รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

โดย ดร. เทพกัญญา หาญศีลวัต

กรกฎาคม 2555

สัญญาเลขที่ MRG 5180086

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

ผู้วิจัย	สังกัด
ดร. เทพกัญญา หาญศีลวัต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ. ดร. รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ และ สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต นักวิจัยที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ไม่เพียงเฉพาะแต่เรื่องงานวิจัยเท่านั้น แต่ยังเป็นเรื่องการทำงานต่างๆ อีกด้วย ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และบริษัทเอฟเอ็มซี เคมิคัล (ประเทศไทย) จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์คาร์ราจีแนนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เทพกัญญา หาญศีลวัต

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5180086

ชื่อโครงการ : การศึกษาผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

ชื่อนักวิจัย : ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต

E-mail Address : thepkunya.h@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 15 พฤษภาคม 2551 – 31 ธันวาคม 2553

แป้งมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง มีสมบัติในการให้ความหนืดสูง เจลที่ได้ใส และไม่มีกลิ่นรส แป้งที่ผลิตส่วนใหญ่ในประเทศยังเป็นแป้งมันสำปะหลังดิบ จึงยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ เช่น ความไม่คงทนต่อแรงเฉือน ความไม่คงตัวต่อสภาวะในการแปรรูป ดังนั้นจึงมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของแป้งดิบ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของคาร์ราจีแนนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง รวมทั้งศึกษาผลของเกลือและซูโครสต่อสมบัติบางประการของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน จากการศึกษาสมบัติทางภายภาพต่างๆ ในระบบสารผสมที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 พบว่า ชนิดของคาร์ราจีแนนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง โดยตัวอย่างที่มีไอออตา-คาร์ราจีแนนจะมีค่าความหนืดสูงสุดที่วัดจากเครื่อง RVA สูงกว่าทั้งตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและตัวอย่างที่มีเพียงแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว การเติมคาร์ราจีแนนในตัวอย่างทำให้ค่า breakdown ลดลง ทั้งยังช่วยลดค่า setback ให้มีค่าต่ำลงกว่าตัวอย่างที่มีเพียงแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้ คาร์ราจีแนนมีผลให้ค่าการพองตัวของตัวอย่างที่มีแป้งมันสำปะหลังลดลง เมื่อพิจารณาผลของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อสมบัติรีโอโลจีของแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติวิสโคอิลาสติก พบว่า ตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนแสดงพฤติกรรมของเจลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเติมคาร์ราจีแนนมีผลต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลัง โดยแคปปา-คาร์ราจีแนนทำให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ไอออตา-คาร์ราจีแนนไม่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งนี้ นอกจากนี้เมื่อศึกษาสมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง พบว่า ทั้งแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอออตา-คาร์ราจีแนนสามารถช่วยลดการแยกตัวของน้ำเมื่อวงจรการแช่แข็งและการละลายเพิ่มขึ้นได้ ในระบบที่มีเกลือชนิดต่างๆ (NaCl, KCl, $CaCl_2$) พบว่า การเติมเกลือทำให้สมบัติเพสติงในด้านต่างๆ ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่มีคาร์ราจีแนนเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้การเติม KCl มีผลต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนมากที่สุดโดยทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นมาก สำหรับสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและมีเกลือพบว่า ตัวอย่างทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยในตัวอย่างที่มี NaCl หรือ $CaCl_2$ ทำให้ค่าความหนืดลดลงเล็กน้อย แต่ในตัวอย่างที่มี KCl ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่มีเกลือ พบว่า สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงและสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน พบว่า ทั้งในตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอออตา-คาร์ราจีแนน จะมีอุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มซูโครสทำให้สมบัติเพสติงในด้านต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสพบว่า เมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังดิบได้

คำหลัก: แป้งมันสำปะหลัง คาร์ราจีแนน เกลือ ซูโครส

Abstract

Project Code : MRG5180086

Project Title : Study of effects of carrageenan, salt, and sucrose on changes of tapioca starch properties

Investigator : Dr.Thepkunya Harnsilawat, Kasetsart University

E-mail Address : thepkunya.h@ku.ac.th

Project Period : 15 May 2008 – 31 December 2010

Tapioca starch (TS) obtained from cassava roots has the properties that give high viscosity, clear appearance and has no flavour. In Thailand, tapioca starch product are mainly native type therefore there are limitation in use such as low stability against shear or processing conditions. Blending starch with other hydrocolloids is a well-known technique to modify some properties of native starch. In this study we studied the effect of carrageenan (CAR) on changes of tapioca starch properties including the effect of salt and sucrose on selected properties of TS and CAR mixtures. From the study of physical properties in TS/CAR mixtures at various ratios (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 and 9/1), the results showed that type of CAR had an effect on physical properties of TS. Sample contained iota-carrageenan (iCAR) gave higher peak viscosity values obtained from RVA than those of whether sample contained kappa-carrageenan (kCAR) or TS. Samples contained CAR showed lower breakdown and setback values than that of TS alone. Moreover, CAR had an effect on swelling power of TS by lowering this value. When considering the effect of kCAR on rheological properties of TS, it found that all samples showed shear-thinning behaviour. When considering the viscoelastic properties, it found that sample contained kCAR showed gel-like property at 25°C. Addition of CAR had an effect on textural properties of TS. kCAR could increase the hardness of samples while iCAR could not. When studied freeze-thaw stability, the results showed that both kCAR and iCAR could reduce the water separation after increasing freeze-thaw cycles. In the systems containing salts (NaCl, KCl, $CaCl_2$), it found that the addition of salts had an effect on pasting properties of the sample contained kCAR by increasing final viscosity. For the viscosity of the sample contained kCAR and salts, it found that all samples exhibited shear-thinning behaviour. Either NaCl or $CaCl_2$ could decrease the viscosity of sample, while the viscosity of sample contained KCl was increased. When considering textural properties of samples contained salts, the results showed that the textural properties were changed. From the study of the effect of sucrose on pasting properties and textural properties of TS/CAR mixtures, it found that pasting temperatures of either TS/kCAR or TS/iCAR increased when increasing sucrose. Increasing sucrose content resulted in increased pasting property values. Considering textural properties, it found that when sucrose was increased, textural property values were trended to increase. The knowledge gained from this research could be applied in the development of products containing native tapioca starch.

Keywords : tapioca starch, carrageenan, salt, sucrose

สารบาญ

หน้า

สารบาญ	i
สารบาญตาราง	ii
สารบาญภาพ	iii
Executive Summary	vi
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	3
วิธีการทดลอง	4
ผลการทดลองและวิจารณ์	12
สรุปผลการทดลอง	38
เอกสารอ้างอิง	39
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	42
ภาคผนวก	43

สารบาญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน	13
2	ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนระดับต่างๆ กัน โดยมีความเข้มข้นของพอลิแซคคาร์ไรด์ 5%	21
3	ผลของเกลือต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%	29
4	ผลของเกลือต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%	30
5	อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน	32
6	อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและไอออตา-คาร์ราจีแนน	33
7	ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน	36
8	ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและไอออตา-คาร์ราจีแนน	36

สารบาญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน	5
2	วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนในระบบที่มีเกลือ 10	
3	วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนในระบบที่มีซูโครส	11
4	สมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5%	15
5	ค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆกัน (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 1%	16
6	ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50ºC ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆกัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5%	17
7	ผลของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อค่า G′ และ G″ ของแป้งมันสำปะหลังที่เจลาติไนซ์แล้วที่อัตราส่วนต่างๆกัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% และทำการวัดค่าที่อุณหภูมิ 25 และ 50ºC ที่ 1% strain	19
8	ผลของคาร์ราจีแนนต่อปริมาณการแยกตัวของน้ำในสารผสมของแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5%	22
9	RVA profiles ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 10/0(a), 9.5/0.5(b) และ 9/1(c) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ที่มีเกลือชนิดต่างๆที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1%	24
10	RVA profiles ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 10/0(a), 9.5/0.5(b) และ 9/1(c) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ที่มีเกลือชนิดต่างๆที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1%	25
11	อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ (Pasting temperature) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$	26

สารบาญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$	27
13	ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$	27
14	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือนต่อค่าความหนืดของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% อันเป็นผลจากการเติม NaCl (a-c), KCl (d-f) และ $CaCl_2$ (g-i)	28
15	ผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5%; (a) peak viscosity, (b) breakdown, (c) final viscosity และ (d) setback	32
16	ผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/iCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5%; (a) peak viscosity, (b) breakdown, (c) final viscosity และ (d) setback	34
17	ผลของซูโครสต่อค่า hardness ของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ และมีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์ 5%; (a) แคปปา-คาร์ราจีแนน และ (b) ไอออตา-คาร์ราจีแนน	37

Executive Summary

แป้งมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง มีสมบัติในการให้ความหนืดสูง เจลที่ได้ใส ไม่มีกลิ่นรสจึงไม่รบกวนกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตส่วนใหญ่เป็นแป้งมันสำปะหลังที่คงสมบัติตามปกติหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (native starch) โดยไม่ได้ผ่านการดัดแปรหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ จึงยังมีข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังดิบในระดับอุตสาหกรรม เช่น ความไม่คงทนต่อแรงเฉือน ความไม่คงตัวต่อสภาวะต่างๆ ระหว่างการแปรรูป รวมถึงสภาวะในการเก็บรักษา ดังนั้นจึงมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของแป้งดิบ ไฮโดรคอลลอยด์เป็นไบโอพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติทั้งจากพืชและสัตว์ เมื่อไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่ละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำจะทำให้สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และรสชาติที่ดีกว่า รวมถึงให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวที่ดีตลอดอายุการเก็บ ทั้งนี้การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกับแป้งมันสำปะหลังจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนต่อสภาวะการแปรรูปและการเก็บรักษาต่างๆ ได้ดีขึ้น คาร์ราจีแนนเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายสีแดง คาร์ราจีแนนมี 3 ชนิด (kappa, iota, lambda) ซึ่งมีความแตกต่างกันเนื่องจากปริมาณและตำแหน่งของหมู่ ester sulphate และปริมาณ 3,6-anhydro-D-galactose ทำให้คาร์ราจีแนนแต่ละชนิดมีสมบัติในการเกิดเจลต่างคาร์ราจีแนนมีสมบัติช่วยลดการแยกตัวของน้ำจากเจล และช่วยเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์ต่อวงจรการแช่แข็งและการละลายได้ นอกจากนี้ ในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีส่วนประกอบอื่น เช่น เกลือและน้ำตาล ซึ่งมีผลต่อสมบัติบางประการของของผสมระหว่างแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของคาร์ราจีแนน เกลือและน้ำตาลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลังยังมีไม่มาก อย่างไรก็ตาม ความรู้ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังได้จึงได้ดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาผลของคาร์ราจีแนนโดยแปรเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนในระบบที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์คงเดิม และศึกษาผลของเกลือชนิดต่างๆ และซูโครส ต่อสมบัติบางประการของสารผสมดังกล่าว

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ในระบบสารผสมที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 พบว่า ชนิดของคาร์ราจีแนนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง โดยตัวอย่างที่มีไอออตา-คาร์ราจีแนนจะมีค่าความหนืดสูงสุดที่วัดจากเครื่อง RVA สูงกว่าทั้งตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและตัวอย่างที่มีเพียงแป้งมัน

สำปะหลังเพียงอย่างเดียว การเติมคาร์ราจีแนนในตัวอย่างทำให้ค่า breakdown ลดลง ทั้งยังช่วยลดค่า setback ให้มีค่าต่ำลงกว่าตัวอย่างที่มีเพียงแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้ คาร์ราจีแนนมีผลให้ค่าการพองตัวของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังลดลง เมื่อพิจารณาผลของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อสมบัติรีโอโลจีของแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติวิสโคอิลาสติก พบว่า ตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนแสดงพฤติกรรมของเจลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเติมคาร์ราจีแนนมีผลต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลัง โดยแคปปา-คาร์ราจีแนนทำให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ไอออตา-คาร์ราจีแนนไม่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งนี้ นอกจากนี้เมื่อศึกษาสมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง พบว่า ทั้งแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอออตา-คาร์ราจีแนนสามารถช่วยลดการแยกตัวของน้ำเมื่อวงจรการแช่แข็งและการละลายเพิ่มขึ้นได้

เมื่อพิจารณาตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนในระบบที่มีเกลือชนิดต่างๆ (NaCl, KCl, $CaCl_2$) พบว่า การเติมเกลือทำให้สมบัติเพสติงในด้านต่างๆ ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่มีคาร์ราจีแนนเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้การเติม KCl มีผลต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนมากที่สุดโดยทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นมาก สำหรับสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและมีเกลือ พบว่า ตัวอย่างทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยในตัวอย่างที่มี NaCl หรือ $CaCl_2$ ทำให้ค่าความหนืดลดลงเล็กน้อย แต่ในตัวอย่างที่มี KCl ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่มีเกลือ พบว่า สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงและสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน พบว่า ทั้งในตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอออตา-คาร์ราจีแนน จะมีอุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การเพิ่มซูโครสทำให้สมบัติเพสติงในด้านต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสพบว่า เมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังดิบได้

บทนำ

แป้งมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการค้านอกเหนือไปจากแป้งข้าวโพด (Moorthy, 2004) โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ซอส ซุป ไอศกรีม เส้นก๋วยเตี๋ยว พุดดิ้ง อาหารกระป๋อง และอาหารแช่แข็ง เป็นต้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติในการให้ความหนืดสูง เจลที่ได้ใส ไม่มีกลิ่นรสจึงไม่รบกวนกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตแป้งมันในปริมาณมากและมีแนวโน้มที่จะผลิตเพิ่มขึ้น (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550; Sriroth et al., 2007) ทั้งนี้พบว่า ในปี 2554 ที่ผ่านมา ประเทศไทยมีผลผลิตมันสำปะหลัง 21,912,416 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554) แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตส่วนใหญ่เป็นแป้งมันสำปะหลังที่คงสมบัติตามปกติหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (native starch) โดยไม่ได้ผ่านการดัดแปรหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เมื่อพิจารณาสมบัติของแป้ง มักถูกนำไปใช้เพื่อให้เกิดสมบัติที่ต้องการบางชนิด เช่น เพิ่มความข้นหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังดิบเพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เช่น ความไม่คงทนต่อแรงเฉือน ความไม่คงตัวต่อสภาวะต่างๆ ระหว่างการแปรรูป (เช่น ความเป็นกรดด่าง การให้ความร้อน หรือ ผลของการเติมส่วนผสม เช่น เกลือ น้ำตาลต่อสมบัติของแป้ง) รวมถึงสภาวะในการเก็บรักษา ดังนั้นจึงมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของแป้งดิบ ไฮโดรคอลลอยด์เป็นไบโอพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติทั้งจากพืชและสัตว์ เช่น คาร์ราจีแนนหรืออัลจิเนตจากสาหร่าย กลูโคแมนแนนจากหัวบุก ไคโตซานจากเปลือกกุ้งหรือเปลือกปู เป็นต้น เมื่อไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่ละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำจะทำให้สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และรสชาติที่ดีกว่า รวมถึงให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวที่ดีตลอดอายุการเก็บ (เช่น ความคงตัวต่อสภาวะการเก็บแช่แข็ง) ทั้งนี้การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกับแป้งมันสำปะหลังจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนต่อสภาวะการแปรรูปและการเก็บรักษาต่างๆ ได้ดีขึ้น (Pongsawatmanit et al., 2006; Pongsawatmanit et al., 2007; Sae-Kang and Suphantharika, 2006; Temsiripong et al., 2005)

