าในเจลแป้งที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ จะไม่พบฟลักที่มุมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าไม่มีการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกในระดับที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray diffractometry ในขณะที่พบลักษณะของฟลักที่มุมดังกล่าวในเจลแป้งที่มีน้ำตาลซูโครสที่ทุกระดับความเข้มข้น แต่พื้นที่ใต้กราฟของฟลักที่มุมดังกล่าวซึ่งบอกถึงระดับโครงสร้างผลึกจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ แสดงให้เห็นว่า การเติมน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับเจลแป้งที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์จะไม่ปรากฏลักษณะของฟลักที่มุมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลในการยับยั้งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกในเจลแป้งมันสำปะหลัง แต่พบฟลักที่มุมหักเห 27° และ 32° ซึ่งเป็นฟลักของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในตัวอย่าง (Hashizume *et al.*, 1997) โดยพื้นที่ใต้กราฟของฟลักที่มุมดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น

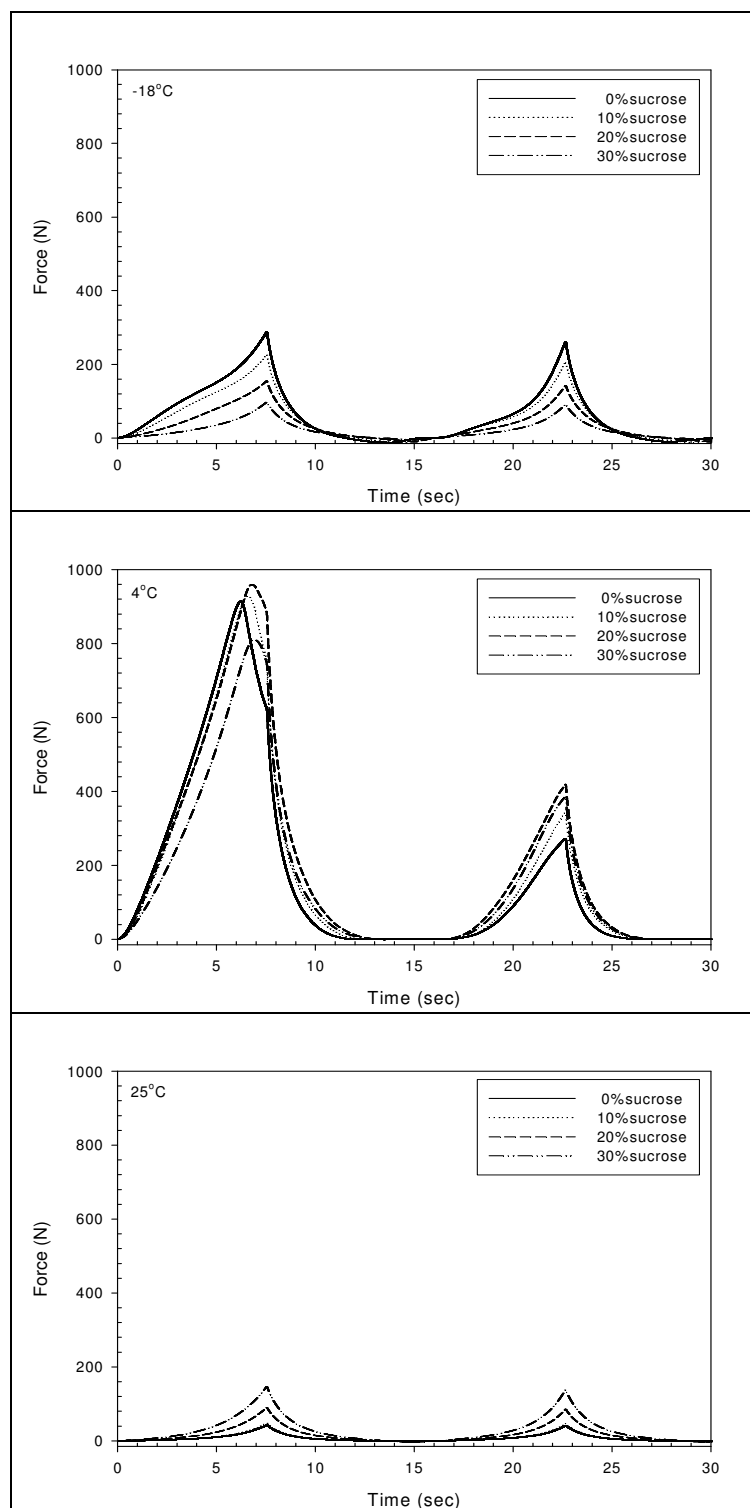
2.9 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันลำปะหลัง

2.9.1 ผลของน้ำตาลซูโครสต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันลำปะหลัง

ภาพที่ 55 และ 56 แสดงลักษณะของเจลเป็งมันลำปะหลังและผลการวัดค่าเค้าโครงคุณลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ของเจลเป็งมันลำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 55 ลักษณะของเจลเป็งมันลำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน



ภาพที่ 56 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer

เมื่อพิจารณาลักษณะของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ดังภาพที่ 55 พบว่าเจลแป้งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะบูนที่บ่งแสงมากกว่าเจลแป้งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส และพบว่าเจลแป้งในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะใสขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสต่าง ๆ ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครส ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 56 และตารางที่ 28

ตารางที่ 28 สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer

Textural properties	Sucrose concentration (%)	Storage temperature			Average
		-18°C	4°C	25°C	
Hardness (N)	0	28.28 ± 0.96 ^{b,A}	91.06 ± 0.26 ^{a,AB}	4.17 ± 0.08 ^{c,C}	41.17
	10	22.19 ± 1.01 ^{b,B}	92.19 ± 6.08 ^{a,AB}	4.71 ± 0.06 ^{c,C}	39.70
	20	15.18 ± 2.01 ^{a,C}	97.72 ± 0.56 ^{a,A}	8.82 ± 0.82 ^{b,B}	40.57
	30	9.55 ± 0.41 ^{c,D}	82.10 ± 0.99 ^{a,B}	14.38 ± 1.31 ^{b,A}	35.34
	Average	18.80	90.77	8.02	
Adhesiveness	0	-296.74 ± 42.26 ^{a,A}	-11.74 ± 5.96 ^{b,NS}	-17.83 ± 2.86 ^{b,NS}	-108.77
	10	-269.81 ± 8.96 ^{a,A}	-3.83 ± 2.53 ^{c,NS}	-25.44 ± 4.13 ^{b,NS}	-99.69
	20	-177.64 ± 11.75 ^{a,B}	-5.35 ± 4.25 ^{b,NS}	-36.72 ± 14.66 ^{b,NS}	-73.24
	30	-68.20 ± 2.31 ^{a,C}	-12.32 ± 2.65 ^{c,NS}	-50.42 ± 3.65 ^{b,NS}	-43.65
	Average	-196.35	-8.31	-32.60	
Springiness	0	0.84 ± 0.00	0.82 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.85 ^{NS}
	10	0.88 ± 0.01	0.79 ± 0.04	0.86 ± 0.01	0.84 ^{NS}
	20	0.87 ± 0.02	0.83 ± 0.02	0.86 ± 0.03	0.86 ^{NS}
	30	0.88 ± 0.00	0.81 ± 0.03	0.87 ± 0.00	0.85 ^{NS}
	Average	0.87 ^a	0.81 ^b	0.87 ^a	

ตารางที่ 28 (ต่อ)

Textural properties	Sucrose concentration (%)	Storage temperature			Average
		-18°C	4°C	25°C	
Cohesiveness	0	0.61 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.57 ^B
	10	0.65 ± 0.00	0.25 ± 0.08	0.91 ± 0.00	0.60 ^{AB}
	20	0.71 ± 0.01	0.29 ± 0.12	0.86 ± 0.01	0.62 ^{AB}
	30	0.82 ± 0.00	0.33 ± 0.10	0.85 ± 0.00	0.66 ^A
	Average	0.69 ^b	0.26 ^c	0.88 ^a	
Gumminess	0	17.13 ± 0.43	17.17 ± 1.70	3.76 ± 0.09	12.69 ^{NS}
	10	14.41 ± 0.68	22.44 ± 5.76	4.27 ± 0.05	13.70 ^{NS}
	20	10.71 ± 1.29	28.43 ± 11.52	7.61 ± 0.61	15.74 ^{NS}
	30	7.78 ± 0.31	27.08 ± 8.21	12.16 ± 1.06	15.67 ^{NS}
	Average	12.50 ^b	23.90 ^a	6.95 ^c	

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant

การเก็บรักษาเจลแป็งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างกันมีผลทำให้เจลแป็งมีค่าความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 28 และภาพที่ 57) โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะให้เจลที่มีความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเจลแป็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา โดยพบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ทำให้เจลแป็งมีค่าความแข็งลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำให้เจลแป็งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มจาก 0 ถึง 20% จากนั้นจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 30% และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำให้เจลแป็งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Stephen, 1995) ค่าความแข็งของเจลแป็งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นไปในทิศทางเดียวกับร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อวิเคราะห์ด้วย DSC ในขณะที่เจลแป็งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส รีโทรเกรดเพียงเล็กน้อยแต่มีค่า

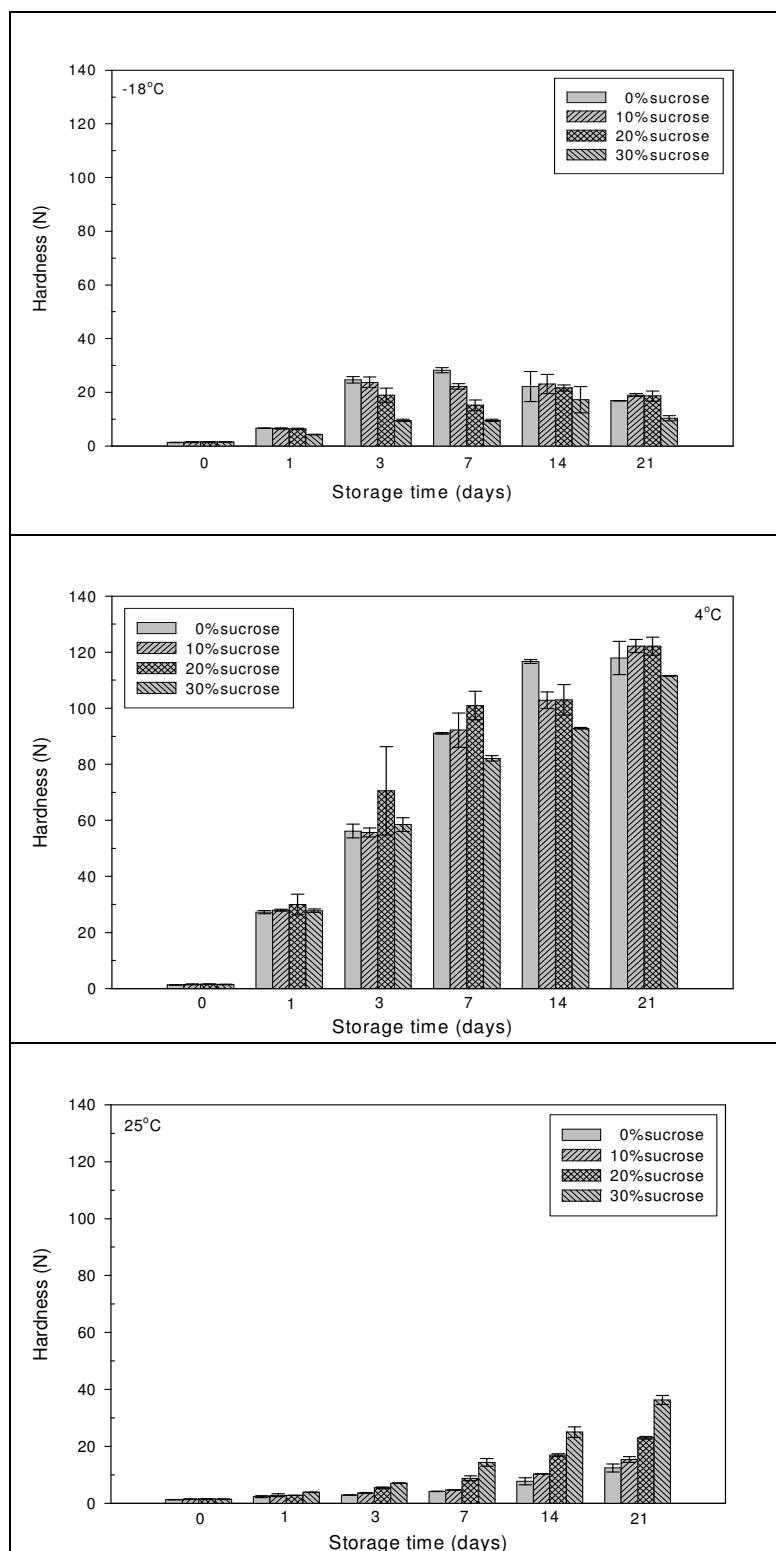
ความแข็งแรงมากกว่าเจลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากอัตราการลดอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็งเป็นไปอย่างช้า เจลแข็งบางส่วนจึงสามารถรีโทรเกรดได้ดีกว่า นอกจากนี้ระยะเวลาการเก็บรักษายังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของเจลแข็งมันสำปะหลัง โดยพบว่าเจลแข็งมันสำปะหลังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยเฉพาะเจลที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส และพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสไม่มีอิทธิพลที่แน่นอนต่อค่าความแข็งแรงของเจลแข็งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 และ 4 องศาเซลเซียส ในขณะที่เจลแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น

