



## รายงานการวิจัย

ผลของวัตถุเจือปนอาหารบางชนิดต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์  
สมบัติของเจล และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าว

EFFECT OF CERTAIN FOOD ADDITIVES ON PASTING BEHAVIOR,  
GEL PROPERTY AND RETROGRADATION OF RICE STARCH

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

31 มีนาคม 2562

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากเงินรายได้ประเภทเงินอุดหนุนการวิจัยจากรัฐบาล โดยเป็นโครงการต่อเนื่อง 2 ปี (ปีงบประมาณ 2560-2561) สำหรับรายงานนี้เป็นการวิจัยที่ดำเนินการภายใต้เงินอุดหนุนประจำปีงบประมาณ 2561 (รหัสทุน GB-A\_61\_026\_23\_07) โดยโครงการในปีที่ 2 นี้เป็นการศึกษาผลของพรีไบโอติก (งานวิจัยต่อเนื่องจากปีที่ 1) สารลดแรงตึงผิว และต่าง ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพรีไบโอติก สารลดแรงตึงผิว และต่างต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า ในการศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่า ชนิดของพรีไบโอติก (ฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ หรือ FOS และ inulin) มีผลค่อนข้างน้อยต่อสมบัติการเกิดเพสต์ ในขณะที่ความเข้มข้นของพรีไบโอติกมีผลต่อสมบัติการเกิดเพสต์ โดยการเติมพรีไบโอติกทำให้ pasting temperature เพิ่มขึ้น แต่มีผลให้ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีค่าลดลง สำหรับผลที่มีต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงเล็กน้อย ในแง่การเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าตัวอย่างที่เติม inulin เข้มข้น 10% มีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพรีไบโอติกที่ใช้พบว่าการเติม inulin ช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ดีกว่าการเติม FOS ผลที่ได้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชให้แตกออกและปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง ในส่วนการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติมโซเดียมสเตียโริลแลกทิเลต (SSL) และกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (GMS) มีผลทำให้ peak viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวส่งผลให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม SSL ที่ความเข้มข้น 1.0% นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปี ยกเว้นการเติม SSL ที่ความเข้มข้น 0.5% ซึ่งมีผลทำให้เอนทัลปีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในด้านการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าสำหรับการเติม SSL มีผลทำให้อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แต่สำหรับตัวอย่างที่เติม GMS พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นพีคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน ในด้านแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้าให้แตกออก พบว่าตั้งแต่วันที่ 7 ของการเก็บรักษาตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ส่วนในด้านปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง พบว่าตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในส่วนการศึกษาผลของต่างต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าตัวอย่างที่เติมคั้นชุยมี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในด้านอุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคั้นชุยต่าง พบว่าการเติมคั้นชุยมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน รวมทั้งเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าตัวอย่างที่เติมคั้นชุยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินเพิ่มขึ้น แต่เอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าลดลง ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม สำหรับแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชให้แตกออก พบว่าเจลสตาร์ชที่เติมคั้นชุยมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของคั้นชุยเพิ่มขึ้น และในการวิเคราะห์ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง พบว่า ณ วันที่ 0 ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมคั้นชุย 0.5% มีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคั้นชุยเป็น 1.0% พบว่าเจลที่ได้มีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งต่ำกว่าเจลที่เติมคั้นชุย 0.5% และเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่างมีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้น

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ง
1. บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. วิธีดำเนินการวิจัย	2
4. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	8
5. สรุปผลการวิจัย	32
บรรณานุกรม	35
ประวัตินักวิจัย	40

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

FOS fructo-oligosaccharide

GMS glycerol monostearate

RS rice starch

SSL sodium stearyl lactylate

## 1. บทนำ

สตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักของส่วนเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าวเจ้าซึ่งเป็นอาหารหลักของคนทั่วโลก พลาวยข้าวเจ้าประกอบด้วยสตาร์ชประมาณ 80% โดยน้ำหนักแห้ง (Marshall and Wadsworth, 1994; Lumdubwong and Seib, 2000) สตาร์ชจึงมีบทบาทสำคัญในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีข้าวเจ้าหรือพลาวยข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลัก

สตาร์ชนอกจากจะมีบทบาทในเชิงโภชนาการแล้ว ยังให้สมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลายแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น รักษาความชื้น เพิ่มสมบัติการเกาะติดพื้นผิว (adhesiveness) ให้สี ให้ความเงา เพิ่มความคงตัว ให้ความข้นหนืด ปรับปรุงสมบัติด้านการไหล ทำให้เกิดเจล ทำให้เกิดฟิล์ม และเพิ่มความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง-การทำละลาย (Satin, 2012) สมบัติเหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในการให้ความร้อนและการเย็นตัวลงทั้งในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่เป็นระบบที่มีความซับซ้อน (complex system) ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายอย่าง ซึ่งอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบด้วยกันเอง (ingredient interaction) และส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของอาหารที่แตกต่างไปจากระบบที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า (Gaonkar, 1995) ในทำนองเดียวกันอาหารจากสตาร์ช (starch-based food) ส่วนใหญ่มักมีองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากสตาร์ชรวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจส่งผลที่แตกต่างไปจากระบบที่ประกอบด้วยสตาร์ชเพียงอย่างเดียว ประกอบกับขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น การให้ความร้อน การทำให้เย็น การเก็บรักษา ล้วนแต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับสตาร์ช เช่น เจลาทีไนเซชัน รีโทรเกรเดชัน การเกิดเพสต์และเจล งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของวัตถุดิบอาหารบางประเภท ได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์ พรีไบโอติก สารลดแรงตึงผิว และด่าง ที่มีต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า โดยจะเป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีอยู่แล้ว เป็นการนำเอาองค์ความรู้มาใช้เป็นพื้นฐานสู่การสร้างศักยภาพและความสามารถเพื่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของชาวไทยเพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ

## 2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัตถุเจือปนอาหารบางประเภท ได้แก่ พรีไบโอติก สารลดแรงตึงผิว และต่าง ที่มีต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า โดยเป็นโครงการต่อเนื่อง 2 ปี ในปีนี้ 2 นี้ (ปีงบประมาณ 2561) เป็นการศึกษาผลของพรีไบโอติก (งานวิจัยต่อเนื่องจากปีที่ 1) สารลดแรงตึงผิว และต่าง ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าว

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบ

ข้าวสาร พันธุ์ปทุมธานี 1 (กำไรการเกษตร, สุพรรณบุรี)

Fructo-oligosaccharide, DP 2-10, food grade (Orafti®P95, Beneo, Tienen, Belgium)

Inulin, DP 2-60, food grade (Jepsen & Jessen Ingredients (T), Bangkok, Thailand)

Glycerol monostearate (GMS), food grade (Berli Jucker, Bangkok, Thailand)

Sodium stearyl lactylate (SSL), food grade (Berli Jucker, Bangkok, Thailand)

Potassium carbonate, anhydrous, AR grade (Ajax Finechem, Taren Point, Australia)

Sodium carbonate, anhydrous, AR grade (Ajax Finechem, Taren Point, Australia)

#### 3.2 การเตรียมสตาร์ชข้าวเจ้า

นำข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 มาผลิตเป็นฟลาวัวร์ด้วยวิธีไม่เปียก โดยนำข้าวสารมาคัดแยกสิ่งปนเปื้อนและล้างทำความสะอาด แช่ข้าวสารโดยใช้อัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำกลั่น เท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำข้าวสารและน้ำมาบดโดยใช้เครื่องปั่นผสม (Waring, Torrington, CT) เป็นเวลา 2 นาที กรองผ่านผ้าขาวบาง และนำไปบีบน้ำออกโดยใช้เครื่องบีบอัดไฮดรอลิก (บริษัท ซากาย่า ออโต้เมท จำกัด, กรุงเทพฯ) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง นำฟลาวัวร์แห้งที่ได้มาบดลดขนาดโดยใช้เครื่องปั่นผสม (Waring, Torrington, CT) เป็น

เวลา 2 นาที แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 ยูเอสเมช บรรจุลงในถุงพอลิเอทิลีน ปิดผนึกด้วยความร้อน ฟลาวัวร์ที่ได้จะนำมาใช้เพื่อสกัดแยกสตาร์ชต่อไป

สำหรับการสกัดแยกสตาร์ชตัดแปลงจากวิธีของ Lumdubwong and Seib (2000) นำฟลาวัวร์ข้าวเจ้ามาแขวนลอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้อัตราส่วนของฟลาวัวร์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1:2 กวนผสมสารแขวนลอยที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที แยกส่วนใสและส่วนสีเหลืองที่จับเป็นผิวอยู่ด้านบนออก นำส่วนตะกอนที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นโดยใช้อัตราส่วนของตะกอนต่อน้ำกลั่นเป็น 1:2 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที ล้างซ้ำเช่นนี้อีก 3 ครั้ง จากนั้นนำส่วนตะกอนที่ได้มาผสมกับน้ำกลั่นโดยใช้อัตราส่วนของตะกอนต่อน้ำกลั่นเป็น 1:2 แล้วปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารแขวนลอยให้เท่ากับ 7 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ แล้วนำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที แยกส่วนใสทิ้ง นำสตาร์ชที่ได้มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง สตาร์ชที่ได้มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 12.67% (wb) นำสตาร์ชที่ได้มาบดลดขนาดโดยใช้เครื่องปั่นผสม (Waring, Torrington, CT) เป็นเวลา 2 นาที แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 ยูเอสเมช บรรจุลงในถุงพอลิเอทิลีน ปิดผนึกด้วยความร้อน เก็บสตาร์ชที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปทดลองต่อไป

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นและโปรตีนของสตาร์ชที่สกัดได้ตามวิธีของ AOAC (2006a) และ AOAC (2006b) และวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสและคำนวณปริมาณแอมิโลเพกทินในสตาร์ชตามวิธีของ Takeda et al. (1987)

### 3.3 การศึกษาผลของฟรีไบโอติกต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

ฟรีไบโอติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ FOS และ inulin แปรความเข้มข้นของฟรีไบโอติกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนักของสตาร์ช ศึกษาผลของฟรีไบโอติกต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าดังนี้



### 3.3.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

ติดตามพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าผสมพรีไบโอติกโดยใช้ rapid visco analyzer (RVA) (Newport Scientific, Warriewood, Australia) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Bao (2008) เตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ของผสมของสตาร์ชข้าวเจ้าและพรีไบโอติก 2.95 กรัมต่อน้ำกลั่น 25.05 กรัม ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 1200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วลดความเร็วเป็น 800 รอบต่อนาที กวนเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยพรีไบโอติกบรรจุลงในถ้วยตัวอย่าง (canister) ของเครื่อง RVA ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้าในปริมาณที่ต้องการเติมลงในสารแขวนลอยพรีไบโอติก ใส่ใบพัด (paddle) ลงในถ้วยตัวอย่าง หมุนไปพักกวนไปมาอย่างแรง เพื่อให้สตาร์ชไม่จับตัวกันเป็นก้อนที่ผิวสารละลายหรือติดที่ใบพัด จากนั้นนำถ้วยตัวอย่างพร้อมใบพัดติดตั้งลงบนเครื่อง RVA ให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจาก 50-95 องศาเซลเซียสในเวลา 3.45 นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส ในเวลา 4.90 นาที และคงอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.24 นาที บันทึกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ pasting temperature, peak viscosity, final viscosity, breakdown viscosity (ผลต่างระหว่าง peak viscosity และ trough viscosity) และ setback viscosity (ผลต่างระหว่าง final viscosity และ trough viscosity)