จากสมบัติที่ดีของไฮโดรคอลลอยด์ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบ คาร์ราจีแนนเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายสีแดง มี

galactose backbone เชื่อมต่อกับ alternating glycosidic linkages คาร์ราจีแนนมี 3 ชนิด (kappa, iota, lambda) ซึ่งมีความแตกต่างกันเนื่องจากปริมาณและตำแหน่งของหมู่ ester sulphate และปริมาณ 3,6-anhydro-D-galactose ทำให้คาร์ราจีแนนแต่ละชนิดมีสมบัติในการเกิดเจลต่างกัน คาร์ราจีแนนมีสมบัติในการเกิดเจลเมื่อมีการเติมอิออนเช่น K^+ Ca^{2+} เป็นตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนี้คาร์ราจีแนนยังช่วยลดการแยกตัวของน้ำจากเจล (syneresis) และช่วยเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์ต่อวงจรการแช่แข็งและการละลายได้ (Thomas, 1997) ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้คาร์ราจีแนนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ไอศกรีม พุดดิ้ง นม ขนมหวานที่มีลักษณะเป็นเจล เจลลี ซอส เป็นต้น (Piculell, 1995)

นอกจากนี้ ในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีส่วนประกอบอื่น เช่น เกลือและน้ำตาล ซึ่งมีผลต่อสมบัติบางประการของของผสมระหว่างแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ (Funami et al., 2008; Pongsawatmanit et al., 2007; Viturawong et al., 2008) ทั้งนี้ Funami และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาระบบแป้งข้าวโพดผสมไอออตา-คาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นต่ำ (แป้ง 0.5% และไอออตา-คาร์ราจีแนน 0.2%) โดยมีการศึกษาผลของเกลือหลายชนิดร่วมด้วย พบว่า หน้าที่ของไอออตา-คาร์ราจีแนนขึ้นกับชนิดของเกลือที่ถูกเติมลงไป นอกจากนี้ Viturawong และคณะ (2008) ยังได้ทำการศึกษาระบบแป้งข้าวเจ้าผสมแซนแทนกัมที่มีการปรับเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุลร่วมกับการเติมเกลือ NaCl หรือ $CaCl_2$ พบว่า การเติมเกลือมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง และยังมีผลต่อสมบัติทางรีโอโลจีของตัวอย่างอีกด้วย เมื่อพิจารณาผลของน้ำตาล Pongsawatmanit และคณะ (2007) ได้รายงานผลของระบบสารผสมของแป้งมันสำปะหลังร่วมกับไซโลกลูแคนโดยมีการเติมซูโครสลงไป พบว่า ซูโครสมีผลต่อสมบัติทางความร้อนและรีโอโลจีของตัวอย่าง โดยเมื่อในระบบมีปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันค่า loss tangent ของตัวอย่างมีค่าต่ำลงเมื่อมีปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้นแสดงถึงลักษณะคล้ายของแข็งที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลจากส่วนของซูโครสที่ละลายในระบบ เมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านความร้อน พบว่า ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ซูโครสยังเพิ่มค่า stiffness และ hardness ของตัวอย่างที่เป็นเจลอีกด้วย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และน้ำตาลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลังยังมีไม่มาก แต่ความรู้ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังได้ ในการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลังเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

2. เพื่อทราบผลของเกลือและซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

- แป้งมันสำปะหลัง (TS) ซื้อจากบริษัทสยาม ควอลิตี้ สตาร์ชจำกัด (ปทุมธานี, ประเทศไทย)
- แคปปา-คาร์ราจีแนน (Gelcarin® XP 3370) (kCAR) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอฟเอ็มซี เคมิคัล (ประเทศไทย) จำกัด
- ไอออตา-คาร์ราจีแนน (Viscarin® SD 389) (iCAR) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอฟเอ็มซี เคมิคัล (ประเทศไทย) จำกัด
- เกลือชนิดต่างๆ (NaCl, KCl และ $CaCl_2$) เป็น analytical grade ซื้อจากบริษัทเมอร์ค จำกัด (ประเทศไทย)
- ซูโครส เป็น analytical grade ซื้อจากบริษัท Fisher Scientific จำกัด

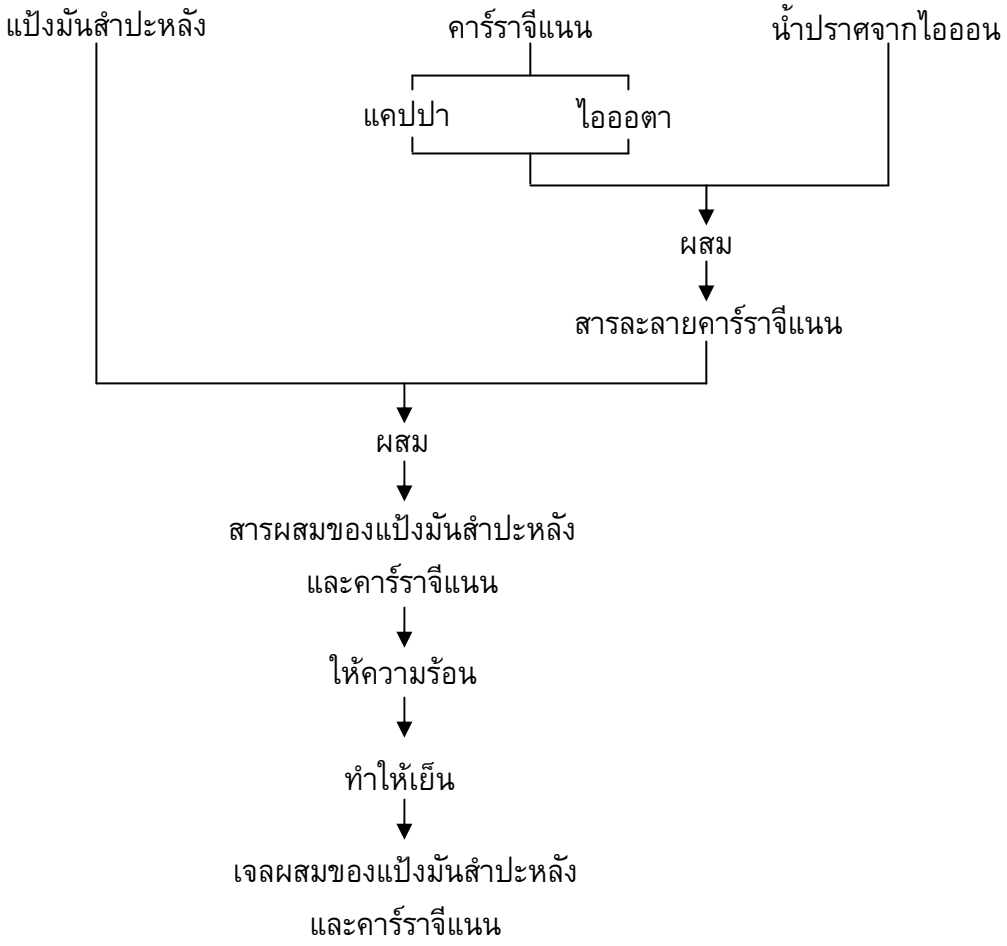
2. วิธีการ

2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

นำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณตามวิธีการของ AOAC (1995) การวิเคราะห์นี้ส่วนหนึ่งเป็นการทำเพื่อให้แน่ใจว่าองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าแป้งที่นำมาใช้จัดเป็น starch ไม่ใช่ flour สำหรับตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังมีการนำไปวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสด้วยวิธี HPSEC โดยการใช้เอนไซม์ alpha-amylase ตามวิธีการของ Govindasamy และคณะ (1992) สำหรับคาร์ราจีแนนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุได้แก่ Na, K, Ca และ Mg ด้วยเครื่อง AAS (Flame Technique)

2.2 การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

ชั่งตัวอย่างแป้งสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนหรือไอโอตา-คาร์ราจีแนน ค่อยๆ เติมคาร์ราจีแนนลงในน้ำที่ปราศจากไอออน ทำการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีสำหรับแคปปา-คาร์ราจีแนน และ 2 ชั่วโมงสำหรับไอออตา-คาร์ราจีแนน โดยให้มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ในอัตราส่วนที่ต่างกัน (แป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนน เท่ากับ 10/0, 9.5/0.5, 9/1) จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปวัดสมบัติในด้านต่างๆ ในการเตรียมตัวอย่างอาจมีการให้ความร้อน (อุณหภูมิใจกลางตัวอย่างมีค่า 95 °C เป็นเวลา 30 นาที) ทำให้เย็นและเทใส่พิมพ์ นำตัวอย่างเจลไปวัดสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสต่อไป (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน

2.2.1 สมบัติเพสติง (Pasting properties)

ทำการศึกษาสมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (Model RVA-4, Newport Scientific Pty, Ltd., Warriewood, NSW, Australia) ซึ่งต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ข้อมูล Thermocline นำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% ผสมกับน้ำปราศจากไอออน เตรียมใส่ใน RVA canister ให้มีน้ำหนักตัวอย่างรวม 28 กรัม ก่อนทำการวัดค่า ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะถูกกวนด้วยใบพัดพลาสติกเป็นเวลาเท่าๆ กัน (20-30 วินาที) เพื่อให้ตัวอย่างไม่ตกตะกอนก่อนนำใส่ในเครื่อง RVA ข้อมูลในการวัดค่าที่ใช้มีดังนี้ ช่วงเริ่มต้นให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิ 50 $^{\circ}$C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 95 $^{\circ}$C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 6 $^{\circ}$C ต่อนาที คงอุณหภูมิที่ 95 $^{\circ}$C นี้ไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิ 50 $^{\circ}$C ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 6 $^{\circ}$C ต่อนาที และคงอุณหภูมิที่ 50 $^{\circ}$C จนสิ้นสุดเวลาการวัดค่า เวลารวมในการวัดค่าทั้งหมดเท่ากับ 23 นาที ความเร็วในการกวนผสมระหว่างการวัดค่าในช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 960 รอบต่อนาที (10 วินาทีแรก) และ 160 รอบต่อนาที (ตลอดการทดลองที่เหลือ) (Pongsawatmanit and Srijunthongsiri, 2008) บันทึกค่าสมบัติเพสติงต่าง ๆ จากกราฟ RVA ที่ได้

2.2.2 ค่ากำลังการพองตัว (Swelling power)

ทำการศึกษาค่าการพองตัวของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนตามวิธีการของ Li และ Yeh (2001) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนที่เป็นผงตามอัตราส่วนต่างๆ ที่ศึกษา (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 1% ใส่ในหลอดเซนตริฟิวจ์ที่มีฝาปิดแบบเกลียว และเติมน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาต 10 มิลลิลิตร นำหลอดที่บรรจุตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (55-95 $^{\circ}$C) เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในเครื่อง shaking water bath ซึ่งมีการเขย่าไปด้วยเพื่อไม่ให้ตัวอย่างตกตะกอน ภายหลังการให้ความร้อน นำหลอดเซนตริฟิวจ์ที่บรรจุตัวอย่างมาทำให้เย็นแล้วจึงนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8000 g เป็นเวลา 20 นาที แยกส่วนใสที่ได้โดยเทออกจากหลอด ส่วนของตะกอนจะติดอยู่ที่ก้นหลอด นำไปชั่งน้ำหนักจะได้ค่า W_s สำหรับส่วนใสนำไปอบให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักจะได้ค่า W_l นำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นค่าดัชนีการละลาย (water soluble index, WSI) และค่ากำลังการพองตัว (swelling power, SP) ตามสมการข้างล่างนี้

$$WSI = [W_l/0.1] \times 100\% \quad (1)$$

$$SP = W_s/[0.1(100\% - WSI)] \ (g/g) \quad (2)$$

2.2.3 การวัดค่าความหนืด (Steady shear viscosity measurement)

นำตัวอย่างแป้งผสมคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ให้ความร้อน (จากเครื่อง RVA) จะได้ตัวอย่างที่เจลาติไนซ์แล้วมาเหวี่ยงที่แรง 190 g เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศ นำตัวอย่างมาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Physica MCR 300, Anton Paar GmbH, Stuttgart, Germany) โดยใช้หัววัดชนิด cone and plate (50 mm diameter, 1° cone angle และ 0.05 mm gap) ก่อนทำการวัด ตัวอย่างจะถูกรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 50 °C เพื่อป้องกันการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน และเมื่อบรรจุตัวอย่างใส่เครื่องมือวัดมีการรอให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C เป็นเวลา 15 นาทีก่อนเริ่มการวัดค่า ค่าความหนืดปรากฏที่ได้ทำการวัดโดยการเพิ่มค่าอัตราเฉือน (shear rate) จาก 0.1 ถึง 1000 s^{-1}

2.2.4 สมบัติวิสโคอิลาสติก (Dynamic viscoelastic properties)

นำตัวอย่างแป้งผสมคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ให้ความร้อน (จากเครื่อง RVA) จะได้ตัวอย่างที่เจลาติไนซ์แล้วมาเหวี่ยงที่แรง 190 g เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศ นำตัวอย่างมาวัดค่าด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Physica MCR 300, Anton Paar GmbH, Stuttgart, Germany) โดยใช้หัววัดชนิด cone and plate (50 mm diameter, 1° cone angle และ 0.05 mm gap) ก่อนทำการวัดตัวอย่างจะถูกรักษาอุณหภูมิที่ 50 °C เพื่อป้องกันการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่า dynamic moduli (storage modulus และ loss modulas) ที่ความถี่ต่างๆ ในช่วง 0.01-10 rad/s ที่อุณหภูมิ 2 ระดับคือ 25 และ 50 °C เพื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของตัวอย่างด้วย ในการวัดค่าได้กำหนดให้ค่าแรงที่ใช้คงที่ (1% strain) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วง linear viscoelastic region ได้จากการศึกษาเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลอง strain sweep ในการวัดค่ามีการหยดน้ำมัน (mineral oil) รอบๆ ขอบของตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำระหว่างการวัด บันทึกค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'')

2.2.5 สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (ดัดแปลงจากวิธีการของ Nunes, 2003)

เตรียมตัวอย่างสารผสมแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนสำหรับการวัดสมบัติด้านเนื้อสัมผัส โดยการนำคาร์ราจีแนนผสมกับสารแขวนลอยแป้งมันสำปะหลัง เติมน้ำปราศจากไอออน ซึ่งจะได้ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับ 5% โดยมีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ตามลำดับ จากนั้นนำไปกวนต่อเพื่อผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ จนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 95 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการกวนตลอดการให้ความร้อน เทตัวอย่างที่ผ่านการกำจัดฟองอากาศแล้วลงในภาชนะบรรจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 3.5 ซม. ทิ้งให้เย็นแล้วจึงปิดฝาให้สนิท นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบต่อโดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น Lloyd, UK) ใช้หัววัดทรงกระบอก (cylinder probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะทางที่กดเท่ากับ 30% ใช้ความเร็วของหัววัดขณะกดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.2.6 สมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (ดัดแปลงจากวิธีการของ Sae-kang and Suphantharika, 2006)