เจลแข็งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ (Adhesiveness) มากที่สุด รองลงมาคือเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ 25 และ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 28 และภาพที่ 58) ทั้งนี้อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเจลแข็ง ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 และ 4 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเก็บรักษาเจลแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าการเก็บรักษาเจลแข็งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำให้เจลแข็งมีความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น และการเก็บรักษาเจลแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ทำให้เจลแข็งมีความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น ในขณะที่ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนของความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุในเจลแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลแข็งมันสำปะหลัง

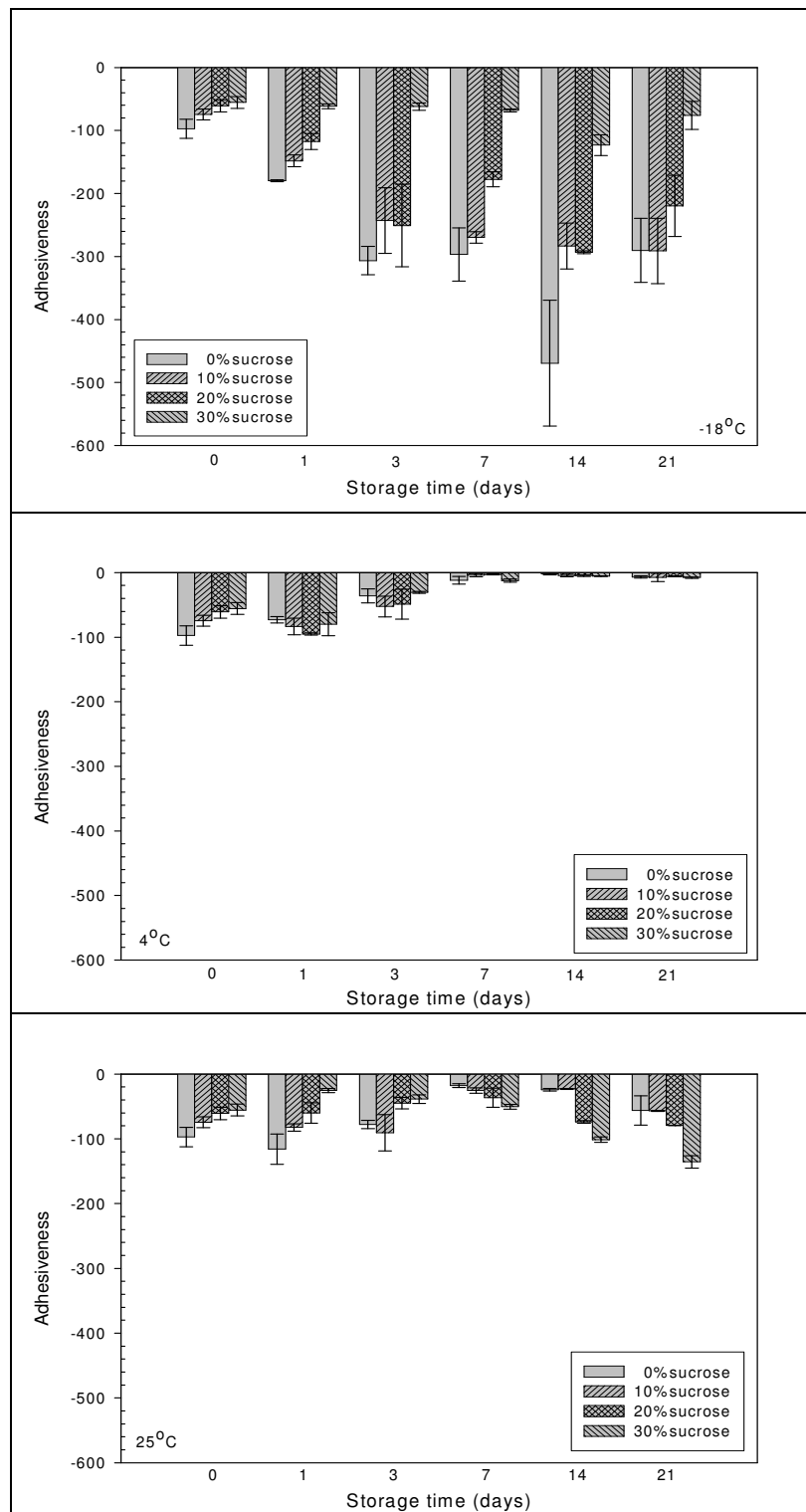
ความยืดหยุ่นของเจลแข็งมันสำปะหลัง (Springiness) หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าเจลที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา และมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสทุกระดับความเข้มข้น (ตารางที่ 28 และภาพที่ 59) ในขณะที่ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ของเจลแข็งมันสำปะหลังมีค่าลดลงอย่างชัดเจนหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 28 และภาพที่ 60) โดยเจลแข็งจะมีค่าการ

เกาะรวมตัวกันสูงหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25, -18 และ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับความสามารถเกาะรวมตัวกันแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของพันธะภายในที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้ตัวอย่างทนต่อแรงที่มากระทำก่อนที่ตัวอย่างจะขาดหรือแยกออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าเจลแป้งรีโทรเกรดได้น้อยที่อุณหภูมิ 25 และ -18 องศาเซลเซียส แต่โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในเจลจะมีความแข็งแรงมาก และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นความสามารถเกาะรวมตัวกันของเจลจะมีค่าสูงขึ้นโดยเฉพาะในเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 และ 4 องศาเซลเซียส เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น เจลแป้งมันสำปะหลังจะมีความสามารถเกาะรวมตัวกันลดลงโดยเฉพาะเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

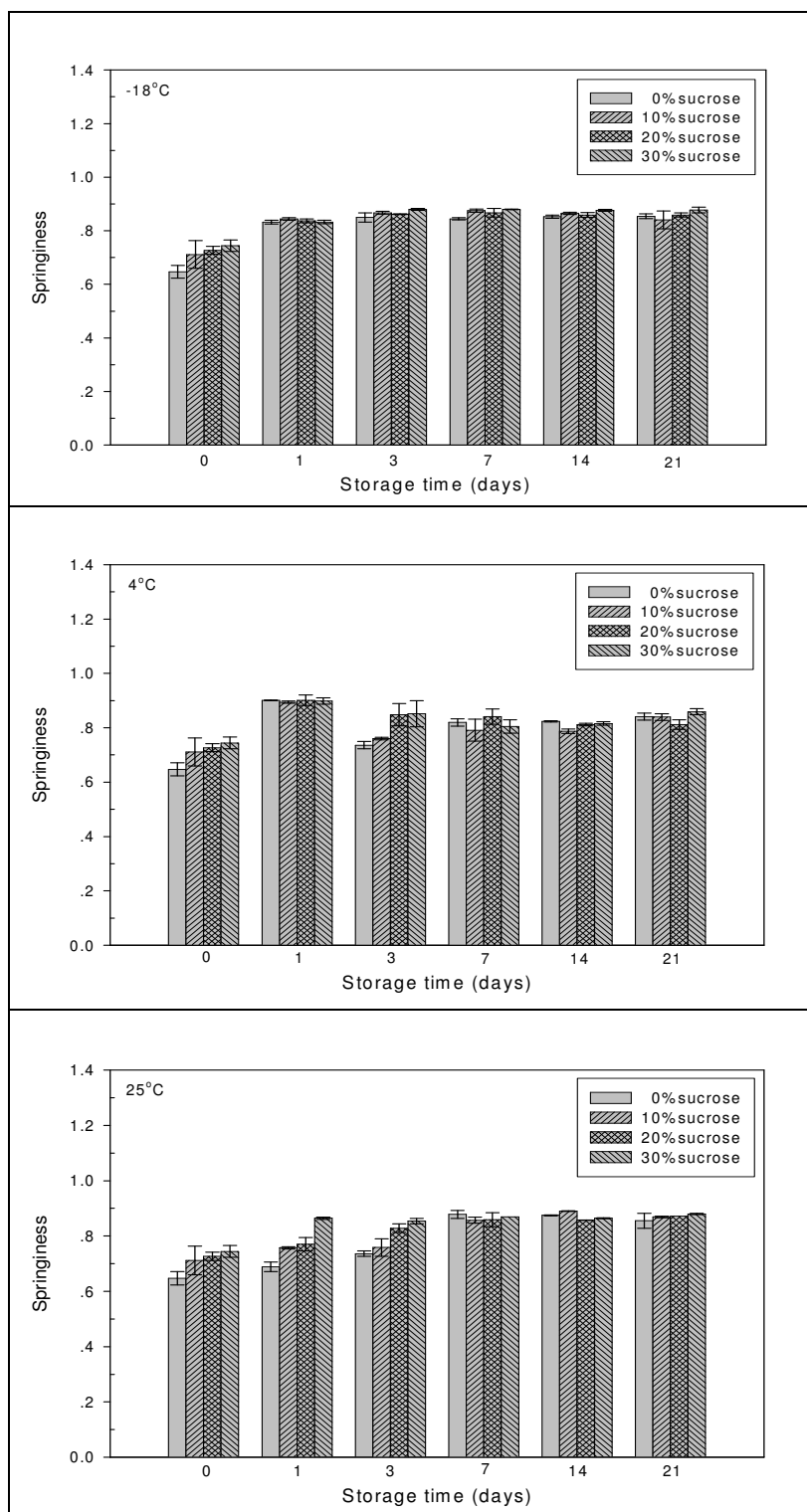
ความเหนียวเป็นยาง (Gumminess) ของเจลแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงสุดหลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 28 และภาพที่ 61) โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสสูงขึ้น ยกเว้นเจลที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และค่าความเหนียวเป็นยางจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสำหรับเจลแป้งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