### 3.3.2 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีนเซชัน

ติดตามอุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าผสมพรีไบโอติกโดยใช้ differential scanning calorimeter (DSC) (Perkin Elmer, Waltham, MA) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) เตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ของผสมของสตาร์ชข้าวเจ้าและพรีไบโอติก 5.0 กรัมต่อน้ำกลั่น 20.0 กรัม (ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก) ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 1200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วลดความเร็วเป็น 800 รอบต่อนาที กวนเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้าในปริมาณที่

ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในสารแขวนลอยพรีไบโอติก พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

ชั่งตัวอย่างสารแขวนลอยของสตาร์ชข้าวเจ้าและพรีไบโอติกประมาณ 8 มิลลิกรัมให้ ทรานน้ำหนักแน่นอน บรรจุลงในถาด DSC ชนิด volatile aluminum pan (Perkin Elmer, Waltham, MA) ปิดผนึกถาด DSC ให้สนิท เก็บรักษาถาด DSC ที่บรรจุตัวอย่างแล้วที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 จนถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature,  $T_o$ ) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature,  $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature,  $T_c$ ) และเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตาชันในเซชัน (gelatinization enthalpy,  $\Delta H_g$ )

### 3.3.3 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน

นำถาดตัวอย่างจากข้อ 3.3.2 มาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ณ วันที่ 3, 7 และ 10 ของการเก็บรักษา นำตัวอย่างมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินโดยใช้ DSC (Perkin Elmer, Waltham, MA) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Karim et al. (2008) นำถาดตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC และใช้ถาด DSC เปล่าที่ปิดผนึกสนิทแล้วเป็นถาดอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 จนถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และเอนทัลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน

### 3.3.4 สมบัติเชิงกลของเจลสตาร์ช

เตรียมเจลสตาร์ชโดยดัดแปลงจากวิธีของ Muadklay and Charoenrein (2008) เตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ของผสมของสตาร์ชข้าวเจ้าและพรีไบโอติก 10.0 กรัมต่อน้ำกลั่น 40.0 กรัม (ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก) ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ

กลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 1200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วลดความเร็วเป็น 800 รอบต่อนาที กวนเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้าในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในสารแขวนลอยพรีไบโอติก พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นำสารแขวนลอยที่ได้มาให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Julabolaborteknik, Seelbach, Germany) ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที พร้อมกับกวนเป็นระยะ นำเพสต์ที่ได้บรรจุลงในพิมพ์รูปทรงกระบอกที่ทำจากแก้วซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร และสูง 25 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำตัวอย่างออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดเป็นเจล วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเจลสตาร์ช ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังจากเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3, 7 และ 10 วัน

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลโดยนำตัวอย่างเจลมาตัดให้เป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และสูง 20 มิลลิเมตร วัดแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออก (breaking force) โดยใช้เครื่อง texture analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, UK) โดยวิธี uniaxial compression ซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Lanier (1992) ทำโดยนำตัวอย่างเจลวางลงบนแท่นของเครื่องวัด กดด้วยหัววัด stainless steel spherical probe (P/0.25S) (Stable Micro Systems, Surrey, UK) กำหนดให้หัววัดกดลงบนตัวอย่างเจลเป็นระยะทาง 30% ของความสูงของตัวอย่าง และกดด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตร/วินาทีจนกระทั่งตัวอย่างเจลแตกออก บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกในหน่วยกรัม-แรง (gf)

### 3.3.5 ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง (solid-like fraction) ของเจลสตาร์ช

ติดตามปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าผสมพรีไบโอติกโดยใช้เทคนิค NMR spectroscopy เตรียมเจลสตาร์ชโดยดัดแปลงจากวิธีของ Muadklay and Charoenrein (2008) เตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ของผสมของสตาร์ชข้าวเจ้าและพรีไบโอติก 5.0 กรัมต่อน้ำกลั่น 20.0 กรัม (ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก) ทำโดยชั่งพรีไบโอติกในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 1200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วลดความเร็วเป็น 800 รอบต่อนาที กวนเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสตาร์ชข้าวเจ้าในปริมาณที่ต้องการแล้วเติมอย่างช้าๆ ลงในสารแขวนลอยพรีไบโอติก

โอดิก พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นำสารแขวนลอยที่ได้มาให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Julabolabortechnik, Seelbach, Germany) ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที พร้อมกับกวนเป็นระยะ บรรจุเพสต์ที่ได้ลงในหลอด NMR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยบรรจุเพสต์ให้ได้ความสูง 40 มิลลิเมตร จากนั้นนำหลอดบรรจุตัวอย่างไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำตัวอย่างออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดเป็นเจล วิเคราะห์ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในเจล ณ วันแรกที่ผลิต (วันที่ 0) และหลังเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 7 และ 10 วัน

วิเคราะห์ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งตามวิธีของ Yao and Ding (2002) โดยใช้ Fourier 300 NMR spectrometer (Bruker, Rheinstetten, Germany) ที่ความถี่ 300 เมกะเฮิร์ตซ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ pulse sequence ที่ประกอบด้วย  $90^\circ$  pulse width เท่ากับ 6.5 ไมโครวินาที เก็บข้อมูลซ้ำ 4 ครั้ง

ตามสมการของ Avrami ร้อยละของส่วนเสมือนของแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) (Yao and Ding, 2002)

$$V = 1 - \exp(-kt^n) \quad \dots (1)$$

เมื่อ  $V$  คือร้อยละของส่วนเสมือนของแข็งที่ระยะเวลาการเก็บรักษา  $t$  ในขณะที่  $k$  คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดเป็นผลึก (crystallization rate constant) และ  $n$  คือเลขชี้กำลังของ Avrami (Avrami exponent) โดย  $k$  และ  $n$  สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ของสมการที่ (2)

$$\ln(-\ln(1-V)) = \ln k + n \ln t \quad \dots (2)$$

### 3.4 การศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ GMS และ SSL แปรความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0, 0.5 และ 1.0% โดยน้ำหนักของสตาร์ช ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติของสตาร์ช ข้าวเจ้าดังข้อ 3.3.1-3.3.5)

### 3.5 การศึกษาผลของต่างต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

ต่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ของผสมของโซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนตใน อัตราส่วน 9:1 โดยน้ำหนัก และเพื่อความสะดวกในงานวิจัยนี้จะเรียกแทนว่า “คั้นซุย” แปรความเข้มข้นของคั้นซุยเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0, 0.5 และ 1.0% โดยน้ำหนักของสตาร์ช ศึกษาผลของคั้นซุยต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า ดังข้อ 3.3.1-3.3.5)

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test

## 4. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

### 4.1 การศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

#### 4.1.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์<sup>1</sup>

สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก ได้แก่ FOS และ inulin โดย แปรความเข้มข้นของพรีไบโอติกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 0, 5, และ 10% แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าชนิดของ พรีไบโอติกมีผลค่อนข้างน้อยต่อสมบัติการเกิดเพสต์ ได้แก่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity, setback viscosity และ pasting temperature ในขณะที่ความเข้มข้นของพรีไบโอติกมีผลต่อสมบัติ การเกิดเพสต์ พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้ pasting temperature เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้น peak viscosity, breakdown

<sup>1</sup> หมายเหตุ: ผลการวิจัยในข้อนี้ได้รายงานไว้แล้วในรายงานฉบับสมบูรณ์ของงานวิจัยในปีที่ 1 แต่เพื่อให้การวิจารณ์สามารถ เชื่อมโยงกับสมบัติด้านอื่นๆ ได้จึงนำผลดังกล่าวมาแสดงไว้ ณ ที่นี้อีกครั้งหนึ่ง

viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของพรีไบโอติกประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาได้กับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้มีผลขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสตาร์ชด้วยตัวเอง

ตารางที่ 4.1 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)	Pasting temperature (°C)
Control (RS)	3956.67±35.56 <sup>a</sup>	2088.33±72.01 <sup>a</sup>	3296.67±34.24 <sup>a</sup>	1428.00±21.16 <sup>a</sup>	74.82±0.03 <sup>b</sup>
RS+5% FOS	3418.67±4.16 <sup>b</sup>	1212.00±18.14 <sup>b</sup>	2033.00±13.00 <sup>b</sup>	826.33±17.10 <sup>b</sup>	79.98±0.03 <sup>a</sup>
RS+10% FOS	3156.00±12.29 <sup>d</sup>	1145.33±16.91 <sup>bc</sup>	1636.00±16.09 <sup>d</sup>	625.33±30.89 <sup>d</sup>	80.85±0.05 <sup>a</sup>
RS+5% inulin	3427.33±14.19 <sup>b</sup>	1094.00±11.51 <sup>c</sup>	1837.00±27.40 <sup>c</sup>	803.67±23.63 <sup>b</sup>	80.83±0.06 <sup>a</sup>
RS+10% inulin	3206.00±22.65 <sup>c</sup>	1030.33±16.66 <sup>c</sup>	1451.67±13.87 <sup>e</sup>	776.00±22.87 <sup>c</sup>	80.80±0.05 <sup>a</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.1.2 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกที่ติดตามโดยใช้เทคนิค DSC พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพรีไบโอติกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากพรีไบโอติกประกอบด้วยหมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำจำนวนมากจึงเกิดอันตรกิริยาได้กับน้ำ ทำให้ทำให้สภาพพร้อมใช้ของน้ำในระบบ (water availability) ลดลง เจลลาทีโนเซชันจึงเกิดได้ยากขึ้น ในแง่เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำใหเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากเจลลาทีโนเซชันที่เกิดขึ้นอย่างจำกัด เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของพรีไบโอติกที่ศึกษา พบว่า FOS ทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าเพิ่มขึ้นได้สูงกว่า inulin ทั้งนี้อาจเนื่องจาก FOS มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าจึงได้ให้อันตรกิริยากับน้ำได้ดีกว่า (Bello-Pérez, Sánchez-Rivera, Núñez-Santiago, Rodríguez-Ambriz, & Román-Gutierrez, 2010; Ronda, & Roos, 2008) อย่างไรก็ตาม

สำหรับเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าตัวอย่างที่เติม inulin มีเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าสูงกว่าตัวอย่างที่เติม FOS

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิต่ำสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)
Control (RS)	68.65±0.52 <sup>c</sup>	74.48±0.48 <sup>d</sup>	80.09±0.27 <sup>c</sup>	14.16±0.12 <sup>a</sup>
RS+5% FOS	71.19±0.84 <sup>b</sup>	86.78±0.35 <sup>b</sup>	93.18±0.58 <sup>b</sup>	11.74±0.27 <sup>b</sup>
RS+10% FOS	78.84±0.03 <sup>a</sup>	94.96±0.27 <sup>a</sup>	102.66±0.63 <sup>a</sup>	6.34±0.39 <sup>c</sup>
RS+5% inulin	68.83±0.87 <sup>c</sup>	80.40±0.10 <sup>c</sup>	83.94±0.15 <sup>c</sup>	13.30±0.48 <sup>a</sup>
RS+10% inulin	77.20±0.32 <sup>a</sup>	94.20±0.30 <sup>a</sup>	100.35±0.92 <sup>ab</sup>	6.51±0.34 <sup>c</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.1.3 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน

งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการติดตามอุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าผสมพรีไบโอติกซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน (ตารางที่ 4.3) พบว่าเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นเดียวกับตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่เติมพรีไบโอติก นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่เติม inulin เข้มข้น 10% มีเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำที่สุด ซึ่งเห็นว่าการเติม inulin เข้มข้น 10% มีผลชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพรีไบโอติกที่ใช้ พบว่าการเติม inulin ช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ดีกว่าการเติม FOS ทั้งนี้อาจเนื่องจาก inulin เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับ FOS ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า จึงทำให้เกิดความเกาะเกาะเชิงโครงสร้าง ทำให้การกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบผลึกของแอมิโลเพกทินเกิดขึ้นได้ยากขึ้น (Juszczak et al., 2012)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมัลเฟกทินของเจดสตาร์ข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)		เอนทัลปี (จูลต่อกรัม)					
	3	7 <sup>ns</sup>	3	7 <sup>ns</sup>	3	7 <sup>ns</sup>	3	7				
Control (RS)	45.80±0.92 <sup>ns</sup>	48.92±0.47	48.63±0.19 <sup>c</sup>	54.85±0.35 <sup>c</sup>	57.61±0.06	57.55±0.21 <sup>a</sup>	61.07±0.01 <sup>cd</sup>	63.44±0.47	2.49±0.27 <sup>a</sup>	3.66±0.20 <sup>a</sup>	5.69±0.01 <sup>a</sup>	
RS+5%FOS	43.02±1.00 <sup>b</sup>	50.01±0.74	52.54±0.89 <sup>a</sup>	52.21±1.02 <sup>b</sup>	55.45±0.61	57.85±1.69 <sup>a</sup>	60.50±0.64 <sup>d</sup>	63.0±0.45	64.64±0.10	2.03±0.14 <sup>b</sup>	3.35±0.06 <sup>a</sup>	5.01±0.21 <sup>b</sup>
RS+10%FOS	46.21±0.90 <sup>a</sup>	48.16±0.40	50.00±0.12 <sup>b</sup>	55.47±0.05 <sup>a</sup>	56.01±0.78	58.44±0.88 <sup>a</sup>	62.77±0.12 <sup>bc</sup>	63.72±0.56	65.06±0.44	1.85±0.02 <sup>b</sup>	2.22±0.14 <sup>b</sup>	3.58±0.19 <sup>a</sup>
RS+5%inulin	44.18±0.04 <sup>b</sup>	49.22±0.89	49.85±0.08 <sup>b</sup>	54.54±0.13 <sup>a</sup>	56.89±0.66	55.21±0.43 <sup>b</sup>	64.10±0.89 <sup>a</sup>	64.11±0.62	65.19±0.65	1.97±0.22 <sup>b</sup>	2.50±0.16 <sup>b</sup>	3.41±0.11 <sup>ab</sup>
RS+10% inulin	45.36±0.05 <sup>ns</sup>	50.26±0.40	51.11±0.10 <sup>ns</sup>	55.22±0.30 <sup>a</sup>	57.51±0.48	58.46±1.02 <sup>a</sup>	60.22±0.50 <sup>d</sup>	63.55±0.48	64.32±0.87	1.21±0.03 <sup>c</sup>	1.48±0.15 <sup>c</sup>	2.05±0.12 <sup>c</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสโตมส์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

<sup>ns</sup> ค่าเฉลี่ยในสโตมส์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

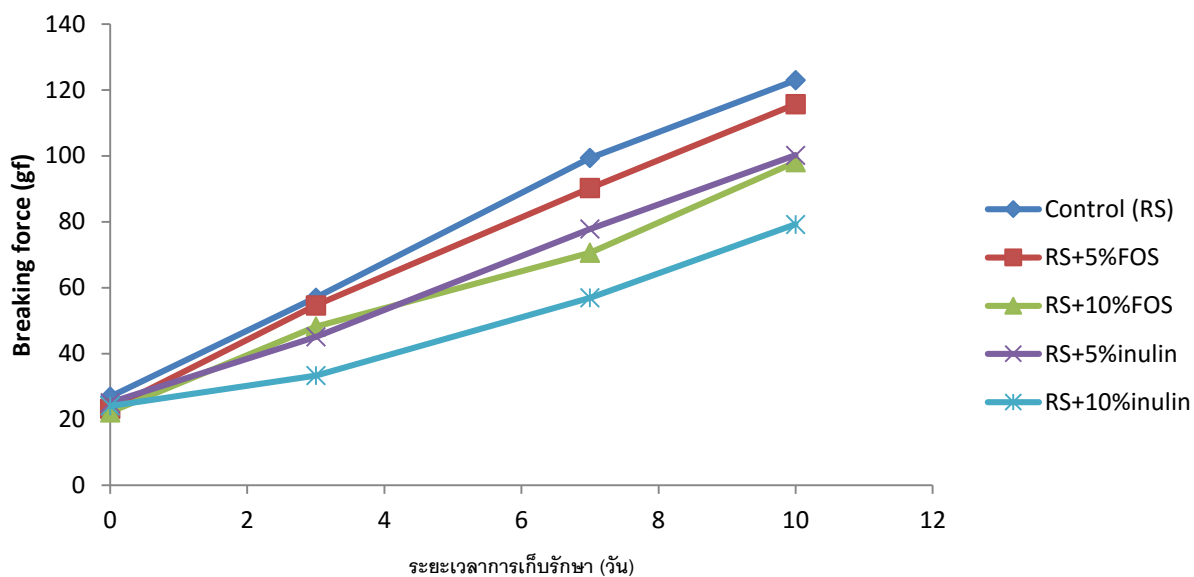


#### 4.1.4 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก

ในงานวิจัยนี้ได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าโดยการวัดแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก โดยเก็บรักษาตัวอย่างเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 3, 7 และ 10 วัน ค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกแสดงดังภาพที่ 4.1 จากการทดลองพบว่า ณ วันที่ 0 ของการเก็บรักษา แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกของตัวอย่างเจลที่เติมพรีไบโอติกมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ setback viscosity ที่ต่ำกว่าของตัวอย่างเจลที่เติมพรีไบโอติกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ตารางที่ 4.1) เมื่อเปรียบเทียบชนิดของพรีไบโอติกพบว่าเจลที่เติมพรีไบโอติกทั้งสองชนิดมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกใกล้เคียงกัน เมื่อนำเจลสตาร์ชมาเก็บรักษาไว้พบว่าค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกของทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดย BeMiller (2011) เสนอว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแข็งขึ้นของเนื้อสัมผัสของระบบสตาร์ช ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการติดตามเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 4.3) ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องจากพรีไบโอติกซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลสตาร์ช ทำให้สายโซ่สตาร์ชมีการเคลื่อนที่ได้ลดลง นอกจากนี้ยังมีผลไปขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งทำให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง

#### 4.1.5 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติก พบว่า ณ วันที่ 0 ของการเก็บรักษา ตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งที่สูงขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการที่พรีไบโอติกสามารถจับกับสตาร์ชด้วยพันธะไฮโดรเจนเช่นเดียวกับในกรณีของคาร์โบไฮเดรตประเภทอื่นๆ (Funami et al., 2005a) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นพบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นของแข็งที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ส่วนเสมือนของแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษา ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินที่ต่ำกว่าของตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ตารางที่ 4.3)



ภาพที่ 4.1 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (ตัวอย่างควบคุม, RS) เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม fructo-oligosaccharide (FOS) และเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ inulin โดยเก็บรักษาเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0-10 วัน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมพรีไบโอติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง(%)			
	ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)			
	0	3	7	10
Control (RS)	0.71±0.03 <sup>c</sup>	1.47±0.03 <sup>d</sup>	2.11±0.07 <sup>d</sup>	2.43±0.02 <sup>b</sup>
RS+5% FOS	1.15±0.01 <sup>b</sup>	1.89±0.04 <sup>c</sup>	2.52±0.05 <sup>b</sup>	2.60±0.15 <sup>a</sup>
RS+10% FOS	1.45±0.42 <sup>a</sup>	2.01±0.14 <sup>b</sup>	2.43±0.01 <sup>bc</sup>	2.56±0.04 <sup>ab</sup>
RS+5% inulin	1.23±0.06 <sup>ab</sup>	1.99±0.03 <sup>c</sup>	2.32±0.06 <sup>c</sup>	2.34±0.15 <sup>c</sup>
RS+10% inulin	1.51±0.13 <sup>a</sup>	2.62±0.05 <sup>a</sup>	2.71±0.10 <sup>a</sup>	2.63±0.09 <sup>a</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 2 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

จากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าความสามารถของพรีไบโอติกในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชน่าจะเป็นผลมาจากการที่พรีไบโอติกสามารถเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ชซึ่งมีผลขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชด้วยกันเองและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ของสตาร์ช โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลเพกทิน ผลที่ได้นี้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (งานวิจัยในปีที่ 1) ทั้งนี้อาจเนื่องจากทั้งพรีไบโอติกและไฮโดรคอลลอยด์ที่ศึกษาต่างก็เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ชในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

## 4.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

### 4.2.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ SSL และ GMS โดยแปรความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0 (ตัวอย่างควบคุม), 0.5 และ 1.0% พบว่าการเติม SSL และ GMS มีผลทำให้ peak viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) Kaur et al. (2005) เสนอว่าสารลดแรงตึงผิวอาจมีผลลดความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชัน (inclusion complexes) กับเกลียวของแอมิโลส ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชแกรนูลแข็งแรงมากขึ้นและสตาร์ชแกรนูลดูดน้ำได้ลดลง ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของเพสต์สตาร์ชลดลง รวมถึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดความหนืด Hansson and Lindman (1996) อธิบายว่าสารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนหัวที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับบริเวณด้านในเกลียวของแอมิโลสซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันนี้ทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรงมากขึ้น ผลที่ได้ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Azizi and Rao (2005) ซึ่งศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ ได้แก่ SSL, diacetyl tartaric acid ester of monoglycerides and diglycerides (DATEM), GMS และ distilled monoglycerides (DGMS) ต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเติมสารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 0.5% พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้ส่งผลให้ peak viscosity มีค่าลดลง ส่วน pasting temperature มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิว

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)	Pasting temperature(°C)
Control (RS)	3956.67±35.56 <sup>a</sup>	2088.33±72.01 <sup>a</sup>	3296.67±34.24 <sup>c</sup>	1428.00±21.16 <sup>a</sup>	74.82±0.03 <sup>b</sup>
RS+0.5% SSL	3452.50±67.88 <sup>bc</sup>	-82.00±18.38 <sup>b</sup>	3994.67±193.04 <sup>b</sup>	447.50±10.41 <sup>c</sup>	76.35±0.42 <sup>a</sup>
RS+1.0% SSL	3357.00±72.12 <sup>c</sup>	-70.51±23.53 <sup>b</sup>	3310.00±123.04 <sup>c</sup>	102.00±26.87 <sup>d</sup>	76.08±0.81 <sup>a</sup>
RS+0.5% GMS	3603.50±36.77 <sup>b</sup>	-120.50±17.68 <sup>d</sup>	4870.50±119.50 <sup>a</sup>	1147.50±143.38 <sup>b</sup>	73.10±0.57 <sup>cb</sup>
RS±1.0% GMS	3377.00±73.54 <sup>c</sup>	-98.00±6.37 <sup>cd</sup>	4585.00±34.67 <sup>a</sup>	1120.00±18.38 <sup>b</sup>	72.33±0.53 <sup>c</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

Eliasson and Krog (1985) และ Gudmundsson and Eliasson (1990) ศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันของสารลดแรงตึงผิวกับแอมิโลส และอธิบายว่าส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างแบบเกลียวคู่ของแอมิโลส โดยเมื่อศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) พบว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวเมื่อเกิดรีโทรเกรเดชันจะมีโครงสร้างผลึกแบบบี (B-pattern) แต่เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวกับแอมิโลสและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบวี (V-pattern) เช่นเดียวกับในกรณีของไขมันซึ่งพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันมีโครงสร้างผลึกแบบวี (Hibi et al., 1990; Gelders et al., 2004; Derycke et al., 2005)

นอกจากนี้ Hossain et al. (2012) ใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR) ศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสารลดแรงตึงผิวกับแอมิโลส พบว่าส่วนที่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวยังสามารถเกิดอันตรกิริยา เช่น พันธะไฮโดรเจน กับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ด้านนอกของโมเลกุลสตาร์ชได้อีกทางหนึ่งด้วย

สำหรับ breakdown viscosity พบว่าตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่า breakdown viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดย breakdown viscosity ของตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่าเป็นลบ รวมทั้ง final viscosity ที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ซึ่ง Hannaford and Whalen (2014) อธิบายว่าพฤติกรรมเกิดเพสต์ในลักษณะนี้พบในตัวอย่างที่มีการเกิดอันตรกิริยากันในระดับสูง (extensively interact) โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมีสาเหตุเนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสารลดแรงตึงผิวกับเกลียวของแอมิโลสมีผลทำให้โครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Putseys et al., 2010)

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Zhou et al. (2007) ซึ่งพบว่าการเติมกรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก และกรดลิโนเลอิก มีผลทำให้ breakdown viscosity ของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ผู้วิจัยเสนอว่าเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรดไขมันกับสตาร์ช

สำหรับค่า setback viscosity พบว่าการเติม SSL และ GMS ทำให้ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวสามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ชในระหว่างการทำให้เย็นตัวลง ศิวาพร ศิวเวชช (2529) กล่าวว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลสสามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ชได้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง SSL และ GMS ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์ที่แตกต่างกัน นอกจากจะเป็นผลจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแล้ว ยังอาจมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างค่าสมดุลความชอบน้ำ-ความไม่ชอบน้ำ (hydrophile-lipophile balance, HLB) ที่แตกต่างกัน (Stampfli and Nerden, 1995; Numfor et al., 1996) Mwasaru and Muhammad (2001) ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีค่า HLB แตกต่างกันต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ (pigeon pea) และถั่วพุ่ม (cowpea) พบว่า pasting temperature มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ HLB เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่เติม SSL (HLB ประมาณ 22) มี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างที่เติม GMS (HLB ประมาณ 3.6-4.0) โดยตัวอย่างที่เติม GMS มี pasting temperature ที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม Mwasaru and Muhammad (2001) เสนอว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีค่า HLB สูง ซึ่งมีความเป็นขี้สูงกว่ความเป็นขี้ ส่วนที่มีขี้จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ขี้ของสตาร์ชซึ่งอยู่ด้านนอก ส่วนที่ไม่มีขี้จึงทำหน้าที่เสมือนชั้นเคลือบที่ผิวของสตาร์ชแกรนูล (Numfor et al., 1996) ส่งผลให้สตาร์ชแกรนูลพองตัวได้ยากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำให้เกิดความหนืด

#### 4.2.2 อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

อุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิว ซึ่งศึกษาโดย DSC แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม SSL ที่ความเข้มข้น 1.0% ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชัน สำหรับค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Huang and White (1993) ซึ่งติดตามการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวโพดเหนียวที่เติมโมโนกลีเซอไรด์เข้มข้น 0.5% และรายงานว่าการเติมโมโนกลีเซอไรด์มีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าแม้อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวจะแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แต่ค่าดังกล่าวแตกต่างจาก

ตัวอย่างควบคุมในช่วงไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส สำหรับค่าเอนทาลปี พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปี ยกเว้นการเติม SSL ที่ความเข้มข้น 0.5% ซึ่งมีผลทำให้เอนทาลปีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) จากผลการทดลองที่ได้นี้จึงอาจสรุปได้ว่าสารลดแรงตึงผิวอาจมีผลไปจำกัดการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล แต่ไม่มีผลมากนักต่อการทำลายโครงสร้างผลึกของสตาร์ช

ตารางที่ 4. 6 อุณหภูมิและเอนทาลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิว

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิต่ำสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	เอนทาลปี (จูลต่อกรัม)
Control (RS)	68.65±0.52 <sup>a</sup>	74.48±0.48 <sup>a</sup>	80.09±0.27 <sup>ab</sup>	14.15±0.12 <sup>a</sup>
RS+0.5%SSL	67.25±0.12 <sup>c</sup>	73.44±0.12 <sup>c</sup>	79.63±0.04 <sup>b</sup>	13.30±0.23 <sup>b</sup>
RS+1.0%SSL	68.11±0.13 <sup>ab</sup>	74.18±0.11 <sup>ab</sup>	80.22±0.28 <sup>a</sup>	14.36±0.20 <sup>a</sup>
RS+0.5%GMS	67.71±0.13 <sup>bc</sup>	73.85±0.12 <sup>c</sup>	79.55±0.12 <sup>b</sup>	14.06±0.29 <sup>a</sup>
RS+1.0%GMS	67.57±0.04 <sup>bc</sup>	73.51±0.00 <sup>cb</sup>	79.52±0.27 <sup>b</sup>	14.88±0.02 <sup>a</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

Svensson et al. (1998) ศึกษาผลของการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecylsulfate, SDS) ต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชมันฝรั่ง โดยเติม SDS เข้มข้น 0.05% สำหรับสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่าการเติม SDS ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นและเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลง และก่อนหน้านี้ Numfor et al. (1996) ศึกษาผลของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติม GMS และ SSL เข้มข้น 1.0% พบว่าการเติม GMS ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม สำหรับการเติม SSL มีผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาทีโนเซชันเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเอนทาลปีของสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าลดลงเมื่อเติม SSL อย่างไรก็ตามการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดไม่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

Chungcharoen and Lund (1987) ศึกษาผลของ GMS ต่อเอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของฟลาวัวร์ข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติม GMS ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปีของฟลาวัวร์ข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเจ้าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม GMS

#### 4.2.3 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทิน

ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิและเอนทัลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิวและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3, 7 และ 10 วัน พบว่าอุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่เติม SSL มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการเติม SSL พบว่ามีผลทำให้อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ความเข้มข้นของ SSL ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เอนทัลปีของการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับตัวอย่างที่เติม GMS พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นพีคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมละลายผลึกแอมิโลเพกทิน ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวสามารถชะลอหรือยังยั้งการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ชได้ เนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของแอมิโลเพกทิน (Brates and White, 1986; Gudmundsson, 1992; Keetels et al., 1996; Ali and Hasnain, 2013 )

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมเหล็กแอมัลโกพอกทินของเจลดสตาร์ข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิวและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)											
	3	7	10	3	7	10	3	7	10	3	7	10
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)											
อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)											
เอนทัลปี (จูลต่อกรัม)	เอนทัลปี (จูลต่อกรัม)											
Control (RS)	45.80±0.92 <sup>a</sup>	48.92±0.47 <sup>a</sup>	48.63±0.19 <sup>a</sup>	54.85±0.35 <sup>a</sup>	57.61±0.06 <sup>a</sup>	57.55±0.21 <sup>a</sup>	61.07±0.01 <sup>a</sup>	64.16±0.17 <sup>a</sup>	63.44±0.47 <sup>a</sup>	2.49±0.27 <sup>a</sup>	3.66±0.20 <sup>a</sup>	5.69±0.01 <sup>a</sup>
RS+0.5%	45.40±0.06 <sup>a</sup>	49.69±0.21 <sup>a</sup>	49.36±0.43 <sup>a</sup>	55.25±0.02 <sup>b</sup>	56.74±0.11 <sup>b</sup>	56.76±0.32 <sup>b</sup>	60.17±0.06 <sup>b</sup>	60.64±0.17 <sup>b</sup>	61.44±0.28 <sup>b</sup>	1.65±0.02 <sup>b</sup>	3.10±0.06 <sup>b</sup>	3.81±0.01 <sup>b</sup>
SSL	45.62±0.33 <sup>a</sup>	46.17±0.06 <sup>b</sup>	46.31±0.00 <sup>b</sup>	53.14±0.42 <sup>c</sup>	53.06±0.00 <sup>c</sup>	53.65±0.11 <sup>c</sup>	60.50±0.03 <sup>b</sup>	60.63±0.18 <sup>b</sup>	61.54±0.12 <sup>b</sup>	1.74±0.08 <sup>b</sup>	2.72±0.08 <sup>b</sup>	3.16±0.30 <sup>c</sup>
RS+0.5% GMS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RS+1.0% GMS	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสัปดาห์เดียวกันที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ND ไม่พบที่ตรวจเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเทอร์โมแกรม



เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารลดแรงตึงผิว พบว่าการเติม GMS สามารถป้องกันการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินในตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้าได้ดีว่าการเติม SSL ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากส่วนที่เป็นกิ่งด้านนอกของแอมิโลเพกทินสามารถเกิดเป็นโครงสร้างแบบเกลียวได้เช่นเดียวกับแอมิโลส โดยหมู่ไฮดรอกซิลจะอยู่รอบนอกของโครงสร้างเกลียวและหมู่ที่ไม่ชอบน้ำจะหันเข้าภายในโครงสร้างเกลียว ส่งผลให้ด้านในโครงสร้างแบบเกลียวมีความเป็นขี้ดต่ำ (Bao and Bergman, 2004) ดังนั้น GMS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีค่า HLB ต่ำ (ประมาณ 3.6-4.0) จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไม่ชอบน้ำที่อยู่ด้านในโครงสร้างแบบเกลียวของแอมิโลเพกทินได้ดีกว่า (Raphaelides and Karkalas, 1988; Eliasson and Wahlgren, 2004; Putseys et al., 2010) โดย Tang and Copeland (2007) กล่าวว่าเกิดการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสตาร์ชกับไขมันสามารถเกิดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไขมัน โดยไขมันที่มีส่วนไม่ชอบน้ำมากจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสตาร์ชได้ดีกว่า