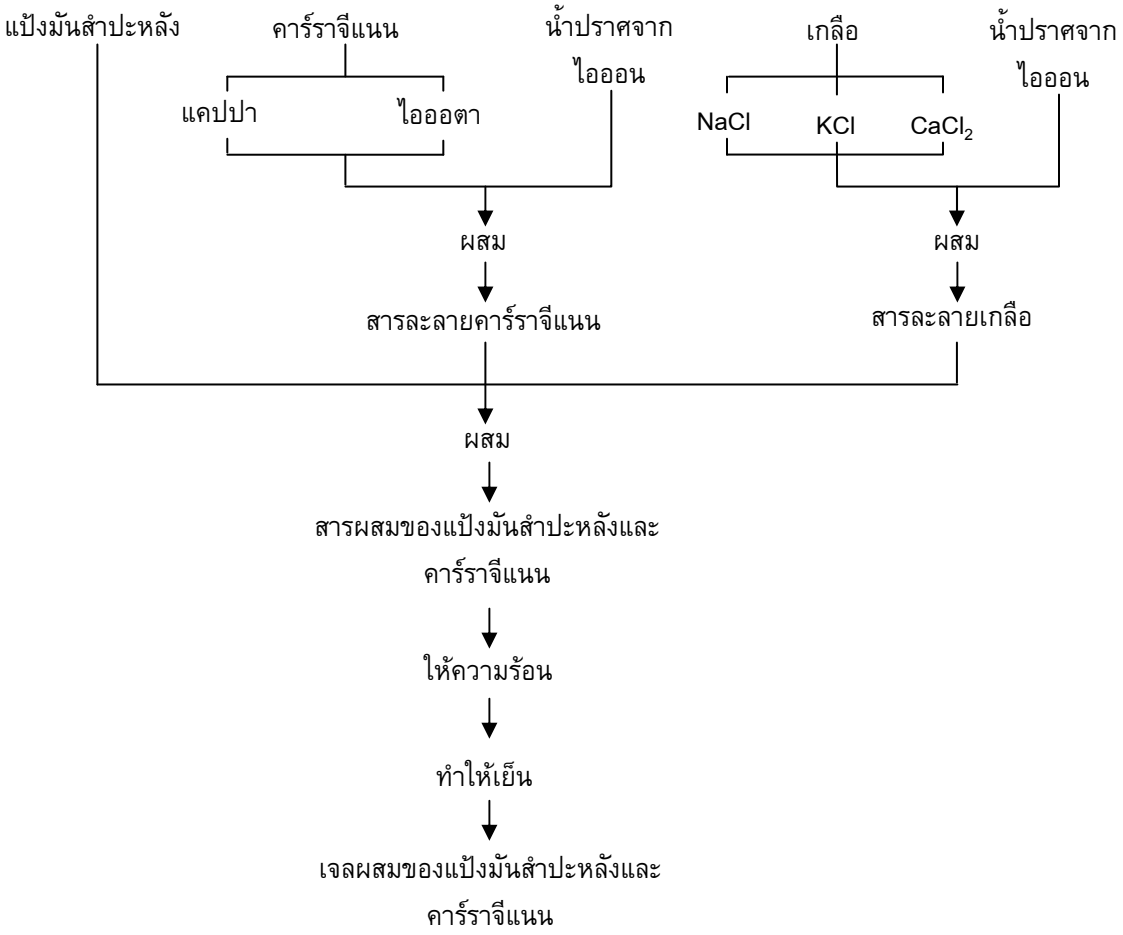
นำคาร์ราจีแนนผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เติมน้ำปราศจากไอออน ซึ่งจะได้ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับ 5 % โดยมีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนน เท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ตามลำดับ จากนั้นนำไปกวนต่อเพื่อผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ จนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 95 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที โดยกวนตลอดการให้ความร้อน บรรจุตัวอย่างลงในหลอดสำหรับหมุนเหวี่ยง (หลอดเซนตริฟิวจ์) ขนาด 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปเหวี่ยงไล่ฟองอากาศที่ 190 g เป็นเวลา 2 นาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งโดยใช้ตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 $^{\circ}$C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง แล้วนำมาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งโดยแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 30 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นับเป็นการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งรอบที่ 1 สุ่มตัวอย่างมาทำการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นก่อนนำไปหมุนเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 g เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นแยกส่วนใสตอนบนออก และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือเพื่อหาน้ำหนักของส่วนใสที่ถูกแยกออกไป ค่าที่ได้นำไปคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำตามสมการข้างล่างนี้ ส่วนหลอดที่เหลือนำไปแช่เยือกแข็งต่อเป็นเวลา 22

ชั่วโมงอีกครั้ง จากนั้นทำการคืนรูปตัวอย่างด้วยวิธีเดิมแล้วแบ่งหลอดมาหมุนเหวี่ยงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การแยกตัวของน้ำเช่นเดิม

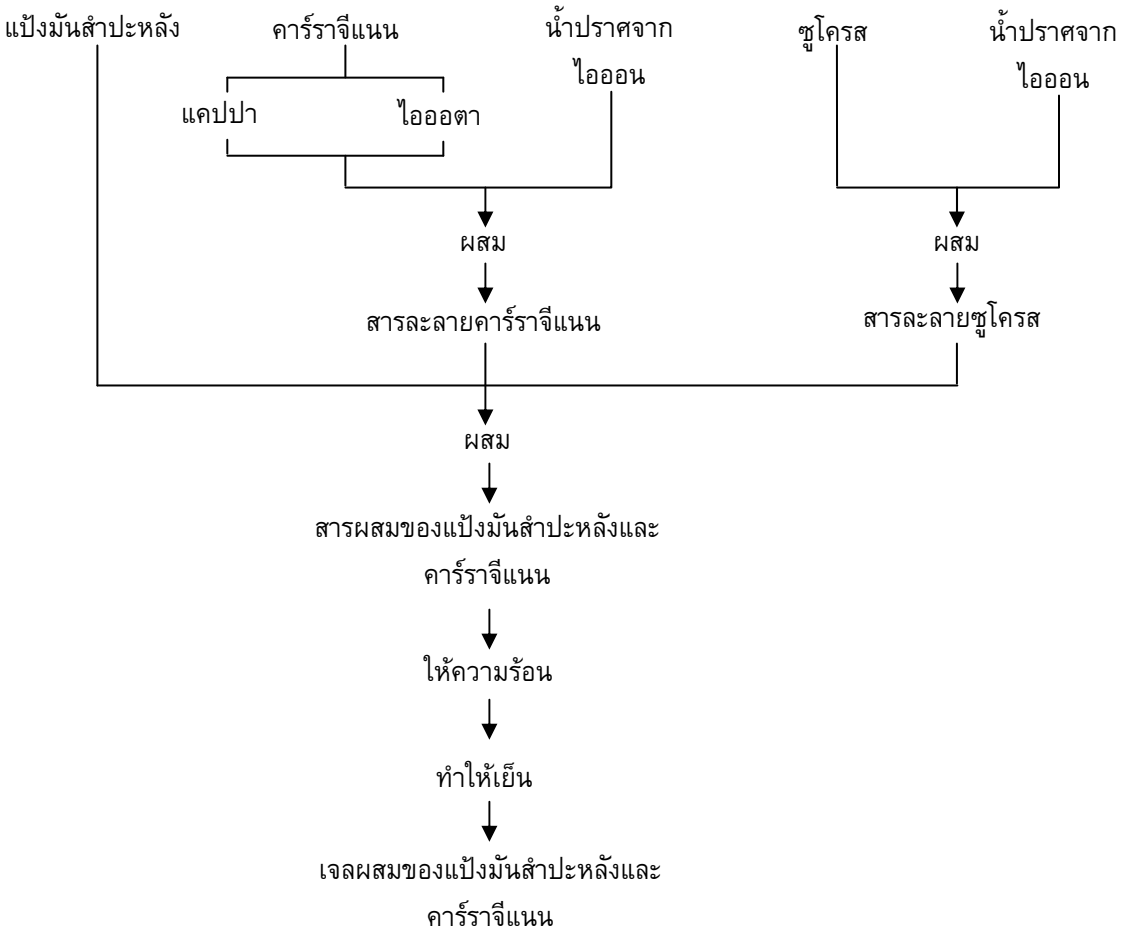
$$\text{เปอร์เซ็นต์การแยกตัวของน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

2.3 การศึกษาผลของเกลือและซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

ทำการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันและคาร์ราจีแนนด้วยวิธีการเดียวกับข้อ 2.2 แต่ในส่วนของน้ำปราศจากไอออน ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งสำหรับเตรียมสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน อีกส่วนทำการเติมส่วนผสม เช่น เกลือ ซูโครส เพื่อละลาย แล้วจึงนำมาผสมกับส่วนที่เหลือ ตามวิธีการในภาพที่ 2-3 ในที่นี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิดเกลือ 3 ชนิด ได้แก่ NaCl, KCl และ $CaCl_2$ ซึ่งเป็นเกลือที่มีประจุต่างกัน โดยมีสมมติฐานว่าจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนต่างกัน สำหรับผลของน้ำตาล ได้ทำการศึกษาผลของซูโครส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่ใช้มากในผลิตภัณฑ์อาหาร ซูโครสเป็นน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบได้ ตัวอย่างที่เตรียมได้ นำไปวัดค่าสมบัติต่างๆ ตามวิธีการในข้อ 2.2



ภาพที่ 2 วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนในระบบที่มีเกลือ



ภาพที่ 3 วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนในระบบที่มีซูโครส

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

จากการนำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยประมาณตามวิธีการของ AOAC (1995) เพื่อให้แน่ใจว่าองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าแป้งที่นำมาใช้จัดเป็น starch ไม่ใช่ flour นอกจากนี้ สำหรับตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังยังมีการนำไปวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสด้วยวิธี HPSEC โดยการใช้เอนไซม์ alpha-amylase ตามวิธีการของ Govindasamy และคณะ (1992) สำหรับคาร์ราจีแนน นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุได้แก่ Na, K, Ca และ Mg ด้วยเครื่อง AAS (Flame Technique) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ใช้มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ในปริมาณที่ต่ำ จากการศึกษาของ Li และ Yeh (2001) อธิบายไว้ว่าแป้งที่เป็น starch นั้นควรมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าต่ำกว่า 0.5, 0.3 และ 0.4% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีค่าต่างๆ เหล่านั้นน้อยกว่ามาก แสดงถึงความบริสุทธิ์ของแป้งที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองนี้ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของแป้งมันสำปะหลังยังได้ค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับการศึกษาของ Charles และคณะ (2007) แต่เมื่อพิจารณาปริมาณอะมิโลส พบว่า ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในการทดลองนี้มีค่าปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่รายงานในการทดลองอื่นซึ่งอยู่ในช่วง 22-25% (Charles et al., 2007) ซึ่งเป็นผลมาจากพันธุ์ของมันสำปะหลังที่ใช้ (Moorthy, 2004) อย่างไรก็ตามค่าที่ได้อยู่ในช่วงเดียวกับที่ Zobel และ Stephen (1995) รายงานไว้ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของปริตา (2544) ซึ่งเป็นผลวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทย เมื่อพิจารณาค่าปริมาณเถ้าของคาร์ราจีแนน พบว่ามีปริมาณมาก ซึ่งอาจเป็นผลจากกรรมวิธีการผลิต โดยตัวอย่างคาร์ราจีแนนที่ใช้ในการทดลองนี้ยังคงมีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของทางบริษัทของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

องค์ประกอบ	แป้งมันสำปะหลัง	แคปปา-คาร์ราจีแนน	ไอออตา-คาร์ราจีแนน
โปรตีน (%)	0.09 ± 0.00	0.79 ± 0.19	0.36 ± 0.14
ไขมัน (%)	0.13 ± 0.05	1.50 ± 0.36	0.21 ± 0.14
เถ้า (%)	0.06 ± 0.02	29.55 ± 1.05	19.83 ± 0.01
ความชื้น (%)	11.19 ± 0.05	8.82 ± 0.06	10.68 ± 0.01
อะมิโลส (%)	17.92 ± 0.04	-	-
Na (%)	-	0.52	3.07
K (%)	-	9.25	4.40
Ca (%)	-	0.91	0.07
Mg (%)	-	0.80	0.27

หมายเหตุ – หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

2. ผลของชนิดและความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

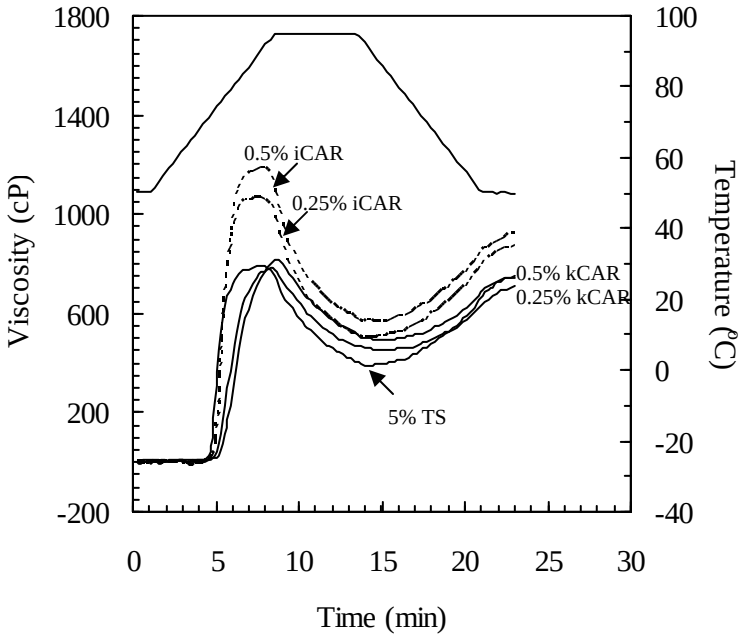
เมื่อเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนหรือไอโอตา-คาร์ราจีแนน โดยให้มีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 5% ในอัตราส่วนที่ต่างกัน (แป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนน เท่ากับ 10/0, 9.5/0.5, 9/1) แล้วนำของผสมที่ได้ไปวัดสมบัติในด้านต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

2.1 สมบัติเพสติง (Pasting properties)

ภาพที่ 4 แสดงสมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน จากการทดลอง พบว่า สมบัติเพสติงของแป้งมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลจากการเติมคาร์ราจีแนน โดยปกติเมื่อนำสารละลายคาร์ราจีแนนเพียงอย่างเดียวมาทำการวัดสมบัติเพสติงจะไม่ปรากฏพีคหรือการเปลี่ยนแปลงความหนืด (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมบัติเพสติงนี้สัมพันธ์กับการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งมันสำปะหลัง โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณภูมิที่เป็น onset temperature ของกระบวนการเจลาติไนเซชันของแป้ง เช่น ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 $^{\circ}$C นั้น เม็ดแป้งมันสำปะหลังจะยังคงกระจายตัวอยู่ในน้ำ (ไม่ได้ละลาย) ความหนืดในช่วงอุณหภูมินี้จึงยังมีค่าต่ำ แต่เมื่อมีการให้ความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งโดยมีปริมาณน้ำที่มาก