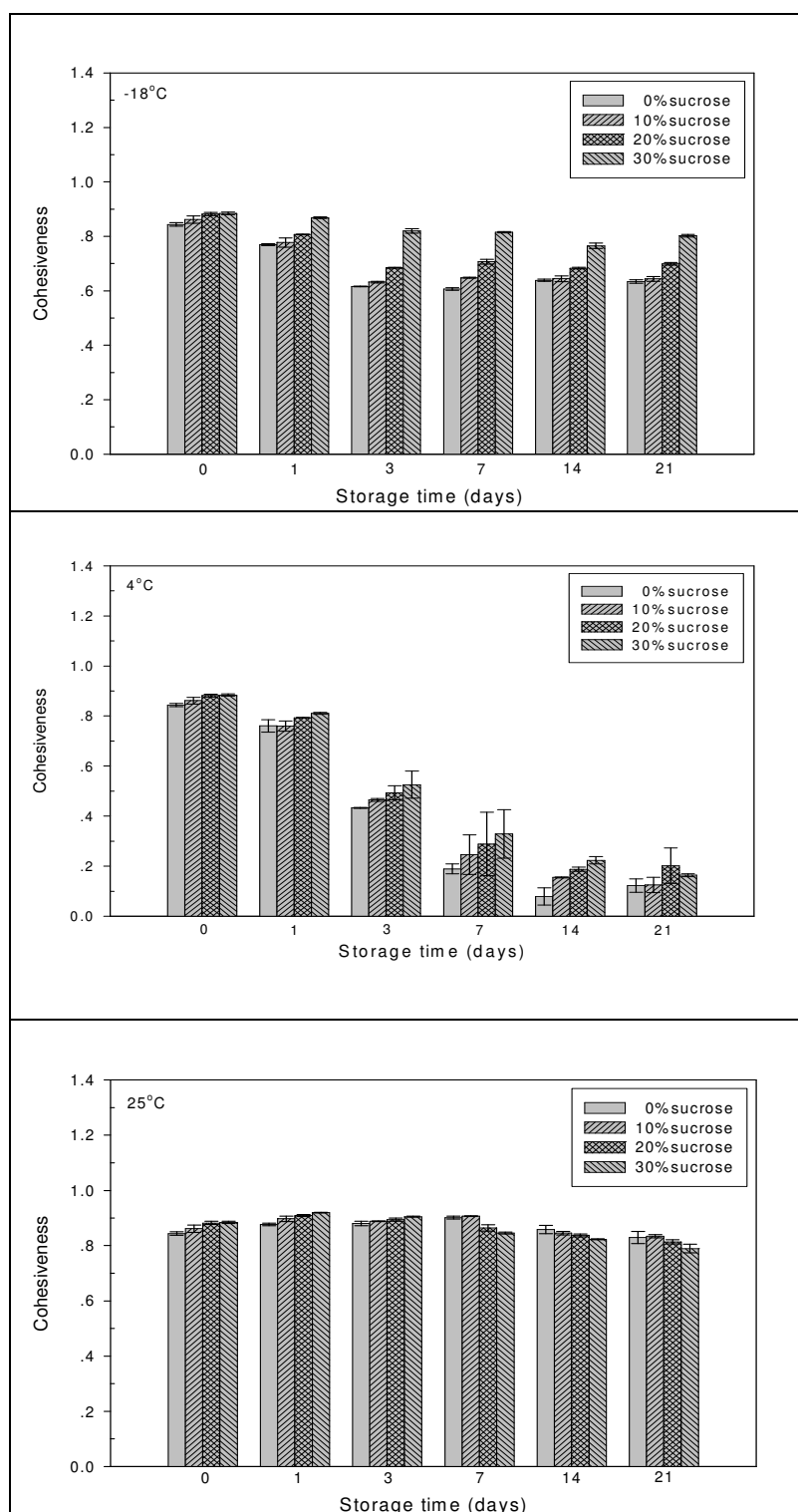
ภาพที่ 57 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อค่าความแข็งของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



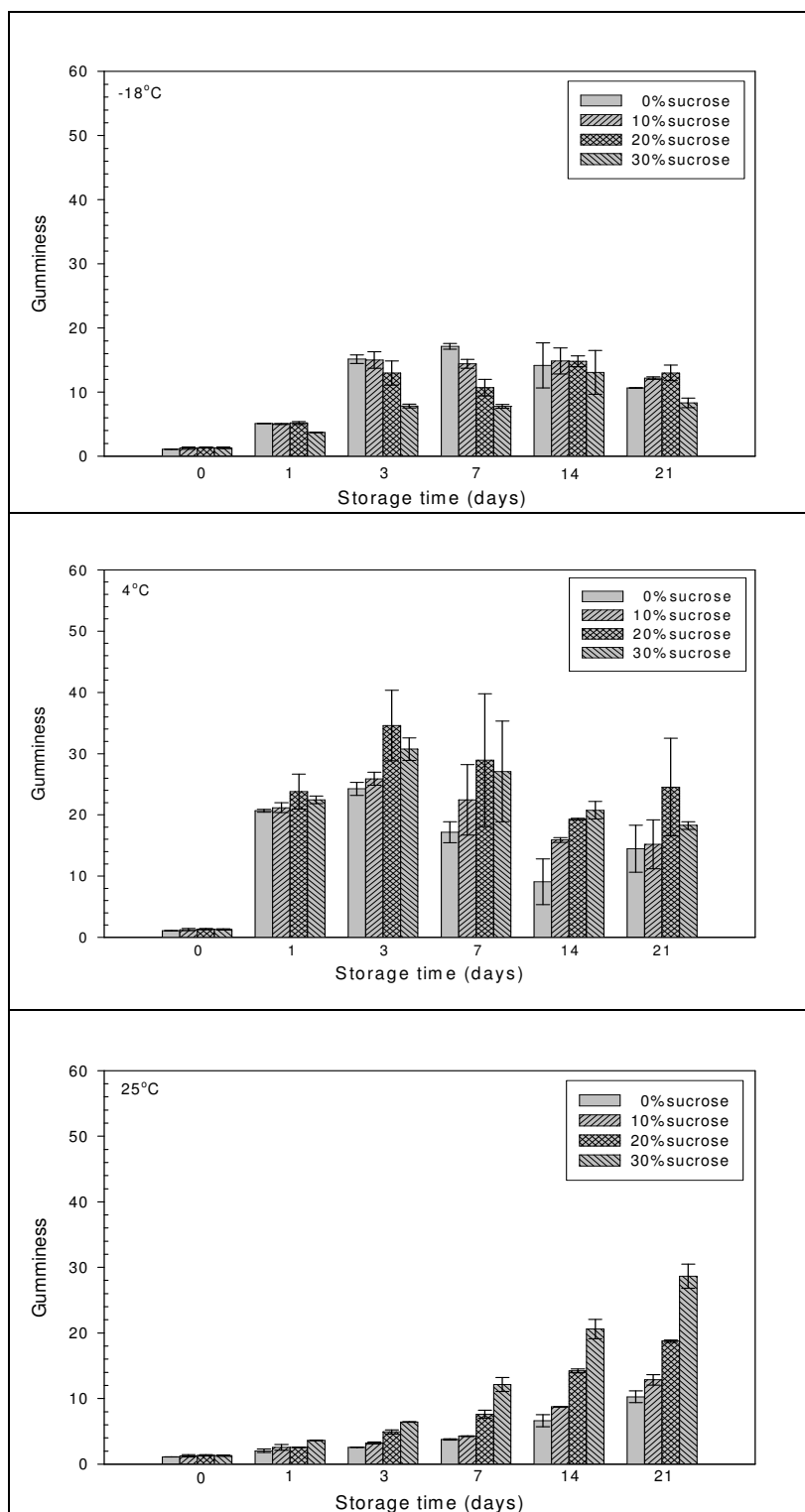
ภาพที่ 58 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของ เจลแปงมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 59 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความยืดหยุ่นของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



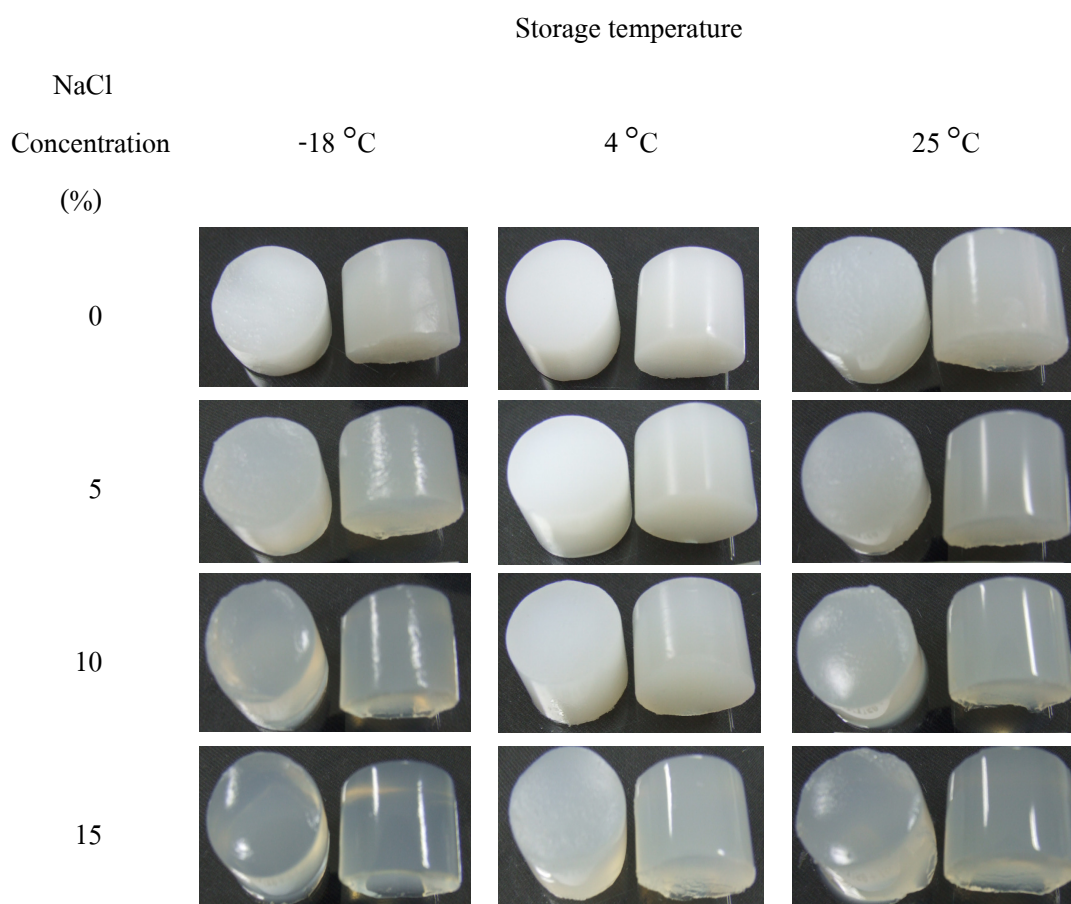
ภาพที่ 60 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อความสามารถเกาะรวมตัวกันของ
 เจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส
 เป็นเวลา 0-21 วัน



