

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 แป้งมันสำปะหลังในสภาพธรรมชาติ (native starch) จากบริษัท สยามมอดิฟายด์-สตาร์ช จำกัด
- 1.2 แชนแทนกัม (Rhodigel® 80) จากบริษัท เบอร์ลี่ ยูคเกอร์ จำกัด (มหาชน)
- 1.3 โลกัสต์ปิ่นกัม (Grindsted® LBG 647) จากบริษัท เบอร์ลี่ ยูคเกอร์ จำกัด (มหาชน)
- 1.4 กัวร์กัม (Type 100 HV) จากบริษัท เบอร์ลี่ ยูคเกอร์ จำกัด (มหาชน)
- 1.5 คอนซัคกูโคแมนแนน จาก บริษัท คีทแฮล์ม จำกัด

2. เครื่องมืออุปกรณ์

- 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ
 - 2.1.1 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air Oven, Memmert รุ่น ULE 500, Germany)
 - 2.1.2 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis, Stable Micro System รุ่น TA-XT2, UK)
 - 2.1.3 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia)
 - 2.1.4 เครื่องวัดสี (Minolta Spectrophotometer รุ่น CM-3500d)
 - 2.1.5 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิต่ำได้ (Refrigerated centrifuge, Hitachi รุ่น Himec CR 20B2)
 - 2.1.6 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl apparatus, Buchi)
 - 2.1.7 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น Soxtec system HT)
 - 2.1.8 ตู้แช่เยือกแข็ง (Medical freezer, Sanyo รุ่น MDF-U536d)
 - 2.1.9 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิก (cryogenic freezer) (รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)

- 2.1.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Microscope, Leica รุ่น DME)
- 2.1.11 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Memmert, รุ่น WB22, Germany)
- 2.1.12 สเปกโตรโฟมิเตอร์ (Spectrophotometer, Labomed, รุ่น Spectronic 22)
- 2.1.13 เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High torque stirrer, Ingenieurburo CAT, M.Zip รุ่น R50D, Germany)
- 2.1.14 สายเทอร์มोकัปเปิล (thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger)
- 2.1.15 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, Gallenkamp รุ่น FSE-261-210D)
- 2.1.16 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Sartec รุ่น SPB31)
- 2.1.17 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

- 3.1.1 เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3.1.3 กรดแอซิดิก
- 3.1.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Sigma, USA)
- 3.1.5 ไอโอดีน
- 3.1.6 โพแตสเซียมไอโอไดด์

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

- 3.2.1 กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 95-97
- 3.2.2 คอปเปอร์ซัลเฟต
- 3.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3.2.4 กรดบอริก
- 3.2.5 โพแตสเซียมซัลเฟต
- 3.2.6 กรดไอโดรคลอริก
- 3.2.7 เมทิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน ได้แก่ ปีโตรเลียมอีเทอร์

3.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์สมบัติการพองตัว ได้แก่ บลูเดกซ์แทรน (blue dextran)

วิธีการ

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลัง

1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชมันสำปะหลัง (ภาคผนวก ก)

- 1.1.1 ความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)
- 1.1.3 ปริมาณโปรตีน คัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.4 ปริมาณไขมัน คัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AACC (2000)

1.2 การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชมันสำปะหลัง

1.2.1 ตรวจสอบรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลัง (คัดแปลงจากวิธีการของ Sathe and Salunkhe, 1981) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านที่ก้ำลำขยาย 400 เท่า

1.2.2 ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของเม็ดสตาร์ช (คัดแปลงจากวิธีการของ Tester and Morrison, 1990)

ชั่งสตาร์ชประมาณ 400 มิลลิกรัมลงในหลอดขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตรแล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีโดยนำหลอดตัวอย่างขึ้นมาเขย่าอย่างแรงด้วยเครื่อง vortex mixer ทุก ๆ 2 นาที จากนั้นนำหลอดมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็งจนอุณหภูมิลดถึง 20 องศาเซลเซียส แล้วเติมสารละลายบลูเดกซ์แทรน (blue dextran) ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรจำนวน 1 มิลลิลิตรลงไปผสมให้เข้ากัน นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000xg เป็นเวลา 15 นาที จาก

นั้นดูดส่วนใสด้านบนมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor, SF) ตามสูตร โดย A_s คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดที่มีตัวอย่างสตาร์ชและ A_r คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดที่ไม่มีการใส่ตัวอย่างสตาร์ช

$$SF = 1 + ((7,000/W) (A_s - A_r) / A_s))$$

2. การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

2.1 การเตรียมตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมไฮโดรคอลลอยด์

นำสารแขวนลอยสตาร์ชมันสำปะหลังผสมกับสารละลายไฮโดรคอลลอยด์ 4 ชนิด ได้แก่ กัวร์กัม กลูโคแมนแนน โลกัสต์ปีนิกัมและแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.10, 0.25 และ 0.50 โดยมีความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 นำไปให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียสในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้เป็นเวลา 30 นาทีโดยกวนตลอดการให้ความร้อนแล้วนำมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์ตามข้อ 2.2 เพื่อหาชนิดของไฮโดรคอลลอยด์และความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการนำไปผสมกับ สตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งจะนำไปศึกษาต่อในข้อ 3-4

2.2 สมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (ดัดแปลงจากวิธีการของ Schoch, 1968)

นำเจลสตาร์ชจากข้อ 2.1 ประมาณ 8 กรัมบรรจุลงในหลอดสำหรับหมุนเหวี่ยง จากนั้นนำหลอดทั้งหมดใส่ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 23 ชั่วโมง ทำการคืนรูปเจลด้วยการแช่หลอดทั้งหมดลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจึงแบ่งหลอดมาหมุนเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 x g เป็นเวลา 15 นาทีจำนวน 3 หลอด ทำการแยกส่วนใสตอนบนเจลออกและชั่งน้ำหนักเจลที่เหลือเพื่อหาน้ำหนักของส่วนใสที่ถูกแยกออกมาจากนั้นคำนวณร้อยละการแยกของน้ำตามสูตร ส่วนหลอดที่เหลือนำมาแช่เยือกแข็งต่อที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 23 ชั่วโมงอีกครั้ง ทำการคืนรูปเจลแล้วแบ่ง

หลอดมาหมุนเหวี่ยงแยกเพื่อหาร้อยละการแยกของน้ำจำนวน 3 หลอดเช่นเดิมโดยนับเป็นการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2 และทำซ้ำเช่นเดิมจนครบ 5 รอบ

$$\text{ค่าร้อยละการแยกของน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยงแยก}} \times 100$$

3. อิทธิพลของแซนแทนกัมต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

นำสารแขวนลอยสตาร์ชมันสำปะหลังไปผสมกับ สารละลายแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 โดยมีความเข้มข้นของระบบรวมเท่ากับร้อยละ 5 นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA) ตามวิธีการของ AACC (2000) (ภาคผนวก ก6) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุดขณะร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบคในรูปของผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough)

4. อิทธิพลของแซนแทนกัม อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิในการเก็บรักษา

4.1 การเตรียมตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัม

เตรียมสารละลายแซนแทนกัมโดยนำแซนแทนกัมปริมาณ 0.0 2.5 และ 5.0 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ผสมลงในน้ำกลั่นให้ได้น้ำหนักรวม 750 กรัม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ใช้ใบพัดแบบ large paddle) จากนั้นนำไปผสมกับสารแขวนลอยสตาร์ชมันสำปะหลังที่เตรียมโดยผสมสตาร์ชปริมาณ 50.0 47.5 และ 45.0 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงในน้ำกลั่นให้ได้น้ำหนักรวม 250 กรัม ซึ่งจะได้ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 โดยมีความเข้มข้นของแซนแทนกัมเท่ากับร้อยละ 0.00 0.25 และ 0.50 ตามลำดับ จากนั้นนำไปกวนต่อเพื่อผสมให้เข้ากันที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยกวนตลอดการให้ความร้อนแล้วนำมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที

เจลที่ได้เทลงในภาชนะบรรจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประมาณ 30 ± 0.10 กรัม ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปทดสอบต่อตามวิธีในข้อ 4.2-4.4

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของเจลก่อนการแช่เยือกแข็ง

4.2.1 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีการของ Hikone, 1998)

ตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้อ 4.1 โดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น TA-XT2, UK) ด้วยวิธีทดสอบแบบการใช้แรงกด (compression) โดยใช้หัววัดทรงกระบอก (cylinder probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร (P/36) กำหนดระยะทางที่กดเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วของหัววัดขณะกดเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และขณะยกขึ้นเท่ากับ 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ

4.2.2 สมบัติด้านสีของเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีการของ Hsu *et. al.*, 2003)

นำเจลสตาร์ชจากข้อ 4.1 บรรจุลง Petri dish ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร นำไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสี (Minolta Spectrophotometer รุ่น CM-3500d) และบันทึกค่าสีที่วัดได้ในระบบของ Hunter เป็นค่าความสว่างของสี (L^*) โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

4.3 การแช่เยือกแข็ง

นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 4.1 ไปแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าด้วยการแช่ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสที่อัตราเร็วประมาณ 0.06°C ต่อนาที อัตราแบบปานกลางและแบบเร็วด้วยเครื่องไครโอจินิกโดยกำหนดสภาวะในการแช่เยือกแข็งของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางเป็น การลดอุณหภูมิของเครื่องไครโอจินิกลงจากประมาณ 10 องศาเซลเซียสเป็น -40 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 3 นาทีซึ่งจะได้อัตราเร็วประมาณ 0.90°C ต่อนาที และแบบเร็วโดยลดอุณหภูมิของเครื่องไครโอจินิกลงจากประมาณ 10 องศาเซลเซียสเป็น -80 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 2 นาทีซึ่งจะได้อัตราเร็วประมาณ 2.30°C ต่อนาที โดยติดตามและวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วย

เทอร์มोकัปเปิล (thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger) ค่าที่ได้นำมาแสดงเป็นแผนภาพการแช่เยือกแข็งดังแสดงในภาพผนวก ข จากนั้นนำเจลที่ได้ไปเก็บรักษาตามวิธีในข้อ 4.4

4.4 การเก็บรักษาหลังการแช่เยือกแข็ง

นำตัวอย่างจากข้อ 4.3 ไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อตามวิธีในข้อ 5

5. การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังแช่เยือกแข็ง

5.1 การคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้อ 4.4 มาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งก่อนนำไปวิเคราะห์ตามข้อ 5.2 - 5.5 โดยการแช่ภาชนะบรรจุลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5.2 ค่าร้อยละการแยกของน้ำ (% syneresis) (ดัดแปลงจากวิธีของ Baker and Rayas-Duarte , 1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน มาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งตามวิธีในข้อ 5.1 จากนั้นนำเจลสตาร์ชประมาณ 30 กรัมบรรจุลงในหลอดสำหรับหมุนเหวี่ยง บันทึกน้ำหนักเจลสตาร์ชเริ่มต้น หมุนเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 x g เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใสตอนบนของเจลออก ชั่งน้ำหนักเจลที่เหลือเพื่อหาน้ำหนักของส่วนใสที่ถูกแยกออกมา จากนั้นคำนวณค่าร้อยละการแยกของน้ำตามสูตร และรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

$$\text{ค่าร้อยละการแยกของน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยงแยก}} \times 100$$

5.3 สมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process) (ดัดแปลงจากวิธีการของ Schoch, 1968)

นำเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0 วัน มาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งตามวิธีในข้อ 5.1 จากนั้นนำเจลสตาร์ชประมาณ 30 กรัม บรรจุลงในหลอดสำหรับหมუნเหวี่ยง บันทึกน้ำหนักของเจลสตาร์ชเริ่มต้นแล้วแบ่งหลอดจำนวน 3 หลอดไปหมუნเหวี่ยงในเครื่องหมუნเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 x g เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นแยก ส่วนใสตอนบนของเจลออก และชั่งน้ำหนักของเจลที่เหลือเพื่อหาน้ำหนักของส่วนใสที่ถูกแยกออกไป ค่าที่ได้นำไปคำนวณร้อยละการแยกของน้ำตามสูตร ส่วนภาชนะบรรจุที่เหลือให้นำไปแช่เยือก-แข็งต่อที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 23 ชั่วโมงอีกครั้ง (อัตราเร็วเท่ากับ 0.05 °ซ ต่อวินาที) จากนั้นทำการคืนรูปเจลด้วยวิธีเดิมแล้วแบ่งหลอดมาหมუნเหวี่ยงแยกเพื่อหา ร้อยละการแยกของน้ำ จำนวน 3 หลอดเช่นเดิมโดยนับเป็นการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2 และทำซ้ำเช่นเดิมจนครบ 7 รอบ โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

$$\text{ค่าร้อยละการแยกของน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยงแยก}} \times 100$$

5.4 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีการของ Hikone, 1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน มาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งตามวิธีในข้อ 5.1 แล้วนำไปตรวจเนื้อสัมผัสโดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น TA-XT2, UK) ด้วยวิธีทดสอบแบบการใช้แรงกด (compression) โดยใช้หัววัดทรงกระบอก (cylinder probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร (P/36) กำหนดระยะทางที่กดเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วของหัววัดขณะกดเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และขณะยกขึ้นเท่ากับ 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ

5.5 สมบัติด้านสีของเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีการของ Hsu *et. al.*, 2003)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 7, 31 และ 91 วัน มาทำการคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็งตามวิธีในข้อ 5.1 จากนั้นนำตัวอย่างประมาณ 30 กรัมบรรจุลงใน Petri dish ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร แล้วนำไปตรวจค่าความสว่างของสี (L^*) ในระบบของ Hunter ด้วยเครื่องวัดสี (Minolta Spectrophotometer รุ่น CM-3500d) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่างหลังการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาโดยเทียบกับตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง ($L^*-L_0^*$) โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

6. การศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็ง

6.1 การคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็ง

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้อ 4.4 ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 91 วัน มาทำการคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไมโครเวฟโดยใช้ความร้อนสูงสุดจนผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างหลอมละลาย (2 นาที 15 วินาที) แล้วนำมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ตามวิธีในข้อ 6.2

6.2 สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีการของ Hikone, 1998)

ตรวจเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งหลังการคั้นรูปตามวิธีในข้อ 6.1 โดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น TA-XT2, UK) ด้วยวิธีทดสอบแบบการใส่แรงกด (compression) โดยใช้หัววัดทรงกระบอก (cylinder probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร (P/36) กำหนดระยะทางที่กดเท่ากับ 9 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วของหัววัดขณะกดเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และขณะยกขึ้นเท่ากับ 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลองเปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ของเจลสตาร์ชที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม SPSS (version 10.0) ถ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

8. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2547 ถึง เดือนธันวาคม 2548

ผลและการวิจารณ์

1. องค์ประกอบและสมบัติของสสารไขมันสำปะหลัง

1.1 องค์ประกอบของสสารไขมันสำปะหลัง

องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเห็นได้ว่า แป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบอื่น ๆ นอกเหนือจากสสารไขมัน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเถ้าหลงเหลืออยู่คิดเป็นปริมาณรวมกันทั้งหมดน้อยกว่าร้อยละ 1 ดังนั้นจึงจัดแป้งมันสำปะหลังที่ใช้นี้เป็นแป้งประเภทสสาร (กล้าณรงค์, 2543; สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2531) และจะเรียกแป้งมันสำปะหลังนี้ว่าสสารไขมันสำปะหลังตลอดงานวิจัย ซึ่งสำหรับปริมาณองค์ประกอบของสสารไขมันสำปะหลังนั้น Sriroth *et. al.* (1999) พบว่าสสารไขมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ได้แก่ ระยอง1 ระยอง60 ระยอง90 และเกษตรศาสตร์ 50 มีโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15-0.30 ไขมันประมาณร้อยละ 0.01 เถ้าร้อยละ 0.08-0.15 และฟอสฟอรัสร้อยละ 2.04-2.45 ส่วนการทดลองของ Freitas *et. al.* (2004) พบว่ามีโปรตีนอยู่ร้อยละ 0.1 เถ้าร้อยละ 0.08 และไขมันร้อยละ 1.2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ามีค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน โดยปริมาณที่แตกต่างกันอาจเกิดจากพันธุ์ อายุ ฤดูกาลการเก็บเกี่ยว และวิธีที่ใช้ในการสกัด (Moorthy, 2002)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของสสารไขมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณเป็นร้อยละ
ความชื้น	12.34 ± 0.16
แอมิโลส	22.16 ± 0.27
โปรตีน	0.02 ± 0.00
ไขมัน	0.06 ± 0.00
เถ้า	0.11 ± 0.06

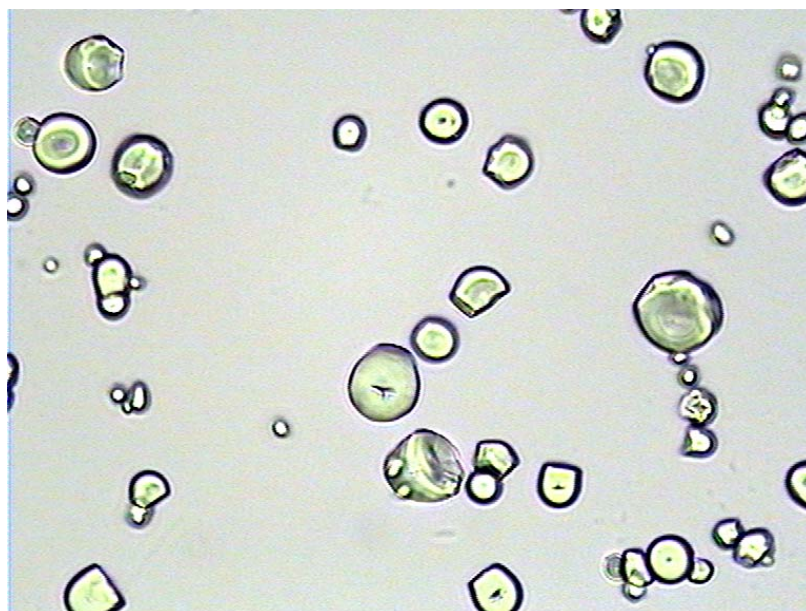
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้าคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้ง

ค่าปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ใช้งานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.16 ซึ่งจัดเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสค่อนข้างต่ำ (Defloor *et. al.* 1998) โดยจากการทดลองของ Sriroth *et. al.* (1999) พบว่าค่าปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ซึ่งผลิตได้ภายในประเทศไทยที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 6 จนถึง 16 เดือนมีค่าประมาณร้อยละ 19.5-24.1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากเป็นพันธุ์มันสำปะหลังที่ปลูกได้ภายในประเทศไทยเหมือนกันรวมทั้งมีสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกใกล้เคียงกันด้วย

1.2 ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชมันสำปะหลัง

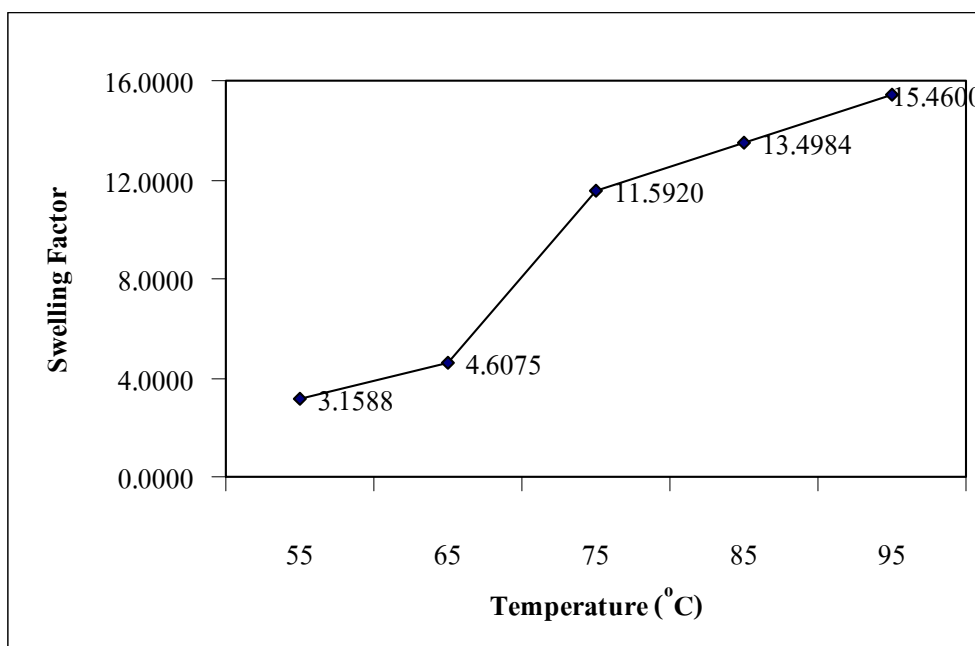
ภาพที่ 13 แสดงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งพบว่า เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่โดยทางด้านตอนปลายมีลักษณะเป็นปลายตัดคล้ายปากแตร (truncated end) โดยจากการสุ่มวัดขนาดของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 100 เม็ด พบว่า ค่าเฉลี่ยขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าประมาณ 17.05 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการศึกษาของ Defloor *et. al.* (1998) Sriroth *et. al.* (1999) และ Gunaratne and Hoover (2002) ที่พบว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดอยู่ในช่วง 3-32, 5-45 และ 8-22 ไมโครเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 13 รูปร่างและลักษณะของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังที่กำลังขยาย 400 เท่า

1.3 สมบัติการพองตัวของสสารไขมันสำปะหลัง

ค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor, SP) ของสสารไขมันสำปะหลังดังแสดงในภาพที่ 14 โดยที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวมีค่า 3.16 และ 4.07 ตามลำดับซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 75 องศาเซลเซียส ค่าก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 11.59 ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของสสารไขมันสำปะหลังซึ่งโดยปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส (Moorthy, 1985) ดังนั้นเมื่อสสารจึงพองตัวเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 85 และ 95 องศาเซลเซียส (13.50 และ 15.46 ตามลำดับ)



ภาพที่ 14 ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสสารไขมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการทดลองของ Gunaratne and Hoover (2002) พบว่า ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสสารไขมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 0.00, 4.6, 31.0, 43.0 และ 36.5 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่าซึ่งน่าจะเกิดจากพันธะของไขมันสำปะหลังที่แตกต่างกันทำให้องค์ประกอบและโครงสร้างโมเลกุลของสสารมีความแตกต่างกันเช่น สสารไขมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองของ Gunaratne and Hoover (2002) มีค่าปริมาณแอมิโลสซึ่งมีผล

ต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ชอยู่ประมาณร้อยละ 19.8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสอยู่มากกว่าจึงมีค่าแฟกเตอร์การพองตัวต่ำกว่าด้วยเนื่องจาก สตาร์ชที่มีแอมิโลสสูงจะมีการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีแอมิโลสต่ำ (กล้านรงค์, 2543) นอกจากนี้ก็อาจเกิดจากสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน

2. การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองเบื้องต้นโดยศึกษาไฮโดรคอลลอยด์ทั้งหมด 4 ชนิดได้แก่ กัวร์กัม คอนยัคกลูโคแมนแนน โลกัสต์บินกัม และแซนแทนกัมเพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยเลือกศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์เท่ากับร้อยละ 0.25 และ 0.50 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งเป็นความเข้มข้นในระดับที่ใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหาร (Monsanto, 2000) และเลือกใช้ที่ระดับความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งเป็นระดับที่ความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่จุดวิกฤต (critical concentration) ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 1.4 (Leach *et al.*, 1959) ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างภายหลังการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแบบเป็นเจล ดังนั้นจึงจะใช้คำว่าเจลสตาร์ชมันสำปะหลังตลอดการทดลองนี้ ซึ่งการเลือกใช้ที่ระดับความเข้มข้นรวมมากกว่าร้อยละ 5 นี้เนื่องจากการทำการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นสูงมากกว่าร้อยละ 5 เจลที่ได้จะมีความหนืดและมีเนื้อสัมผัสไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มักใช้สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบ โดยผลการทดลองหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

การทดลองหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชในการทดลองนี้ทำโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี freeze-thaw cycle process (FTC process) จากนั้นหาค่าร้อยละการแยกของน้ำด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifugation method) โดยค่าร้อยละการแยกของน้ำของตัวอย่างที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ในรอบที่ 1 ของการแช่เยือกแข็งและการทำละลายตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.25 เจลสตาร์ชที่เติมโลกัสต์บินกัม และแซนแทนกัมจะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำต่ำที่สุดโดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าร้อยละการแยกของน้ำจะ

สูงที่สุดสำหรับตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมกัวร์กัม รองลงมาคือเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ และที่เติมคอนยัคกลูโคแมนแมนตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งในรอบการแช่เยือกแข็งและ ทำละลายที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ 0.25

รอบ ที่	เจลสตาร์ช มันสำปะหลัง	เจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสม			
		กัวร์กัม	กลูโคแมนแมน	โลกัสต์บินกัม	แซนแทนกัม
1	11.36 ±3.00 cA	14.29±0.87 dA	4.89±0.69 bA	1.11±0.14 aA	0.22±0.01 aA
2	40.79±0.87 cB	49.07±2.03 dB	31.04±2.22 bB	31.48±3.33 bB	1.85±0.87 aA
3	45.89±4.43 bcB	53.72±2.57 dC	48.49±0.06 cC	41.88±1.59 bC	26.72±0.54 aB
4	51.44 ±1.94 aC	57.74±1.57 bD	57.92 ±1.85 bD	52.50±0.38 aD	52.13±5.86 aC
5	52.78±2.65 aC	59.76±0.50 cD	59.76±0.50 cD	56.97±0.54 bE	59.96±0.41 cD

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)

จากการศึกษาวิจัยโดยผู้วิจัยหลายท่านพบว่า กลไกการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในระบบที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์น่าจะเกิดจาก โมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์เข้าไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งกลไกการขัดขวางที่ได้มีผู้เคยสันนิษฐานไว้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ อาจเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์ (Christianson *et. al.*, 1981; Shi and BeMiller, 2002) หรือเกิดเนื่องจากการที่โมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชโดยไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันทำให้โอกาสที่โมเลกุลของสตาร์ชจะมาจับกันมีลดน้อยลง (Chaisawang and Supphantharika, 2005; Mandala *at. al.*, 2002)

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นก็จะเห็นได้ว่า การเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 แชนแทนกัมและโลกัสต์ปิ่นกัมสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้อย่างมีนัยสำคัญ รองลงมาคือ คอนยัคกลูโคแมนแนน ส่วนกัวร์กัมนั้นพบว่า ไม่สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้ ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากโมเลกุลของกัวร์กัมไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสตาร์ชได้ หรืออาจเกิดจากการที่โมเลกุลของกัวร์กัมเข้าไปมีผลต่อโครงสร้างของเจลผสมทำให้อาจเกิดโครงสร้างเป็นเจลผสมแบบที่ 1 ซึ่งกัวร์กัมจะไม่เกิดเป็นเจลขึ้นในโครงสร้างแต่จะแทรกติดอยู่กับโมเลกุลของสตาร์ช (Morris, 1986) และอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดเจลของโมเลกุลสตาร์ชซึ่งจะทำให้โครงสร้างเกิดการแยกแหว่งเฟสต่าง ๆ ภายในเจล (phase separate) จึงทำให้ไม่สามารถกักเก็บน้ำเอาไว้ในโครงสร้างได้ ซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการแยกของน้ำของตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมกัวร์กัมนั้นจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างเจลที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญ

ค่าร้อยละการแยกของน้ำจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกตัวอย่างเมื่อทำการแช่เยือกแข็ง และทำการละลายมากเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่เติมโลกัสต์ปิ่นกัม และแชนแทนกัมจะพบว่า เมื่อรอบการทำละลายเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่รอบที่ 2 เป็นต้นไป แชนแทนกัมจะให้ผลในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าโลกัสต์ปิ่นกัม อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในรอบที่ 5 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลายนั้น ค่าร้อยละการแยกของน้ำของตัวอย่างที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์จะมีค่าต่ำกว่าที่เติมอย่างมีนัยสำคัญซึ่งน่าจะเป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี FTC process และเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นมีความสัมพันธ์กับการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำของเจล (spongy gel) (Ferrero *et. al.*, 1994) ถ้าการเกิดรีโทรเกรเดชันมีมากการเกิดโครงสร้างเจลแบบฟองน้ำก็จะสูงด้วย ดังนั้นสำหรับเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งมีการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากกว่า เจลจะมีความแข็งและความยืดหยุ่นมากเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำไปตรวจสอบด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง เจลสตาร์ชก็จะต่อต้านการสูญเสียน้ำ และรูปร่างได้มากกว่า ค่าร้อยละการแยกของน้ำจึงมีค่าลดลงแทนที่จะเพิ่มสูงขึ้น (Yuan and Thompson, 1998) โดยสำหรับตัวอย่างที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์นั้น ไฮโดรคอลลอยด์จะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเกิด รีโทรเกรเดชันได้ (Ferrero *et. al.*, 1994) ค่าร้อยละการแยกของน้ำในรอบของการแช่เยือกแข็งและทำละลายที่ 4 และ 5 จึงมีค่ามากกว่าเจลที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งในรอบการแช่เยือกแข็งและ
ทำละลายที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ที่
ความเข้มข้นร้อยละ 0.50