เพียงพอ เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้และพองตัวขึ้นจนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเริ่มต้นหลายเท่า ในกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible process) ที่เรียกว่า กระบวนการเจลาติไนเซชัน ความหนืดของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการกวนตัวอย่างไปด้วย อุณหภูมิที่ความหนืดของตัวอย่างเริ่มต้นสูงขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ หรือ Pasting temperature ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เม็ดแป้งต้องการเพื่อให้เกิดการพองตัว ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จำเป็นต้องใช้ในการทำให้ตัวอย่างสุกในกระบวนการแปรรูปอาหารด้วย (Newport Scientific, 1995) ในการทดลองนี้ พบว่า อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ของแป้งมันสำปะหลังมีค่าประมาณ 71.6 $^{\circ}$C และเมื่อเติมคาร์ราจีแนนลงไปมีผลให้อุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์ราจีแนน อุณหภูมิในการเกิดเพสต์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในขณะที่เม็ดแป้งพองตัวขึ้น ความหนืดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีการกวนอย่างต่อเนื่องภายในภาชนะ เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่จะถูกทำลายโดยแรงเฉือนทำให้โมเลกุลอะมิโลสหลุดออกมา ณ จุดนี้จะเกิดพีคขึ้น เรียกว่า ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของเม็ดแป้งที่ใช้ในการจับตัวกับน้ำ และแรงที่ต้องใช้ในการกวนหรือผสมในอาหาร (Newport Scientific,1995) เกิดที่จุดสมดุลระหว่างการพองตัวเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นกับการถูกทำลายของเม็ดแป้งภายใต้สภาวะที่มีการกวน จากการทดลองพบกว่าค่าความหนืดสูงสุดของแป้งมันสำปะหลังมีค่าประมาณ 790.7 cP การเติมคาร์ราจีแนนทั้งสองชนิดมีผลทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เมื่อความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อระบบถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}$C ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง พร้อมกับตัวอย่างมีการกวนผสมไปด้วย จะทำให้เม็ดแป้งมีการแตกตัวมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีอะมิโลสกระจายตัวอยู่ในสารละลายผสม การเติมคาร์ราจีแนนทำให้ค่า breakdown ลดลง แสดงถึงการเพิ่มความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ความร้อน) และแรงเฉือน (การกวน) ของตัวอย่างซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร จากนั้นสารผสมจะถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิ 50 $^{\circ}$C ส่วนของอะมิโลสจะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างใหม่ในลักษณะโครงร่างสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือเกิดลักษณะเจลขึ้น ค่าความหนืด ณ จุดนี้แสดงด้วยค่า final viscosity การเติมคาร์ราจีแนนมีผลต่อค่าความหนืดสุดท้ายนี้ โดยที่ไอออตา-คาร์ราจีแนนมีผลต่อค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังมากกว่าแคปปา-คาร์ราจีแนน ในช่วงนี้เมื่อนำค่าความหนืดสูงสุดหักลบด้วยค่าความหนืดสุดท้ายจะได้ค่า setback ซึ่งแสดงเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง (ชนิด short term) หากมีค่าสูง แสดงว่าจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก และยังบ่งชี้เกี่ยวกับความคงตัวของเจลแป้งอีกด้วย ทั้งนี้ การเติมคาร์ราจีแนนทำให้ค่าดังกล่าวลดต่ำลงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมคาร์ราจีแนน เช่น การเติมแคปปา-คาร์ราจีแนน ทำให้ค่าลดลงจาก 368.3 cP เป็น 262 cP แสดงว่าการเติมคาร์ราจีแนนอาจช่วยลดอัตราการแยกตัวของน้ำ โดยเพิ่มความคงตัวของเจลได้ ทั้งนี้ Copeland และคณะ (2009) ได้รายงานว่าเวลาในการเกิดความ

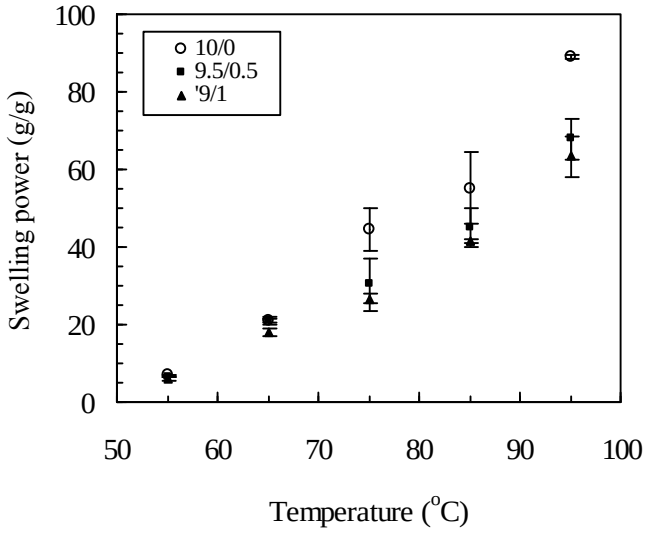
หนืดสูงสุดและค่าความหนืดสูงสุดเป็นตัวบ่งชี้เกี่ยวกับความสามารถในการจับตัวกับน้ำของเม็ดแป้ง รวมทั้งความยากง่ายในการจัดเรียงตัวของเม็ดแป้ง นอกจากนี้ค่า setback ที่สูงยังสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลสในเม็ดแป้งอีกด้วย



ภาพที่ 4 สมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5%

2.2 ค่ากำลังการพองตัว (Swelling power)

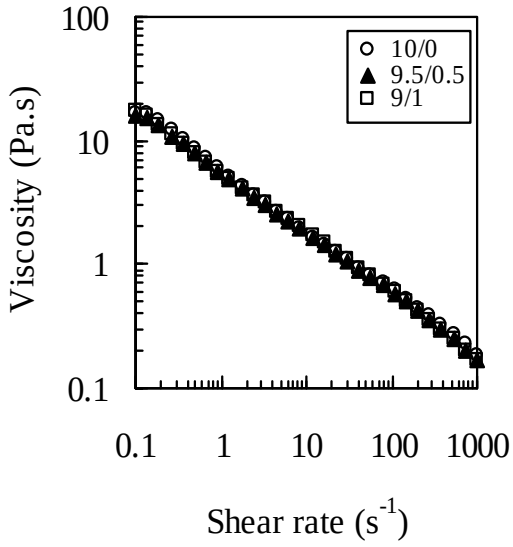
คาร์ราจีแนนมีผลต่อค่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังดังแสดงในภาพที่ 5 (ในที่นี้แสดงผลเฉพาะแคปปา-คาร์ราจีแนน) จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่ตัวอย่างจาก 55-95 °C ทำให้ค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของ Li และ Yeh (2001) และงานวิจัยของ Chaisawang และ Suphantharika (2006) อธิบายได้ว่า เมื่อเม็ดแป้งถูกทำให้เป็นเพสต์ในน้ำร้อน เม็ดแป้งแต่ละเม็ดจะพองตัวขึ้น และเป็นสัดส่วนระหว่างเม็ดแป้งที่ละลายอยู่ในสารละลาย ปริมาณการพองตัวและปริมาณสารที่ละลายได้ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งและการดัดแปร (Schoch, 1964) ในการศึกษานี้พบว่าการพองตัวของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับแคปปา-คาร์ราจีแนนมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวซึ่งอาจเป็นผลจากการที่เม็ดแป้งไม่สามารถพองตัวได้เต็มที่ในระบบที่มีสารละลายของคาร์ราจีแนนอยู่ ทั้งนี้ Chaisawang และ Suphantharika (2006) ได้รายงานผลค่ากำลังการพองตัวของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแซนแทนกัม ซึ่งค่ากำลังการพองตัวของสารผสมนั้นมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งเพียงอย่างเดียวเช่นกัน



ภาพที่ 5 ค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 1%

2.3 ความหนืด (Steady shear viscosity)

จากการเตรียมตัวอย่างแป้งผสมคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ให้ความร้อน (จากเครื่อง RVA) จะได้ตัวอย่างที่เจลาติไนซ์แล้วมาเหวี่ยงที่แรง 190 g เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศ นำตัวอย่างมาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยใช้หัววัดชนิด cone and plate ทำการวัดค่าความหนืดปรากฏที่ได้ทำการวัดโดยการเพิ่มค่าอัตราเฉือน (shear rate) จาก 0.1 ถึง 1000 s^{-1} ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 °C เพื่อป้องกันการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน พบว่า ตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning นั่นคือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน ค่าความหนืดจะลดต่ำลง ทั้งนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน ผลที่ได้แสดงว่าแคปปา-คาร์ราจีแนนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในสภาวะการวัดค่าดังกล่าว (ภาพที่ 6)



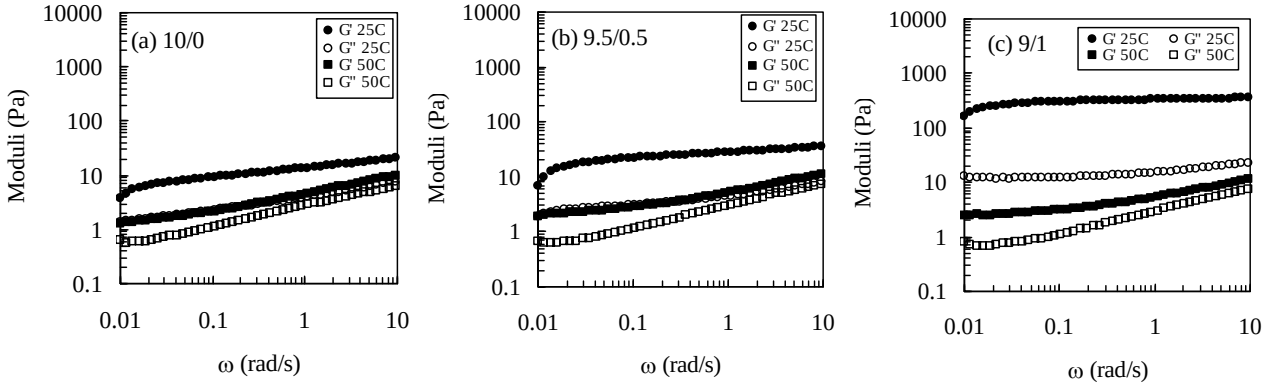
ภาพที่ 6 ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50°C ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5%

2.2.4 สมบัติวิสโคอิลาสติก (Dynamic viscoelastic properties)

จากการเตรียมตัวอย่างแป้งผสมคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/CAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่มีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ให้ความร้อน (จากเครื่อง RVA) จะได้ตัวอย่างที่เจลาติไนซ์แล้วมาเหวี่ยงที่แรง 190 g เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศ นำตัวอย่างมาวัดสมบัติวิสโคอิลาสติกด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยใช้หัววัดชนิด cone and plate (50 mm diameter, 1° cone angle และ 0.05 mm gap) ก่อนทำการวัดตัวอย่างจะถูกรักษาอุณหภูมิที่ 50 °C เพื่อป้องกันการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่า dynamic moduli (storage modulus และ loss modulas) ที่ความถี่ต่างๆ ในช่วง 0.01-10 rad/s ที่อุณหภูมิ 2 ระดับคือ 25 และ 50 °C เพื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของตัวอย่าง ในการวัดค่านี้ได้กำหนดให้ค่าแรงที่ใช้คงที่ (1% strain) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วง linear viscoelastic region ที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลอง strain sweep พบว่าสำหรับตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนมีสมบัติวิสโคอิลาสติกดังแสดงในภาพที่ 7 โดยอุณหภูมิที่เลือกศึกษาเป็นเพราะที่อุณหภูมิ 25 °C แคปปา-คาร์ราจีแนนสามารถเกิดเจลได้เนื่องเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า gelation temperature ของแคปปา-คาร์ราจีแนนซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของสารผสม ในขณะที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นอุณหภูมิที่สูงมากพอที่จะป้องกันการเกิดเจลของแคปปา-คาร์ราจีแนน

โดยทั่วไป ตัวอย่างทุกตัวอย่างแสดงลักษณะพฤติกรรมของเจลเนื่องจากมีค่า G′ สูงกว่า G″ ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา (Techawipharat et al., 2008) ตัวอย่างที่ทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 °C จะแสดงพฤติกรรมดังกล่าว และค่า G′ และ G″ ของตัวอย่างที่ทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 °C นั้นมีค่าสูงกว่าค่า G′ และ G″ ของตัวอย่างที่ทำการวัดที่อุณหภูมิ 50 °C อีกด้วย แสดงถึงผลของอุณหภูมิต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน โดยที่อุณหภูมิ 25 °C การเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนมีผลให้ค่า G′ และ G″ มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวอันเป็นผลจากแคปปา-คาร์ราจีแนนเป็นสารที่ช่วยในการเกิดเจลได้ ทั้งนี้มีรายงานว่าแคปปา-คาร์ราจีแนนเป็นสารช่วยทำให้เกิดเจล ทำให้โครงสร้างของแป้งข้าวโพดที่เจลาติไนซ์อ่อนตัว ส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างและอันตรกริยาของเม็ดแป้ง (Eidam et al., 1995; Techawipharat et al., 2008) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติวิสโคอิลาสติกของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 °C พบว่าการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอิลาสติกของแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิด

เจลของแคปปา-คาร์ราจีแนนซึ่งทำให้สารผสมยังคงลักษณะเป็นของเหลวอยู่ G′ และ G″ จึงไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม



ภาพที่ 7 ผลของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อค่า G′ และ G″ ของแป้งมันสำปะหลังที่เจลาติไนซ์แล้วที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% และทำการวัดค่าที่อุณหภูมิ 25 และ 50 °C ที่ 1% strain

2.2.5 สมบัติด้านเนื้อสัมผัส

จากเตรียมตัวอย่างสารผสมแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนโดยการนำคาร์ราจีแนนผสมกับสารแขวนลอยแป้งมันสำปะหลัง เติมน้ำปราศจากไอออน ซึ่งจะได้ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับ 5% โดยมีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนน เท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ตามลำดับ ให้ความร้อนแล้วทำให้เย็น เทใส่พิมพ์ เมื่อนำตัวอย่างไปวัดสมบัติด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและใช้หัววัดทรงกระบอกในการกด พบว่า ในงานวิจัยนี้ทำการกดตัวอย่างให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) 30 % จากความสูงเดิมของตัวอย่าง แล้วรายงานผลออกมาเป็นค่าต่างๆ ได้แก่ ค่าความแข็งของตัวอย่าง ซึ่งค่าความแข็ง (hardness) ที่ได้หมายถึง ค่าแรงสูงสุดจากกราฟที่เกิดขึ้นจากการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ที่ระยะทาง 30 % ของความสูงตัวอย่าง ค่า hardness ที่วัดได้มีหน่วยเป็นนิวตัน โดยสัมพันธ์กับความแข็งของตัวอย่างที่ต้านแรงกด, ค่า cohesiveness (การรวมตัวกันภายในของตัวอย่าง), springiness (การกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิม), gumminess (ระดับความเป็นกาวยางหรือแป้งเปียก) และ adhesiveness (การเกาะติดผิว) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า hardness (แรงที่ใช้มีหน่วยเป็นนิวตันในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป)

ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อแคปปา-คาร์ราจีแนนเท่ากับ 9/1 มีความแตกต่างกับอัตราส่วนที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลที่ปรากฏมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากผลความหนืดสุดท้าย (final viscosity) จากการทดสอบสมบัติเพสติ้งโดยใช้เครื่อง RVA โดยแสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนในอัตราส่วน 9/1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้ปริมาณแคปปา-คาร์ราจีแนนมากที่สุด ส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งมากที่สุด ในขณะที่การใช้แป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนในอัตราส่วน 9.5/0.5 ไม่ทำให้ตัวอย่างมีความแข็งที่แตกต่างกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแคปปา-คาร์ราจีแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่า hardness ที่สูงขึ้น เกิดจากลักษณะการเกิดเจลของแคปปา-คาร์ราจีแนนที่ให้เจลที่มีความแข็ง ช่วยเสริมทำให้เนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังเปลี่ยนแปลงไป ผลต่างระหว่างค่า hardness 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนมีการถูกทำลายโครงสร้างภายในจากการกดครั้งที่ 1 ทำให้การกดครั้งที่ 2 ใช้แรงน้อยกว่า แสดงถึงตัวอย่างที่มีลักษณะที่แข็งเปราะ ยืดหยุ่นน้อย และเกิดการคืนตัวน้อยกว่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลของไอออตา-คาร์ราจีแนนต่อค่า hardness ของตัวอย่าง พบว่าการเติมไอออตา-คาร์ราจีแนนทำให้ตัวอย่างมีสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป แต่เป็นไปในทางกลับกันกับแคปปา-คาร์ราจีแนน เนื่องจากไอออตา-คาร์ราจีแนนทำให้ตัวอย่างมีลักษณะนิ่มขึ้น (ค่า hardness น้อยลง) นั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่า cohesiveness (การรวมตัวกันภายในของตัวอย่าง) เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างของตัวอย่าง จากตารางที่ 2 พบว่าตัวอย่างที่ทำการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลต่อค่า cohesiveness ให้มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทำให้ได้ตัวอย่างที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งแน่นกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ในขณะที่ตัวอย่างที่เติมไอออตา-คาร์ราจีแนนไม่แสดงลักษณะดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาค่า springiness (การกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิมเมื่อถอนแรง) ค่า springiness แสดงถึง elasticity ของตัวอย่าง จากตารางที่ 2 พบว่า ค่า springiness ของตัวอย่างที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อแคปปา-คาร์ราจีแนนเท่ากับ 9/1 มีค่าสูงที่สุด ตามด้วยอัตราส่วน 10/0 และ 9.5/0.5 แสดงให้เห็นว่าการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนในอัตราส่วน 9/1 ตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับได้ดีที่สุด

ขณะที่ค่า gumminess (ระดับความเป็นกาวยางหรือแป้งเปียก) แสดงถึงแรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างแตกและอยู่ในสภาพที่พร้อมจะกลืน จากตารางที่ 2 พบว่าค่า gumminess ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 9/1 มีค่าสูงที่สุดและแตกต่างกับอัตราส่วนที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อมีอัตราส่วนของแคปปา-คาร์ราจีแนนที่เพิ่มขึ้นทำให้ตัวอย่างมีลักษณะที่ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพที่เหมาะแก่การกลืน ซึ่ง

สอดคล้องกับค่า hardness สำหรับค่า adhesiveness (การเกาะติดผิว) แสดงถึงลักษณะของตัวอย่างที่มีความหนืดและต้องใช้แรงในการถอนหัววัดออกจากตัวอย่าง จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อแคปปา-คาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า adhesiveness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลที่ปรากฏมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากค่า hardness ทั้งนี้ ตัวอย่างที่มีไอออตา-คาร์ราจีแนน ไม่สามารถวัดค่า cohesiveness, gumminess และ adhesiveness ได้

ตารางที่ 2 ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนแป้งมันต่อคาร์ราจีแนนระดับต่างๆ กัน โดยมีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์ 5%

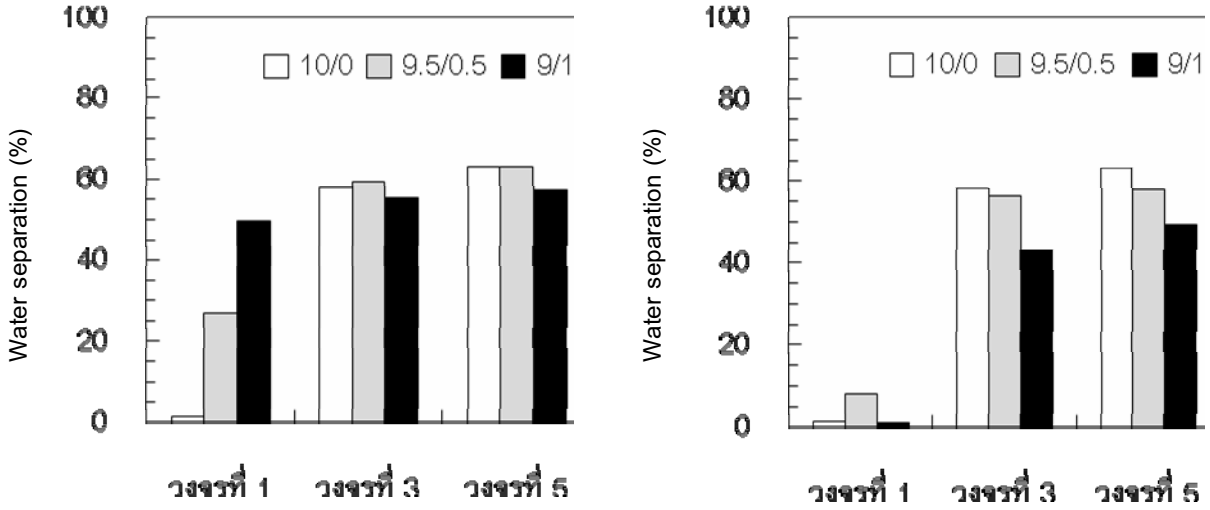
ชนิดคาร์ราจีแนน	อัตราส่วน (TS/CAR)	สมบัติด้านเนื้อสัมผัส					
		Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness (-)	Springiness index (-)	Gumminess (N)	Adhesiveness (N)
kCAR	10/0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
	9.5/0.5	0.48 ± 0.11	0.35 ± 0.07	0.16 ± 0.09	0.68 ± 0.13	0.06 ± 0.03	0.00 ± 0.00
	9/1	1.64 ± 0.34	1.07 ± 0.23	0.32 ± 0.06	1.26 ± 0.35	0.54 ± 0.18	0.00 ± 0.00
iCAR	10/0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
	9.5/0.5	0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.02	1.02 ± 0.47	0.62 ± 0.21	0.33 ± 0.07	0.00 ± 0.00
	9/1	0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.04	2.13 ± 1.65	0.65 ± 0.20	0.32 ± 0.14	0.00 ± 0.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (*ค่าทางสถิติเปรียบเทียบเฉพาะผลของอัตราส่วนที่ใช้คาร์ราจีแนนชนิดเดียวกัน*)

2.2.6 สมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง

จากการเตรียมตัวอย่างโดยนำคาร์ราจีแนนผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เติมน้ำปราศจากไอออน ซึ่งจะได้ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับ 5 % โดยมีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนน เท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ตามลำดับ นำไปให้ความร้อนเพื่อให้ตัวอย่างแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ แล้วบรรจุตัวอย่างในหลอดเซนตริฟิวจ์ นำตัวอย่างไปแช่เยือกแข็งโดยใช้ตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 $^{\circ}$C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง แล้วนำมาทำการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งโดยแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 30 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า คาร์ราจีแนนมีผลต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (ภาพที่ 8) ทั้งนี้เมื่อวงจรการแช่แข็งและการละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่แยกตัวออกมาจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแช่แข็งทำให้เจลตัวอย่างเกิดการสร้างผลึก

น้ำแข็ง ความเข้มข้นของตัวอย่างในส่วนที่ไม่เกิดผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชันจึงเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนวรจราของการแช่แข็งและการละลายเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแยกเฟสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้น โครงสร้างร่างแหของแป้งที่เรียงตัวกันแน่นจะทำให้น้ำแยกตัวออกมาเมื่อละลายได้ง่าย สำหรับในวงจรของการแช่แข็งและการละลายวงจรแรก การเติมไอออตา-คาร์ราจีแนนในตัวอย่างที่อัตราส่วน 9/1 มีผลให้ปริมาณน้ำที่แยกตัวออกมาลดลงมา แต่ในตัวอย่างที่มีแคปปา-คาร์ราจีแนนกลับมีปริมาณน้ำที่แยกตัวออกมามากกว่า อาจเป็นเพราะสมบัติของคาร์ราจีแนนเอง



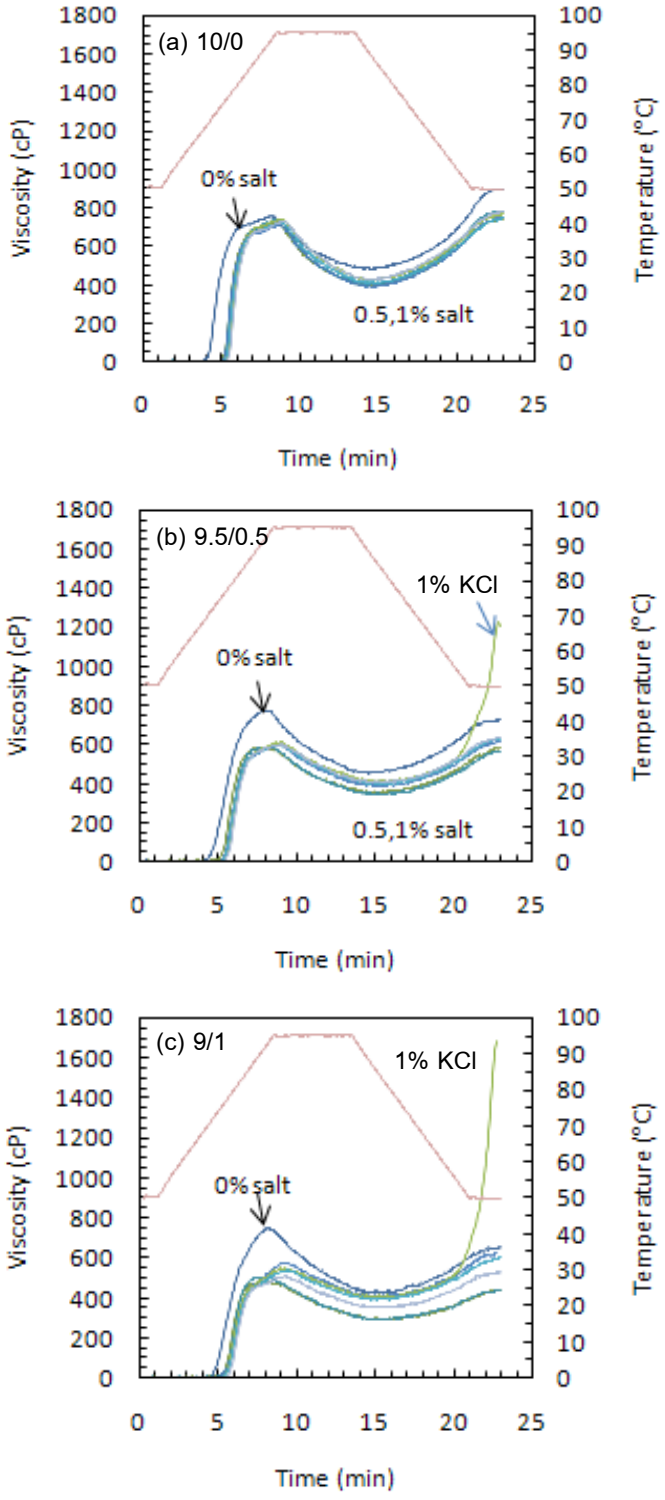
(a) kCAR (c) iCAR

ภาพที่ 8 ผลของคาร์ราจีแนนต่อปริมาณการแยกตัวของน้ำในสารผสมของแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%

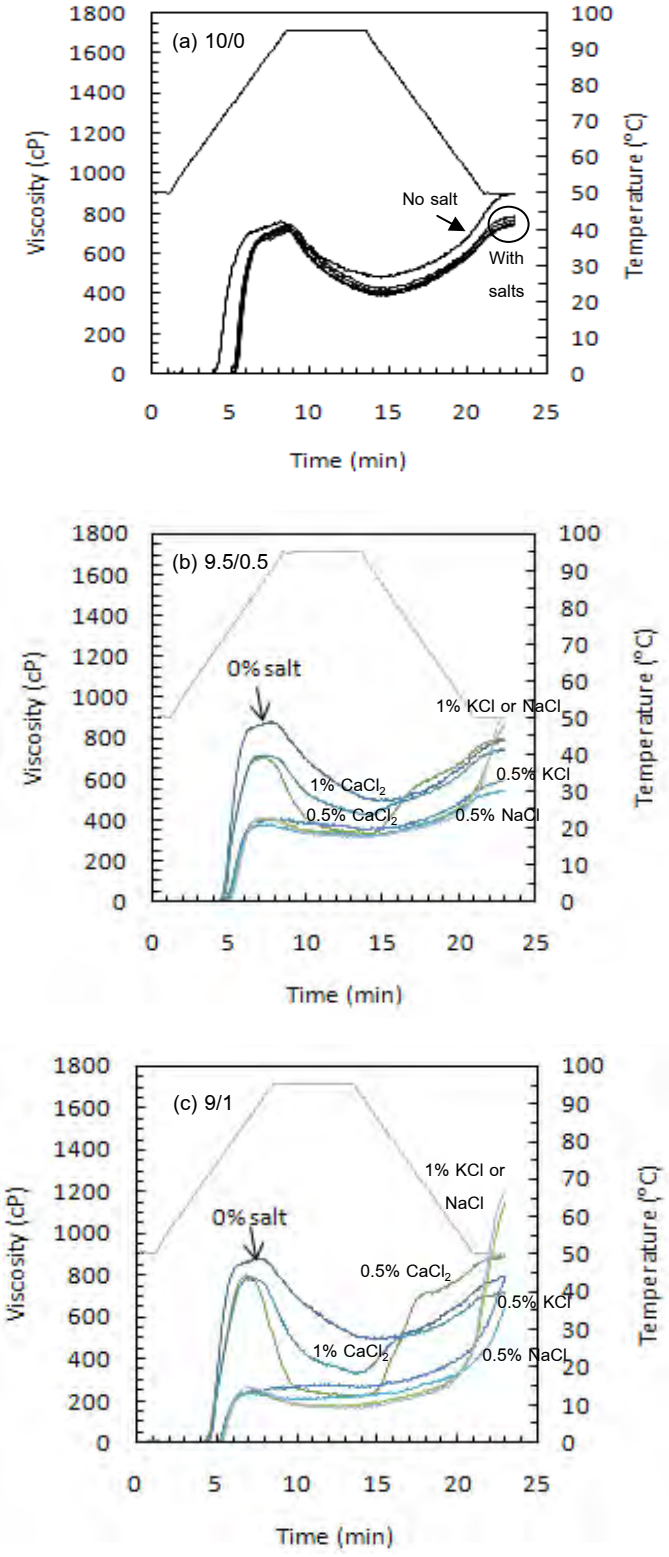
2.3 ผลของเกลือและซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน

2.3.1 ผลของเกลือ

เกลือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอาหารโดยมีบทบาทในการปรับรสชาติให้อาหารมีรสเค็ม ประโยชน์ของเกลือมีมากมาย เช่น ใช้ในการถนอมอาหารโดยการดองเค็ม นอกจากนี้เกลือยังมีบทบาทต่อสมบัติบางประการในผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบ มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของเกลือในระบบแป้งต่างๆ เช่น แป้งข้าวโพด (Sudkakar et al., 1995; Funami et al., 2008) แป้งข้าวสาลี (Mandala et al., 2004) และแป้งข้าวเจ้า (Viturawong et al., 2008) ในการศึกษานี้ได้ศึกษาในระบบสารผสมของแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาไรด์เท่ากับ 5% และใช้เกลือ 3 ชนิด ได้แก่ NaCl, KCl และ $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 3 ระดับคือ 0, 0.5 และ 1% พบว่า ชนิดและความเข้มข้นของเกลือมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน โดยเฉพาะแคปปา-คาร์ราจีแนน เนื่องจาก K^+ จะช่วยเพิ่มความแข็งของเจลแคปปา-คาร์ราจีแนนได้ ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดค่าตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนนทั้งสองชนิดในระบบที่มีเกลือชนิดต่างๆ แสดงในภาพที่ 9-10 จากภาพจะเห็นว่า KCl จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนมากกว่าเกลือชนิดอื่น ในขณะที่ระบบที่มีไอออตา-คาร์ราจีแนน ทั้ง KCl และ $CaCl_2$ จะมีบทบาทมากกว่า