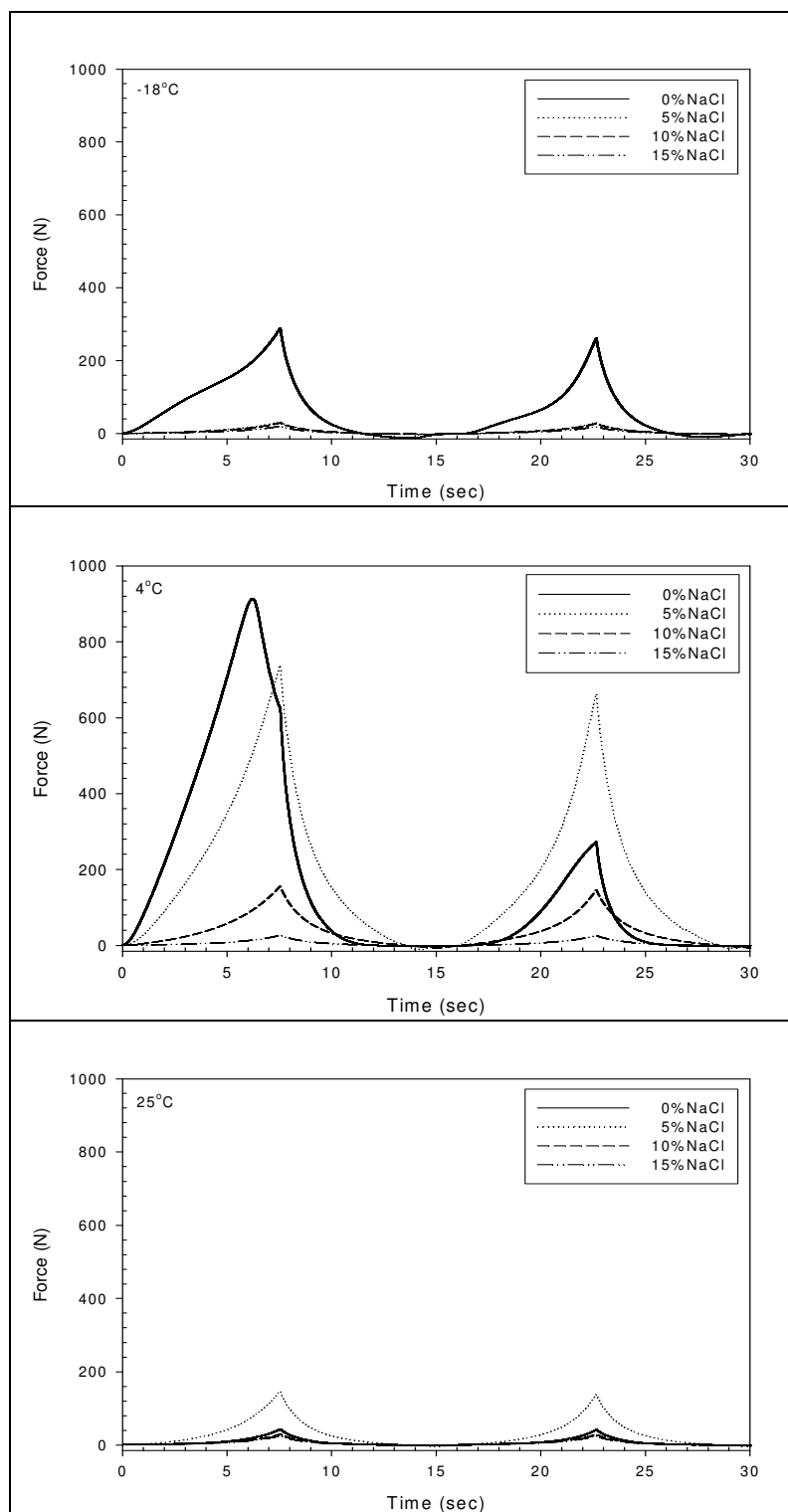
ภาพที่ 61 ผลของน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 0-30% ต่อค่าความเหนียวเป็นยางของเจลแบ่งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน

2.9.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันสำปะหลัง

ภาพที่ 62 และ 63 แสดงลักษณะของเจลเป็งมันสำปะหลังและผลการวัดค่าเค้าโครงคุณลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ของเจลเป็งมันสำปะหลังเข้มข้น 30% (โดยน้ำหนัก) ในสถานะที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 5, 10 และ 15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 62 ลักษณะของเจลเป็งมันสำปะหลังในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน



ภาพที่ 63 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลเป็งมันลำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer

เมื่อพิจารณาลักษณะของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ดังภาพที่ 62 พบว่าเจลแป้งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะขุ่นทึบแสงมากกว่าเจลแป้งที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส และพบว่าเจลแป้งในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์หลังการเก็บรักษาที่ทุกอุณหภูมิจะมีลักษณะใสขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสต่าง ๆ ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 63 และตารางที่ 29

ตารางที่ 29 สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลังในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์
เข้มข้น 0-15% หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer

Textural properties	NaCl concentration (%)	Storage temperature		
		-18°C	4°C	25°C
Hardness (N)	0	28.28 ± 0.96 ^{b,A}	91.06 ± 0.26 ^{a,A}	4.17 ± 0.08 ^{c,A}
	5	3.20 ± 0.18 ^{b,B}	74.02 ± 0.70 ^{a,B}	3.92 ± 0.30 ^{b,A}
	10	2.80 ± 0.12 ^{b,B}	15.37 ± 1.63 ^{a,C}	2.86 ± 0.16 ^{b,B}
	15	1.94 ± 0.13 ^{b,B}	2.61 ± 0.06 ^{a,D}	2.45 ± 0.02 ^{a,B}
Adhesiveness	0	-296.74 ± 42.26 ^{a,A}	-11.74 ± 5.96 ^{b,NS}	-17.83 ± 2.86 ^{b,C}
	5	-96.49 ± 17.19 ^{ns,B}	-78.58 ± 29.68 ^{ns,NS}	-33.62 ± 0.09 ^{ns,B}
	10	-63.00 ± 3.37 ^{ns,B}	-51.53 ± 52.61 ^{ns,NS}	-47.30 ± 3.96 ^{ns,A}
	15	-46.71 ± 1.85 ^{ns,B}	-56.97 ± 22.71 ^{ns,NS}	-43.39 ± 8.09 ^{ns,AB}
Springiness	0	0.84 ± 0.00 ^{ab,A}	0.82 ± 0.01 ^{b,NS}	0.88 ± 0.01 ^{a,A}
	5	0.79 ± 0.00 ^{c,B}	0.89 ± 0.00 ^{a,NS}	0.83 ± 0.01 ^{b,B}
	10	0.80 ± 0.00 ^{b,B}	0.85 ± 0.01 ^{a,NS}	0.80 ± 0.03 ^{b,B}
	15	0.79 ± 0.01 ^{ns,B}	0.79 ± 0.05 ^{ns,NS}	0.80 ± 0.00 ^{ns,B}
Cohesiveness	0	0.61 ± 0.01 ^{b,D}	0.19 ± 0.02 ^{c,D}	0.90 ± 0.01 ^{a,B}
	5	0.82 ± 0.00 ^{b,C}	0.73 ± 0.08 ^{c,C}	0.92 ± 0.00 ^{a,A}
	10	0.85 ± 0.00 ^{b,B}	0.83 ± 0.12 ^{b,B}	0.92 ± 0.01 ^{a,A}
	15	0.87 ± 0.00 ^{b,A}	0.91 ± 0.10 ^{a,A}	0.91 ± 0.00 ^{a,AB}
Gumminess	0	17.13 ± 0.43 ^{a,A}	17.17 ± 1.70 ^{a,B}	3.76 ± 0.09 ^{b,A}
	5	2.64 ± 0.15 ^{b,B}	54.27 ± 1.80 ^{a,A}	3.59 ± 0.28 ^{b,A}
	10	2.37 ± 0.10 ^{b,B}	12.60 ± 0.95 ^{a,C}	2.62 ± 0.13 ^{b,B}
	15	1.69 ± 0.11 ^{b,C}	2.36 ± 0.10 ^{a,D}	2.23 ± 0.02 ^{a,B}

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์
เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$, ns = not significant

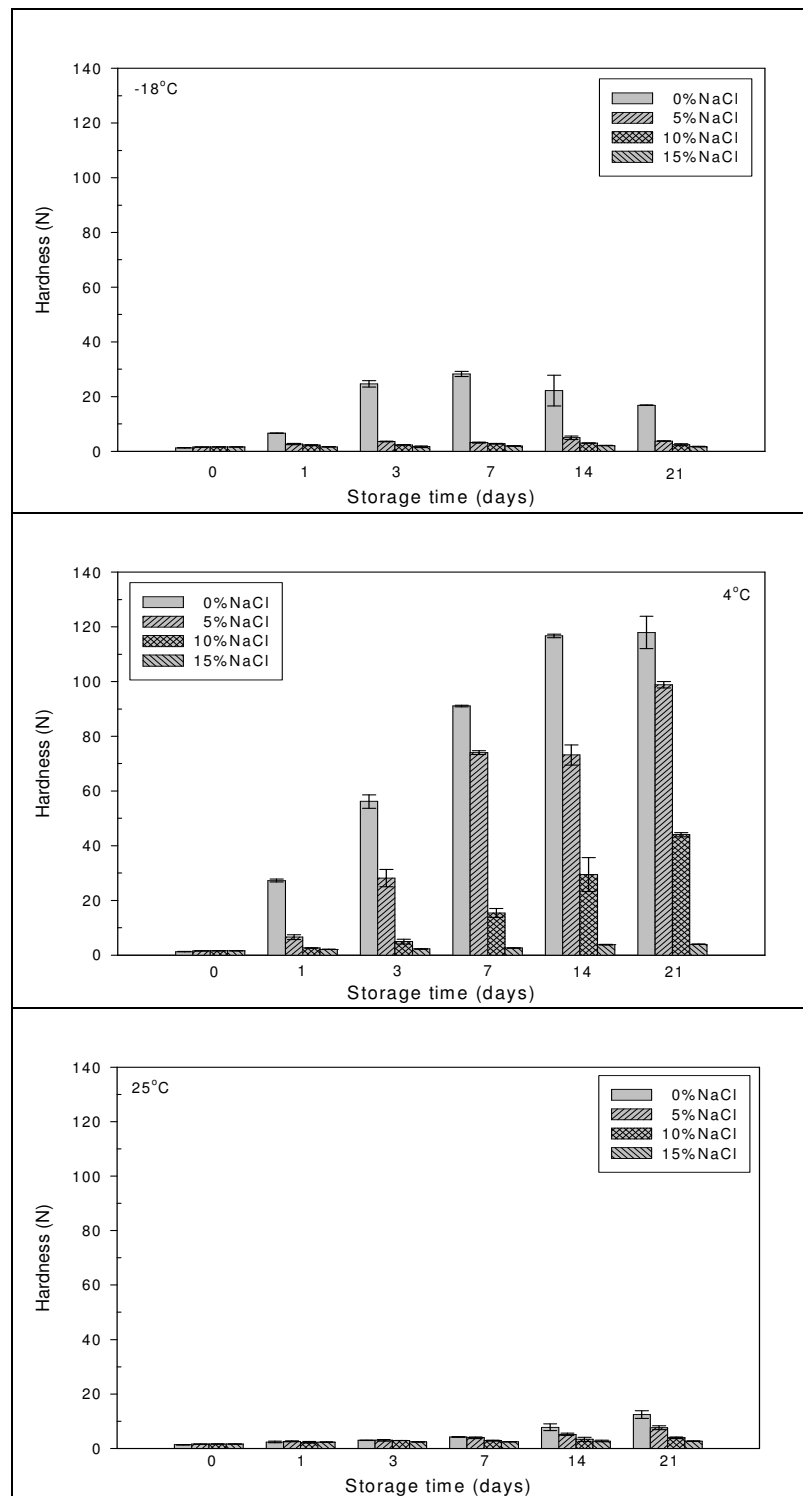
การเก็บเจลที่อุณหภูมิต่างกันมีผลทำให้เจลเป็งมันสำปะหลังมีค่าความแข็ง (Hardness) แตกต่างกัน (ตารางที่ 29 และภาพที่ 64) การเก็บรักษาเจลเป็งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะทำให้เจลเป็งมีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าความแข็งของเจลเป็งหลังผ่านการเก็บรักษาที่ทุกอุณหภูมิ จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งเป็นผลมาจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (Stephen, 1995) ค่าความแข็งของเจลเป็งหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ทุกระดับความเข้มข้นลดลงสอดคล้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วย DSC นอกจากนี้เจลเป็งมันสำปะหลังจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยเฉพาะเจลที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปเจลเป็งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จะมีความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ (Adhesiveness) มากที่สุด (ตารางที่ 29 และภาพที่ 65) ในขณะที่ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บรักษาโดยมีค่าลดลงเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ในขณะที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลเป็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ ยังมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น