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Eliasson and Ljunger (1988) ซึ่งศึกษาผลของการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวโพดเมื่อเติมวัตถุเจือปนอาหาร ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) โมโนกลีเซอไรด์ เลซิทีน โซเดียมคลอเรต (sodium chlorate) และน้ำมันถั่วเหลือง เข้มข้น 0.14% เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 และ 7 วัน พบว่าตัวอย่างที่เติมวัตถุเจือปนอาหารและตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่เติมวัตถุเจือปนอาหารมีเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมวัตถุเจือปนอาหารดังกล่าวมีผลทำให้เอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

Gudmundsson and Eliasson (1990) ติดตามการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวโพดเมื่อเติมโมโนกลีเซอไรด์เข้มข้น 1.9 และ 2.9% พบว่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวโพดลดลงเมื่อเติมโมโนกลีเซอไรด์ ผู้วิจัยเสนอว่าเป็นผลมาจากการที่โมโนกลีเซอไรด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลเพกทิน

เช่นเดียวกับ Huang and White (1993) ซึ่งศึกษาผลของโมโนกลีเซอไรด์เข้มข้น 0.5% ต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวโพดเหนียว โดยเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าการเติมโมโนกลีเซอไรด์ส่งผลให้เอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามการเติมโมโนกลีเซอไรด์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน

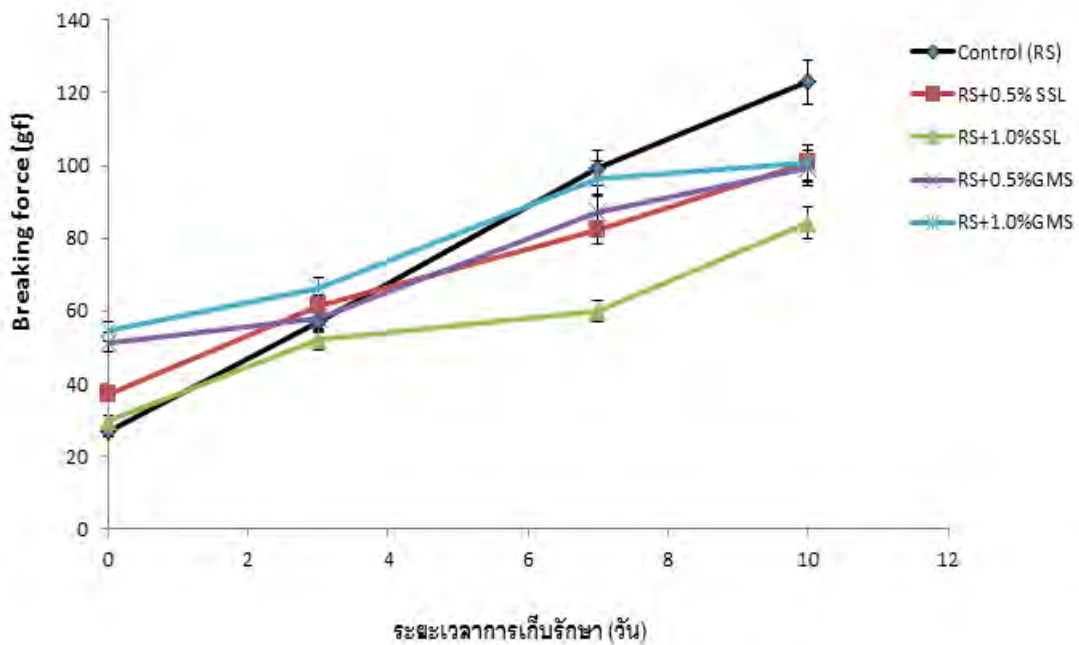
นอกจากนี้ Ali and Hasnain (2013) ศึกษาการเติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ GMS, SSL และ DATEM ต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชข้าวฟ่างและสตาร์ชข้าวฟ่างดัดแปร โดยแปรความเข้มข้นของ

สารลดแรงตึงผิวเป็น 0.5, 0.75 และ 1.0% พบว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินได้ เห็นได้จากเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินที่มีค่าลดลง ซึ่งผู้วิจัยให้เหตุผลว่าสารลดแรงตึงผิวจะรบกวนการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินโดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของแอมิโลเพกทิน

#### 4.2.4 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้าให้แตกออก

จากการศึกษาแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก (ภาพที่ 4.2) พบว่า ณ วันที่ 0 ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติม SSL และ GMS มีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อนำตัวอย่างมาเก็บรักษาไว้พบว่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น Ribotta et al. (2004) รายงานว่าโดซนมปังแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่วันที่ 7 ของการเก็บรักษาตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินที่มีค่าลดลง (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสตาร์ชซึ่งช่วยยับยั้งการเกิด รีโทรเกรเดชันหรือป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของเจลสตาร์ช (Ribotta et al., 2004)

สำหรับ SSL พบว่าตัวอย่างที่เติม SSL เข้มข้น 0.5% มีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกต่ำกว่าที่ตัวอย่างที่เติม SSL เข้มข้น 1.0% ในขณะที่ตัวอย่างที่เติม GMS เข้มข้น 0.5% มีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกสูงกว่าที่ตัวอย่างที่เติม GMS เข้มข้น 1.0% Azizi and Rao (2005) เสนอว่าผลของสารลดแรงตึงผิวขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวด้วย เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสตาร์ชที่แตกต่างกัน ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Kaur et al. (2005) ซึ่งศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่งที่เติม GMS เข้มข้น 1% พบว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่งที่เติม GMS มีแรงที่ใช้กดตัวอย่าง (compression force) ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เติม GMS ผู้วิจัยเสนอว่า GMS สามารถลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสตาร์ช



ภาพที่ 4.2 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก (breaking force) ของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (RS) ที่เติมโซเดียมสเตียโรอิลแลกทิลเลต (SSL) และกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (GMS) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยเก็บรักษาเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0-10 วัน

Numfor et al. (1998) รายงานว่าเจลฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่เติม GMS และ SSL เข้มข้น 0.5, 1.0 และ 2.0% มีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว Indrani and Rao (2003) ศึกษาผลของ GMS, DATEM, SSL และพอลิออกซีเอทิลีนซอร์บิแทนโมโนสเตียเรต (polyoxyethylene sorbitan monosterate, PS-60) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของพารอตตา (parotta) ที่ผลิตจากฟลาวัวร์ข้าวสาลี โดยเติมสารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 0.5% พบว่าตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีแรงที่ใช้กดตัวอย่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และนอกจากนี้ Gomes-Ruffi et al. (2012) ซึ่งศึกษาผลของ SSL เข้มข้น 0.5% ต่อความแน่นเนื้อของขนมปังที่ผลิตจากฟลาวัวร์ข้าวสาลีโดยเก็บตัวอย่างขนมปังไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 6 และ 10 วัน รายงานว่าตัวอย่างขนมปังที่เติม SSL มีค่าความแน่นเนื้อต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เติม SSL

#### 4.2.5 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ SSL และ GMS พบว่าตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสารลดแรงตึงผิวกับสตาร์ช (Eliasson and Krog, 1985; Kaur et al., 2005) เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นปริมาณส่วนเสมือนของแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของส่วนเสมือนของแข็งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาและการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและสารลดแรงตึงผิว

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสารลดแรงตึงผิวและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง (%)			
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)			
	0	3	7	10
Control (RS)	0.71±0.03 <sup>e</sup>	1.47±0.03 <sup>d</sup>	2.11±0.07 <sup>d</sup>	2.43±0.02 <sup>e</sup>
RS+0.5%SSL	2.76±0.05 <sup>d</sup>	3.10±0.06 <sup>c</sup>	3.46±0.03 <sup>c</sup>	4.11±0.08 <sup>d</sup>
RS+1.0%SSL	4.54±0.06 <sup>b</sup>	4.54±0.05 <sup>a</sup>	5.46±0.13 <sup>a</sup>	6.10±0.06 <sup>c</sup>
RS+0.5%GMS	3.62±0.02 <sup>c</sup>	2.90±0.06 <sup>c</sup>	4.38±0.14 <sup>b</sup>	6.77±0.04 <sup>b</sup>
RS+1.0%GMS	5.53±0.02 <sup>a</sup>	3.63±0.12 <sup>b</sup>	3.18±0.04 <sup>c</sup>	8.52±0.28 <sup>a</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 2 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

จากผลการทดลองที่ได้นี้ ให้ผลไปในทำนองเดียวกับการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์และพรีไบโอติก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถของสารลดแรงตึงผิวในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชน่าจะเป็นผลมาจากการที่สารลดแรงตึงผิวสามารถเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ช ทั้งการเกิดเป็นสารประกอบอินคลูชันของส่วนที่ไม่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวกับด้านในเกลียวของสตาร์ช และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ที่ขบหน้าของสารลดแรงตึงผิวกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ด้านนอกของเกลียวสตาร์ช จึงมีผลขัดขวางการจับกันของโมเลกุลของสตาร์ชด้วยตัวเองและช่วยชะลอการเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ของสตาร์ช

### 4.3 ผลของต่างต่อสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า

#### 4.3.1 พฤติกรรมการเกิดเพสต์

สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมต่าง (คั้นชุย) ซึ่งแปรความเข้มข้นของคั้นชุย เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0 (ตัวอย่างควบคุม), 0.5 และ 1.0% โดยน้ำหนักของสารละลาย แสดงดังตารางที่ 4.9 จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่เติมคั้นชุยมี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Karim et al. (2008) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชสาकुที่ผ่านการแช่ด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยแปรความเข้มข้นของสารละลายต่างเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 0.1 และ 0.5% พบว่าสตาร์ชสาकुที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างมี pasting temperature เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) Oosten (1979) และ Lawal et al. (2008) เสนอว่าการที่สตาร์ชมี pasting temperature สูงขึ้นเมื่อเติมเกลืออาจเป็นผลเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอออนที่มีประจุบวก เช่น โซเดียมอออนและโพแทสเซียมอออนกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชซึ่งจะมีผลช่วยเพิ่มความเสถียรให้แก่สตาร์ชแกรนูลและทำให้สตาร์ชแกรนูลพองตัวได้ลดลง (Karim et al., 2008; Nor Nadiha et al., 2010; Wang and Copeland, 2012) Méndez-Montevalvo et al. (2006) รายงานว่าสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการนิกซ์ทามาไลเซชันด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% มี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการนิกซ์ทามาไลเซชัน

ความเสถียรของสตาร์ชแกรนูลอันเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชกับอออนที่มีประจุบวกนี้ยังอาจมีผลต่อ breakdown viscosity ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าการเติมคั้นชุยมีผลทำให้ breakdown viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมคั้นชุย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแกรนูลที่พองตัวแล้วในตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคั้นชุยมีความทนทานต่อความร้อนและแรงเค้นมากขึ้น (Mistry and Eckhoff, 1992; Lai et al., 2002) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nor Nadiha et al. (2010) ที่พบว่าการแช่สตาร์ชสาकुและสตาร์ชมันฝรั่งด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1% เป็นระยะเวลา 0, 15 และ 30 วัน มีผลทำให้ breakdown viscosity ของสตาร์ชทั้งสองมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.9 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมต่าง