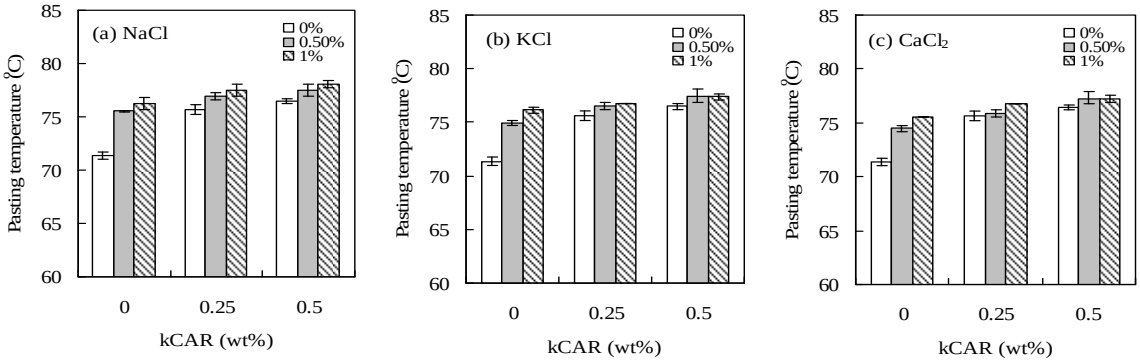


ภาพที่ 9 RVA profiles ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 10/0(a), 9.5/0.5(b) และ 9/1(c) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งหมด 5% ที่มีเกลือชนิดต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1%

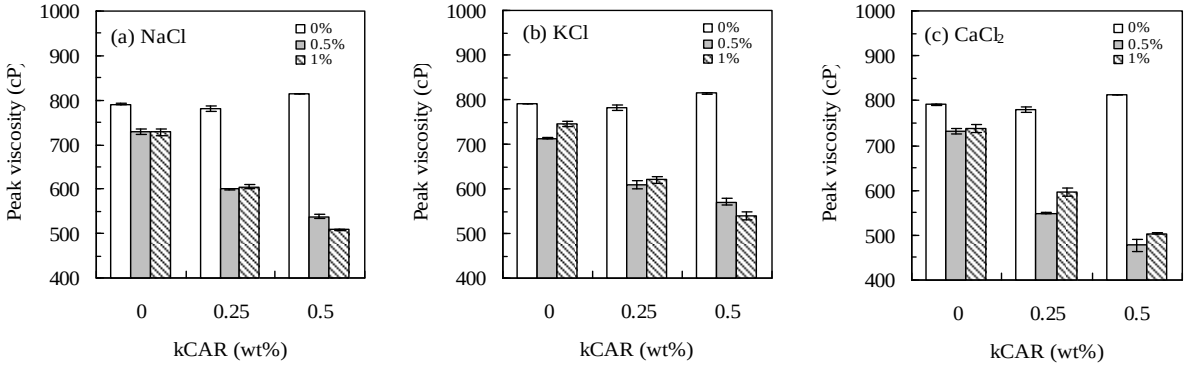


ภาพที่ 10 RVA profiles ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วน 10/0(a), 9.5/0.5(b) และ 9/1(c) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งหมด 5% ที่มีเกลือชนิดต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1%

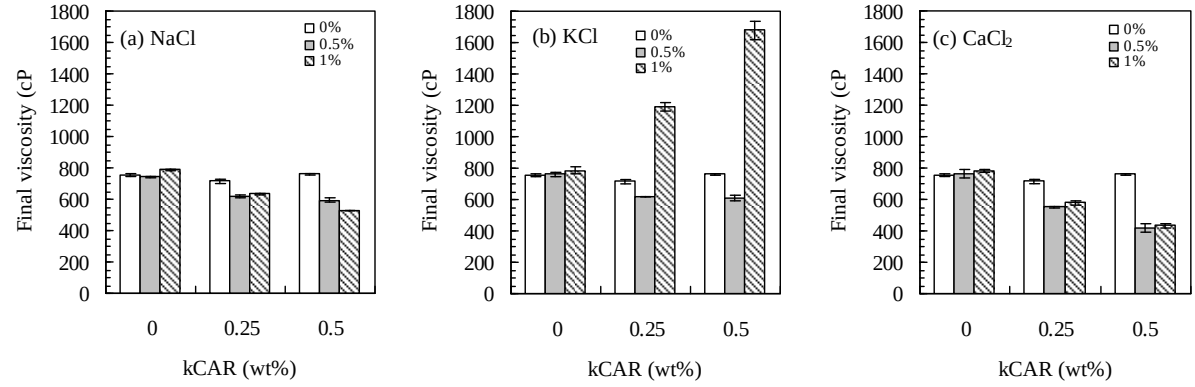
เมื่อเลือกพิจารณาสมบัติเพสติงบางประการของแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนน (ภาพที่ 11-13) พบว่า การเติมเกลือมีผลให้อุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่ามีอันตรกริยาระหว่างสารผสมของแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ และเกลือ การเติม NaCl และ $CaCl_2$ มีผลให้ความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างลดลง ในขณะที่การเติม KCl มีผลให้ความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น Piculell (1995) ได้รายงานผลของเกลือต่อสมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนนว่า การเติมเกลือมีผลต่อสมบัติส่วนใหญ่ของแคปปา-คาร์ราจีแนนอันเป็นผลจากสภาวะแวดล้อมที่มีประจุ ซึ่งไม่เพียงแต่จะขึ้นกับค่าวาเลนซีแต่ยังขึ้นกับชนิดไอออนด้วย อันตรกริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic attraction) ระหว่างประจุที่ตรงข้ามกันกับโมเลกุลของคาร์ราจีแนน



ภาพที่ 11 อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ (Pasting temperature) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$

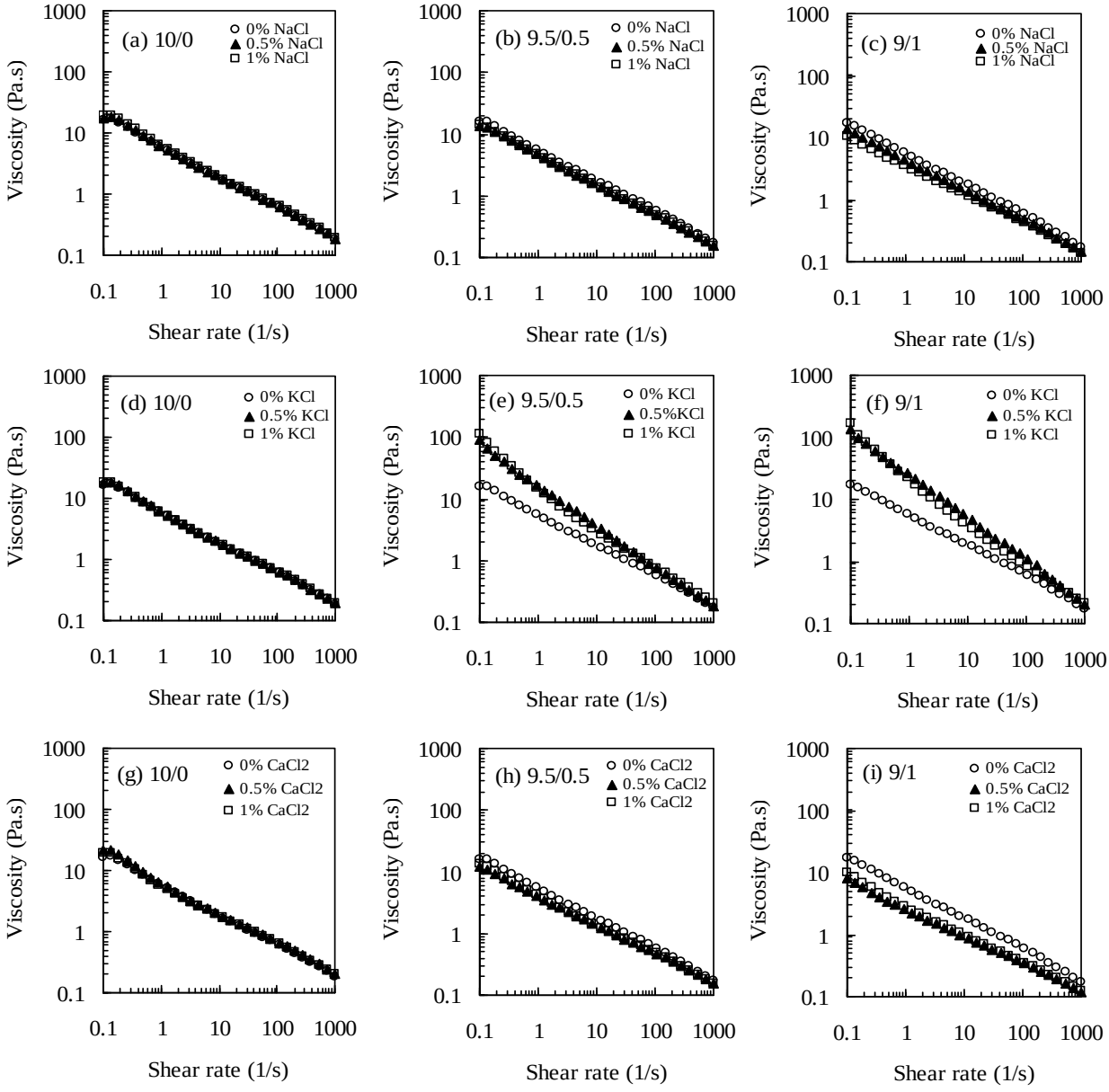


ภาพที่ 12 ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$



ภาพที่ 13 ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ที่ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5% ในระบบที่มีเกลือ (a) NaCl, (b) KCl และ (c) $CaCl_2$

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดของแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนน (ภาพที่ 14) พบว่า ตัวอย่างทุกตัวอย่างยังแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning ทั้งนี้ การเติม NaCl หรือ $CaCl_2$ มีผลให้ค่าความหนืดของตัวอย่างลดลงเหมือนเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีเกลือ แต่การเติม KCl มีผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าความหนืดสุดท้ายที่ได้จากการศึกษาสมบัติเพสติงของตัวอย่าง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากชนิดและความเข้มข้นของเกลือที่ใช้



ภาพที่ 14 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือนต่อค่าความหนืดของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปาคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5% อันเป็นผลจากการเติม NaCl (a-c), KCl (d-f) และ $CaCl_2$ (g-i)

เมื่อพิจารณาผลของเกลือต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3 ผลของเกลือต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%

		สมบัติด้านเนื้อสัมผัส					
TS/kCAR	เกลือ (%)	Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness (-)	Springiness index	Gumminess	Adhesiveness
10/0	0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.48 ± 0.11	0.35 ± 0.07	0.16 ± 0.09	0.68 ± 0.13	0.06 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9/1		1.64 ± 0.34	1.07 ± 0.23	0.32 ± 0.06	1.26 ± 0.35	0.54 ± 0.18	0.00 ± 0.00
10/0	0.5%NaCl	0.30 ± 0.20	0.28 ± 0.18	NA	NA	NA	NA
9.5/0.5		1.55 ± 0.14	1.29 ± 0.14	0.37 ± 0.08	0.89 ± 0.03	0.57 ± 0.08	0.00 ± 0.00
9/1		3.93 ± 0.09	3.52 ± 0.09	0.34 ± 0.01	0.90 ± 0.10	1.32 ± 0.03	0.00 ± 0.00
10/0	1%NaCl	0.32 ± 0.05	0.28 ± 0.03	NA	0.91 ± 0.02	NA	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		1.11 ± 0.03	0.98 ± 0.00	0.27 ± 0.02	0.76 ± 0.06	0.31 ± 0.02	0.00 ± 0.00
9/1		1.71 ± 0.14	1.47 ± 0.21	0.35 ± 0.08	0.87 ± 0.03	0.59 ± 0.08	0.00 ± 0.00
10/0	0.5%KCl	0.24 ± 0.09	0.24 ± 0.07	NA	0.81 ± 0.08	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		1.50 ± 0.10	1.36 ± 0.08	0.31 ± 0.12	0.75 ± 0.12	0.48 ± 0.21	0.00 ± 0.00
9/1		3.67 ± 0.88	3.26 ± 0.97	0.35 ± 0.01	1.01 ± 0.17	1.29 ± 0.30	0.00 ± 0.00
10/0	1%KCl	0.22 ± 0.05	0.22 ± 0.01	NA	0.81 ± 0.11	NA	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		1.28 ± 0.19	1.05 ± 0.18	0.29 ± 0.02	0.99 ± 0.21	0.37 ± 0.06	0.00 ± 0.00
9/1		2.86 ± 0.24	2.41 ± 0.19	0.35 ± 0.04	0.95 ± 0.16	1.00 ± 0.17	0.00 ± 0.00
10/0	0.5%$CaCl_2$	0.42 ± 0.24	0.40 ± 0.22	0.00 ± 0.00	0.73 ± 0.04	7.39 ± 0.97	0.02 ± 0.02
9.5/0.5		0.81 ± 0.29	0.78 ± 0.31	0.00 ± 0.00	0.73 ± 0.17	7.54 ± 1.22	0.07 ± 0.01
9/1		1.40 ± 0.20	1.18 ± 0.17	0.01 ± 0.00	0.85 ± 0.07	8.78 ± 0.26	0.29 ± 0.04
10/0	1%$CaCl_2$	0.82 ± 0.03	0.64 ± 0.04	NA	0.80 ± 0.14	10.41 ± 0.17	0.04 ± 0.00
9.5/0.5		0.50 ± 0.04	0.39 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.52 ± 0.28	7.56 ± 0.03	0.05 ± 0.01
9/1		0.61 ± 0.08	0.48 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.77 ± 0.1	7.78 ± 1.03	0.10 ± 0.03

ตารางที่ 4 ผลของเกลือต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/iCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%

		สมบัติด้านเนื้อสัมผัส					
TS/iCAR	เกลือ (%)	Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness (-)	Springiness index	Gumminess	Adhesiveness
10/0	0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.02	1.02 ± 0.47	0.62 ± 0.21	0.33 ± 0.07	0.00 ± 0.00
9/1		0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.04	2.13 ± 1.65	0.65 ± 0.20	0.32 ± 0.14	0.00 ± 0.00
10/0	0.5%NaCl	0.30±0.20	0.28±0.18	NA	NA	NA	NA
9.5/0.5		0.15±0.04	0.16±0.03	8.93±1.27	NA	NA	NA
9/1		0.20±0.06	0.22±0.06	7.09±0.88	NA	NA	NA
10/0	1%NaCl	0.40±0.10	0.35±0.08	NA	0.89±0.11	NA	NA
9.5/0.5		0.19±0.07	0.18±0.06	NA	NA	NA	NA
9/1		0.14±0.04	0.13±0.06	NA	NA	NA	NA
10/0	0.5%KCl	0.23±0.09	0.24±0.07	NA	0.81±0.08	NA	NA
9.5/0.5		0.24±0.05	0.21±0.03	7.97±1.41	NA	NA	NA
9/1		0.17±0.02	0.15±0.03	7.50±0.83	NA	NA	NA
10/0	1%KCl	0.22±0.08	0.23±0.06	NA	0.81±0.11	NA	NA
9.5/0.5		0.24±0.07	0.23±0.05	7.29±1.55	NA	NA	NA
9/1		0.24±0.06	0.22±0.05	8.28±0.7	NA	NA	NA
10/0	0.5%$CaCl_2$	0.35±0.14	0.33±0.13	NA	0.73±0.04	NA	NA
9.5/0.5		0.17±0.09	0.15±0.08	NA	NA	NA	NA
9/1		0.14±0.07	0.13±0.06	NA	NA	NA	NA
10/0	1%$CaCl_2$	0.30±0.06	0.37±0.06	NA	0.80±0.14	NA	NA
9.5/0.5		0.28±0.07	0.26±0.06	NA	NA	0.79±0.08	NA
9/1		0.39±0.11	0.35±0.09	NA	NA	0.55±0.32	NA