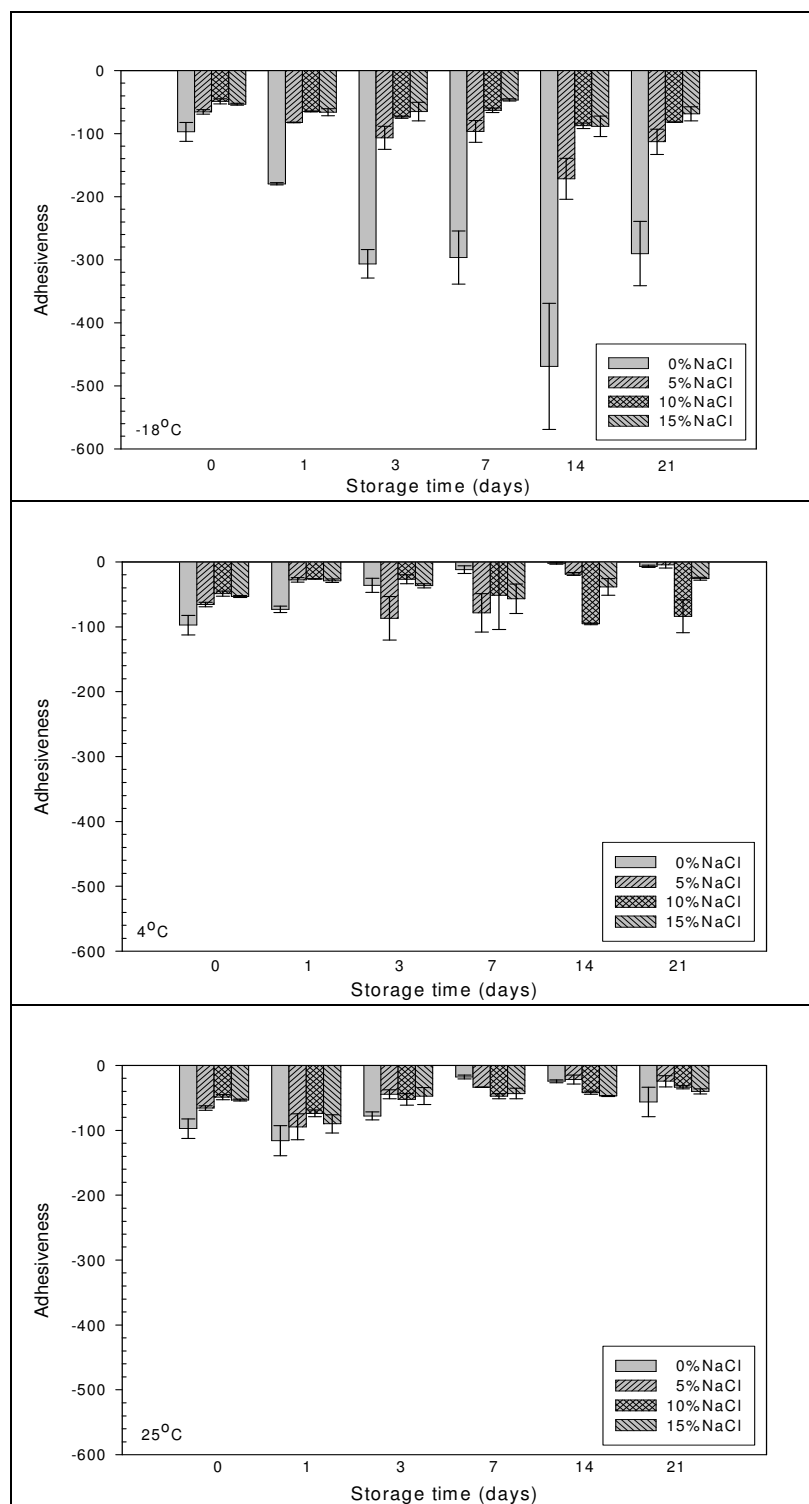
ค่าความยืดหยุ่นของเจลเป็งมันสำปะหลัง (Springiness) มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ทุกระดับความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น (ตารางที่ 29 และภาพที่ 66)

การเก็บรักษาเจลแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างกันมีผลทำให้เจลมีความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) แตกต่างกัน (ตารางที่ 29 และภาพที่ 67) โดยเจลแป้งจะมีค่าการเกาะรวมตัวกันสูงหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25, -18 และ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกันของเจลแป้งมันสำปะหลังระหว่างการเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลียวโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเจลแป้งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 3 วันขึ้นไป

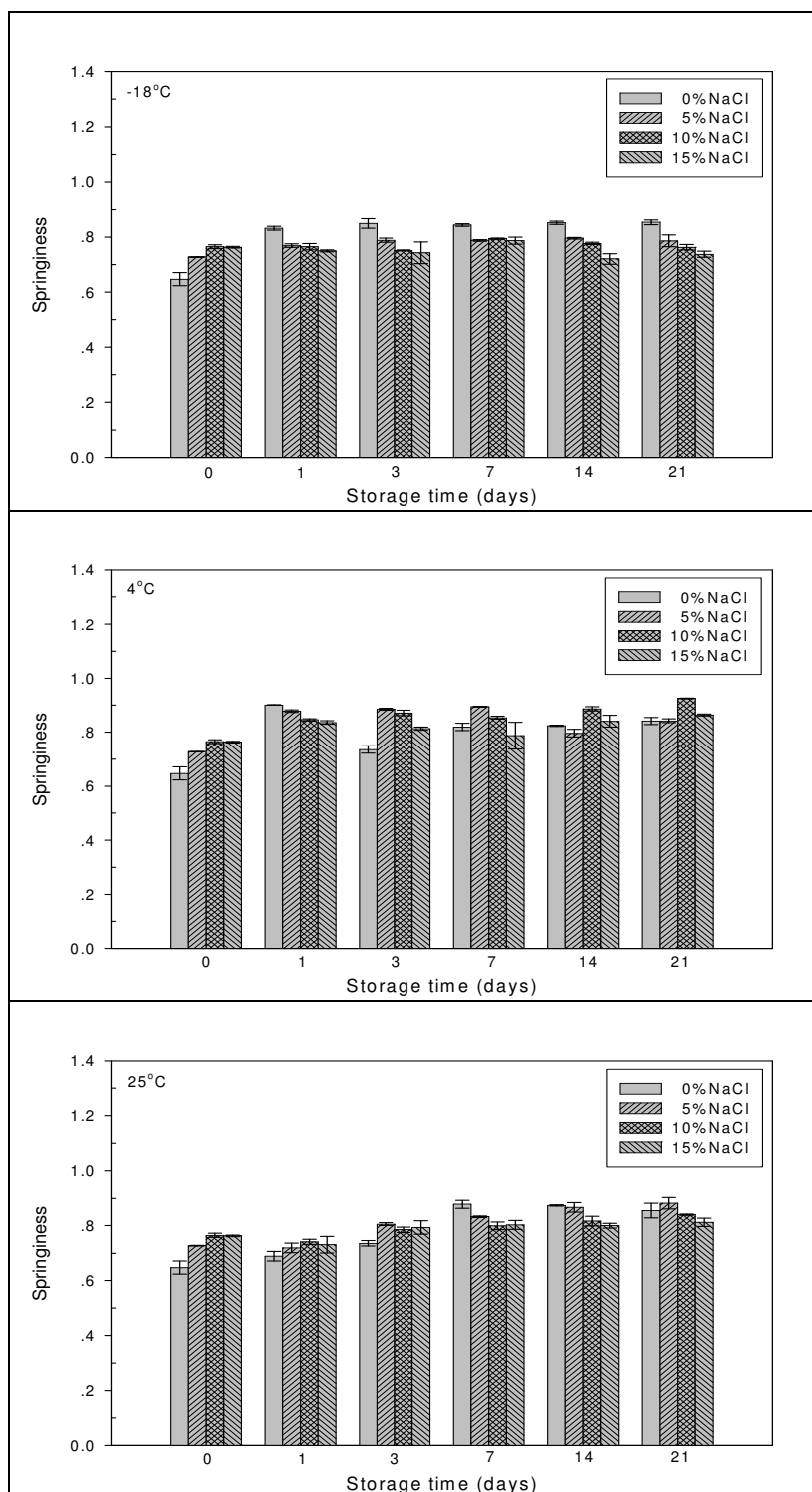
โดยทั่วไปค่าความเหนียวเป็นยาง (Gumminess) ของเจลแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าสูงสุดเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลียวโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 29 และภาพที่ 68) อย่างไรก็ตาม พบว่าเฉพาะค่าความเหนียวเป็นยางของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่านั้นที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นระยะเวลานานขึ้น



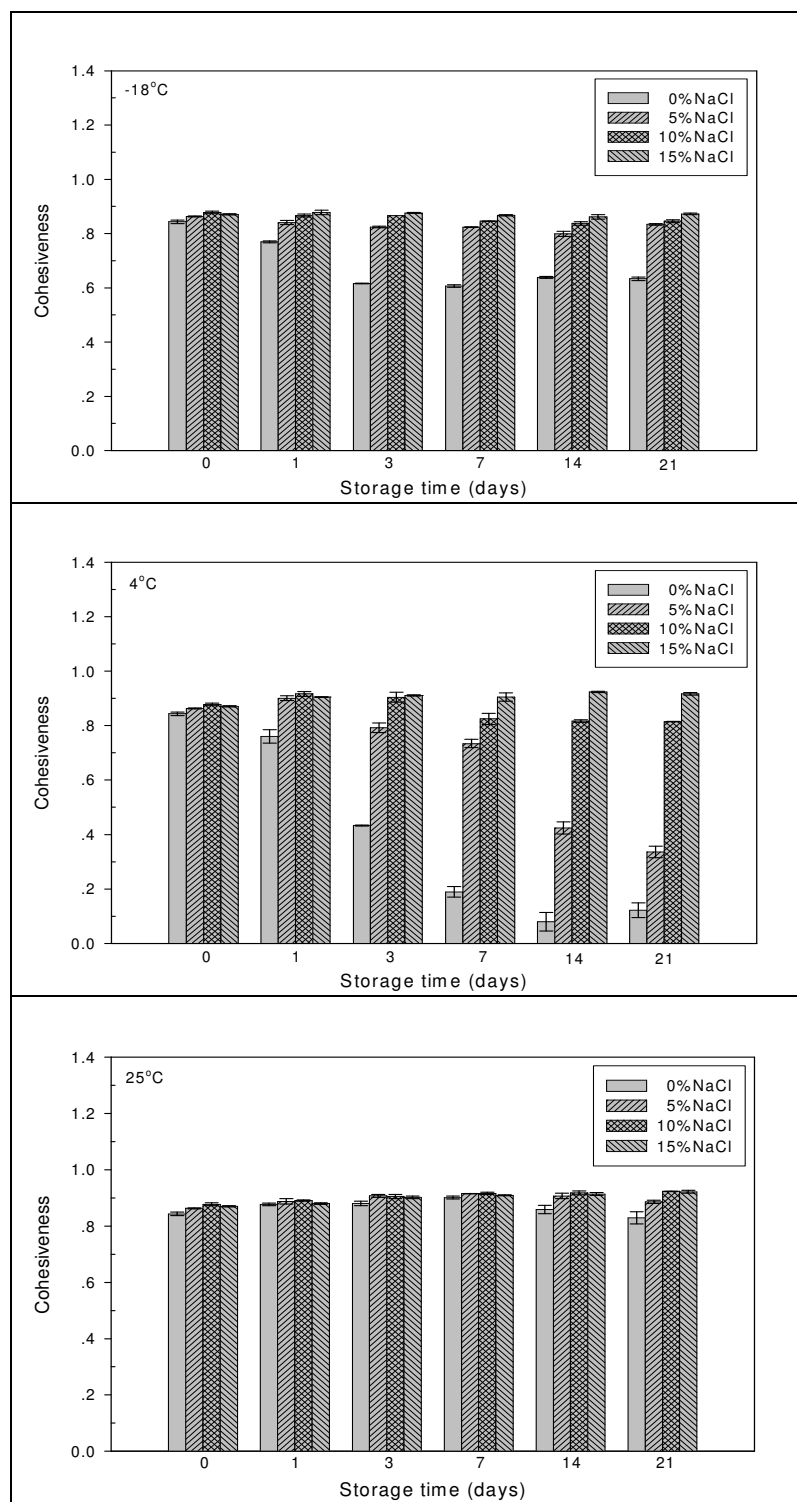
ภาพที่ 64 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อค่าความแข็งของเจลเป็งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