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Breakdown viscosity (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)	Pasting Temperature (°C)
Control (RS)	3956.67±35.56 <sup>a</sup>	2088.33±72.01 <sup>a</sup>	3296.67±34.24 <sup>a</sup>	1428.00±21.16 <sup>a</sup>	74.82±0.03 <sup>b</sup>
RS+0.5%Kansui	3429.00±198.90 <sup>b</sup>	1529.50±60.43 <sup>b</sup>	2903.17±150.34 <sup>b</sup>	1003.83±109.05 <sup>b</sup>	80.63±0.42 <sup>a</sup>
RS+1.0% Kansui	2717.67±190.82 <sup>c</sup>	1355.83±154.13 <sup>b</sup>	2478.17±105.76 <sup>c</sup>	1116.00±21.16 <sup>b</sup>	80.90±0.43 <sup>a</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

สำหรับ peak viscosity และ final viscosity พบว่าเพสต์สตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันชูมีค่าความหนืดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของคันชูสูงขึ้น (ตารางที่ 4.9) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้นอกจากจะเป็นผลจากการที่สตาร์ชแกรนูลของตัวได้ลดลงอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอออนที่มีประจุบวกแล้ว ยังอาจเป็นผลเนื่องจากการเกิดดีเกรเดชันในภาวะต่าง (alkaline degradation) ของพันธะไกลโคซิดิกบางส่วนในโมเลกุลสตาร์ช (Karim et al., 2008) ส่งผลให้ระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซีของโมเลกุลสตาร์ชลดลง ทั้งนี้ Jackson et al. (1988) รายงานว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเพียง 0.001 โมลาร์ สามารถทำลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลสตาร์ชได้ โดยดีเกรเดชันในภาวะต่างจะเกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างและ/หรืออุณหภูมิที่สูง (Suortti et al., 1998; Lai et al., 2002) ในงานวิจัยนี้พบว่าเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันชู 0.5 และ 1.0% มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 12 และอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการติดตามพฤติกรรมเกิดเพสต์มีค่าเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส (รูปแบบการเพิ่มและลดอุณหภูมิดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2.1) โดยก่อนหน้านี้ Han and Lim (2004) รายงานว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสสูงลดต่ำลง ผู้วิจัยให้เหตุผลว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกทินสามารถเกิดดีเกรเดชันในภาวะต่าง

การเกิดดีเกรเดชันในภาวะต่างของพอลิแซ็กคาไรด์เป็นที่รู้จักกันดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษคราฟต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดดีเกรเดชันของเซลลูโลส สำหรับกลไกในการเกิดดีเกรเดชันของพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น เซลลูโลส และสตาร์ช ในขั้นตอนแรกเป็นการเกิดดีเกรเดชันของส่วนปลาย (end-wise degradation) ซึ่งได้แก่หน่วยย่อยน้ำตาลที่ปลายรีดิวซิง (Wetterling, 2012) โดยจะเกิดคีโต-อินอลเทาโทเมอไรเซชัน (keto-enol tautomerization) ซึ่งน้ำตาลจะถูกเปลี่ยนจากรูปเฮมิแอซีทัล (hemiacetal) ไป

เป็นรูปแอลดีไฮด์ และหน่วยย่อยโมโนเมอร์สามารถถูกตัดออกจากโครงสร้างหลักของพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide backbone) ได้โดยปฏิกิริยาเบตา-อีลิมีเนชัน ( $\beta$ -elimination) นอกจากนี้ภาวะต่างยังสามารถทำให้เกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide chain cleavage) โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเริ่มด้วยการแตกตัว (ionization) ของหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ตามด้วยการเกิดการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ภายในโมเลกุล (internal nucleophilic attack) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะ 1-4 ที่เชื่อมต่อโครงสร้างหลักของพอลิแซ็กคาไรด์ และเกิดเป็นปลายรีดิวซ์ใหม่ขึ้นมา (Wetterling, 2012) และในที่สุดปลายรีดิวซ์เหล่านี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอกซิล ทำให้ได้กรดอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์ของการเกิดดีเกรเดชันของพอลิแซ็กคาไรด์ (Sjostrom, 1993) Krochta et al. (1987) รายงานว่าผลิตภัณฑ์หลักของการเกิดดีเกรเดชันของสตาร์ชในภาวะต่างคือกรดโมโนคาร์บอกซิลิก โดยเมื่อวิเคราะห์โดยใช้โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) และแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) พบว่ากรดที่เป็นผลิตภัณฑ์ของการเกิดดีเกรเดชันของสตาร์ชในภาวะต่าง ได้แก่ กรดฟอร์มิก แอซิติก โกลโคลิก แล็กติก 2-ไฮดรอกซีบิวทีริก 2-ไฮดรอกซีไอโซบิวทีริก และ 2-ไฮดรอกซีวาเลอริก

นอกจากนี้ Knill and Kennedy (2003) ยังเสนอว่าสตาร์ชสามารถเกิดออกซิเดชันได้ในภาวะต่าง โดยเกิดขึ้นได้ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ของหน่วยย่อยกลูโคสในโมเลกุลของสตาร์ช ซึ่งสามารถถูกออกซิไดส์ได้เป็นหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งไม่เสถียรในภาวะที่เป็นต่าง และจะเกิดการตัดพันธะ (scission) ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดเล็กลง

นอกจากนี้ยังพบว่าเพสต์สตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันชูมี setback viscosity ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.9) โดย setback viscosity มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของคันชูเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอ็อนที่มีประจุบวกและหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชทำให้มีผลขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสตาร์ชด้วยตัวเอง (Oosten, 1979; Bryant and Hamaker, 1997; Méndez-Montevalvo et al., 2006) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Wang and Copeland (2012) ซึ่งรายงานว่าสตาร์ชถั่วพี (*Pisum sativum* L.) ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1% เป็นเวลา 15 และ 30 วัน มีผลทำให้ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

#### 4.3.2 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีนในเซชัน

อุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีนในเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันชูแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าการเติมคันชูมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาทีนในเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า pasting temperature ที่วัดด้วย RVA (ตารางที่ 4.9) อุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนในเซชันที่สูงขึ้นนี้อธิบายได้โดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิ

ออนที่มีประจุบวกและหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช (Oosten, 1979; Bryant and Hamaker, 1997; Méndez-Montevalvo et al., 2006) ซึ่งช่วยให้สตาร์ชแกรนูลมีความเสถียรเพิ่มขึ้น (Karim et al., 2008; Nor Nadiha et al., 2010; Wang and Copeland, 2012)

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai et al. (2002) ที่ศึกษาผลของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% ต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวเจ้า สตาร์ชข้าวเหนียว สตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชข้าวโพดเหนียว และรายงานว่าตัวอย่างสตาร์ชที่เติมต่างทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมต่าง และยังมีผลการรายงานผลในทำนองเดียวกันโดย Cai et al. (2014) ซึ่งศึกษาการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.4% เป็นระยะเวลา 7 และ 14 วัน พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมต่าง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลเซียส)	เอนทัลปี (จูล/กรัม)
Control (RS)	68.65±0.52 <sup>c</sup>	74.48±0.48 <sup>b</sup>	80.09±0.27 <sup>b</sup>	14.15±0.12 <sup>c</sup>
RS+0.5% <i>Kansui</i>	73.40±0.05 <sup>b</sup>	79.89±0.06 <sup>a</sup>	87.32±0.33 <sup>a</sup>	20.98±0.11 <sup>a</sup>
RS+1.0% <i>Kansui</i>	74.44±0.05 <sup>a</sup>	80.40±0.23 <sup>a</sup>	87.50±0.47 <sup>a</sup>	18.16±0.11 <sup>b</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ในแง่ของเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมคันซุทำให้เอนทัลปีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.10) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Marques et al. (2006) ซึ่งรายงานว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ลงในตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังมีผลทำให้เอนทัลปีในการเกิดเจลลาทีโนเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีของเจลลาทีโนเซชันนี้อาจเป็นผลเนื่องจากความเสถียรของสตาร์ชแกรนูลอันเนื่องมาจากอิออนที่มีประจุบวกเช่นเดียวกัน

#### 4.3.3 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมละลายผลิตภัณฑ์แอมิโลเพกทิน

ตารางที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมละลายผลิตภัณฑ์แอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันซุและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3, 7 และ 10 วัน พบว่าการเติมคันซุมีผล



ต่ออุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยตัวอย่างที่เติมคันชูยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินเพิ่มขึ้น แต่เอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าลดลง ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมคันชูยสามารถชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวเจ้าไว้เป็นระยะเวลาไม่เกิน 7 วัน เอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินของตัวอย่างที่เติมคันชูย 0.5 และ 1.0% มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) อย่างไรก็ตามในตัวอย่างเจลที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าตัวอย่างที่เติมคันชูย 0.5% มีเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินสูงกว่าตัวอย่างที่เติมคันชูย 1.0% การลดลงของการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอออนที่มีประจุบวกและหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระมีจำนวนลดลง จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชได้ลดลง (Oosten, 1979; Bryant and Hamaker, 1997; Méndez-Montevalo et al., 2006) นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการที่พันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลสตาร์ชถูกดีเกรดในภาวะที่เป็นด่างทำให้โมเลกุลมีขนาดที่เล็กลงจึงเกิดรีโทรเกรเดชันได้ลดลง (Karim et al., 2008; Nor Nadiha et al., 2010) โดยก่อนหน้านี้มีรายงานว่าความยาวของสายโซ่สตาร์ชเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน นอกจากนี้ปัจจัยอื่นที่มีผล ได้แก่ ความเข้มข้นของสตาร์ช อัตราส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน อุณหภูมิ และสารอื่นๆ (เช่น เกลือ แซ็กคาไรด์ ลิพิด กรด ไฮโดรคอลลอยด์ และสารลดแรงตึงผิว) (Jacobson et al., 1997; Durán et al., 2001; Smits et al., 2003; Sandhu and Singh, 2007) Chung et al. (2008) ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่ (average chain length) ของแอมิโลเพกทินจากธัญพืชประเภท waxy ต่อสมบัติการไหลของเพสต์ระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชัน และพบว่ามอดูลัสเชิงซ้อน (complex modulus) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับน้ำหนักโมเลกุลและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Otsuka et al. (2001) ซึ่งศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแปรความเข้มข้นของเกลืออัลคาไลน์เป็น 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5% เก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และรายงานว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดได้