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3 และ 4 จะเห็นว่า ทั้งชนิดและความเข้มข้นของเกลือต่างก็มีผลต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของสารผสมของแป้งมันสำปะหลังกับคาร์ราจีแนน ทั้งนี้เป็นผลจากอันตรกริยาร่วมระหว่างแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกับเกลือในระบบ โดยระบบที่มีการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนจะมีผลมากกว่าเนื่องจากแคปปา-คาร์จีแนนสามารถเกิดเจลได้ การเติมเกลือ โดยเฉพาะ KCl จะทำให้ความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น (Thomas, 1997)

2.3.2 ผลของซูโครส

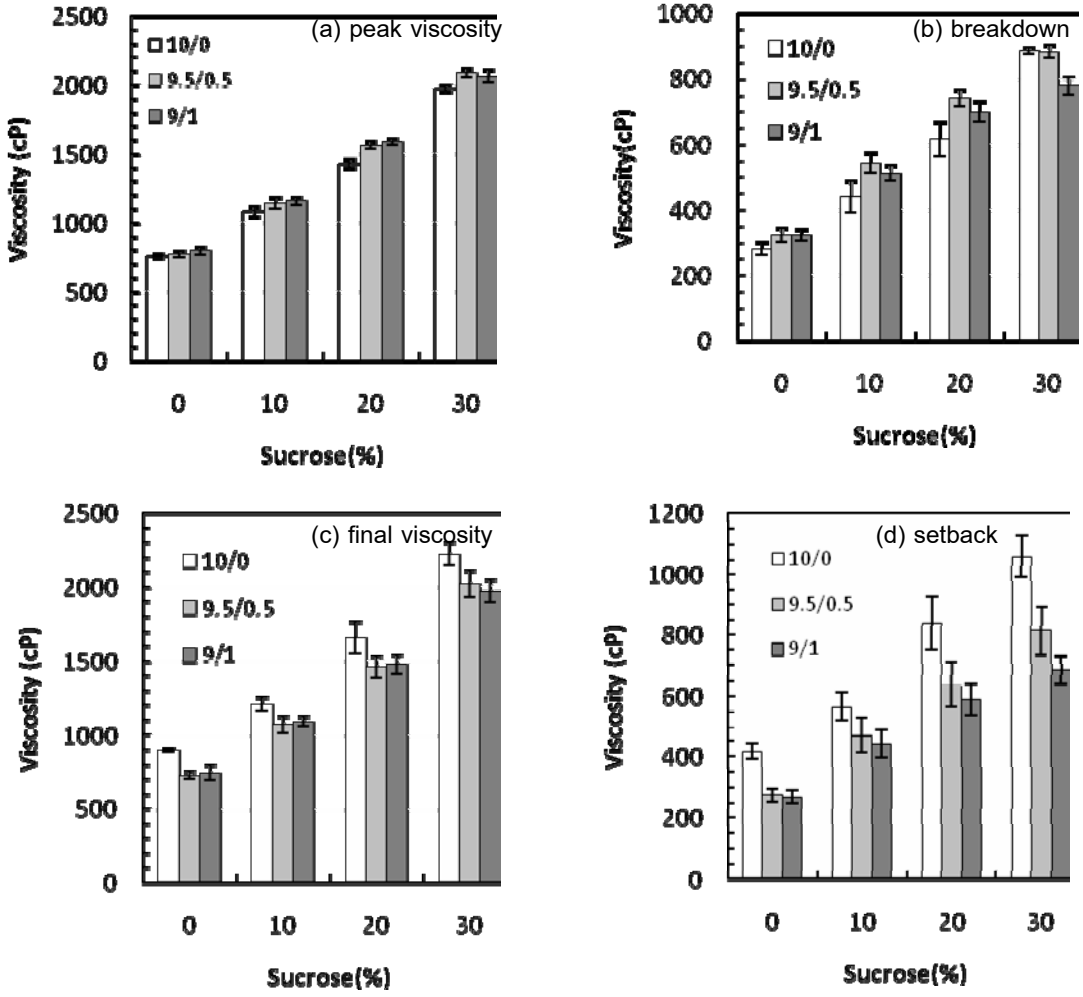
ซูโครสเป็นน้ำตาลชนิดไดแซคคาไรด์ประกอบด้วยกลูโคส 1 โมลกุลเชื่อมต่อกับโมเลกุลของฟรุคโตสด้วยพันธะโคเวเลนท์ ซูโครสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอาหารใช้ในการปรับรสชาติให้อาหารมีรสหวาน ทั้งยังสามารถใช้ในประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้ในการถนอมอาหารโดยการแช่อิ่ม นอกจากนี้ซูโครสยังมีบทบาทต่อสมบัติบางประการในผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบ

เมื่อพิจารณาผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับแคปปา-คาร์ราจีแนน (ตารางที่ 5 และ ภาพที่ 15) พบว่า ซูโครสมีผลต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40% ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มสูงขึ้น เป็นนัยว่าในกระบวนการแปรรูปจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้ตัวอย่างสุก นอกจากนี้ยังมีผลให้ความหนืดสูงสุดหรือ peak viscosity, breakdown, ค่าความหนืดสุดท้าย และค่า setback เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลของแคปปา-คาร์ราจีแนน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแคปปา-คาร์ราจีแนนทำให้ค่าสมบัติเพสติงต่างๆ ลดลงยกเว้นค่าอุณหภูมิในการเกิดเพสต์

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์ราจีแนนกับซูโครสต่อแป้งมันสำปะหลังโดยสังเกตเปรียบเทียบเฉพาะตัวอย่างที่มีการเติมและไม่เติมคาร์ราจีแนนจะพบว่า ตัวอย่างที่ทำการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่ระดับซูโครส 10% ขึ้นไป จะทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและอุณหภูมิในการเกิดเพสต์สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเติมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเติมน้ำตาลลงไปในระบบจะส่งผลให้องค์ประกอบอื่นๆ เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่การเติมน้ำตาลแบบแทนที่น้ำ จะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในระบบลดลงแต่ปริมาณแป้งและคาร์ราจีแนนคงเดิม นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงทำให้อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อน้ำอิสระเพิ่มขึ้นและทำให้มีความแตกต่างด้านสมบัติการเกิดเพสต์มากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนมากขึ้นจากตอนแรกที่ระดับน้ำตาลซูโครส 0% ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างที่ระดับ 10/0 และ 9.5/0.5 ได้ ค่าดังกล่าวตรงกันข้ามกับค่าความหนืดสุดท้าย และค่า Setback ที่พบว่าตัวอย่างที่ไม่เติมแคปปา-คาร์ราจีแนนกลับมีค่าสูงที่สุด จึงเป็นไปได้ว่าแคปปา-คาร์ราจีแนนมีส่วนในการเข้าร่วมสร้างโครงสร้างตาข่ายภายในระบบ (Techawipharat, 2008)

ตารางที่ 5 อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปาคาร์ราจีแนน

ซูโครส (%)	TS/kCAR		
	10/0	9.5/0.5	9/1
0	69.7 ± 1.0	73.7 ± 0.2	74.7 ± 0.5
10	71.3 ± 0.2	74.2 ± 0.2	75.0 ± 1.2
20	74.6 ± 0.2	76.8 ± 0.5	78.5 ± 0.2
30	80.3 ± 1.5	81.2 ± 0.9	82.3 ± 0.4

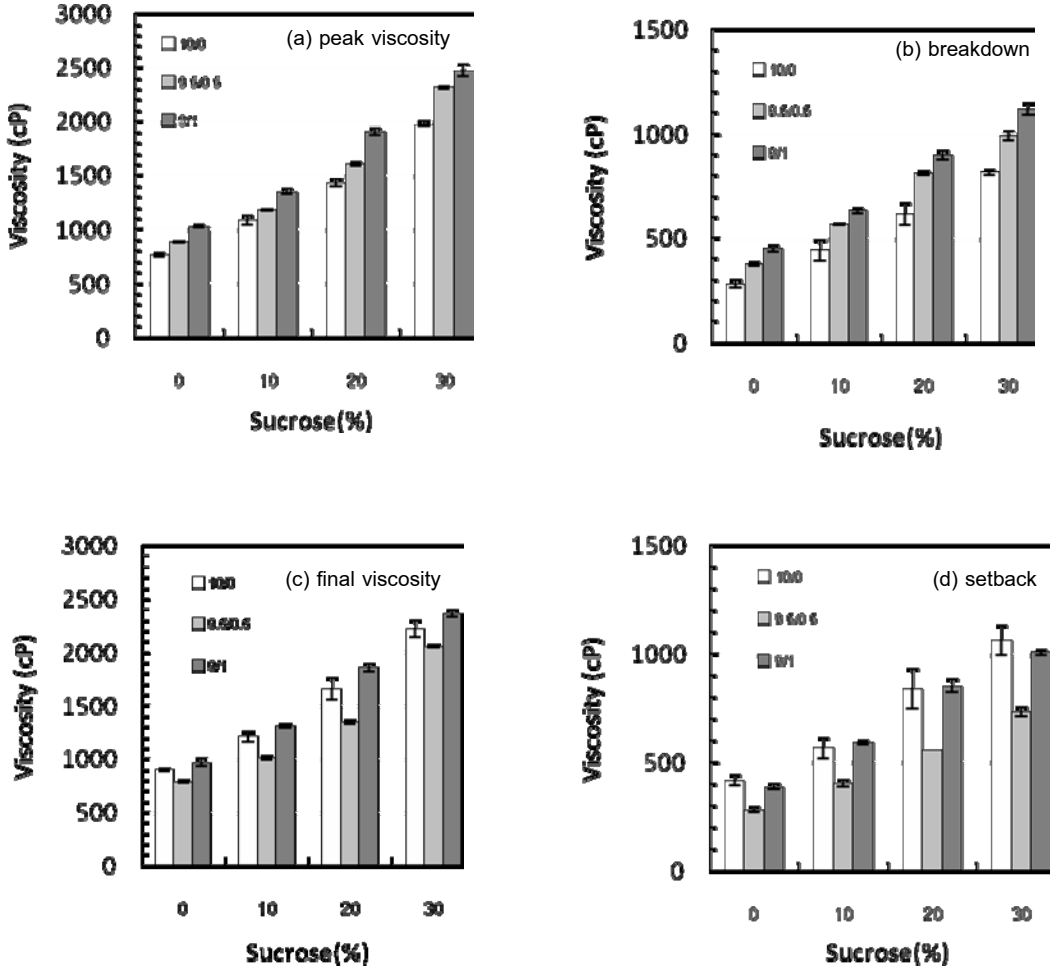


ภาพที่ 15 ผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมแคปปา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%; (a) peak viscosity, (b) breakdown, (c) final viscosity และ (d) setback

เมื่อพิจารณาผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไอออตา-คาร์ราจีแนน (ตารางที่ 6 และ ภาพที่ 16) พบว่า ซูโครสมีผลต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างเมื่อปริมาณซูโครสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40% ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเพสต์เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับตัวอย่างสารผสมแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน เมื่อพิจารณาตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไอโอตา-คาร์ราจีแนน จะมีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย ค่า breakdown และค่า setback แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นในระบบ ในระบบที่เป็นการเติมน้ำตาลแทนที่น้ำนี้ ทำให้ลักษณะของตัวอย่างแป้งที่ได้หลังการให้ความร้อนมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากซูโครสซึ่งมีสมบัติเป็นสารดูดความชื้นได้ดีกว่าแป้ง และสามารถสร้างพันธะกับน้ำได้เร็วกว่า (Bayarri et al., 2004)

ตารางที่ 6 อุณหภูมิในการเกิดเพสต์ของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและไอออตาคาร์ราจีแนน

ซูโครส (%)	TS/iCAR		
	10/0	9.5/0.5	9/1
0	69.7 ± 1.0	71.0 ± 0.6	71.3 ± 0.2
10	71.3 ± 0.2	73.2 ± 0.1	73.7 ± 0.5
20	74.6 ± 0.2	76.1 ± 0.3	76.8 ± 0.4
30	80.3 ± 1.5	81.0 ± 0.5	82.0 ± 0.2



ภาพที่ 16 ผลของซูโครสต่อสมบัติเพสติงของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังผสมไอออตา-คาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ (TS/iCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1) ความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 5%; (a) peak viscosity, (b) breakdown, (c) final viscosity และ (d) setback

จากการศึกษาผลของซูโครสต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์ราจีแนน (ตารางที่ 7-8) พบว่า การเติมซูโครสมีผลต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง เมื่อพิจารณาค่า hardness (แรงที่ทำให้เจลเกิดการเสียรูป) จากตารางที่ 7 พบว่าตัวอย่างที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อแคปปา-คาร์ราจีแนนเท่ากับ 9.5/0.5 และ 9/1 ที่เติมซูโครสมีค่า hardness สูงกว่าตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกันที่ไม่ได้ทำการเติมซูโครส ขณะที่ตัวอย่างที่ไม่เติมแคปปา-คาร์ราจีแนน ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเป็นผลจากการที่ซูโครสช่วยสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในแคปปา-คาร์ราจีแนน ทำให้ junction zones เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างเจลเกิดความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ตัวอย่างเจลเสียสภาพ (Nishinari et al., 1990; Sudhakar et al., 1995) อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างที่เติมไอออตา-คาร์ราจีแนน พบว่า ค่า hardness ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักทั้งที่เติมและไม่เติมซูโครส (ภาพที่ 17)

เมื่อพิจารณาค่า cohesiveness (การรวมตัวกันภายในของตัวอย่าง) เป็นค่าที่ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้าง พบว่า ซูโครสมีผลให้ค่า cohesiveness ของตัวอย่างที่อัตราส่วน 10/0 มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าซูโครสมีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างให้กับตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างที่มีการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนน พบว่า ซูโครสมีผลให้ค่า cohesiveness เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจเป็นผลจากลักษณะตัวอย่างที่แข็งเปราะ ในทางกลับกัน ตัวอย่างที่มีการเติมไอออตา-คาร์ราจีแนน กลับพบว่า ซูโครสช่วยเพิ่มค่า cohesiveness ได้มากขึ้น