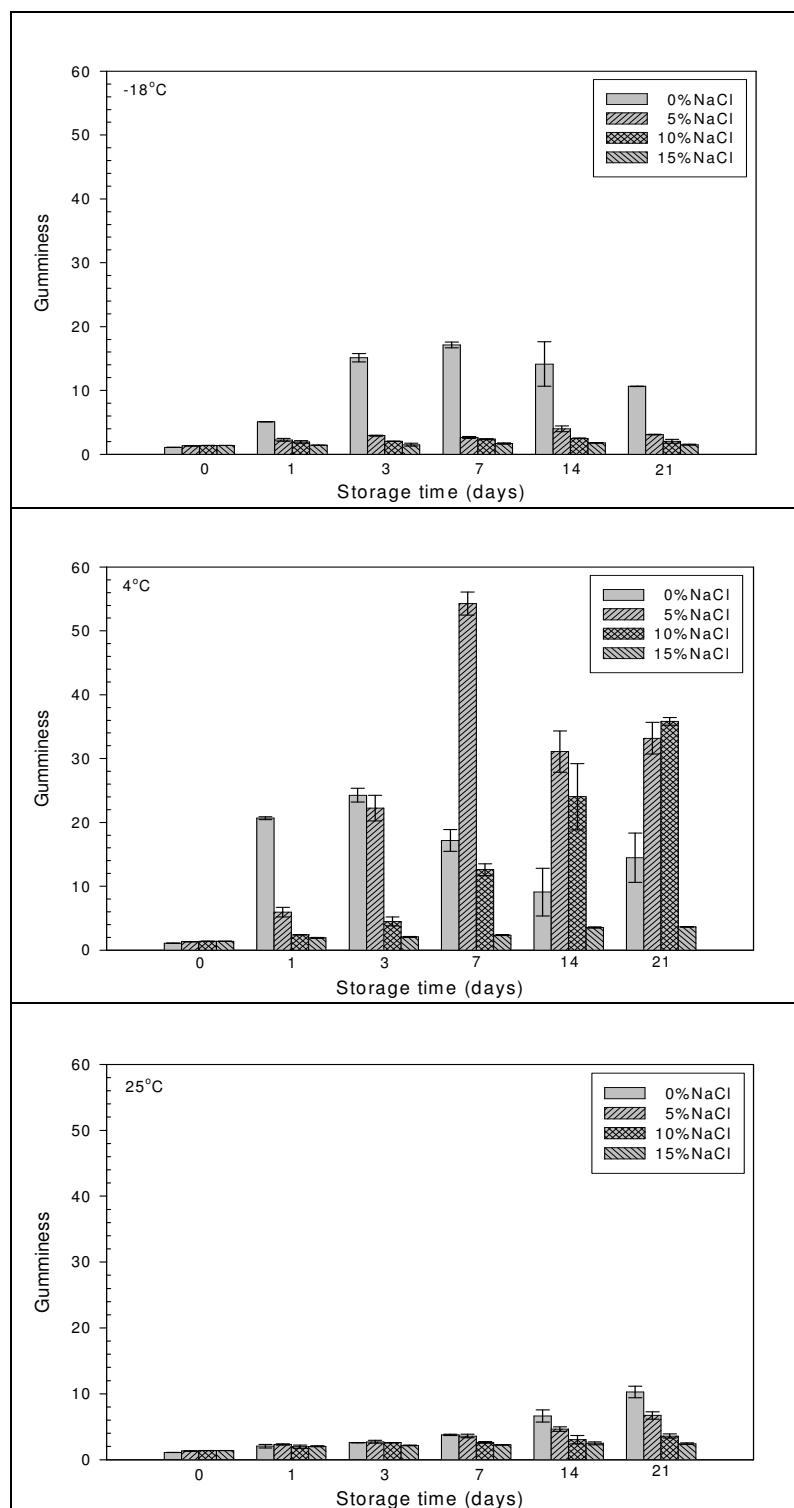
ภาพที่ 65 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุของเจลเป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 66 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความยืดหยุ่นของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 67 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อความสามารถเกาะรวมตัวกันของ
 เจลแป้งมันสำปะหลัง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส
 เป็นเวลา 0-21 วัน



ภาพที่ 68 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0-15% ต่อค่าความเหนียวเป็นยางของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-21 วัน

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังในสารละลายน้ำตาลซูโครส (0, 10, 20 และ 30%) และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (0, 5, 10 และ 15%) และเจลแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้ในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่ามีปริมาณโปรตีนร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณไขมันร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณเถ้าร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณเส้นใยเพียงเล็กน้อยและปริมาณสตาร์ชร้อยละ 98.72 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งจัดว่ามีความบริสุทธิ์สูง

2. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมด พบว่ามีลักษณะรูปร่างกลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้งซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-29 ไมครอน ประกอบด้วยเม็ดแป้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3-10 ไมครอนและ 11-29 ไมครอน ร้อยละ 40 และ 60 โดยประมาณตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 11.7 ไมครอน

3. ลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังขณะให้ความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา พบว่าในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ เม็ดแป้งพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น

4. จากการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดและค่า Breakdown มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มสูงขึ้น ในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึง 10% จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 15% ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่า Breakdown มีค่าลดลงเมื่อความ

เข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น อิทธิพลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการพองตัวและสมบัติความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปของแป้งมันสำปะหลังจะส่งผลกระทบต่อความยากง่ายในการทำให้แป้งสุกในระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ

5. จากการศึกษาสมบัติวิทยาการไหลของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้คุณสมบัติที่ค่า Storage modulus (G') มีค่าเท่ากับ Loss modulus (G'') ในระหว่างการให้ความร้อนมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับคุณสมบัติที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA และทำให้เจลแป้งมันสำปะหลังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในระหว่างการทำให้เย็น

6. สมบัติการเกิดเจลในเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะเปลี่ยนแปลงไปในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าวสามารถสร้างพันธะกับน้ำได้ ปริมาณน้ำอิสระหรือน้ำที่แข็งตัวได้จึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระบบมีมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่และประสิทธิภาพในการพลาสติกไซซ์ของโมเลกุลน้ำลดลง แป้งในน้ำจะเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งในสารละลายน้ำตาลซูโครส 10 ถึง 30% หรือสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 5 และ 10% อย่างไรก็ตามแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มที่จะเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มเป็น 15%

7. จากการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง พบว่าเจลแป้งมันสำปะหลังรีโทรเกรดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ทุกระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ น้ำตาลซูโครสหรือเกลือโซเดียมคลอไรด์ส่งผลกระทบที่แตกต่างกันต่อสมบัติการรีโทรเกรดของเจลแป้งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิในการเก็บรักษา และอุณหภูมิกลาสรานสีชันของเจลแป้งซึ่งมีค่าลดต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยนี้พบว่าน้ำตาลซูโครสมีแนวโน้มในการส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่เกลือโซเดียมคลอไรด์จะช่วยยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งมันสำปะหลัง หลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส โดย

ประสิทธิภาพของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในการยับยั้งการรีโทรเกรดของเจลแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น

8. จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแข็งมันสำปะหลังและเจลแข็ง พบว่าเม็ดมันสำปะหลังมีลักษณะผลึกเป็นแบบ A-type คือ ไม่มีพีคที่มุมหักเห 5.6° แต่มีพีคที่มุมหักเห 17° และ 17.9° และมีพีคเดี่ยวที่มุมหักเห 23° การตรวจสอบลักษณะการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกในเจลแข็งในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ พบว่าน้ำตาลซูโครสมีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่เกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลในการยับยั้งการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโครงสร้างผลึกในเจลแข็งมันสำปะหลัง

9. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแข็งมันสำปะหลังโดยเฉพาะความแข็งและความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันกับระดับการเกิดรีโทรเกรดของเจลแข็งในแต่ละสถานะการเก็บรักษา โดยเจลแข็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีน้ำตาลซูโครสมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุลดลงระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และเจลแข็งมันสำปะหลังในสถานะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของเม็ดมันสำปะหลังที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีเม็ดมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้เม็ดมันสำปะหลัง รวมถึงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้คงคุณภาพตามต้องการ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2520. **เกลือ คุณสมบัติและการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2.

คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 49 น.

_____. 2538. **เคมีน้ำตาล**. บริษัท ชูการ์ คอนซัลแตนท์ (ไทยแลนด์) จำกัด, กรุงเทพฯ. 104 น.

_____. 2542. **สารให้ความหวาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท จาร์พา เทคโนโลยี เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ. 118 น.

_____ และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 303 น.

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538. **องค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหาร**.

พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ฟอรัมเทพรินติ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ. 237 น.

ธงชัย สุวรรณสิขณ. 2544. **การวัดค่าเนื้อสัมผัส**. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวัดค่าปัจจัย

คุณภาพทางเคมีและกายภาพ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 78 น.

นิติ เต็มเวชชยานนท์. 2543. **การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี Ball mill และศึกษาสมบัติของ**

แป้งตัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

487 น.

บุญทิวา นิลจันทร์. 2548. **การศึกษาสมบัติเคมีฟิสิกส์ของฟลาวและสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์ต่าง ๆ**

ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2546. **คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแป้งทำยายม่อม และการนำ**

ไปใช้ประโยชน์ในขนมชั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์. 2543. การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยเอนไซม์พุลูลานเนสเพื่อใช้ในการทำแผ่นฟิล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรางคณา สวงวนพงษ์. 2544. การลดขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วันเพ็ญ รัตนชน. 2545. การเปรียบเทียบพันธุ์กรรม และสมบัติทางเคมีกายภาพของมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* CRANTZ) ชนิดชม และชนิดหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิไล รังสาดทอง. 2545. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เฟอร์นัลพับลิเคชัน จำกัด, กรุงเทพฯ. 477 น.
- ศิริลักษณ์ สินธวาลัย. 2525 ก. ทฤษฎีอาหาร เล่ม1 หลักการประกอบอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัท บี เอฟ ไอ จำกัด, กรุงเทพฯ. 248 น.
- _____. 2525 ข. ทฤษฎีอาหาร เล่ม3 หลักการทดลองอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท บี เอฟ ไอ จำกัด, กรุงเทพฯ. 270 น.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2516. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง. มอก. ที่ 52-2516.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2521. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. มอก. ที่ 274-2521.
- Baek, M.H., B. Yoo and S.T. Lim. 2004. Effect of sugars and sugar alcohols on thermal transition and cold stability of corn starch gel. **Food Hydrocolloids**. 18: 133-142.