รอบ ที่	เจลสตาร์ช มันสำปะหลัง	เจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสม			
		กั้วร็กัม	กลูโคแมนแนน	โลกัสต์ปิ่นกัม	แซนแทนกัม
1	11.36±3.00 cA	26.79±3.94 dA	24.42±1.07 dA	5.91±0.69 bA	0.05±0.02 aA
2	40.79±0.86 cB	40.04±3.35 cB	32.88±1.42 bB	29.74±1.78 bB	0.08 ±0.02 aA
3	45.89±4.43 bC	53.12±4.26 cC	51.74±2.88 cC	42.98±3.86 bC	9.98±1.52 aB
4	51.44±1.94 bC	55.40±2.98 bCC	56.36±1.02 cD	58.17±2.94 cD	20.62±2.55 aC
5	52.78±2.65 bC	56.11±1.86 bCC	62.38±0.95 dE	60.91±5.02 cD	32.60±1.84 aD

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)

ตารางที่ 3 แสดงค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชเมื่อเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.50 ผลที่ได้คือ เจลสตาร์ชที่มีการเติมแซนแทนกัมจะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือโลกัสต์ปิ่นกัม และเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ ส่วนกลูโคแมนแนนและกั้วร็กัมนั้นพบว่า ค่าร้อยละการแยกของน้ำจะมีค่าสูงที่สุดโดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสำหรับกั้วร็กัมนั้นน่าจะมีสาเหตุเช่นเดียวกับการเติมที่ระดับร้อยละ 0.25 ส่วนเจลสตาร์ชที่เติมคอนยัคกลูโคแมนแนน และโลกัสต์ปิ่นกัมซึ่งมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.50 นั้นสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากระดับความเข้มข้นที่สูงมากเกินไปจึงส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาหรือการเกิดการซ้อนทับกันระหว่างโมเลกุลสตาร์ชกับโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์มีสูงมากเกินไปซึ่งจะส่งผลให้การจับกับโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างลดลง ค่าร้อยละการแยกของน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้น (Lee *et. al.*, 2002) ส่วนแซนแทนกัมนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 นี้จะลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25 โดยเมื่อเปรียบ-

เทียบกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ๆ จะพบว่า แชนแทนกัมสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้มากกว่าไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ๆ ที่ทั้งสองระดับความเข้มข้น

ตารางที่ 4 ค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งในรอบการแช่เยือกแข็งและทำละลายที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแชนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25 และ 0.50

รอบที่	ความเข้มข้นของแชนแทนกัม (ร้อยละ)		
	0.10	0.25	0.50
1	0.0547 ± 0.32 aA	0.2218 ± 0.02 aA	0.0467 ± 0.01 aA
2	27.145 ± 0.54 cB	1.8513 ± 0.02 bA	0.0754 ± 0.87 aA
3	60.7500 ± 2.43 cC	26.7181 ± 1.52 bB	9.9822 ± 0.54 aB
4	57.4763 ± 0.48 bC	52.1341 ± 2.55 bC	20.6162 ± 5.86 aC
5	61.2558 ± 0.82 bC	59.9616 ± 1.84 bD	32.5954 ± 0.41 aD

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นจึงได้เลือกใช้แชนแทนกัมในงานวิจัยนี้ โดยได้ทำการทดลองเพิ่มเติมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.10 เพื่อทดสอบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการเติมที่ระดับร้อยละ 0.25 หรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากแชนแทนกัมมีราคาก่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของสตาร์ชมันสำปะหลัง ดังนั้นถ้าสามารถลดระดับความเข้มข้นของแชนแทนกัมลงได้โดยให้ประสิทธิภาพในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ไม่แตกต่างกันก็จะเป็นการประหยัดต้นทุนได้มากกว่าด้วย ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าในรอบที่ 1 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลาย แม้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 จะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำไม่แตกต่างจากการเติมที่ร้อยละ 0.25 และ 0.50 อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ในรอบที่ 2 จนถึงรอบที่ 5 พบว่ามีค่าสูงกว่าค่อนข้างมาก ดังนั้น

จึงได้เลือกที่ความเข้มข้นที่ร้อยละ 0.25 และ 0.50 มาใช้ในวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งต่อไป

3. ผลของแซนแทนกัมต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (RVA) ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยรูปกราฟการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพผนวกที่ 11 สตาร์ชมันสำปะหลังในระบบที่มีการเติมแซนแทนกัมมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ไม่แตกต่างจากตัวอย่างสตาร์ชที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ส่วนค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดในระหว่างการให้ความร้อน และความหนืดสุดท้ายพบว่า มีค่าสูงกว่าสารแขวนลอยสตาร์ชในน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 5 ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย เซตแบค และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัม (XG) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50

XG (%)	อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (°ซ)	ความหนืด (RVU)				เซตแบค
		ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	
0.00	50.6 a	775.0 a	444.5 a	330.5 b	667.5 a	233.0 c
0.25	50.2 a	1020.5 b	822.5 b	198.0 a	977.5 b	155.0 b
0.50	51.0 a	1282.5 c	1066.5 c	216.0 a	1163.5 c	97.0 a

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

สำหรับสาเหตุที่ค่าความหนืดของระบบที่มีการเติมแซนแทนกัมมีค่าสูงมากกว่าน่าจะเกิดเนื่องจาก เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยสตาร์ช ระบบจะเกิดโครงสร้างแบบเจลซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญคือ ส่วนของเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลเอมิโลสที่ถูกชะออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อนและเกิดเป็นเจลกระจายอยู่ในระบบ กับส่วนของเฟสกระจายตัว (disperse phase) ซึ่งเป็นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาตินในซ์แล้วกระจายอยู่ในส่วนของเจลเอมิโลส (Biliaderis, 1998; Morris, 1990) โดยในระบบที่มีการเติมแซนแทนกัม เจลจะประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ 2 ชนิดอยู่รวมกัน ซึ่งจากการศึกษาของ Gonera and Cornillon (2002) พบว่า โมเลกุลของแซนแทนกัมจะอยู่ในส่วนของเฟสต่อเนื่อง ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากโมเลกุลแซนแทนกัมมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชซึ่งเป็นส่วนของ เฟสกระจายตัวได้ ซึ่งจะส่งผลต่อระบบคือ ในระหว่างการให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชจะเริ่มเกิดการพองตัว โดยจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิที่ให้แก่ระบบ ซึ่งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในส่วนเฟสกระจายตัวที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ สัดส่วนของเฟสต่อเนื่องในระบบมีค่าลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบจะพบว่า ระบบที่มีการเติมแซนแทนกัมจะมีค่าความเข้มข้นรวมของโมเลกุลภายในส่วนของเฟสต่อเนื่องมากกว่าในระบบที่ไม่ได้เติม ซึ่งสนับสนุนโดย Alloncle *et. al.* (1989) ว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความหนืดโดยรวมของระบบที่มีการเติมแซนแทนกัมมีค่าสูงกว่าในระบบที่ไม่ได้เติม (Alloncle *et. al.*, 1989) โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้น ($0.50 > 0.25$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sudhakar *et. al.* (1995) อย่างไรก็ตามในเรื่องของค่าความหนืดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ก็มีผู้ที่สนับสนุนไว้แตกต่างกันออกไปอีกได้แก่ Christianson *et. al.* (1981) ซึ่งสนับสนุนว่า น่าจะเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแซนแทนกัมและโมเลกุลของเอมิโลสในส่วนเฟสต่อเนื่องมากกว่า

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดลดลง (breakdown) ที่ได้จากผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดในระหว่างการให้ความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับความสะดวกง่ายในการแตกหักของเม็ดสตาร์ช (Christianson *et. al.*, 1981) และมักใช้เป็นค่าที่บ่งบอกความยากง่ายในการหุงต้ม (Rojas *et. al.*, 1999) พบว่า เจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 มีค่าต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมแซนแทนกัมจะช่วยทำให้เม็ดสตาร์ชแตกหักได้ยากขึ้น และมีความคงทนต่อการหุงต้มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rojas *et. al.* (1999) ที่พบว่า ค่าความหนืดลดลงของสตาร์ชข้าวสาลีเมื่อเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 มีค่ามากกว่าสตาร์ชข้าวสาลีที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าเซตแบคที่ได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from

trough) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชนั้น (Christainson *et. al.*, 1981) พบว่า เจลสตาร์ชที่มีการเติมแซนแทนกัมจะมีค่าเซตแบคต่ำกว่าที่ไม่ได้เติม ($0.50 > 0.25$) เนื่องจากโมเลกุลแซนแทนกัมจะไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของเอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน โดยกลไกในการขัดขวางอาจเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและแซนแทนกัม (Christianson *et. al.*, 1981; Shi and BeMiller, 2002) หรือเกิดเนื่องจากการที่โมเลกุลของแซนแทนกัมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชโดยไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันทำให้โอกาสที่โมเลกุลของสตาร์ชจะมาจับกันมีลดน้อยลง (Chaisawang and Supphantharika, 2005; Mandala *et. al.*, 2002)

4. ผลของแซนแทนกัม อัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

อัตราการแช่เยือกแข็งเป็น ปัจจัยหนึ่งที่มีสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ (Ferrero *et. al.*, 1994; Jacobson and BeMiller, 1998; Navarro *et. al.*, 1995; Varavinit *et. al.*, 2000) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน 3 ระดับ เพื่อเปรียบเทียบการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชได้แก่ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.06 องศาเซลเซียสต่อนาที) แบบปานกลาง (0.90 องศาเซลเซียสต่อนาที) และแบบเร็ว (2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดขึ้นเองเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้านั้น อุณหภูมิจะต้องลดลงประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่วนอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้น อุณหภูมิจะต้องลดลงประมาณ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที (สายสนม, 2543) ซึ่งตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ใช้ในการทดลองนี้บรรจุอยู่ในภาชนะค่อนข้างใหญ่และมีปริมาณค่อนข้างมาก (ประมาณ 30 กรัม) เนื่องจากต้องการให้ใกล้เคียงกับสถานะที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมดังนั้นจึงไม่สามารถลดอุณหภูมิของตัวอย่างให้เร็วกว่านี้ได้

4.1 ผลของแซนแทนกัมและอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าร้อยละการแยกของน้ำ

ค่าร้อยละการแยกของน้ำ (% syneresis) เป็นค่าที่ใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช (Soest *et. al.*, 1994) ซึ่งถ้ามีค่ามากแสดงว่าเจลสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันหรือเกิดการ

กลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ชสูง (Baker and Duarte, 1998; Lee *et. al.*, 2002; Varavinit *et. al.*, 2000; Yuan and Thompson, 1998)

ตารางที่ 6 แสดงค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคืนรูปจากการเยือกแข็งของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียส โดยภายหลังการแช่เยือกแข็งที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากับ 0 วันพบว่า เจลสตาร์ชที่เติมแซนแทนกัม และแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชผสมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50 จะมีค่าต่ำกว่าที่ร้อยละ 0.25 (0.00 และ 6.09 ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mali *et. al.* (2003) ที่พบว่าการเติมแซนแทนกัมจะช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันเทศโดยการเกิดการแยกของน้ำออกจากเจลจะลดลงเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแซนแทนกัมจากร้อยละ 0.30 เป็น 0.50 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Lee *et. al.* (2002) พบว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยนี้คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแซนแทนกัมจาก 0.30 เป็น 0.60 พบว่า เจลสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากระดับความเข้มข้นที่สูงมากเกินไปส่งผลให้เกิดอันตรกิริยา หรือการเกิดการซ้อนทับของโมเลกุลของสตาร์ช และแซนแทนกัมมีมากเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้การจับกับโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างลดลง การเกิดการแยกของน้ำจึงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผลที่ไม่สอดคล้องกันจึงน่าจะเกิดจากความเข้มข้นของแซนแทนกัม และความเข้มข้นรวมของระบบที่แตกต่างกันรวมทั้งชนิดของสตาร์ชที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกันด้วย

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า แซนแทนกัมที่ทั้งสองระดับความเข้มข้น (0.25 และ 0.50) สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เป็นผลเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาและการซ้อนทับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชทั้งแอมิโลส และแอมิโลเพกทินในระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าได้ โดยการใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 ร่วมกับอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่ 0.06 องศาเซลเซียสต่ออนาทีสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการแช่เยือกแข็งได้มากที่สุด โดยเห็นได้จากเจลสตาร์ชไม่เกิดการแยกของน้ำคือ มีค่าร้อยละการแยกของน้ำเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 6 ค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกันความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน

แซนแทนกัน (ร้อยละ)	อัตราการ แช่เยือกแข็ง	ร้อยละการแยกของน้ำ					
		0 วัน	3 วัน	10 วัน	17 วัน	31 วัน	91 วัน
0.00	ช้า	31.24 ± 1.55 ac	30.72 ± 3.05 ac	32.79 ± 1.64 abc	35.36 ± 0.80 bcc	37.47 ± 2.84 cd	37.51 ± 1.12 cd
0.25		6.09 ± 0.75 ab	7.56 ± 1.64 ab	13.34 ± 0.01 bb	15.07 ± 1.71 bb	18.70 ± 11.16 cc	18.55 ± 1.57 cc
0.50		0.00 ± 0.00 aA	0.00 ± 0.00 aA	0.00 ± 0.00 aA	1.40 ± 1.31 bA	1.57 ± 0.85 bB	1.64 ± 0.91 bB
0.00	ปานกลาง	0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A
0.25		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A
0.50		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A
0.00	เร็ว	0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A
0.25		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A
0.50		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

การเกิดริโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งเป็นผลเนื่องจากการเกิดริโทรเกรเดชันของโมเลกุลเอมิโลเพกทิน (Miles *et. al.*, 1985; Morris, 1990; Biliaderis, 1992) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของแซนแทนกัมต่อการลดการเกิดริโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 3, 10, 17, 31 และ 91 วันพบว่าใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 จะเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.50 จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ร้อยละ 0.00 และ 0.25 ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) โดยจะเริ่มเกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 17 วัน และมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญแม้เก็บรักษาจนถึงระยะเวลา 91 วัน ($p > 0.05$) ส่วนการเติมที่ร้อยละ 0.25 พบว่า มีค่าร้อยละการแยกของน้ำสูงกว่าการเติมที่ร้อยละ 0.50 แต่ต่ำกว่าการเติมที่ร้อยละ 0.00 ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แซนแทนกัมสามารถลดการเกิดริโทรเกรเดชันของเอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าได้เนื่องจากมีค่าร้อยละการแยกของน้ำของตัวอย่างเจลสตาร์ชจะมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาแต่ก็จะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัม ($p \leq 0.05$) โดยการเติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 จะลดการเกิดริโทรเกรเดชันของเอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25

จากตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าร้อยละการแยกของน้ำ พบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วสามารถลดการเกิดการแยกของน้ำที่เกิดจากการเกิดริโทรเกรเดชันได้มากกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ($p \leq 0.05$) โดยแบบปานกลางและแบบเร็วนั้นค่าร้อยละการแยกของน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญคือ มีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดการทดลองที่ระยะเวลาการเก็บรักษาตั้งแต่ 0 จนถึง 91 วัน และเมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมแซนแทนกัมก็จะพบว่า เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว ตัวอย่างทั้งที่เติมและไม่ได้เติมแซนแทนกัมจะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเท่ากับศูนย์ตลอดการทดลอง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วมีผลต่อการลดการเกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างของเจลได้มากกว่าการเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วสามารถลดการเกิดริโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้อย่างมีนัยสำคัญทั้งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษา ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบช้า นั้น พบว่า แม้การเติมแซนแทนกัมจะสามารถลดการเกิดริโทร-

เกรเดชันที่ทำให้เกิดการแยกของน้ำได้ทั้งในช่วงระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาแต่ก็น้อยกว่าเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็ว

อย่างไรก็ตาม วิธีการหาค่าร้อยละการแยกของน้ำนี้จะสามารถบอกความแตกต่างได้ดีเมื่อตัวอย่างมีการเกิดรีโทรเกรเดชันในระดับที่มากเพียงพอที่จะทำให้การแยกของน้ำออกจากโครงสร้างของเจลเท่านั้น ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สามารถบอกผลของการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางกับแบบเร็วได้ รวมทั้งไม่สามารถบอกผลของการเติมแซนแทนแทนที่ต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วด้วย โดยผลของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วที่สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้มากกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และการเติมแซนแทนแทนที่นั้นน่าจะเกิดเนื่องจาก ผลของการลดอุณหภูมิผ่านช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการตกผลึกของสายโพลีเมอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นการก่อนิวเคลียสผลึก (nucleation) และขั้นการเพิ่มขนาดผลึก (propagation) โดยทั้งสองขั้นนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 60 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลเพกทิน และ -5 ถึง 150 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลส (Biliaderis, 1998; Eerlingen *et al.*, 1993; Jacobson and BeMiller, 1998; Siliverio *et al.*, 2000; Wunderlich, 1976)

ภาพผนวกที่ ค1 ค3 และ ค4 แสดงแผนภาพการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชทั้งที่เติมและไม่เติมแซนแทนแทนที่เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจากประมาณ 25 จนถึง -5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชจะพบว่า ที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วมีค่าประมาณ 390, 51.6 และ 25.8 นาทีตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว นั้น อุณหภูมิของตัวอย่างเจลสตาร์ชจะลดลงผ่านช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้เร็วกว่าที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วนี้จะส่งผลให้ไม่เกิดนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ชที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจับกันระหว่างสายของโมเลกุลแล้วเกิดเป็นเกลียวคู่ ดังนั้นจึงไม่เกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Ferrero *et al.*, 1994) ทั้งตัวอย่างที่เติมและไม่ได้เติมแซนแทนแทนที่เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังอาจเกิดเนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วทั้ง 2 ระดับนี้จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดเล็กซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วจะไปช่วยเร่ง

และสนับสนุนขึ้นการก่อนิวเคลียสผลึกของผลึกน้ำแข็งให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีเป็นจำนวนมาก (MacDonald and Lanier, 1997) ผลึกน้ำแข็งที่ได้จึงมีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากแทนที่จะเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จำนวนน้อย ซึ่งจากการศึกษาโดย Lee *et. al.* (2002) พบว่า ขนาดของผลึกน้ำแข็งมีความสัมพันธ์กับการเกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างคือ ถ้าผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่การเกิดการแยกของน้ำก็จะมีค่ามากด้วย ดังนั้นการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วทั้งสองระดับระดับนี้จึงมีค่าร้อยละการแยกของน้ำต่ำกว่าเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

4.2 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าร้อยละการแยกของน้ำ

งานวิจัยนี้เลือกใช้อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ -12 และ -18 องศาเซลเซียสในการเก็บรักษาเจลสตาร์ชทั้งที่เดิมและไม่เติมแซนแทนกัมเนื่องจากที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่ออายุการเก็บรักษาและค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสีย (Blond and Meste, 2004) ส่วนอุณหภูมิที่ -12 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิสูงที่สุดตามข้อกำหนดของกลุ่มสหภาพยุโรป (The European Community) ที่อนุญาตให้ใช้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในระหว่างรอการจำหน่าย (Persson and Londahl, 1993)

ค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์ชที่เดิมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียสดังแสดงในตารางที่ 7 ค่าที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ -12 และ -18 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากับ 0, 3, 10, 17 และ 31 วันมีค่าร้อยละการแยกของน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยค่าร้อยละการแยกของน้ำซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อเก็บรักษาทั้งสองอุณหภูมินี้จะเกิดจากการที่อุณหภูมิทั้งสองเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชในระบบแช่เยือกแข็ง (T_g) ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ -5 องศาเซลเซียส (Ferrero *et al.*, 1994) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิทั้งสองจึงมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

ตารางที่ 7 ค่าร้อยละการแยกของน้ำของเจลสตาร์จมันลำปะหลังผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -12 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ร้อยละการแยกของน้ำ					
		0 วัน	3 วัน	10 วัน	17 วัน	31 วัน	91 วัน
0.00	ช้า	31.24 ± 1.55 ac	31.15 ± 2.21 ac	32.74 ± 0.09 abc	35.60 ± 1.23 bc	36.68 ± 4.15 bc	error
0.25		6.09 ± 0.75 ab	8.49 ± 1.18 ab	14.11 ± 1.51 bb	15.45 ± 2.58 bb	19.55 ± 0.73 cb	error
0.50		0.00 ± 0.00 aA	0.00 ± 0.00 aA	0.00 ± 0.00 aA	1.35 ± 1.29 bA	1.78 ± 0.08 bA	error
0.00	ปานกลาง	0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error
0.25		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error
0.50		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error
0.00	เร็ว	0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error
0.25		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error
0.50		0.00 ± 0.00 nsA	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	0.00 ± 0.00 A	error

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

- error หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากตู้แช่เยือกแข็งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ -12 องศาเซลเซียสได้

5. ผลของแซนแทนกัม อัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความคงตัวของเจล คินรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process)

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ (temperature fluctuations) ในระหว่างการเก็บรักษา และการขนส่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ช่วยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งซึ่งเกิดเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช และการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่ (Bevilacqua and Zaritzky, 1982) โดยการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่จะส่งผลให้เจลสตาร์ชเกิดการแยกของน้ำมากเพิ่มขึ้น (Lee *et. al.*, 2002) เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชอยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันจึงมีมากกว่าเมื่อผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก โดยจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะหาผลของการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันรวมทั้งผลของการเติมแซนแทนกัมที่มีต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ เนื่องจากเป็นสถานะที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงทั้งในระหว่างการเก็บรักษา และการขนส่งโดยได้เลือกใช้การทดลองหาค่าร้อยละการแยกของน้ำโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี freeze-thaw cycle process (FTC process) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ ทั้งนี้ก็เพื่อหาสถานะที่สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้มากที่สุด

ค่าร้อยละการแยกของน้ำที่ได้จากเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี FTC process แล้วหาการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงดังแสดงในตารางที่ 8 โดยค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคินรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชในรอบที่ 1 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลายพบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้ดีที่สุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งตัวอย่างที่เดิม และไม่เติมแซนแทนกัมคือมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเท่ากับศูนย์ ส่วนการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้านั้น พบว่า การเติมแซนแทนกัมมีผลต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้โดยการเติมที่ร้อยละ 0.50 จะลดได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25 อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ระดับร้อยละ 0.50 เจลเกิดการแยกของน้ำเล็กน้อยโดยมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเท่ากับ 0.58 ซึ่งผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 6 ที่ค่าร้อยละการแยกของน้ำเมื่อเติมที่ร้อยละ 0.50 มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งน่าจะเกิดจากอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่มีค่าแตกต่างกัน โดยอัตราที่ใช้กับตัวอย่างที่ทดสอบด้วยวิธี FTC process มีค่าเท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาทีซึ่งน้อยกว่าที่ใช้กับตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งมีค่าอัตราเร็วเท่ากับ 0.06 องศาเซลเซียสต่อนาทีจึงส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า

อุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์จะใช้เวลามากกว่า ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชันจึงมากกว่าด้วย

การทดลองในรอบที่ 2 ถึงรอบที่ 7 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลายเจลสตาร์จะทำได้โดยนำเจลสตาร์ในทุกสถานะที่แตกต่างกันกลับไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า ซึ่งค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งในรอบที่ 2 พบว่า ค่าร้อยละการแยกของน้ำจากเจลสตาร์ที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50 ด้วยอัตราเร็วการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 ระดับจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเติมที่ร้อยละ 0.00 และ 0.25 ที่อัตราการแช่เยือกแข็งทุกระดับอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยการเติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 ร่วมกับการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือแบบปานกลางและแบบช้าตามลำดับ ส่วนการเติมที่ร้อยละ 0.25 พบว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ต่ำกว่าเมื่อใช้อัตราแบบช้า ส่วนเจลสตาร์ที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งพบว่ามีค่าสูงที่สุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสถานะที่ดีที่สุดได้แก่ การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแบบเร็วซึ่งจะไม่เกิดการแยกของน้ำแม้ในรอบที่ 2 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลายซึ่งเป็นการนำเจลสตาร์มาผ่านการแช่เยือกแข็งอีกครั้งด้วยอัตราเร็วแบบช้า โดยการที่ตัวอย่างไม่เกิดการแยกของน้ำน่าจะเกิดจาก 2 ปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งปัจจัยแรกคือ ผลของแซนแทนกัมที่เติมลงไปในระบบ โดยสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากโมเลกุลของแซนแทนกัมจะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้าง และขัดขวางการจับกันระหว่างโมเลกุลสตาร์โดยไม่เกิดอันตร-กิริยากับโมเลกุลของสตาร์ดังจะกล่าวต่อไปในเรื่องเนื้อสัมผัสของเจล ส่วนปัจจัยที่สองคือผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง ซึ่งเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วก็จะทำให้โมเลกุลของสตาร์ในระบบไม่อยู่ในสถานะที่พร้อมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือเป็นสถานะที่ระบบไม่เกิดนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ซึ่งเป็นขั้นแรกที่จะทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ดังนั้นเมื่อนำไปผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าอีกครั้งเจลสตาร์จึงไม่เกิดการแยกของน้ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางพบว่า แม้ใช้แซนแทนกัมร้อยละ 0.50 เหมือนกันแต่ค่าร้อยละการแยกของน้ำของการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางก็มีค่าสูงกว่าแบบเร็ว ซึ่งสันนิษฐานว่าที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง โมเลกุลของสตาร์บางส่วนอาจอยู่ในลักษณะผลึกนิวเคลียสซึ่งพร้อมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ดังนั้นเมื่อนำไปผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าอีกจึงเกิดการแยกของน้ำอันเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้มากกว่าเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ตารางที่ 8 ค่าร้อยละการแยกของน้ำหลังการคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็งในรอบการแช่เยือกแข็งและทำละลายที่ 1-7 ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสม
แซนแทนกัม (XG) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็ว

XG (%)	อัตราการ แช่แข็ง	ร้อยละการแยกของน้ำ						
		รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	รอบที่ 6	รอบที่ 7
0.00	ช้า	35.21 ± 2.25 aC	59.16 ± 0.42 bEF	ND	ND	ND	ND	ND
0.25		5.70 ± 1.70 aB	53.06 ± 1.15 bE	60.78 ± 0.62 cC	61.71 ± 4.93 cB	ND	ND	ND
0.50		0.58 ± 0.50 aA	34.26 ± 4.18 bC	60.46 ± 0.14 cC	59.52 ± 5.36 cAB	67.70 ± dA	68.42 ± 2.07 dA	ND
0.00	ปานกลาง	0.00 ± 0.00 aA	54.15 ± 1.43 bEF	64.55 ± 2.64 cC	70.91 ± 1.73 dC	ND	ND	ND
0.25		0.00 ± 0.00 aA	42.14 ± 1.90 bD	62.10 ± 1.52 cC	69.71 ± 1.30 dC	73.81 ± 7.40 dB	ND	ND
0.50		0.00 ± 0.00 aA	20.14 ± 9.71 bB	47.76 ± 5.22 cA	55.61 ± 6.72 dAB	66.16 ± 1.36 eA	66.02 ± 3.48 eA	66.75 ± 0.64 eA
0.00	เร็ว	0.00 ± 0.00 aA	60.90 ± 0.52 bF	63.77 ± 2.89 bC	70.84 ± 1.47 cC	ND	ND	ND
0.25		0.00 ± 0.00 aA	44.15 ± 4.70 bD	63.59 ± 0.99 cC	68.87 ± 0.24 cC	66.51 ± 3.13 cA	ND	ND
0.50		0.00 ± 0.00 aA	0.00 ± 0.00 aA	49.87 ± 2.06 bA	53.66 ± 2.83 bA	67.71 ± 3.48 cA	66.16 ± 4.16 cA	66.86 ± 0.87 cA

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวดิ่ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ND หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากตัวอย่างคุดน้ำกลับ