ตารางที่ 4. 1 อุณหภูมิและเอนทัลปีของการหลอมผลึกเอมิโกลพาทินของเจลสตาร์ข้าวเจ้าที่เติมต่างและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	เอนทัลปี (จล/กรัม)								
ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)												
	7	10	3	7	10	3	7	10				
Control (RS)	45.80±0.91	48.92±0.47 <sup>b</sup>	48.63±0.19 <sup>b</sup>	54.84±0.35 <sup>c</sup>	57.61±0.06 <sup>c</sup>	57.55±0.21 <sup>c</sup>	61.07±0.01 <sup>b</sup>	64.16±0.17 <sup>b</sup>	63.44±0.47 <sup>b</sup>	2.49±0.27 <sup>a</sup>	3.66±0.20 <sup>a</sup>	5.69±0.01 <sup>a</sup>
RS+0.5% <i>Kansui</i>	45.59±0.52	50.55±0.31 <sup>a</sup>	50.48±0.47 <sup>a</sup>	60.83±0.21 <sup>a</sup>	59.07±0.72 <sup>b</sup>	58.58±0.13 <sup>b</sup>	65.16±0.02 <sup>a</sup>	65.52±0.58 <sup>a</sup>	65.33±0.11 <sup>a</sup>	1.21±0.11 <sup>b</sup>	2.58±0.08 <sup>b</sup>	4.46±0.13 <sup>b</sup>
RS+1.0% <i>Kansui</i>	45.60±0.49	49.45±0.56 <sup>ab</sup>	49.14±0.04 <sup>b</sup>	58.90±0.12 <sup>b</sup>	60.74±0.07 <sup>a</sup>	60.82±0.06 <sup>a</sup>	65.63±0.09 <sup>a</sup>	65.59±0.04 <sup>a</sup>	65.38±0.21 <sup>a</sup>	1.20±0.06 <sup>b</sup>	2.56±0.05 <sup>b</sup>	2.74±0.05 <sup>c</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

จากงานวิจัยนี้พบว่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินในทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างเชิงกิ่งทำให้แอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างช้าๆ ในระหว่างการเก็บรักษา (Miles et al., 1985; Ring et al., 1987) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Méndez-Montevalvo et al. (2006) ซึ่งติดตามการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการนิกซ์ทามาไลเซชัน และรายงานว่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น

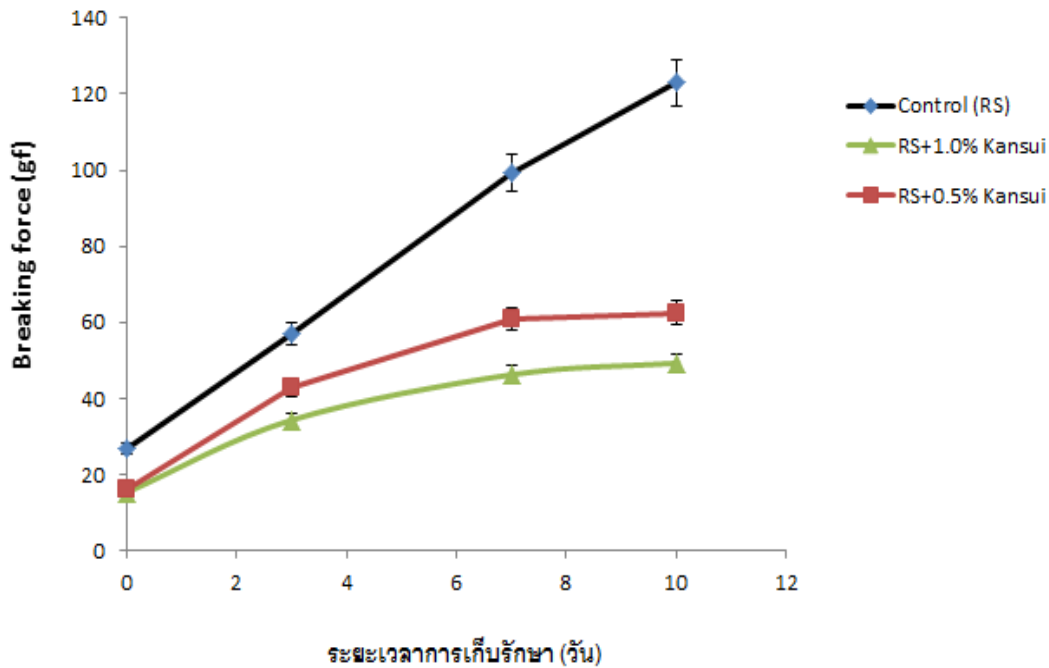
Méndez-Montevalvo et al. (2006) ติดตามเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการนิกซ์ทามาไลเซชันด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยเก็บรักษาเจลสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 และ 14 วัน และรายงานว่าสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการนิกซ์ทามาไลเซชันมีค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินลดลง เช่นเดียวกับรายงานของ Karim et al. (2008) ซึ่งพบว่าสตาร์ชสาकुที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ Nor Nadiha et al. (2010) ยังรายงานผลในทำนองเดียวกันสำหรับสตาร์ชสาकु สตาร์ชมันฝรั่ง และสตาร์ชข้าวโพดที่แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

#### 4.3.4 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก

ในงานวิจัยนี้ได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าโดยการวัดแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกเมื่อเก็บตัวอย่างเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 3, 7 และ 10 วัน ค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกแสดงดังภาพที่ 4.3

ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมคันชูยมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของคันชูยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 4.11) ในระหว่างที่เพสต์หรือเจลสตาร์ชเย็นตัวลง โมเลกุลสตาร์ชทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจะกลับมารวมตัวกันใหม่ (reassociation) และเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่ารีโทรเกรเดชัน (Atwell et al., 1988) อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างที่แตกต่างกันของโมเลกุลสตาร์ชทั้งสองชนิด ทำให้แอมิโลสและแอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกรเดชันในอัตราที่ต่างกัน แอมิโลสมีโครงสร้างเชิงเส้นจึงเกิดการรวมตัวกันใหม่ได้เร็ว ซึ่งโดยทั่วไปแอมิโลสในเพสต์หรือเจลสตาร์ชจะเกิดรีโทรเกรเดชันเกือบสมบูรณ์ในระหว่างที่เพสต์หรือเจลสตาร์ชนั้นเย็นตัวลง ในขณะที่แอมิโลเพกทินมีโครงสร้างเชิงกิ่งซึ่งส่งผลให้มีการขัดขวางเชิงโครงสร้าง แอมิโลเพกทินจึงเกิดรีโทรเกรเดชันในอัตราที่ช้ากว่า และเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากแบ่งในระหว่างการเก็บรักษา (Miles et al., 1985; Ring et al., 1987) ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าคันชูย สามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินซึ่งช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจล สตาร์ชข้าวเจ้าในระหว่างการเก็บรักษาได้



ภาพที่ 4. 1 แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก (breaking force) ของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (RS) ที่เติมคันชูยที่ ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยเก็บรักษาเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 0-10 วัน

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Karim et al. (2008) ซึ่งศึกษาผลของการแช่ สตาร์ชสาकुด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 และ 0.5% เมื่อนำเจลสตาร์ชไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน พบว่าเจลสตาร์ชสาकुที่ผ่านการแช่ในต่างมีค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ต่ำกว่า ตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานว่าเจลที่ผลิตจากสตาร์ชที่แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% มีความแน่นเนื้อต่ำกว่าเจลที่ผลิตจากสตาร์ชที่แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1% ใน ทำนองเดียวกันกับรายงานวิจัยของ Rodriguez et al. (1996) ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แช่เมล็ด ข้าวโพดต่อความแน่นเนื้อของทอร์ทิญญาลาวาร์ข้าวโพด โดยแปรความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 6 ระดับ ได้แก่ 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.5% และรายงานว่าความแน่นเนื้อของทอร์ทิญญามีค่าลดลงเมื่อความ เข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น

#### 4.3.5 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคันชูเข้มข้น 0.5 และ 1.0% พบว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมคันชู 0.5% (วันที่ 0) มีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอ้อนที่มีประจุบวกและหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคันชูเป็น 1.0% พบว่าเจลที่ได้มีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งต่ำกว่าเจลที่เติมคันชู 0.5% ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ต่างที่ความเข้มข้นสูงสามารถทำให้เกิดดีเกรเดชันพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลสตาร์ช นอกจากนี้ยังพบว่าทุกตัวอย่างมีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 4.11) และแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออก (ภาพที่ 4.3)

ตารางที่ 4. 2 ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมต่างและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ปริมาณของส่วนเสมือนของแข็ง (%)			
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)			
	0	3	7	10
Control (RS)	0.71±0.03 <sup>c</sup>	1.47±0.03 <sup>b</sup>	2.11±0.07 <sup>b</sup>	2.43±0.02 <sup>c</sup>
RS+ 0.5% <i>Kansui</i>	1.32±0.06 <sup>a</sup>	1.67±0.05 <sup>a</sup>	2.59±0.10 <sup>a</sup>	3.00±0.11 <sup>a</sup>
RS+1.0% <i>Kansui</i>	0.95±0.02 <sup>b</sup>	1.44±0.02 <sup>b</sup>	1.86±0.07 <sup>c</sup>	2.71±0.11 <sup>b</sup>

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 2 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยในสมมุติเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของพรีไบโอติก สารลดแรงตึงผิว และต่าง ต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า ในการศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับพฤติกรรมที่เกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าชนิดของพรีไบโอติก (FOS และ inulin) มีผลค่อนข้างน้อยต่อสมบัติการเกิดเพสต์ ได้แก่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity, setback viscosity และ pasting temperature ในขณะที่ความเข้มข้นของพรีไบโอติกมีผลต่อสมบัติการเกิดเพสต์ โดยการเติมพรีไบโอติกทำให้ pasting temperature เพิ่มขึ้น แต่มีผลให้ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback

viscosity มีค่าลดลง สำหรับผลที่มีต่อการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมพรีไบโอติกทำให้อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และทำให้เอนทาลปีของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงเล็กน้อย ในแง่การเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าตัวอย่างที่เติม inulin เข้มข้น 10% มีเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินต่ำที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติม inulin เข้มข้น 10% มีผลชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพรีไบโอติกที่ใช้พบว่าการเติม inulin ช่วยชะลอการเกิดเป็นผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทินได้ดีกว่าการเติม FOS สำหรับแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชให้แตกออก ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแรงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และสำหรับปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง พบว่าตัวอย่างที่เติมพรีไบโอติกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นของแข็งที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าความสามารถของพรีไบโอติกในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชน่าจะเป็นผลมาจากการที่พรีไบโอติกสามารถเกิดอันตรกิริยากับสตาร์ช ซึ่งมีผลขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชด้วยกันเองและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ของสตาร์ชโดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมิโลเพกทิน

ในการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับพฤติกรรมที่เกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าการเติม SSL และ GMS มีผลทำให้ peak viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชันมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติม SSL ที่ความเข้มข้น 1.0% อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่มีผลต่ออุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน สำหรับเอนทาลปีการเกิดเจลลาทีโนเซชัน พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปี ยกเว้นการเติม SSL ที่ความเข้มข้น 0.5% ซึ่งมีผลทำให้เอนทาลปีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยการวัดอุณหภูมิและเอนทาลปีในการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน พบว่าสำหรับการเติม SSL มีผลทำให้อุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับตัวอย่างที่เติม GMS พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นพิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมผลึกแอมิโลเพกทิน ในด้านแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้าให้แตกออก พบว่าตั้งแต่วันที่ 7 ของการเก็บรักษาตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ส่วนในด้านปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง พบว่าตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวมีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ปริมาณส่วนเสมือนของแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสารลดแรงตึงผิวกับสตาร์ช จากผลการทดลองที่ได้นี้ ชี้ให้เห็นว่าความสามารถของสารลดแรงตึงผิวในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชน่าจะเป็นผลมาจากการที่สารลดแรงตึงผิวสามารถ