- Bean, M.M. and C.S. Setser. 1992. Polysaccharide, sugar and sweeteners, pp. 69-198. *In* J. Brovers (eds.). **Food Theory and Applications**. Macmillan Publishing Co., New York.
- Beta, T. and H. Corke. 2001. Noodle quality as related to sorghum starch properties. **Cereal Chem.** 78(4): 417-420.
- Botlan, D.L. and P. Desbois. 1995. Starch retrogradation study in presence of sucrose by low-resolution nuclear magnetic resonance. **Cereal Chem.** 72(2): 191-193.
- Bourne, M.C. 1978. Texture profile analysis. **Food Technology.** 32(7): 62-66.
- Carvalno, C.W.P. and J.R. Mitchell. 2001. Effect of sucrose on starch conversion and glass transition of notexpanded Maize and Wheat Extrudates. **Cereal Chem.** 78(3): 342-348.
- Chiotelli, E., G. Pilosio and M.L. Meste. 2002. Effect of sodium chloride on the gelatinization of starch: a multimeasurement study. **Biopolymer.** 63: 41-58.
- Chungcharoen, A. and D.B. Lund. 1987. Influence of solutes and water on rice starch gelatinization. **Cereal Chemistry.** 64: 240-243.
- Conde-Petit, B. 2001. **Structural Features of Starch in Food : A Polymeric and Colloidal Approach.** Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Zurich. 161p.
- Coulter, T.P. 2002. **Food: The Chemistry of Its Components.** 4th Ed. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

- Eliasson, A.C. and M. Gudmundsson. 1996. Starch: physicochemical and functional aspects, pp. 431-503. *In* A.C. Eliasson (ed.). **Carbohydrate in Food**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Evans, I.D. and D.R. Haisman. 1982. The effect of solutes on the gelatinization temperature range of potato starch. **Starch/Staerke**. 34: 224-231.
- Freach, A.D. 1979. Allowed and preferred shapes of amylose. **Baker's Dig.** 53(1) : 30.
- Gudmundsson, G. 1994. Retrogradation of starch and the role of its components. **Thermochimica Acta**. 246: 329-341.
- Guilbot, A. and C. Mercier. 1985. Starch, pp. 209-282. *In* G.O. Aspinall (ed.). **The Polysaccharides**. Vol. 3. Academic Press, New York.
- Hashizume, H., S. Shimomura, H. Yamada, T. Fujita and H. Nakazawa. 1997. An x-ray diffraction system with controlled relative humidity and temperature. **The Rigaku Journal**. 14: 1-4.
- Hodge, J.E. and E.M. Osman. 1976. Carbohydrates, pp. 97-138. *In* O.R. Fennema (ed.). **Principle of Food Science Part I: Food Chemistry**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Hoover, R. and N. Senanayake. 1996. Effect of sugars on the thermal and retrogradation properties of oat starches. **Journal of Food Biochemistry**. 20: 65-83.
- Jane, J.L. 1993. Mechanism of starch gelatinization in neutral salt solutions. **Starch/Staerke**. 45: 161-166.
- Jang, J.K., S.H. Lee, S.C. Cho and Y.R. Pyun. 2001. Effect of sucrose on glass transition, gelatinization and retrogradation of wheat starch. **Cereal Chem.** 78(2): 186-192.

- Karim, A.A., M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chemistry**. 71: 9-36.
- Kim, C.S. and C.E. Walker. 1992. Changes in starch pasting properties due to sugars and emulsifiers as determined by viscosity measurement . **J. Food Sci**. 57(4): 109-1013.
- Kim, Y.S., D.P. Wiesenborn, P.H. Orr and L.A. Grant. 1995. Differential scanning calorimetry. **J. Food Sci**. 60(5): 1060-1065.
- Leach, H.W., L.D. McCowen and T.J. Schoch. 1959. Structure of the starch granule I. swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chem**. 36: 534-544.
- Leach, H.W. 1965. Gelatinization of starch, pp. 289-307. *In* R.L. whistler, E.F. Paschall, J.N. BeMiller and H.J. Roberts (eds.). **Starch: Chemistry and Technology**. Vol. I. Academic Press, New York.
- Levine, H. and L. Slade. 1986. A polymer physicochemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). **Carbohydrate Polymer**. 6: 213-244.
- Lii, C.Y. and B.L. Lee. 1993. Heating A-,B-,and C-,type starches in aqueous sodium chloride: effect of sodium chloride concentration and moisture content on differential scanning calorimetry thermograms. **Cereal Chem**. 70(2) : 188-192.
- Maauf, A.G., Y.B. Man, B.A. Asbi, A.H. Junainah and J.F Kennedy. 2001. Gelatinisation of sago starch in the presence of sucrose and sodium chloride as assessed by differential scanning calorimetry. **Carbohydrate Polymers**. 45: 335-345.
- Mallery, C.H. 2005. Department of Biology, University of Miami. Available Source: <http://www.fig.cox.miami.edu./.../150/chemistry/organic.htm>, January 14, 2005.

- Mezger, T.G. 2002. **The Rheology Handbook**. For users of rotational and oscillatory rheometers. Hannoprint, Inc., Germany.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyser**. Warriewood, New South Wales. 93 p.
- Noosuk, P. 2003. **The Assessment of the Relationship Between Structure and Functional Properties of Rice Starch**. Ph.D. thesis, Chulalongkorn University.
- Oates, C.G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends in Food Science and Technology**. 8: 375-382.
- Oosten, B.J. 1982. Tentative hypothesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperature of starches in water. **Starch/Staerke**. 34: 233.
- _____. 1990. Interactions between starch and electrolytes. **Starch/Staerke**. 42: 327.
- Pauling, L. 1946. **The Biology Project**. Department of Biochemistry and Molecular Biophysics. The University of Arizona.
- Perry, P.A. and A.M. Donald. 2002. The effect of sugars on the gelatinisation of starch. **Carbohydrate Polymers**. 49: 155-165.
- Pomeranz, Y. 1991. **Functional Properties of Food Component**. Academic Press, Inc. New York. p 25-62.
- Prokopowich, D.J. and C.G. Biliaderis. 1995. A comparative study of effect of sugars on the thermal and mechanical properties of concentrated waxy maize, wheat, potato and pea starch gels. **Food Chemistry**. 52: 255-262.

- Rupp, P.L.C. and S.J. Schwartz. 1988. Characterization of the action of *Bacillus subtilis* alpha-amylase on sweet potato starch, amylose and amylopectin. **J. Food Biochem.** pp. 191-203.
- Russell, P.L. and G. Oliver. 1989. The effect of pH and NaCl content on starch gel aging. A study by differential scanning calorimetry and rheology. **J. Cereal Sci.** 10: 123-138.
- Sahai, D. and D.S. Jackson. 1996. Structural and chemical properties of native corn starch granules. **Starch/Staerke.** 48: 249-255.
- Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches, pp: 106-108. *In* R.L. Whistler, R.J. Smith and J.N. Bemiller (eds.). **Method in Carbohydrates Chemistry.** Vol. IV. Academic Press, New York.
- Slade, L. and H. Levine. 1987. Recent advances in starch retrogradation, pp. 387-430. *In* S.S. Stivala, V. Crescenzi and I.C.M. Dea (eds.). **Industrial Polysaccharides.** Gordon and Breach Science, New York.
- _____. 1991. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition.** 30: 115-360.
- Spies, R.D. and R.C. Hoseney. 1982. Effect of sugars on starch gelatinization. **Cereal Chem.** 59(2): 128-131.
- Steffe, J.F. 1996. **Rheological Method in Food Process Engineering.** East Lansing: Freeman Press.
- Stephen, A.M. 1995. **Food Polysaccharides and Their Application.** Marcel Dekker, Inc. 654 p.

- Sudhakar, V., R.S. Singhal and P.R. Kulkarni. 1994. Studies on starch-hydrocolloid Interactions: effect of salts. **Food Chemistry**. 53(1995): 405-408.
- Waigh, T.A., P.J. Jenkins and A.M. Donald. 1996. Quantification of water in carbohydrate lamellae using SANS. **Faraday Discuss**. 103: 325-337.
- _____, M.J. Gidley, B.U. Komanshet and A.M. Donald. 2000. The phase transformations in starch during gelatinization: a liquid crystalline approach. **Carbohydr. Res**. 328: 165-176.
- Wang, Y.J. and J. Jane. 1994. Correlation between glass transition temperature and starch retrogradation in the presence of sugars and maltodextrins. **Cereal Chem**. 71(6): 527-531.
- Whistler, R.L. and J.R. Deniel. 1984. Molecular structure of starch, pp. 153-178. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall (eds.). **Starch: Chemistry and Technology**. 2nd Ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Wivinis, G.P. and E.C. Mayward. 1986. Photographs of starches, pp. 153-183. *In* R.L. Whistler and E.F. Paschall (eds.). **Starch: Chemical and Technology**. Vol. I. Academic Press, Florida.
- Wootton, M. and A. Bamunuarachchi. 1980. Application of differential scanning calorimetry to starch gelatinization: Effect of sucrose and NaCl. **Starch/Staerke**. 32: 126-129.
- Zelevnak, K.J. and R.C. Hoseney. 1987. The glass transition in starch. **Cereal Chem**. 64(2): 121-124.

- Zobel, H.F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes, p. 286. *In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall (eds.). **Starch: Chemistry and Technology**. Vol. 2. Academic Press: New York.
- _____. 1992. Starch granule structure, pp. 1-36. *In* R.J. Alexander and H.F. Zobel (eds.). **Developments in Carbohydrate Chemistry**. American Association of Cereal Chemists: St Paul.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

1.1 เครื่องมือ

- 1) จานกระเบื้อง (aluminum dish) พร้อมด้วยฝาปิด
- 2) ตู้อบไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้
- 3) เครื่องเคาะที่มีสารดูดความชื้น

1.2 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) อบจานอะลูมิเนียมพร้อมด้วยฝาปิดในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105-107 องศาเซลเซียส นานประมาณ 15 นาที นำออกมาวางในเครื่องเคาะทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างแป้งในจานอะลูมิเนียมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม อบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105-107 องศาเซลเซียส นานประมาณ 5 ชั่วโมง นำออกมาวางในเครื่องเคาะทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่ง อบซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างหลังจากอบแห้งแล้ว

1.3 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{100 \times (W_1 - W_2)}{W_1 - W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียม (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของจานอะลูมิเนียมและตัวอย่างหลังอบแห้ง (กรัม)

2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

2.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องย่อย (2006 Digestor Exhaust system)
- 2) เครื่องกลั่นไนโตรเจน (1026 Distilling unit Kjeltex system)
- 3) ขวดแก้วเจดาห์ล (Kjeldahl flask)
- 4) บิวเรต
- 5) ตู้ดูดควัน

2.2 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.84
- 2) สารละลายกรดบอริก ร้อยละ 4 ของน้ำหนัก
- 3) สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- 4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 40 ของน้ำหนัก
- 5) ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3.5 กรัม โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2PO_4) และ 0.4 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)

2.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วเจดาห์ล โดยระวังอย่าให้ติดข้างขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ช้อน เติมกรดซัลฟูริก 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบา ๆ วางบนขวดเครื่องย่อยในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำไปเข้าเครื่องกลั่นไนโตรเจนโดยต่อท่อให้ปลายจุ่มในฟลasks ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อเก็บแอมโมเนีย กลั่นประมาณ 5 นาที แล้วนำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละไนโตรเจน

2.4 วิธีคำนวณ

$$\begin{array}{l} \text{ปริมาณโปรตีน} \\ \text{(ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)} \end{array} = \frac{(S-B) \times N \times 1.401 \times 5.27 \times 100}{W \times (100-M)}$$

เมื่อ S = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรต Blank

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละความชื้น

3. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

3.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soctex system HT 1046 Service unit และ Soctex system HT2 1045 Extraction unit)
- 2) เครื่องทำความเย็น (CTL 911)
- 3) ถ้วยอะลูมิเนียม (Extraction cups)
- 4) คีมสำหรับจับถ้วยอะลูมิเนียม
- 5) ทิมเบิล (Thimble)
- 6) กระดาษกรองเบอร์ 1