- การแช่เยือกแข็งและทำละลายในรอบที่ 2-7 ของการทดลองจะทำการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

แนวโน้มน้ำที่ร้อยละการแยกของน้ำในรอบการแช่เยือกแข็งและทำละลายรอบที่ 3- 7 ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คือ การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและปานกลางมีค่าต่ำที่สุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ส่วนเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบแผ่นเรียงซ้อนทับกัน (sheet-like character) ทำให้ไม่สามารถวัดค่าร้อยละการแยกของน้ำได้ตั้งแต่รอบที่ 3 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลายเนื่องจากตัวอย่างเกิดการคุดน้ำกลับ (รายงานค่าในตารางเป็น ND) ส่วนตัวอย่างที่มีการเติมแซนแทนกัมที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในลักษณะนี้ช้ากว่า

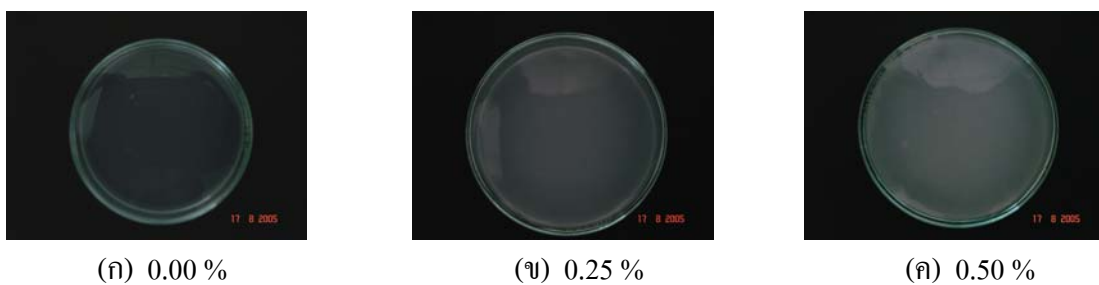
Jacobson and BeMiller (1998) และ Yaun and Thompson (1998) สันนิษฐานว่า การเกิดโครงสร้างในลักษณะนี้มีสาเหตุมาจากการเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ หรือการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลเอมิโลเพกทิน เนื่องจากเมื่อทำการแช่เยือกแข็งและทำละลายซ้ำไปมาหลาย ๆ รอบ ความเข้มข้นของโมเลกุลสตาร์ชในส่วนแช่เยือกแข็ง (freeze-concentration) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลของสตาร์ชจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันจึงมีมากกว่าแม้จะถูกขัดขวางจากโมเลกุลแซนแทนกัมที่แทรกอยู่ในระบบแต่ปริมาณของแซนแทนกัมก็อาจไม่มากเพียงพอที่จะลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยจากงานวิจัยนี้พบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถลดการเกิดโครงสร้างลักษณะนี้ได้มากกว่าที่สภาวะอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แซนแทนกัมสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลสและเอมิโลเพกทินได้แม้ค่าร้อยละการแยกของน้ำในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง และทำละลายจะยังคงเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเติมที่ร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้มากที่สุด เนื่องจากสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ทำให้เกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างได้ดีที่สุดในรอบที่ 1 และ 2 ของการแช่เยือกแข็งและทำละลาย (ค่าร้อยละการแยกของน้ำเป็นศูนย์) รวมทั้งสามารถลดการเกิด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลได้จนถึงการแช่เยือกแข็งและทำละลายในรอบที่ 7 หรืออาจสรุปได้ว่า การลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นสามารถทำได้โดยการเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 และ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว โดยสภาวะที่ดีที่สุดคือ การเติมที่ร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและปานกลางตามลำดับ รองลงมาคือ การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็ว

6. ผลของแซนแทนกัม อัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อผลต่างของค่าความสว่างของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

6.1 ผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อผลต่างของค่าความสว่าง

การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชภายหลังผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งรวมทั้งในระหว่างการเก็บรักษาจะส่งผลให้เจลสตาร์ชมีความข้นเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากในช่วงของการเกิดรีโทรเกรเดชันซึ่งเป็นกระบวนการตกผลึกของสายโพลิเมอร์สตาร์ช (Biliaderis, 1998; Eerlingen *et al.*, 1993; Jacobson and BeMiller, 1998; Siliverio *et al.*, 2000; Wunderlich, 1976) โมเลกุลของสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันและจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของการกระจายตัวของโมเลกุลสตาร์ชภายในระบบ ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชคือ จะทำให้เจลสตาร์ชจะมีความข้นเพิ่มสูงขึ้น (Miles *et al.*, 1985) โดยถ้าการเกิดรีโทรเกรเดชันมีมาก การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชก็จะมาก ค่าความข้นของเจลสตาร์ชก็จะมีความสูง ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงจะประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันจากค่าความข้นของเจลสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปโดยอาศัยหลักการเดียวกับการวัดการลดลงของแสงที่ส่องผ่านที่ใช้ในงานวิจัยของ Jacobson and BeMiller (1998) และ Miles *et al.* (1985) รวมทั้งเป็นค่าที่นิยมใช้เพื่อประเมินสมบัติของผลิตภัณฑ์ภายหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง (Mallikarjunan and Hung, 1997) โดยจะหาออกมาในรูปของผลต่างของค่าความสว่างซึ่งได้จาก ค่าความสว่างของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับค่าความสว่างของตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง ($L^* - L_0^*$) โดย L^* คือ ค่าความสว่างของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง และ L_0^* คือ ค่าความสว่างของตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง ซึ่งถ้าการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมีมาก ผลต่างของค่าความสว่างก็จะมีค่าสูง

ภาพที่ 15 แสดงภาพเจลสตาร์ชก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยค่าความสว่างก่อนการแช่เยือกแข็ง (L_0^*) ของตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 มีค่าเท่ากับ 17.73 ± 0.21 , 25.84 ± 0.20 และ 32.18 ± 0.20 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญคือการเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ตัวอย่างจะมีค่าความสว่างเริ่มต้นสูงที่สุด รองลงมาคือ การเติมที่ร้อยละ 0.25 และที่ไม่ได้เติมตามลำดับ



ภาพที่ 15 เจลสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนการแช่เยือกแข็ง

(ก) ไม่เติมแซนแทนกัม (ข) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 (ค) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50

ค่าความสว่างเริ่มต้นที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นของเจลสตาร์ช คือ ค่าความสว่างจะมีค่าน้อยเมื่อเจลมีความใสมากหรือมีความขุ่นค่อนข้างน้อยเนื่องจากการวัดที่ใช้ในการทดลองนี้จะวัดตัวอย่างในสถานะที่ใช้พื้นหลัง (background) เป็นสีดำ ถ้าตัวอย่างมีความขุ่นน้อย ค่าความสว่างก็จะน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แซนแทนกัมมีผลต่อการเพิ่มค่าความขุ่นของเจลซึ่งสันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแซนแทนกัม (Mandala *et. al.*, 2002)

ภาพที่ 16-18 แสดงภาพเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งโดยใช้อุณหภูมิในการคืนรูปที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงของตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 91 วัน โดยผลต่างของค่าความสว่าง (L^* - L_0^*) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 7, 31 และ 91 วัน ดังแสดงในตารางที่ 9



(ก) 0.00 %

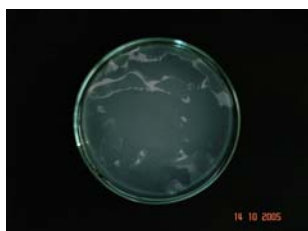


(ข) 0.25 %



(ค) 0.50 %

ภาพที่ 16 เจลสตาร์ชมันสำปะหลังหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ของเจลที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าเมื่อเก็บรักษาที่ -18 °ซ เป็นเวลา 91 วัน
(ก) ไม่เติมแซนแทนกัม (ข) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 (ค) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50



(ก) 0.00 %



(ข) 0.25 %



(ค) 0.50 %

ภาพที่ 17 เจลสตาร์ชมันสำปะหลังหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ของเจลที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางเมื่อเก็บรักษาที่ -18 °ซ เป็นเวลา 91 วัน
(ก) ไม่เติมแซนแทนกัม (ข) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 (ค) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50



(ก) 0.00 %



(ข) 0.25 %



(ค) 0.50 %

ภาพที่ 18 เจลสตาร์ชมันสำปะหลังหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ของเจลที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 °ซ เป็นเวลา 91 วัน
(ก) ไม่เติมแซนแทนกัม (ข) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 (ค) แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50

ตารางที่ 9 ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$) ของเจลสตาบิลิซิ่งน้ำมันลำปะหลังผสมแซนแทนกัม (XG) ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลางและแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 7, 31 และ 91 วัน

XG	อัตราการแช่เยือก	ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$)			
		0 วัน	7 วัน	31 วัน	91 วัน
	(%)				
0.00	ช้า	42.80±1.53 nsF	43.50±0.72 F	44.08±1.19 F	43.04±0.51 F
0.25		37.67±0.06 nsE	37.36±1.84 E	37.54±0.72 E	36.73±0.89 E
0.50		32.31±1.89 nsD	31.42±1.32 D	32.37±0.31 D	33.76±0.52 D
0.00	ปานกลาง	9.82±1.09 nsC	10.31±0.04 C	9.98±2.22 C	9.67±2.81 C
0.25		6.92±1.48 nsB	6.40±0.04 B	7.13±1.17 B	6.48±1.84 B
0.50		6.82±0.16 nsB	7.12±1.04 B	6.20±0.39 B	6.66±1.31 B
0.00	เร็ว	5.55±1.06 nsAB	5.60±0.06 AB	5.24±0.96 AB	5.43±0.87 AB
0.25		7.49±0.28 nsB	6.48±0.07 B	6.97±1.24 B	6.50±1.90 B
0.50		4.58±0.20 nsA	4.40±0.54 A	3.95±0.24 A	4.09±0.92 A

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns ในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

จากตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$) ของตัวอย่างที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 0 วัน พบว่า เจลสตาบิลิซิ่งในกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะมีค่าผลต่างของค่าความสว่างมากกว่าในกลุ่มที่ใช้การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว โดยในกลุ่มที่ใช้การแช่เยือกแข็งแบบช้า ตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50 จะมีค่าน้อยกว่าที่ร้อยละ 0.25 และ 0.00 ตามลำดับ ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง ตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.25 และ 0.50 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่น้อยกว่าการเติมที่ร้อยละ 0.00 ส่วนการแช่เยือก-

แข็งแบบเร็ว ตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50 จะมีค่าน้อยที่สุด โดยตัวอย่างที่เติมร้อยละ 0.00 และ 0.25 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นสรุปได้ว่า การเติมแซนแทนกัมและการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันมีผลต่อการลดการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ชได้ โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะลดการเกิดริโทเกรเดชันได้มากกว่าแบบปานกลาง และแบบเร็วตามลำดับ เนื่องจากผลต่างค่าความสว่างของสีของตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมเมื่อใช้การแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะมีค่าต่ำกว่าแบบปานกลาง และแบบช้าซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีผลต่อการลดการก่อนิวเคลียสผลึกได้มากที่สุด ส่วนการเติมแซนแทนกัมนั้นพบว่า ที่ร้อยละ 0.50 จะลดได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25 เนื่องจากผลต่างค่าความสว่างของสีเมื่อเติมที่ร้อยละ 0.50 จะมีค่าต่ำกว่าที่ร้อยละ 0.25 เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว ส่วนที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง พบว่า การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 และ 0.50 จะให้ผลต่อการลดการริโทเกรเดชันได้อย่างไม่แตกต่างกันเนื่องจากผลต่างค่าความสว่างของสีมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยจากผลดังกล่าวข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า การลดการเกิดริโทเกรเดชันนั้นจะต้องคำนึงถึงทั้งระดับการเติมแซนแทนกัมและการเลือกใช้อัตราการแช่เยือกแข็ง โดยประสิทธิภาพการลดการเกิดริโทเกรเดชันที่ได้จะขึ้นอยู่กับระดับการเติมแซนแทนกัมและการเลือกใช้อัตราการแช่เยือกแข็ง

เมื่อพิจารณาผลของการเติมแซนแทนกัมและการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งร่วมกันแล้ว จะพบว่า การลดการก่อนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ชจะมีค่ามากขึ้นเมื่อนำแซนแทนกัมมาใช้ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราแบบต่าง ๆ โดยสถานะที่สามารถลดได้มากที่สุดคือ การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากการใช้แซนแทนกัมเท่ากับร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้นจะทำให้โมเลกุลเกิดการจับกันค่อนข้างน้อยหรือมีนิวเคลียสผลึกที่เกิดจากการจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชเริ่มต้นในปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ที่สถานะอื่น ๆ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะส่งผลต่อการก่อนิวเคลียสผลึกของทั้งโมเลกุลสตาร์ชและผลึกน้ำแข็งดังที่ได้อธิบายไว้ในเรื่องร้อยละการแยกของน้ำ ส่วนการเติมแซนแทนกัมก็มีผลต่อการขัดขวางการจับกันของโมเลกุลสตาร์ช ดังนั้นเมื่อใช้ร่วมกันจึงน่าจะส่งผลต่อการลดการเกิดริโทเกรเดชันได้มากขึ้นด้วย ซึ่งก็สอดคล้องกับการหาร้อยละการแยกของน้ำด้วยวิธี FTC process ที่พบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วร่วมกับการใช้แซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 จะลดการเกิดริโทเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้ดีที่สุด

เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากค่าร้อยละการแยกของน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้ที่พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ค่าร้อยละการแยกของน้ำจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อใช้ร่วมกับการเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 ส่วนที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วจะมีค่าร้อยละการแยกของน้ำเท่ากับศูนย์ในทุกตัวอย่างทั้งที่เติมและไม่เติมแซนแทนกัม ผลที่ได้จากผลต่างของค่าความสว่างแม้จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่าร้อยละการแยกของน้ำคือแสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งมีผลต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้แต่การวัดด้วยวิธีการหาผลต่างของค่าความสว่างนี้มีข้อดีมากกว่าคือ สามารถบอกได้ว่าแซนแทนกัมมีผลอย่างไรต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วในขณะที่วิธีการหาค่าร้อยละการแยกของน้ำไม่สามารถบอกได้เนื่องจาก การเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือการเกิดการจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชอาจเกิดน้อยกว่าในระดับที่จะทำให้เกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างได้ การหาค่าร้อยละการแยกของน้ำจึงไม่สามารถตรวจสอบความแตกต่างได้ จึงสรุปได้จากผลข้างต้นว่า การเติมแซนแทนกัมร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง หรือแบบเร็วมีผลต่อการลดการเกิดนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ชที่เป็นสาเหตุของการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าการใช้แซนแทนกัม หรือการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางหรือแบบเร็วเพียงอย่างเดียว

ในระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 0, 7, 31 และ 91 วัน พบว่า ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$) ของทุกตัวอย่างที่ทุกสภาวะของการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าน่าจะเกิดจากการวัดค่าความขุ่นโดยอาศัยหลักการส่องผ่านของแสงนี้จะสามารถเปรียบเทียบได้ดีเฉพาะในช่วงแรกของการเก็บรักษาซึ่งจะเป็นช่วงเริ่มต้นที่มีการพัฒนาของค่าความขุ่น (Jacobson and BeMiller, 1998) และจะใช้ได้ดีเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชระบบมีค่าไม่เกินกว่าร้อยละ 2.5 เนื่องจากถ้ามากเกินไป ความขุ่นจะมีค่ามากส่งผลให้ไม่สามารถตรวจวัดความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้ (Jacobson and BeMiller, 1998) ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้การแช่เยือกแข็งแบบช้าซึ่งมีค่าความขุ่นของเจลค่อนข้างสูง วิธีนี้จึงอาจจะไม่สามารถบ่งบอกการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาได้ แต่สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วนั้นพบว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีในการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเนื่องจากเจลที่ได้มีความใส ไม่ขุ่นทึบเหมือนกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังนั้นการที่ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$) ของทุกตัวอย่างที่ทุกสภาวะของการทดลองที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างการ

เก็บรักษานั้นก็แสดงให้เห็นว่า การใช้เซนแทนกัมและการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่ทั้งสองระดับนี้สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้

5.2 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อผลต่างของค่าความสว่าง ($L^* - L_0^*$)

ตารางที่ 10 แสดงผลต่างของค่าความสว่าง ($L^* - L_0^*$) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมเซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้าปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 7, 31 และ 91 วัน

ผลการทดลองที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสพบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากการที่อุณหภูมิทั้งสองเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชในระบบแช่เยือกแข็งซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ -5 องศาเซลเซียส (Ferrero *et al.*, 1994) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิทั้งสองจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งก็สอดคล้องกับผลที่ได้จากค่าร้อยละการแยกของน้ำ

ตารางที่ 10 ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$) ของเจลสตาบิลไมล์ล้างหลังผสมแซนแทนกัม (XG) ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตรา การแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลางและแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -12 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 7, 31 และ 91 วัน

XG (%)	อัตราการ แช่เยือกแข็ง	ผลต่างของค่าความสว่าง ($L^*-L_0^*$)			
		0 วัน	7 วัน	31 วัน	91 วัน
0.00	ช้า	42.80 ± 1.53 nsF	43.71 ± 1.63 F	43.16 ± 1.54 F	error
0.25		37.67 ± 0.06 nsE	36.77 ± 2.71 E	37.29 ± 2.62 E	error
0.50		32.31 ± 1.89 nsD	31.02 ± 1.66 D	31.23 ± 2.17 D	error
0.00	ปานกลาง	9.82 ± 1.09 nsC	9.70 ± 1.66 C	8.95 ± 0.86 C	error
0.25		6.92 ± 1.48 nsB	7.40 ± 1.66 B	7.02 ± 1.76 B	error
0.50		6.82 ± 0.16 nsB	7.19 ± 0.88 B	7.35 ± 1.59 B	error
0.00	เร็ว	5.55 ± 1.06 nsAB	5.66 ± 0.05 AB	5.89 ± 0.41 AB	error
0.25		7.49 ± 0.28 nsB	6.29 ± 0.05 B	6.91 ± 1.11 B	error
0.50		4.58 ± 0.20 nsA	4.35 ± 1.32 A	3.85 ± 0.23 A	error

หมายเหตุ - ตัวอย่างในวันที่ 91 แสดงค่าเป็น error เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก -12 เป็นประมาณ 30 องศาเซลเซียส

- ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns ในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

6. ผลของแซนแทนกัม อัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อเนื้อสัมผัสของ เจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

6.1 ผลของแซนแทนกัม และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าแรงด้านการกดสูงสุด

ค่าความแข็ง (hardness) ของเจลสตาร์ชสามารถประเมินจากค่าแรงด้านการกดสูงสุด (maximum force) ของเจล (Hikone, 1998; Mandala, 2002) โดยตารางที่ 11 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธี compression test ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เจลสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมแซนแทนกัมจะมีค่าความแข็งสูงสุด ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือ เจลสตาร์ชผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.50 และจะมีค่าต่ำที่สุดสำหรับตัวอย่างที่เติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25

ตารางที่ 11 ค่าแรงด้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนการแช่เยือกแข็ง

สมบัติด้านเนื้อสัมผัส	ความเข้มข้นของแซนแทนกัม (ร้อยละ)		
	0.00	0.25	0.50
แรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน)	0.760 ± 0.01 c	0.560 ± 0.00 a	0.654 ± 0.00 b

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การเติมแซนแทนกัมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลสตาร์ชซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดได้จาก 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 แซนแทนกัมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการเกิดเจลไดโนซ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะของเจลสตาร์ชจะพบว่า เจลที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมจะมีลักษณะเป็นเจลที่มีความเหนียวยืดเป็นสาย (long patse) และมีเนื้อสัมผัสที่เหนียวติดกัน (cohesive texture) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง (Moorthy, 2002) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเจลที่เติมแซน-

แทนกันจะพบว่า ลักษณะของเจลที่ได้เปลี่ยนแปลงไปคือ มีความเหนียวยืดเป็นสายและมีเนื้อสัมผัสที่เหนียวติดกันน้อยลง โดยการเติมที่ระดับ 0.25 เจลจะเหนียวยืดเป็นสายน้อยกว่าการเติมที่ระดับ 0.50 ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากผลของแซนแทนกันที่สูงมากกว่า

ลักษณะของเจลสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากการเติมแซนแทนกันนั้นอาจจะมีสาเหตุเกิดจาก การเติมแซนแทนกันจะช่วยทำให้เม็ดสตาร์ชมีความคงตัวมากขึ้น การเกิดการแตกหักของเม็ดสตาร์ชจึงมีค่าลดน้อยลงในระหว่างการให้ความร้อนโดยดูได้จาก ค่าความหนืดลดลงหรือค่าbreakdown ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA ที่พบว่า ระบบที่มีการเติมแซนแทนกันจะมีค่าความหนืดลดลงน้อยกว่าในระบบที่ไม่ได้เติม ดังนั้นเม็ดสตาร์ชจึงจะเกิดการแตกหักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซึ่งก็สอดคล้องกับการทดลองของ Sekene (1996) ที่พบว่าเม็ดสตาร์ชในระบบที่มีการเติมแซนแทนกันจะไม่เกิดการแตกหักของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน ผลดังกล่าวนี้อาจส่งผลต่อโครงสร้างของเจลโดยรวมเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเจลจะขึ้นอยู่กับเฟสทั้ง 2 ส่วนได้แก่ เฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายตัว (Biliaderis, 1998) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสทั้งสอง เนื้อสัมผัสของเจลที่ได้จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชมีค่าลดน้อยลง

กรณีที่ 2 ที่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลได้แก่ การที่โมเลกุลของแซนแทนกันเข้าไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งเห็นได้จากค่าแรงด้านการกดสูงสุดของตัวอย่างที่เติมแซนแทนกันที่จะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจสันนิษฐานได้ว่า การเติมแซนแทนกันอาจจะส่งผลทำให้การเกิดเจลในระบบเป็นแบบ phase-seperated networks คือ ระบบจะประกอบด้วยโพลิเมอร์ 2 ชนิดอยู่รวมกันโดยไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ดังนั้นค่าความแข็งของเจลสตาร์ชผสมแซนแทนกันที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 จึงมีค่าต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการเกิดเจลแบบ phase-seperated networks นี้ โมเลกุลของแซนแทนกันจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชซึ่งจะมีผลต่อการขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายของโมเลกุลที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง โดยลักษณะการแทรกของโมเลกุลแซนแทนกันนั้นน่าจะเกิดในลักษณะที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสตาร์ชเนื่องจากถ้าเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแซนแทนกันและสตาร์ชแล้ว ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชควรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม การที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแซนแทนกัมจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.50 แล้วค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั้นน่าจะเป็นผลจาก สมบัติการเกิดโครงสร้างคล้ายเจลที่มีความแข็งแรงได้ของแซนแทนกัม (Mandala *et. al.*, 2002) จึงส่งผลให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลแซนแทนกัม การเกิดโครงสร้างคล้ายเจลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลแซนแทนกัมก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่ามากขึ้นด้วย

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถสรุปกลไกการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแซนแทนกัมในเจลดสตาร์ชมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ว่า การลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแซนแทนกัมสามารถเกิดได้ทั้งจากการเข้าไปขัดขวางการจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชโดยไม่เกิดอันตรกิริยา หรืออาจเกิดได้จากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแซนแทนกัมและสตาร์ชก็ได้

การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลดสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษาหลังการแช่เยือกแข็งจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเจลมีความแข็งมากเพิ่มขึ้น (Hikone, 1998; Mandala, 2002) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งเพื่อประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลดสตาร์ชที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ใช้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 12 แสดงค่าแรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน) ของเจลดสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วที่ระยะเวลา 0 วัน

ตารางที่ 12 ค่าแรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วที่ระยะเวลา 0 วัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	อัตราการ แช่เยือกแข็ง	แรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน)	
		ก่อนการแช่เยือกแข็ง	หลังการแช่เยือกแข็ง
0.00	ช้า	0.760 ± 0.01 ac	1.704 ± 0.01 bb
0.25		0.560 ± 0.00 aA	1.344 ± 0.00 bA
0.50		0.654 ± 0.00 aB	1.680 ± 0.01 bB
0.00	ปานกลาง	0.760 ± 0.01 ac	1.848 ± 0.01 bBC
0.25		0.560 ± 0.00 aA	1.298 ± 0.03 bA
0.50		0.654 ± 0.00 aB	1.946 ± 0.01 bCD
0.00	เร็ว	0.760 ± 0.01 ac	1.980 ± 0.01 bCD
0.25		0.560 ± 0.00 aA	1.206 ± 0.02 bA
0.50		0.654 ± 0.00 aB	2.040 ± 0.01 bD

หมายเหตุ -ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p>0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบจากตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชที่ระยะเวลา 0 วันที่ทุกสภาวะการทดลองจะมีค่าสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแช่เยือกแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเจลสตาร์ชโดยจะทำให้เจลสตาร์ชที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะพบว่า ตัวอย่างที่เดิมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 จะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตัวอย่างที่ไม่เดิมแซนแทนกัม ($p>0.05$) โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากค่าร้อยละการแยกของน้ำซึ่งการเดิมที่ร้อยละ

0.50 จะมีค่าเท่ากับศูนย์นั้นก็อาจสันนิษฐานได้ว่า ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงในระหว่างการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 อาจจะเป็นผลเนื่องจากการเกิดโครงสร้างคล้ายเจลของแซนแทนกัมมากกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ช ส่วนการเติมที่ร้อยละ 0.25 พบว่ามีความแข็งต่ำที่สุดแสดงให้เห็นว่า การเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นในระดับนี้สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลของสตาร์ชได้โดยจะเกิด โครงสร้างคล้ายเจลของแซนแทนกัมขึ้นน้อยกว่าที่ร้อยละ 0.50 ค่าความแข็งที่ได้จึงต่ำกว่าที่ร้อยละ 0.50

ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 ระดับเมื่อพิจารณาโดยใช้การสังเกตแล้วพบว่า เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เจลจะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกิดเป็นเจลที่มีเนื้อสัมผัสคล้ายทราย (sandy texture) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน ส่วนที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว นั้น โครงสร้างจะมีความยืดหยุ่นคล้ายเจลที่เกิดจากเจลาติน ลักษณะการเกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างนี้ทำให้ไม่ควรนำค่าความแข็งที่ได้สำหรับตัวอย่างที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และแบบปานกลางกับแบบเร็วมาเปรียบเทียบการเกิดรีโทรเกรเดชันระหว่างกันเพราะอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ค่อนข้างสูงเนื่องจาก ความแข็งของเจลที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชแต่อาจเกิดเนื่องจากผลของการเติมแซนแทนกัมซึ่งเห็นได้จาก เมื่อเปรียบเทียบที่การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากัน เจลที่มีการเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.50 ที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งจะมีค่าความแข็งเท่ากับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากผลของอัตราการแช่เยือกแข็งซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเจล สตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยจะเห็นได้จากค่าความแข็งในกลุ่มของเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วจะมีค่าสูงกว่าในกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ซึ่งน่าจะเกิดจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วจะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดเล็ก รวมถึงมีการเกิดผลึกนิวเคลียสของสายโมเลกุลสตาร์ชน้อยกว่าที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เจลสตาร์ชที่ได้จึงมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่เหมือนกับตัวอย่างที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าคือโครงสร้างของเจลจะมีความแน่นแข็งมากกว่า เมื่อนำไปตรวจสอบค่าเนื้อสัมผัส ค่าความแข็งที่ได้จึงสูงกว่า ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบผลของการเติมแซนแทนกัม และการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังแต่อาจเหมาะสมที่จะนำมาใช้ศึกษา การเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลเมื่อมีการเติมแซนแทนกัมหรือเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 13 แสดงค่าแรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสม แชนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วที่ระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของเจลสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า ที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เจลสตาร์ชทั้งที่เติมและไม่เติมแชนแทนกัมจะมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการเก็บรักษา โดยตัวอย่างที่มีการเติมแชนแทนกัมจะมีค่าความแข็งต่ำกว่าที่ไม่ได้เติมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 0-17 วัน ส่วนที่ 31 และ 91 วัน พบว่า ตัวอย่างที่เติมแชนแทนกัมที่ทั้งสองระดับจะมีค่าความแข็งเท่ากับตัวอย่างที่ไม่ได้เติม โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากค่าร้อยละการแยกของน้ำที่พบว่า ค่าร้อยละการแยกของน้ำของตัวอย่างที่มีการเติมแชนแทนกัมจะมีค่าต่ำกว่าตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นในช่วงการเก็บรักษาที่ 31 และ 91 วันนั้นอาจเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแชนแทนกัมไม่ได้เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ช ดังนั้นวิธีการตรวจสอบค่าความแข็งของเจลสตาร์ชต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบสำหรับตัวอย่างที่มีการเติมแชนแทนกัมเนื่องจาก ค่าความแข็งที่ได้ไม่ได้สื่อถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยตรง

ตารางที่ 13 ค่าแรงด้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราการใช้แซนแทนกัมแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	อัตราการใช้แซนแทนกัม	แรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน)					
		0 วัน	3 วัน	10 วัน	17 วัน	31 วัน	91 วัน
0.00	ช้า	1.704 ± 0.01 ab	1.766 ± 0.01 abc	1.820 ± 0.01 abcd	1.956 ± 0.01 bc	2.176 ± 0.01 cb	2.166 ± 0.02 cb
0.25		1.344 ± 0.00 aA	1.360 ± 0.02 aA	1.456 ± 0.02 ab	1.730 ± 0.01 bb	1.994 ± 0.01 cb	1.960 ± 0.01 cb
0.50		1.680 ± 0.01 ab	1.688 ± 0.01 ab	1.686 ± 0.02 ac	1.662 ± 0.01 ab	2.094 ± 0.02 bb	2.040 ± 0.01 bb
0.00	ปานกลาง	1.848 ± 0.01 nsBC	1.872 ± 0.01 BCD	1.850 ± 0.02 CD	1.944 ± 0.01 C	1.976 ± 0.02 B	1.986 ± 0.01 B
0.25		1.298 ± 0.03 nsA	1.119 ± 0.02 A	1.276 ± 0.01 AB	1.266 ± 0.03 A	1.332 ± 0.02 A	1.340 ± 0.02 A
0.50		1.946 ± 0.01 nsCD	2.060 ± 0.01 D	2.012 ± 0.00 D	2.036 ± 0.01 C	2.142 ± 0.00 B	2.046 ± 0.02 B
0.00	เร็ว	1.980 ± 0.01 nsCD	1.942 ± 0.02 CD	1.988 ± 0.01 D	1.898 ± 0.00 C	1.976 ± 0.01 B	2.060 ± 0.00 B
0.25		1.206 ± 0.02 nsA	1.156 ± 0.03 A	1.182 ± 0.03 A	1.210 ± 0.02 A	1.226 ± 0.01 A	1.254 ± 0.03 A
0.50		2.040 ± 0.01 nsD	1.936 ± 0.01 CD	2.038 ± 0.01 D	2.020 ± 0.00 C	2.098 ± 0.01 B	2.076 ± 0.01 B

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns หมายถึง ไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

6.2 ผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อค่าแรงด้านการกดสูงสุด (max force)

ตารางที่ 14 แสดงค่าแรงด้านการกดสูงสุด (max force) ของเจลสตาร์ชผสมแซนแทน-กัมที่ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าแบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสพบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งน่าจะเกิดเนื่องจากการที่อุณหภูมิทั้งสองเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชในระบบแช่เยือกแข็งซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ -5 องศาเซลเซียส (Ferrero *et al.*, 1994) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิทั้งสองจึงมีค่าไม่แตกต่างกันซึ่งก็สอดคล้องกับผลที่ได้จากการหาค่าร้อยละการแยกของน้ำและผลต่างของค่าความสว่าง

ตารางที่ 14 ค่าแรงด้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ด้วยอัตราการใช้แซนแทนกัมแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -12 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 31 และ 91 วัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	อัตราการใช้แซนแทนกัม	แรงด้านการกดสูงสุด (นิวตัน)					
		0 วัน	3 วัน	10 วัน	17 วัน	31 วัน	91 วัน
0.00	ช้า	1.704 ± 0.01 aB	1.790 ± 0.01 aBC	1.854 ± 0.02 abDE	1.920 ± 0.02 bcCD	2.108 ± 0.02 cB	error
0.25		1.344 ± 0.00 aA	1.356 ± 0.02 aAB	1.430 ± 0.03 aAB	1.742 ± 0.01 bBC	2.042 ± 0.01 cB	error
0.50		1.680 ± 0.01 aB	1.568 ± 0.01 aB	1.610 ± 0.00 aBC	1.564 ± 0.01 aB	2.068 ± 0.02 bB	error
0.00	ปานกลาง	1.848 ± 0.01 nsBC	1.848 ± 0.01 CD	1.780 ± 0.01 CD	1.938 ± 0.02 CD	1.926 ± 0.01 B	error
0.25		1.298 ± 0.03 nsA	1.276 ± 0.01 A	1.304 ± 0.01 A	1.268 ± 0.01 A	1.318 ± 0.02 A	error
0.50		1.946 ± 0.01 nsCD	2.036 ± 0.02 D	2.012 ± 0.01 DE	1.906 ± 0.01 CD	2.130 ± 0.02 B	error
0.00	เร็ว	1.980 ± 0.01 nsCD	1.898 ± 0.02 CD	1.954 ± 0.01 DE	1.900 ± 0.02 CD	1.958 ± 0.01 B	error
0.25		1.206 ± 0.02 nsA	1.224 ± 0.02 A	1.218 ± 0.03 A	1.242 ± 0.03 A	1.236 ± 0.02 A	error
0.50		2.040 ± 0.01 nsD	1.924 ± 0.00 CD	2.080 ± 0.01 E	2.092 ± 0.01 D	2.148 ± 0.01 B	error

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วย ns หมายถึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

- error หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากตู้แช่เยือกแข็งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ -12 องศาเซลเซียส

7. การศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็ง

จากผลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่า ค่าแรงด้านการกดสูงสุดของตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เดิม และไม่ได้เดิมแซนแทนกัมหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้านั้น แม้จะมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาแต่ก็มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 91 วัน และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการเก็บรักษาที่ 31 วันที่ทุกสภาวะการทดลอง ($p>0.05$) (ดังแสดงในตารางที่ 12) การทดลองนี้จึงได้เลือกใช้เจลสตาร์ชที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 91 วัน มาทำการทดลองคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยการใช้เครื่องไมโครเวฟเพื่อประเมินผลของการเดิมแซนแทนกัม และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไมโครเวฟซึ่งเป็นวิธีการคืนรูปอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไป

ค่าที่ได้จะหาออกมาในรูปผลต่างของค่าแรงด้านการกดสูงสุดระหว่างตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งต่าง ๆ กัน ถ้าผลต่างของค่าแรงด้านการกดสูงสุดมีค่ามาก ตัวอย่างเจลสตาร์ชก็จะมีเนื้อสัมผัสแตกต่างจากตัวอย่างเริ่มต้นในแต่ละสภาวะค่อนข้างสูงคือมีความแข็งของเจลมากกว่า ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมากกว่าด้วย

ตารางที่ 15 แสดงผลต่างของค่าแรงด้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ชผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อนและหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 91 วัน

ตารางที่ 15 ผลต่างของค่าแรงด้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ซผสมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ก่อน และหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และเร็วเมื่อเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 91 วัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ค่าความแข็ง (นิวตัน)
0.00	ช้า	0.808 ± 0.02 C
0.25		0.566 ± 0.02 AB
0.50		0.640 ± 0.01 ABC
0.00	ปานกลาง	0.710 ± 0.01 BC
0.25		0.592 ± 0.01 AB
0.50		0.512 ± 0.01 AB
0.00	เร็ว	0.830 ± 0.02 C
0.25		0.484 ± 0.01 A
0.50		0.506 ± 0.01 AB

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากับ 91 วัน พบว่า เจลสตาร์ซที่เติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 ที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งจะมีค่าต่ำที่สุดโดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ส่วนตัวอย่างเจลสตาร์ซที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็ง พบว่า มีค่ามากที่สุดโดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่มีการเติมแซนแทนกัมจะมีค่าความแข็งของเจลสตาร์ซหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไมโครเวฟต่างจากตัวอย่างเริ่มต้นน้อยกว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เติมโดยไม่คำนึงถึงอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ซซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ซจะถูกขัดขวางโดยโมเลกุลของแซนแทนกัม ดังนั้นเมื่อนำมาคืนรูปด้วยการใช้ไมโครเวฟซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบรวดเร็ว เจลสตาร์ซที่เติมแซนแทนกัมจึงคืนรูปได้ดีกว่า โดยสภาวะที่ดี

ที่สุดที่ทำให้เจลที่ได้หลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไมโครเวฟมีเนื้อสัมผัส หรือค่าความแข็งใกล้เคียงกับเจลก่อนการแช่เยือกแข็งมากที่สุดคือ เจลที่เติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เจลสตาร์ชที่เติมแซนแทนกัมที่ทั้งสองระดับความเข้มข้นจะให้เนื้อสัมผัสหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งแตกต่างจากเจลที่เติมแซนแทนกัมเริ่มต้นก่อนการแช่เยือกแข็งน้อยที่สุด

สรุป

1. ผลของแซนแทนกัมต่อสมบัติของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนการแช่เยือกแข็ง

1.1 ผลของแซนแทนกัมต่อสมบัติด้านสีของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

การเติมแซนแทนกัมจะทำให้เจลสตาร์ชมีสีขาวขุ่นมากกว่าเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติม อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่าความสว่างของสีก่อนการแช่เยือกแข็ง (L^*) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมแซนแทนกัมโดยการเติมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.50 เจลสตาร์ชจะมีสีขาวขุ่นมากที่สุด รองลงมาคือ ที่ร้อยละ 0.25 และที่ไม่ได้เติมตามลำดับ

1.2 ผลของแซนแทนกัมต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

การเติมแซนแทนกัมจะทำให้เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปคือ มีความเหนียวยืดเป็นสาย (long paste) และมีเนื้อสัมผัสเหนียวติดกันน้อยลง (cohesive texture) โดยจะให้ลักษณะเจลที่มีความเหนียวติดกันสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมแซนแทนกัมเพิ่มจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.50 และเมื่อนำไปวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่า ค่าความแข็งของเจลที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัมจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ การเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 และ 0.25 ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเจลที่เกิดขึ้นจากการเติมแซนแทนกัมนี้สันนิษฐานว่า เกิดจากการเกิดโครงสร้างของเจลเป็นแบบ phase-separated networks หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายตัวภายในเจลสตาร์ช ดังนั้นเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชที่ได้จึงเปลี่ยนแปลงไป

2. ผลของแซนแทนกัม และอัตราการใช้เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

2.1 ผลของแซนแทนกัม และอัตราการใช้เยือกแข็งแบบช้า

เจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการใช้เยือกแข็งแบบช้า (0.06°C ต่อนาที) การเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชในระหว่างการแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษาจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้อัตราการใช้เยือกแข็งแบบปานกลาง (0.90°C ต่อนาที) และแบบเร็ว (2.30°C ต่อ

นาทิ) โดยการเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 จะช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าได้ โดยการเติมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.50 จะลดได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25

2.2 ผลของแซนแทนกัม และอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว

เจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็วสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีที่สุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเจลสตาร์ชมันสำปะหลังทั้งที่เติม และไม่ได้เติมแซนแทนกัมจะไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชที่จะทำให้เกิดการแยกของน้ำออกจากโครงสร้างของเจลทั้งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษา เนื่องจากค่าร้อยละการแยกของน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมแซนแทนกัม และการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วโดยดูจากค่าผลต่างของค่าความสว่างแล้ว พบว่า การเติมแซนแทนกัมและการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่ทั้งสองระดับนี้สามารถช่วยลดการเกิดนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ชได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 และการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะลดได้มากกว่าที่ร้อยละ 0.25 และการใช้แบบปานกลางตามลำดับ โดยสภาวะที่ดีที่สุดคือ การใช้แซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

2.3 ผลของแซนแทนกัมและอัตราการแช่เยือกแข็งต่อสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง

เจลสตาร์ชที่มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลายเมื่อทดสอบโดยวิธีการหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process) มากที่สุดคือ เจลสตาร์ชที่เติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และแบบปานกลาง ตามลำดับ รองลงมาคือ การเติมแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0.25 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็ว

3. อุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง

อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ -12 และ -18 องศาเซลเซียสไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันระหว่าง สมบัติของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังภายหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งสำหรับทุกตัวอย่างทั้งที่เดิม และไม่เดิมแซนแทนกัมที่ทุกอัตราการแช่เยือกแข็งซึ่งอาจเกิดเนื่องจากอุณหภูมิทั้ง 2 ระดับเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของระบบ การเปลี่ยนแปลงต่างๆ จึงมีค่าไม่แตกต่างกัน

4. การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็ง

สภาวะภายหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องไมโครเวฟซึ่งใช้จริงในการคืนรูปผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง พบว่า ตัวอย่างที่มีค่าความแข็งของเจลสตาร์ชใกล้เคียงกับตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งมากที่สุดคือ การใช้แซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็ว

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มนัส แซ่ด่าน. 2538. รีโอโลยีเบื้องต้น. บริษัท ก้าวใหม่ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2531. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังของไทย. สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, กรุงเทพฯ.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2543. กระบวนการแช่เยือกแข็ง, น. 131-163. ใน คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, บรรณาธิการ. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- A.A.C.C. 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists.** 10th ed., American Association of Cereal chemists, St. Paul, MN.
- Alloncie, M., J. Lefebvre, G. Llamas and J.L. Doublier. 1989. A rheological characterization of cereal starch-galactomannan mixtures. **Cereal Chem.** 66: 90-93.
- Appelqvist, A.M. and M.R.M. Debet. 1997. Starch-biopolymer interaction-a review. **Food Rev. Int.** 13(2): 163-224.
- Atichokudomchai, N., S. Shobsngob, P. Chinachoti and S. Varavinit. 2001. A study of some physicochemical properties of high-crystalline tapioca starch. **Starch/Starke.** 53: 577-581.
- Baker, L.A. and P. Rayas-Duarte. 1998. Freeze-thaw stability of amaranth starch and the effects of salt and sugars. **Cereal Chem.** 75(3): 301-307.