เกิดอันตรกิริยากับสตาร์ช จึงมีผลขัดขวางการจับกันของโมเลกุลของสตาร์ชด้วยตัวเองและช่วยชะลอการเกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ของสตาร์ช

ในการศึกษาผลของต่างต่อสมบัติของเพสต์และเจลสตาร์ชข้าวเจ้า สำหรับพฤติกรรมการเกิดเพสต์ของสตาร์ชข้าวเจ้า พบว่าตัวอย่างที่เติมคั้นซุยมี pasting temperature สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ peak viscosity, breakdown viscosity, final viscosity และ setback viscosity มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในด้านอุณหภูมิและเอนทาลปีของการเกิดเจลที่โนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมคั้นซุยต่าง พบว่าการเติมคั้นซุยมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลที่โนเซชัน รวมทั้งเอนทาลปีของการเกิดเจลที่โนเซชัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ในการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าตัวอย่างที่เติมคั้นซุยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินเพิ่มขึ้น แต่เอนทาลปีของการหลอมผลึกแอมิโลเพกทินมีค่าลดลง ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม สำหรับแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลสตาร์ชให้แตกออก พบว่าเจลสตาร์ชที่เติมคั้นซุยมีค่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างเจลให้แตกออกมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของคั้นซุยเพิ่มขึ้น และในการวิเคราะห์ปริมาณส่วนเสมือนของแข็ง พบว่า ณ วันที่ 0 ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมคั้นซุย 0.5% มีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคั้นซุยเป็น 1.0% พบว่าเจลที่ได้มีปริมาณส่วนเสมือนของแข็งต่ำกว่าเจลที่เติมคั้นซุย 0.5% และเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่างมีปริมาณของส่วนเสมือนของแข็งเพิ่มขึ้น ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าคั้นซุยสามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินซึ่งช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าในระหว่างการเก็บรักษาได้

## บรรณานุกรม

- ชนจันทร์ มหาวนิช. 2554. การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบอาหาร. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข* 39: 409-420.
- ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ธงชัย สุวรรณสิขณน์, วิชัย หทัยธนาสันดี, และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2546. พฤติกรรมด้านความหนืดและคุณสมบัติทางกลของแป้งท้าวยายม่อม (*Tacca Leontopetaloides* Ktze). ใน: *เรื่องเต็มในการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 4*. หน้า 53-60.
- สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. 2556. คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี [ออนไลน์]. จาก: <http://www.brrd.in.th/rkb/product/index.php-file=content.php&id=3.htm> [25 กรกฎาคม 2560]
- Achayuthakan, P., and M. Suphantharika. 2008. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum. *Carbohydrate Polymers* 71: 9-17.
- Alam, F., A. Siddiqui, Z. Lutfi, and A. Hasnain. 2009. Effect of different hydrocolloids on gelatinization behaviour of hard wheat flour. *Trakia Journal of Science* 7: 1-6.
- AOAC. 2006a. AOAC method no 925.10. In: W. Horwitz and G. W. Latimer (eds.) *Official Methods of Analysis of the AOAC International*, 18th ed. AOAC International, Washington, D.C.
- AOAC. 2006b. AOAC method no 920.87. In: W. Horwitz and G. W. Latimer (eds.) *Official Methods of Analysis of the AOAC International*, 18th ed. AOAC International, Washington, D.C.
- Babic, J. et al. 2006. Effects of pectin and carrageenan on thermophysical and rheological properties of tapioca starch. *Czech Journal of Food Sciences* 24: 275-282.
- Bahnassey, Y. A., and W. M. Breene. 1994. Rapid Visco-Analyzer (RVA) pasting profiles of wheat, corn, waxy corn, tapioca and amaranth starches (*A. hypochondriacus* and *A. cruentus*) in the presence of konjac flour, gellan, guar, xanthan and locust bean gums. *Starch/Stärke* 46: 134-141
- Banchathanakij, R., and M. Suphantharika. 2009. Effect of different  $\beta$ -glucans on the gelatinisation and retrogradation of rice starch. *Food Chemistry* 114: 5-14.
- Bao, J. S. 2008. Accurate measurement of pasting temperature by the Rapid Visco Analyser: A case study using rice flour. *Rice Science* 15: 69-72.



- Baranowska, H., M. Sikora, S. Kowalski, and P. Tomasik. 2008. Interactions of potato starch with selected polysaccharide hydrocolloids as measured by low-field NMR. *Food Hydrocolloids* 22: 336-345.
- BeMiller, J. N. 2011. Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers* 86: 386-423.
- Biliaderis, C. G. 2009. Structural transitions and related physical properties of starch. In: J. BeMiller and R. Whistler (eds.) *Starch: Chemistry and Technology*, 3<sup>rd</sup> ed. Elsevier Science & Technology, UK.
- Biliaderis, C. G., I. Arvanitoyannis, M. S. Izydorcik, and D. J. Prokopowich. 1997. Effect of hydrocolloid on gelatinization and structure formation in concentrated waxy maize and wheat starch gel. *Starch/Stärke* 49: 278-283.
- Chaisawang, M., and M. Suphantharika. 2006. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids* 20: 641-649.
- Christianson, D. D., J. E. Hodge, D. Osborn, and R. W. Detroy. 1981. Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum and cellulose gum. *Cereal Chemistry* 58: 513-517.
- Eugenia, B. M., and C. M. Rosell. 2005. Effect of HPMC addition on the microstructure, quality and aging of wheat bread. *Food Hydrocolloids* 19: 1037-1043.
- Funami, T. et al. 2005a. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food Hydrocolloids* 19: 1-13.
- Funami, T. et al. 2005b. Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2b. Functions of guar gums with different molecular weights on the retrogradation behavior of corn starch. *Food Hydrocolloids* 19: 25-36.
- Gaonkar, A. G. 1995. *Ingredient Interactions: Effects on Food Quality*. Marcel Dekker, New York, NY.
- Karim, A. A. et al. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sago*) starch. *Food Hydrocolloids* 22: 1044-1053.
- Kim, H.-S., and J. N. BeMiller. 2012. Effects of hydrocolloids on the pasting and paste properties of commercial pea starch. *Carbohydrate Polymers* 88: 1164-1171.

- Lanier, T. C. 1992. Measurement of surimi composition and functional properties. In: Lanier and C. M. Lee (eds.) In *Surimi Technology*; T.C. Marcel Dekker, New York.
- 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 Hydrocolloids* 16: 345-352.
- Leite, T. D., J. F. Nicoletti, A. L. B. Penna, and L. M. C. Franco. 2012. Effect of addition of different hydrocolloids on pasting, thermal, and rheological properties of cassava starch. *Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas* 32: 579-587.
- Liu, H., N. A. M. Eskin, and S. W. Cui. 2003. Interaction of wheat and rice starches with yellow mustard mucilage. *Food Hydrocolloids* 17: 863-869.
- Lumdubwong, N., and P. A. Seib. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. *Journal of Cereal Science* 31: 63-74.
- Mali, S. et al. 2003. Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Dioscorea alata*) starch pastes stability. *LWT - Food Science and Technology* 36: 475-481.
- Marshall, W. E., and J. I. Wadsworth. 1994. *Rice Science and Technology*. Marcel Dekker, New York, NY.
- Miles, M. J., V. J. Morris, P. D. Orford, and S. G. Ring. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydrate Research* 135: 271-281.
- Muadklay, J., and S. Charoenrein. 2008. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. *Food Hydrocolloids* 22: 1268-1272.
- Naruenartwongsakul, S., M. S. Chinnan, S. Bhumiratana, and T. Yoovidhya. 2004. Pasting characteristics of wheat flour-based batters containing cellulose ethers. *LWT- Food Science and Technology* 37: 489-495.
- Pongsawatmanit, R., and S. Srijunthongsiri. 2008. Influence of xanthan gum on rheological properties and freeze-thaw stability of tapioca starch. *Journal of Food Engineering* 88: 137-143.
- Ribotta, P. D., and A. Le Bail. 2007. Thermo-physical assessment of bread during staling. *LWT- Food Science and Technology* 40: 879-884.

- Ring, S. G. et al. 1987. The gelation and crystallization of amylopectin. *Carbohydrate Research* 162: 277-293.
- Rojas, J. A., C. M. Rosell, and C. Benedito de Barber. 1999. Pasting properties of different wheat flour-hydrocolloid systems. *Food Hydrocolloids* 13: 27-33.
- Sajjan, S. U., and M. R. R. Rao. 1987. Effect of hydrocolloids on the rheological properties of wheat starch. *Carbohydrate Polymers* 7: 395-402.
- Samutsri, W., and M. Supphantharika. 2012. Effect of salts on pasting, thermal, and rheological properties of rice starch in the presence of non-ionic and ionic hydrocolloids. *Carbohydrate Polymers* 87: 1559-1568.
- Satin, M. 2012. Functional properties of starches. [Online] . Available from: [www.fao.org/ag/magazine/pdf/starches.pdf](http://www.fao.org/ag/magazine/pdf/starches.pdf). [2017, July 19]
- Satrapai, S., and M. Supphantharika. 2007. Influence of spent brewer's yeast  $\beta$ -glucan on gelatinization and retrogradation of rice starch. *Carbohydrate Polymers* 67: 500-510.
- Seetapan, N. et al. 2013. Effect of modified tapioca starch and xantangum on low temperature stability and viscoelasticity of a starch-based food gel. *Journal of Food Engineering* 119: 446-453.
- Subaric, D. et al. 2011. Effect of galactomannan hydrocolloids on gelatinization and retrogradation of tapioca and corn starch. *Croatian Journal of Food Science and Technology* 3: 26-31.
- Takeda, Y., S. Hizukuri, and B. O. Juliano. 1987. Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research* 168: 79-88.
- Techawipharat, J., M. Supphantharika, and J. N. BeMiller. 2008. Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches. *Carbohydrate Polymers* 73: 417-426.
- Temsiripong, T., R. Pongsawatmanit, S. Ikeda, and K. Nishinari. 2005. Influence of xyloglucan on gelatinization and retrogradation of tapioca starch. *Food Hydrocolloids* 19: 1054-1063.
- Vold, R. L., J. S. Waugh, M. P. Klein, and D. E. Phelps. 1968. Measurement of spin relaxation in complex systems. *The Journal of Chemical Physics* 48: 3831-3832.

Yao, Y., and X. Ding. 2002. Pulsed nuclear magnetic resonance (PNMR) study of rice starch retrogradation. *Cereal Chemistry* 79: 751-756.

Zhou, Y., D. Wang, L. Zhang, X. Du, and X. Zhou. 2008. Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *Food Hydrocolloids* 22: 505-512.

## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกในสาขา Food Science จาก University of Illinois at Urbana-Champaign ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสังกัดภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลงานทางวิชาการที่เป็นปัจจุบันดังปรากฏในเว็บไซต์ <http://foodtech.sc.chula.ac.th>

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมัลย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกในสาขา Food Science จาก University of Leeds ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสังกัดภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลงานทางวิชาการที่เป็นปัจจุบันดังปรากฏในเว็บไซต์ <http://foodtech.sc.chula.ac.th>