3.2 สารเคมี

- 1) ปีโตรเลียมอีเทอร์
- 2) อะซิโตน

3.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม บนกระดาษกรองและห่อให้มีขีด จากนั้นนำมาใส่ลงในทิมเบล นำทิมเบลใส่ใน 1045 Extraction unit ซึ่งเชื่อมต่อกับ 1046 Service unit โดยใช้ adapter นำ Extraction cups ไปอบและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมตัวทำละลายประมาณ 45 มิลลิลิตร นำ Extraction cups เข้าไปใน Soxhlet system HT2 1045 Extraction unit พร้อมทั้งเลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง boiling และสกดเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเลื่อนคันโยกมาที่ตำแหน่ง rinsing เป็นเวลา 45 นาที นำ Extraction cups ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้ง Extraction cups ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณร้อยละไขมัน

3.4 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของ Extraction cups (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของ Extraction cups และตัวอย่างหลังอบแห้ง (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

4.1 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ในจานกระเบื้องเคลือบที่เผาและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำไปเผาด้วยไฟอ่อนๆจนหมดควัน แล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 ± 20 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทา นำออกมาวางในเดสิคเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เผาตัวอย่างซ้ำจนกระทั่ง 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม ถือเป็นน้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบและตัวอย่าง หลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่

4.2 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{(W_1 - W)}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างหลังเผาจนได้น้ำหนักคงที่ (กรัม)

5. การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย

5.1 เครื่องมือ

- 1) ปีกเกอร์ชนิดไม่มีปากขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 2) เครื่องย่อย (Digestion Apparatus) ที่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ (Condensor) สำหรับควบคุมปริมาตรของสารละลายให้คงที่ตลอดเวลาการย่อย
- 3) ภาชนะชั่ง (Gooch crucible)
- 4) ชุดอุปกรณ์ suction pump พร้อม Flask และ Buchner
- 5) ตู้อบไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้
- 6) เตาเผาไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้
- 7) เซลล์เคเตอร์ที่มีสารดูดความชื้น

5.2 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.255 นอร์มัล (สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีกรด 1.25 กรัม)
- 2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.313 นอร์มัล (สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัม)
- 3) แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95

5.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 2.5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริก 0.255 นอร์มัล ซึ่งต้มเดือดลงไป 200 มิลลิลิตร นำไปเข้าเครื่องย่อย และต้มเดือดต่อไปอีกนาน 30 นาที กรองทันทีด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ด้วยการ suction ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด (ประมาณ 200 มิลลิลิตร) ตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส ถ่ายกากบนกระดาษกรองลงในบีกเกอร์เดิมจนหมด จากนั้นย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.313 นอร์มัล ซึ่งต้มเดือดจำนวน 200 มิลลิลิตร นำไปย่อยต่อทันที และต้มให้เดือดต่อไปอีกนาน 30 นาที กรองทันทีด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ด้วยการ suction ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดล้าง (ประมาณ 200 มิลลิลิตร) ตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส ล้างกากที่เหลือด้วยแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำกระดาษกรองใส่ครุชชีเบลแล้วนำไปอบที่ 105-107 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในเดสิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่ง อบตัวอย่างซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของครุชชีเบลและกากหลังจากที่อบแห้งแล้ว นำครุชชีเบลพร้อมด้วยกากที่อบแห้ง ไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 ± 20 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนขาว แล้วนำออกมาใส่ในเดสิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งแล้วเผาซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม จดน้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักของครุชชีเบลและเถ้าหลังจากที่เผาแล้ว ผลแตกต่างระหว่างการชั่งน้ำหนักทั้งสองครั้งคือน้ำหนักของเส้นใย

5.4 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณเส้นใย (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของครุชชีเบลและกากหลังจากอบแห้งแล้ว(กรัม)

W_2 = น้ำหนักของครุชชีเบลและเถ้าหลังจากเผาแล้วลบด้วยน้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)

6. การวิเคราะห์ปริมาณแอมป์โดยวิธีโพลาไรเมตริกของอีอีซี (Polarimeter method : The European Economic Community)

6.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องโพลาไรมิเตอร์ (SCHMIDT + HAENSCH Polartronic MH8)
- 2) เตาไฟฟ้า
- 3) เครื่องแก้วในการวิเคราะห์

6.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตามวิธีการของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (52-2516) เตรียมตัวอย่างโดยร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 200 เมช ถ้าผ่านไม่ได้ต้องนำมาบดก่อนจะนำไปวิเคราะห์

6.3 วิธีวิเคราะห์

ก. การวิเคราะห์หาโททัลโรตาทอรีเพาเวอร์ (total rotatory power, P)

- 1) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 5.000 กรัม ใส่ใน volumetric flask ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยผ่านทางกรวยแก้วซึ่งวางบนปากขวด
- 2) เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.3094 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตรแล้วเขย่าตัวอย่างกับสารละลายกรดจนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.3094 นอร์มัล อีก 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าในน้ำเดือดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที แล้วให้ความร้อนต่อไปจนครบ 15 นาที
- 4) นำ volumetric flask ออกจากอ่างน้ำเดือด แล้วเติมน้ำเย็น 60 มิลลิลิตร นำไปแช่ในน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้เหลือ 20 องศาเซลเซียส
- 5) เติมสารละลายซิงค์ซัลเฟต ร้อยละ 40 ปริมาตร 10 มิลลิลิตรและสารละลายโปตัสเซียมเพอร์โรซายาไนต์ ร้อยละ 10 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร พร้อมกับเขย่าแรงๆ
- 6) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 200 มิลลิลิตร แล้วเขย่าสารละลายให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

7) กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ที่กรองได้ 25 มิลลิลิตรแรก นำสารละลายที่กรองได้เทผ่านหลอดแก้วยาว 10 เซนติเมตร ของเครื่องโพลาริมิเตอร์

8) อ่านค่าของ total rotatory power (P) เป็น angular degree ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ข. การวิเคราะห์หาโรทาทอรีเพาเวอร์ ของสารละลายในน้ำ หลังจากทำปฏิกิริยากับ กรดไฮโดรคลอริก (rotatory power, P')

1) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 12.500 กรัม ใส่ใน volumetric flask ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยผ่านทางกรวยแก้วซึ่งวางบนปากขวด

2) เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง โดยเขย่าเป็นระยะประมาณ 6 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 250 มิลลิลิตร แล้วเขย่าซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

3) ตั้งทิ้งไว้ให้แบ่งตกตะกอน แล้วกรองให้ได้สารละลายใส ด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 (ทดสอบสารละลายที่กรองได้ว่าไม่มีแป้งปนออกมา โดยแบ่งสารละลายมา 2 มิลลิลิตร หยดสารละลายไอโอดีนเจือจาง 1 หยด สารละลายนั้นจะต้องไม่มีสีน้ำเงินเกิดขึ้น)

4) ใช้ปิเปตดูดสารละลาย 100 มิลลิลิตร (ซึ่งเท่ากับตัวอย่าง 5 กรัม) ใส่ใน volumetric flask ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 25 ของน้ำหนัก จำนวน 4.2 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจุ่มลงในอ่างน้ำเดือดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หา P เป็นเวลา 15 นาที

5) จากนั้นใช้วิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับการหา P แล้วคำนวณหาปริมาณแป้งเป็นร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง ตามสูตร

$$\text{ปริมาณแป้ง} = \frac{2000 \times (P - P') \times 100 \times 2}{(\alpha)_D^E \times (100 - M)}$$

เมื่อ P = Total rotatory power, angular degree

P' = Rotatory power of active water-soluble substance, angular degree

$(\alpha)_D^E$ = ค่าเฉพาะของแป้ง สำหรับแป้งมันสำปะหลังมีค่า 184.00

M = ปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ

ภาคผนวก ข

Linear Viscoelastic Range

การวิเคราะห์ Linear Viscoelastic (LVE) Range

Linear Viscoelastic Range คือ ช่วงที่วัสดุแสดงลักษณะยืดหยุ่น (elasticity) นั่นคือวัสดุมีความสามารถในการคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมหลังจากที่มีการถอนแรงที่ให้แก่วสดุ ค่า G' และ G'' จะมีค่าคงที่ และลักษณะของกราฟในช่วงนี้จะเป็นเส้นตรง ตรวจสอบด้วยการทำ amplitude sweep ซึ่งเป็น oscillatory test แบบหนึ่ง โดยแปรผันความเครียด (shear strain) ขณะความถี่ (frequency) มีค่าคงที่

1. เครื่องมือ

1.1 เครื่อง Rheometer (Physica MCR Series 300)

1.2 หัวกดแบบ Parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

1.3 อ่างน้ำไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้

2. สารเคมี

2.1 สารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

2.2 สารละลายเกลียวโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

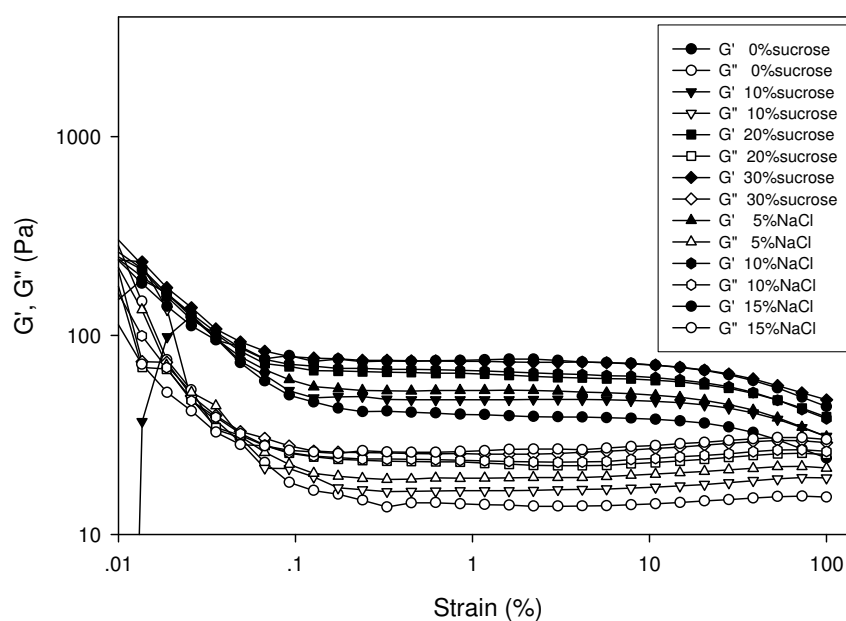
3. วิธีวิเคราะห์

3.1 เตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลียวโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ในพลาสติกปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2 ทำการ Pregelatinized โดยเขย่าอย่างต่อเนื่องในน้ำร้อนที่อุณหภูมิการเกิดเจลในในเซชันของแป้งซึ่งจะแตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลหรือเกลียว

3.3 นำตัวอย่างที่ผ่านการ Pregelatinized แล้วมาให้ความร้อนในอ่างน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบ

3.4 เทตตัวอย่างลงบนแท่นวางตัวอย่าง (rheometer platform) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้หัวกดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กำหนดขนาดช่องว่างสำหรับใส่ตัวอย่าง (Gap size) เท่ากับ 1000 μm กำหนดความถี่เท่ากับ 1 Hz และค่าความเครียดเท่ากับ 0.01-100% กราฟที่ได้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') เทียบกับ % Strain ดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 Linear Viscoelastic Range ของเจลแป้งมันสำปะหลังในสารละลายน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาวสุจิตรา วงษ์ประยูร
เกิดวันที่	22 สิงหาคม พ.ศ. 2523
สถานที่เกิด	อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครสวรรค์
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ชีววิทยา) สาขาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2545)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนมูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (พ.ศ. 2547) ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2548)