- Balagopalan, C., G. Padmaja, S.K. Nanda and S.N. Moorthy. 1998. **Cassava in Food, Feed and Industry**. CRC Press, Inc., Florida.
- Bevilacqua, A.E. and N.E. Zaritzky. 1982. Ice recrystallization in frozen beef. **J. Food Sci.** 47: 1410-1414.
- Blanshard, J.M.V. 1987. Starch granule structure and function: a physicochemical approach, pp. 16-54. *In* T. Galliard, ed. **Starch: Properties and Potential**. John Wiley & Sons, Chichester. Cited R.F. Tester and J. Karkalas. 2002. Starch, pp. 381-438. *In* S.D. Baets, E.J. Vandamme and A. Steinbuechel, eds. **Biopolymers: Volume 6: Polysaccharides II Polysaccharides from Eukaryotes**. Wiley-VCH Verlag GmbH, Federal Republic.
- Biliaderis, C.G. 1992. Structure and phase transition of starch in food systems. **Food Technol.** 46(6): 98-108.
- Biliaderis, C.G. 1998. Structure and phase transitions of starch polymers, pp. 57-168. *In* R.H. Walter, ed. **Polysaccharide Association Structure in Food**. Marcel Dekker, INC., New York.
- Blond, G. and M.L. Meste. 1997. Principles of frozen storage, pp. 87-91. *In* M.C. Ericson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food**. Chapman hall, New York.
- Brownsey, G.J. and V.J. Morris. 1998. Mixed and filled gels-Models for foods, pp. 7-23. *In* Blanshard, J.M.V. and J.R. Mitchell, eds. **Food Structure-Its Creation and Evaluation**. Butler and Tanner, Great Britain.
- Buleon, A., P. Colonna, V. Planchot and S. Ball. 1998. Mini review: Starch granules: Structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromolecules.** 23: 85-112.

- Chaisawong, M. and M. Supphantharika. 2005. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. **Food Hydrocoll.** 1-9.
- Chances, J.W., D. Bermudez, A.V. Fragoso, H.M. Paz and S.M. Alzamora. 2004. Principles of Freeze-Drying, pp. 13-24. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I. Guerrero, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Food**. Marcel Dekker, INC., New York.
- Christianson, D.D. 1982. Hydrocolloid interactions with starches, pp. 933-419. *In* D.R. Lineback and G.E. Inglet, eds. **Food Carbohydr.** AVI Publishing Company, Westport.
- Christianson, D.D, J.E. Hodge, D. Osborne and R.W. Detroy. 1981. Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum, and cellulose gum. **Cereal Chem.** 58: 513-517.
- Chung, H.J., H.Y. Jeong and S.T. Lim. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch. **Carbohydr. polym.** 54: 449-455.
- Defloor, I., I.D. Leuven and J.A.D. Heverlee. 1998. Physico-chemical properties of cassava starch. **Starch/Starke.** 50: 58-64.
- Eerlingen, R.C., M. Crombez and J.A. Delcour. 1993. Enzyme resistance starch I Quantitation and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. **Cereal Chem.** 70: 339-344.
- Eidam, D, W.M.K. Hamburg, K. Kuhn and R.S. Heilbronn. 1995. Formation of maize starch gels selectively regulated by the addition of hydrocolloids. **Starch/Starke.** 47(10): 378-384.

- Fannon, J.E. and J.N. BeMiller. 1992. Structure of starch paste and granule remnants revealed by low-temperature scanning electron microscopy after cryopreparation. **Cereal Chem.** 69(4): 456-460.
- Ferrero, C., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1993. Effect of freezing rate and xanthan gum on the properties of corn starch and wheat flour pastes. **Int. J. Food Sci. Tech.** 28: 481-498.
- Ferrero, C., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1994. Corn Starch-xanthan gum and its effect on the stability during storage of frozen gelatinized suspensions. **Starch/Starke.** 46(8): 300-308.
- Ferrero, C., N.E. Zaritzky. 2000. Effect of freezing rate and frozen storage on starch-sucrose-hydrocolloid systems. **J. Sci. Food Agric.** 80: 2149-2158.
- Franco, C.M., R.A.F. Cabral and D.Q. Tavares. 2000. Structural and physicochemical characteristics of lintnerized native and sour cassava starches. **Starch/Starke.** 54: 469-475.
- Freitas, R.A., R.C. Paula, J.P.A. Feitosa, S. Rocha and M.R. Sierakowski. 2004. Amylose contents, Rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Dioscorea alata*) and cassava (*Manihot utilissima*) starches. **Carbohydr. Polym.** 55: 3-8.
- Funami, T., Y. Kataoka, T. Omoto, Y. Goto, I. Asia and K. Nishinari. 2005. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. **Food Hydrocoll.** 19: 1-13.
- Goff, H.D. 1997. Measurement and Interpretation of the Glass Transition in Frozen Food, pp. 29-50. In M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman & Hall, New York.

- Gonera, A., P. Cornillon. 2002. Gelatinization of Starch/gum/Sugar Systems studied by using DSC, NMR, and CSIM. **Starch/Starke**. 54: 508-516.
- Gunaratne, A. and R. Hoover. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydr. Polym.** 49: 425-437.
- Hansen, L.M., R.C. Hoseney and J.M. Faubion. 1991. Oscillation rheometry of starch-water system: effect of starch concentration and temperature. **Cereal Chem.** 68(4): 347-351.
- Heldman, D.R. and T.A. Taylor. 1997. Modeling of Food Freezing, pp. 51-64. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food**. Chapman & Hall, New York.
- Hikone, Y.H. 1998. Roles of water-soluble and water-insoluble carbohydrates in the gelatinization and retrogradation of rice starch. **Starch/Starke**. 50(11-12): 474-478.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin and its significance. **Carbohydrate Res.** 147: 342-347. Cited E.T. Champagne. 1996. Rice starch composition and characteristics. **Cereal Foods World**. 41(11): 833-838.
- Imeson, A. 1992. **Thickening and Gelling Agents for food**. Chapman & Hall, Great Britain. 258 p.
- Jacobson, M.R. and J.N. BeMiller. 1998. Method for determining the rate and extent of accelerated starch retrogradation. **Cereal Chem.** 75(1): 22-29. Cited M.R. Jacobson. 1994. **Starch Retrogradation: Acceleration, Inhibition and Microstructure**. Ph.D. Thesis, Purdue University.
- James, W.R. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. Chapter: starch. Eagan Press, Minnesota. 117-151 p.

- Jansson, P.E., L. Kenne and B.Lindberg. 1975. Structure of the exocellular polysaccharide from *Xanthomonas campestris*. **Carbohydr. Res.** 45: 275-282.
- Jobling, S. 2004. Improving starch for food and industrial applications. **Current Opinion in Plant Biology.** 7: 210-218.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Sci. Today.** 16(10): 334-340.
- Karim, A.A., M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9-36.
- Keetels, C.J.A.M., T. van Vilet and H. Luyten. 1995. Effect of retrogradation on the structure and mechanics of concentrated starch gels, pp. 472-479. *In* E. Dickinson and D. Lorient, eds. **Food Macromolecules and Colloids.** The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Leach, H.W., L.D. McCowen and T.J. Schoch. 1959. Structure of the starch granule I: Swelling and solubility patterns of various starches. **Anal. Chem.** 36: 535-544.
- Lee, M.H., M.H. Baek, D.S. Cha, H.J. Park and S.T. Lim. 2002. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. **Food Hydrocoll.** 16: 345-352.
- Lineback, D.R. and G.E. Inglett. 1982. **Hydrocolloid Interaction with Starches.** AVI Publishing Company, INC., Connecticut.
- MacDonald, G.A. and T.C. Lanier. 1997. Cryoprotectants for Improving Frozen Food Quality, pp. 197-231. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman & Hall, New York.

- Mali, S., C. Ferrero, V. Redigonda, A.P. Beleia, M.V.E. Grossmann and N.E. zaritzky. 2003. Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Discorea alata*) starch pastes stability. **Lebensm-Wiss. U. -Technol.** 36: 475-481.
- Mandala, I.G. and E. Bayas. 2004. Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions. **Food Hydrocoll.** 18: 191-201.
- Mandala, I.G., E.D. Palogou and A.E. Kostaropoulos. 2002. Influence of prepatraion and storage condition on texture of xanthan-starch mixtures. **J. Food Eng.** 53: 27-38.
- Melton, L.D., L. Mindt, D.A. Rees and G.R. Sanderson. 1976. Covalent structure of the polysaccharide from *Xanthomonas campestris*: evidence from partial hydrolysis studies. **Carbohydr. Res.** 46: 245-257.
- Miles, M.J., V.J. Morris, P.D. Orford and S.G. Ring. 1985. The roles of amylase and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. **Carbohydr. Res.** 135: 271-281.
- Monsanto, G.S. 2000. Xanthan gum, pp. 103-115. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids.** CRC press. Cambridge.
- Moorthy, S.N. 1985. Acetylation of cassava starch using perchloric acid catalysis. **Starch/Starke.** 37(9): 307-308.
- Moorthy, S.N. 2002. Physicochemical and functional properties of tropiocal tuber Starches: A review. **Starch/Starke.** 54: 559-592.
- Morris, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends in Food Sci. & Technol.** 2-6.

- Morris, V.J. 1986. Multicomponent gels, pp. 87-99. *In* G.O. Phillips, D.J. Wedlock and P.A. Williams, eds. **Gum and Stabilizers for the Food Industry 3**. Elsevier Applied Science, New York. Cited J.M.V. Blanshard and J.R. Mitchell. 1998. **Food Structure- Its Creation and Evaluation**. Butler and Tanner, Great Britain.
- Murphy, P. 2000. Starch, pp. 41-65. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids**. Woodhead Publishing, New York.
- Navarro, A.S., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1995. Effect of Freezing Rate on the Rheological Behaviour of Systems Based on Starch and Lipid Phase. **J. Food Eng.** 26: 481-495.
- Nussinovith, A. 1997. **Hydrocolloid Application**. Chapman&Hall., London.
- Padmanabham, S. and B.K.L. Myrose. 1992. Comparative physico-chemical and functional properties of cassava starches obtained by conventional and enzyme-integrated conventional techniques. **Starch/Starke**. 44(9): 328-331.
- Persson, P.O. and G. Londahl. 1993. Freezing Technology, pp. 20-58. *In* C.P. Mallett, ed. **Frozen Food Technology**. Chapman & Hall, Great Britain.
- Poulsen, K.P. 1977. The freezing process under industrial conditions, pp. 347-353. *In* International Institute of Refrigeration, ed. **Freezing, Frozen Storage and Freeze – Drying of Biological Materials and Foodstuffs**. n.p, Paris.
- Ring, S.R., P.Colonna, K.J. I'Anson, M.T. Kalihevsky, M.J.Miles, V.J. Morris and P.D. OrFord. 1987. The gelation and crystallization of amylopectin. **Carbohydr. Res.** 162: 277-293.

- Robin, J.P., C. Mercier, R. Charbonniere and J.A. Guilbot. 1974. Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. **Cereal Chem.** 51: 389-406.
- Rojas, J.A., C.M. Rosell and C.B.D. Barber. 1999. Pasting properties of different wheat flour-hydrocolloid systems. **Food Hydrocoll.** 13: 27-33.
- Roos, Y. and M. Karel. 1991. Applying state diagrams to food processing and development. **Food Technol.** 66-71, 107.
- Sasaki, T. And J. Matsuki. 1998. Effect of Wheat Starch Structure on Swelling Power. **Cereal Chem.** 75(4): 525-529.
- 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. **Methods in Carbohydrates Chemistry**, Vol. IV, Academic Press, New York.
- Schoch, T.J. 1968. Effects of freezing and cold storage on pasted starches, pp. 44-56. In D.K. Tressler, W.B. van Arsdel and M.J. Copley, eds. **The Freezing Preservation of Foods: Vol. 4.** AVI, Westport, CT.
- Sekine, M. 1996. Measurement of dynamic viscoelastic behavior of starch during gelatinization in a xanthan-gum solution. **Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi.** 43: 683-688. Cited X. Shi and J.N. BeMiller. Effects of food gums on viscosities of starch suspension during pasting. **Carbohydr. Polym.** 50: 7-18.
- Shi, X. and J.N. BeMiller. 2002. Effects of food gums on viscosities of starch suspension during pasting. **Carbohydr. Polym.** 50: 7-18.

- Siliverio, J., H. Fredriksson, R. Andersson, A.C. Eliasson and P. Aman. 2000. The effect of temperature cycling on the amylopectin retrogradation of starches with different amylopectin unit-chain length distribution. **Carbohydr. Polym.** 42: 175-184.
- Soest, V.J.J.G., D. de Wit, H. Tournois and J.F.G. Vliegenthart. 1994. Retrogradation of potato starch as studied by Fourier transform infrared spectroscopy. **Starch/Starke.** 46: 453-457.
- Sriroth, K., V. Santisopasri, C. Petchalanuwat, K. Kurotjanawong, K. Piyachomkwan and C.G. Oates. 1999. Cassava starch granule structure-function properties: influence of time and Conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 38: 161-170.
- Sudhakar, V., R.S. Singhal and P.R. Kulkarni. 1995. Starch-galactomannan interactions: Functionality and rheological aspects. **Food Chem.** 55(3): 259-264.
- Takeda, Y., K. Shirasaka and S. Hizuri. 1984. Examination of the purity and structure of amylase by gel permeation chromatography. **Carbohydr. Res.** 132: 83-92.
- Takeda, Y., S. Hizukuri, C. Takeda and A. Suzuki. 1987. Structure of branched molecules of amylase of various and molar fractions of branched and unbranched molecules. **Carbohydr. Res.** 165: 139-145.
- Tester, F.R. and W.R. Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches I Effects of amylopectin, amylase, and lipids. **Cereal Chem.** 67: 551-557.
- Thiewes, H.J. and P.A.M.S. Groningen. 1997. Comparison of the Brabender Viskograph and the Rapid Visco Analyser: I Statistical Evaluation of the Pasting Profile. **Starch/Starke.** 49(3): 85-92.

Urlacher, B. and B. Dalbe. 1992. Xanthan gum, pp. 203-226. *In* A. Imeson, ed. **Thickening and Gelling Agents for Food**. Chapman&Hall, Great Britain.

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

Wunderlich, B. 1976. **Macromolecular Physics: Volume 2: Crystal Nucleation, Growth, Annealing**. Academic Press, New York. Cited J.M.V. Blanshard and J.R. Mitchell. 1988. **Food Structure: Its Creation and Evaluation**. Butler and Tanner, Great Britain.

Yuan,R.C. and D.B. Thompson. 1998. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry. **Cereal Chem**. 75(4): 571-573.

Zhan, D.F., M.J. Ridout, G.J. Brownsey and V.J. Morris. 1933. Xanthan-locust bean gum interaction and gelation. **Carbohydr. Polym**. 21(1): 53-58