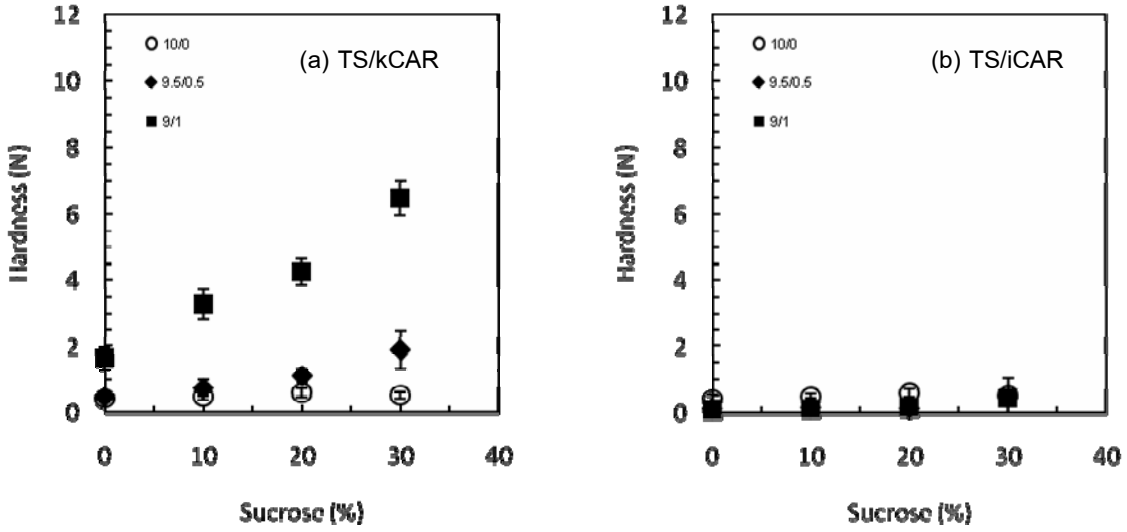
เมื่อพิจารณาค่า springiness (การกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิมเมื่อถอนแรง) ซึ่งแสดงถึง elasticity ของตัวอย่าง พบว่า ซูโครสทำให้ค่า springiness เพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ไม่มีคาร์ราจีแนน แต่เมื่อเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนกลับพบว่าค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อันเป็นผลจากลักษณะของเจลตัวอย่างนั่นเอง สำหรับค่า gumminess (ระดับความเป็นกาวยางหรือแป้งเปียก) แสดงถึงแรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างแตกและอยู่ในสภาพที่พร้อมจะกลืน พบว่า ซูโครสมีผลต่อค่าดังกล่าวเช่นกัน ทั้งนี้สำหรับค่า adhesiveness (การเกาะติดผิว) ซึ่งแสดงถึงลักษณะของตัวอย่างที่มีความหนืดและต้องใช้แรงในการถอนหัววัดออกจากตัวอย่าง พบว่าค่าที่ได้มีค่าน้อยมากทั้งในระบบที่มีและไม่มีซูโครส

ตารางที่ 7 ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนน

		สมบัติด้านเนื้อสัมผัส					
		Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness	Springiness	Gumminess	Adhesiveness
TS/kCAR	ซูโครส (%)			(-)	index	(N)	(Nm)
10/0	0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.48 ± 0.11	0.35 ± 0.07	0.16 ± 0.09	0.68 ± 0.13	0.06 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9/1		1.64 ± 0.34	1.07 ± 0.23	0.32 ± 0.06	1.26 ± 0.35	0.54 ± 0.18	0.00 ± 0.00
10/0	10	0.50 ± 0.10	0.46 ± 0.11	0.49 ± 0.10	0.83 ± 0.06	0.15 ± 0.10	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.75 ± 0.25	0.67 ± 0.19	0.48 ± 0.23	0.77 ± 0.17	0.46 ± 0.17	0.00 ± 0.00
9/1		3.27± 0.44	2.39 ± 0.31	0.29 ± 0.04	1.15 ± 0.21	0.95 ± 0.13	0.00 ± 0.00
10/0	20	0.61 ± 0.12	0.57 ± 0.13	0.76 ± 0.16	0.89 ± 0.08	0.24 ± 0.23	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		1.13 ± 0.18	1.06 ± 0.16	0.48 ± 0.17	0.87 ± 0.08	0.54 ± 0.17	0.00 ± 0.00
9/1		4.24 ± 0.41	3.23 ± 0.36	0.34 ± 0.08	0.93 ± 0.17	1.43 ± 0.33	0.00 ± 0.00
10/0	30	0.54 ± 0.11	0.49 ± 0.09	1.13 ± 0.77	0.91 ± 0.05	0.40 ± 0.09	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		1.90 ± 0.57	1.66 ± 0.46	0.39 ± 0.17	0.81 ± 0.09	0.73 ± 0.22	0.00 ± 0.00
9/1		6.47 ± 0.51	3.67 ± 0.61	0.25±0.05	1.1 ± 0.44	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00

ตารางที่ 8 ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและไอออตา-คาร์ราจีแนน

		สมบัติด้านเนื้อสัมผัส					
		Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness	Springiness	Gumminess	Adhesiveness
TS/iCAR	ซูโครส (%)			(-)	index	(N)	(Nm)
10/0	0	0.44 ± 0.13	0.42 ± 0.08	0.12 ± 0.06	0.77 ± 0.22	0.08 ± 0.03	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.02	1.02 ± 0.47	0.62 ± 0.21	0.33 ± 0.07	0.00 ± 0.00
9/1		0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.04	2.13 ± 1.65	0.65 ± 0.20	0.32 ± 0.14	0.00 ± 0.00
10/0	10	0.50 ± 0.10	0.46 ± 0.11	0.49 ± 0.10	0.83 ± 0.06	0.15 ± 0.10	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.18 ± 0.02	0.21 ± 0.01	6.97 ± 0.81	0.10 ± 0.03	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
9/1		0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.02	7.22 ± 1.48	0.09 ± 0.00	0.00 ± 0.01	0.00 ± 0.00
10/0	20	0.61 ± 0.12	0.57 ± 0.13	0.76 ± 0.16	0.89 ± 0.08	0.24 ± 0.23	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.04	6.04 ± 0.94	0.14 ± 0.08	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00
9/1		0.16 ± 0.00	0.16 ± 0.02	7.10 ± 1.13	0.83 ± 0.36	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00
10/0	30	0.54 ± 0.11	0.49 ± 0.09	1.13 ± 0.77	0.91 ± 0.05	0.40 ± 0.09	0.00 ± 0.00
9.5/0.5		0.48 ± 0.14	0.44 ± 0.12	8.26 ± 1.25	0.60 ± 0.23	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
9/1		0.46 ± 0.15	0.44 ± 0.15	8.34 ± 0.72	0.37±0.16	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00



ภาพที่ 17 ผลของซูโครสต่อค่า hardness ของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนนที่อัตราส่วนต่างๆ และมีความเข้มข้นรวมของพอลิแซคคาร์ไรด์ 5%, (a) แคปปา-คาร์ราจีแนน และ (b) ไอออตา-คาร์ราจีแนน

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของคาร์ราจีแนน เกลือ และซูโครส ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อคาร์ราจีแนนเท่ากับ 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 ชนิดของคาร์ราจีแนนที่ศึกษา 2 ชนิด คือ แคปปา-คาร์ราจีแนน และไอออตา-คาร์ราจีแนน เกลือที่ศึกษามี 3 ชนิด คือ NaCl, KCl และ CaCl2 ที่ความเข้มข้น 0, 0.5 และ 1% ส่วนซูโครสศึกษาที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% พบว่า ชนิดของคาร์ราจีแนนมีผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังได้แก่ สมบัติเพสติงในด้านต่างๆ ค่ากำลังการพองตัว ความหนืด สมบัติวิสโคอิลาสติก สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส และความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง การเติมเกลือชนิดต่างๆ มีผลในการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและคาร์ราจีแนน โดยเกลือบางชนิดจะมีผลช่วยเพิ่มความแข็งของเจล การเติมซูโครสมีผลให้อุณหภูมิในการเพสต์ของทุกตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น และยังทำให้สมบัติเพสติงและสมบัติด้านเนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารอ้างอิง

สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2550. ได้จาก http://www.thaitapiocastarch.org/crop.asp วันที่ 9 ตุลาคม 2550.

Babic, J., Subaric, D., Ackar, D., Pilizota, V., Kopjar, M., and Tiban, N.N. 2006. Effects of pectin and carrageenan on thermophysical and rheological properties of tapioca starch. Czech Journal of Food Science. 24: 275-282.

Bayarri, S., L. Duran. and E. Costell. 2004. Influence of sweeteners on the viscoelasticity of hydrocolloids gelled systems. Food Hydrocolloids. 18. 611-619.

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.

Funami, T., Noda, S., Hiroe, M., Asai, I., Ikeda, S., and Nishinari, K. 2008. Functions of iota-carrageenan on the gelatinization and retrogradation behaviors of corn starch in the presence or absence of various salts. Food Hydrocolloids. 22(7): 1273-1282.

Glicksman, M. 1982. Food Hydrocolloids. CRC Press, Boca Raton, FL.

Li, Jeng-Yune and A. Yeh. 2001. Relationships between thermal, rheological characteristic and swelling power for various starches, J. Food Eng. 50: 141-148.

Moorthy, S.N. 2004. Tropical sources of starch. pp. 321-359. In Eliasson, A.C. (ed). Starch in Food: Structure, Function and Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

Nunes, M. C., P. Batista, A. Raymundo, M.M. Alves and I. Sousa. 2003. Vegetable proteins and milk puddings. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 31: 21-29.

Piculell, L. 1995. Gelling carrageenans. In A.M. Stephen (ed). Food Polysaccharides and Their Applications (pp. 205-244). Marcel Dekker, Inc., NY.

Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong, S. Ikeda and K. Nishinari. 2006. Influence of tamarind seed xyloglucan on rheological properties and thermal stability of tapioca starch. Journal of Food Engineering, 77: 41-50.

Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong and T. Suwonsichon. 2007. Thermal and rheological properties of tapioca starch and xyloglucan mixtures in the presence of sucrose. Food Research International. 40(2): 239-248.

Rapaille, A., and J. Vanhemelrijck. 1997. Modified starch. In A. Imeson (ed.), Thickening and Gelling Agents for Food (pp. 199–229). Blackie Academic and Professional, London.

Sae-Kang, V., and M. Suphantharika. 2006. Influence of pH and xanthan gum addition on freeze-thaw stability of tapioca starch pastes. Carbohydrate Polymers. 65: 371-380.

Sriroth, K., B. Lachaiyaphum and K. Piyachomkwan. 2007. Present situation and future potential of cassava in Thailand. Retrieved from http://www.cassava.org/2007/dmdocuments/presentsituation2.pdf on October 9, 2007.

Sudhakar, V., R.S. Singhal and P. Kulkarni. 1995. Studies on starch-hydrocolloid interactions: effect of salts. Food Chemistry, 53: 405-408.

Sudhakar, V., R.S. Singhal and P.R. Kulkarni. 1995. Effect of sucrose on starch-hydrocolloid interactions. Food Chemistry. 52: 281-284.

Techawipharat, J., M. Suphantharika 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.

Tischer, P.C.S.F., M.D. Noseda, R.A. Freitas, M.R. Sierakowski and M.E.R. Duarte. 2006. Effects of iota-carrageenan on the rheological properties of starches. Carbohydrate Polymers, 65: 49-57.

Thomas, W.R. 1997. Carrageenan. In A. Imeson (ed). Thickening and Gelling Agents for Food (pp. 45-59). Blackie Academic & Profession, London.

Viturawong, Y., P. Achayuthakan and M. Suphantharika. 2008. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures: effects of molecular weight of xanthan and different salts. Food Chemistry. 111(1): 106-114.

Zobel, H.F. and Stephen, A.M. 1995. Starch: structure, analysis, and application. In A.M. Stephen (ed). Food Polysaccharides and Their Applications (pp. 19-66). Marcel Dekker, Inc., NY.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

ได้นำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์ หัวข้อเรื่อง Effect of Carrageenan and Sucrose on Physical Properties of Tapioca Starch ในงานประชุมวิชาการครั้งที่ 50 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อวันที่ 31 มกราคม ถึง 2 กุมภาพันธ์ 2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมีการตีพิมพ์ผลงานวิจัยใน Proceeding ของงานประชุมวิชาการนี้

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำมาใช้ในการสอนนิสิตทั้งในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท รวมทั้งใช้ในการแนะนำการทำวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังได้ต่อยอดงานวิจัยโดยได้รับทุนสนับสนุนสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่มีลักษณะเป็นเจลโดยมีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบ (อยู่ระหว่างการทำวิจัย) ผลงานที่ได้จะมีภาคอุตสาหกรรมนำไปใช้ เพื่อเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีการใช้แป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัตถุดิบในประเทศร่วมกับการใช้คาร์ราจีแนนเพื่อช่วยในการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก

Effect of Kappa-Carrageenan and Sucrose on Textural Properties and Freeze-Thaw Stability of Tapioca Starch Gel

Salinda Sedtha and Thepkunya Harnsilawat

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry
Kasetsart University, THAILAND

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแคปปา-คาร์ราจีแนน (kCAR) และซูโครสต่อสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสและความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลายของเจลแป้งมันสำปะหลัง (TS) จากการศึกษา พบว่า เจลของผสมระหว่าง TS และ kCAR ที่ปราศจากซูโครสที่อัตราส่วน 9/1 จะมีค่าสมบัติด้านเนื้อสัมผัสทุกค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเติมซูโครสจะมีผลให้ค่า Hardness, Gumminess และ Adhesiveness มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่า Cohesiveness มีค่าลดลง นอกจากนี้การเติม kCAR และซูโครสยังมีผลต่อความคงทนต่อการแช่แข็งและละลายของตัวอย่าง โดยการเติม kCAR เพียงอย่างเดียวจะมีผลให้ปริมาณน้ำที่แยกออกมามีมากขึ้น ในขณะที่การเติมซูโครสสามารถลดปริมาณของเหลวที่แยกออกมาได้ ความรู้ที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทขนมหวานที่มีลักษณะเป็นเจลโดยมีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังได้

คำนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารมากมายมีแป้งเป็นส่วนประกอบโดยใช้เป็นสารอุ้มน้ำและทำให้ข้นหนืด ในประเทศไทย แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ผลิตได้มาก ให้ความหนืดสูง ไม่มีสีและกลิ่น ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแพ้กลูเตน แต่ยังมีปัญหาในการใช้เนื่องจากลักษณะบางประการที่ไม่เป็นที่ต้องการ จึงมีการนำไฮโดรคอลลอยด์มาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของแป้ง Chaisawang and Suphantharika, 2006; Chantaro and Pongsawatmanit, 2010, Pongsawatmanit *et al.* 2007) อย่างไรก็ตาม การศึกษาในระบบที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดที่ทำให้เกิดเจลยังมีน้อย ซึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะเป็นเจลมักใช้เจลาติน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากสัตว์ จึงมีข้อจำกัดสำหรับกลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่ม เช่น ผู้ที่นับถือศาสนาอิสลามและผู้ที่บริโภคมังสวิรัติ ในขณะที่คาร์ราจีแนนซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายสีแดงเป็นสารก่อเจลที่น่าสนใจ นอกจากนี้ซูโครสยังเป็นน้ำตาลที่ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเพื่อให้รสหวาน และยังมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบอีกด้วย (Pongsawatmanit *et al.*, 2007) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของแคปปา-คาร์ราจีแนนและซูโครสต่อสมบัติบางประการของเจลแป้งมันสำปะหลัง เพื่อนำความรู้ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง ชั่ง kCAR แล้วค่อยๆ เติมลงในน้ำ DI ทำการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติม TS แล้วทำการกวนผสมต่อจนกระจายทั่ว ของผสมที่ได้จะมีปริมาณพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด 5 %w/w ในอัตราส่วน TS/kCAR = 10/0, 9.5/0.5 และ 9/1 แล้วจึงเติมซูโครสปริมาณ 0 และ 10 %w/w ทำการกวนผสมต่ออีก 30 นาที และให้ความร้อน 95°C เป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวอย่างเจลของผสม

การศึกษาสมบัติด้านเนื้อสัมผัส เทตัวอย่างขณะร้อนลงในภาชนะทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 3.5 ซม. ทิ้งให้เย็นก่อนปิดฝาและแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชม. ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น Lloyd, UK) ด้วยวิธี TPA (ดัดแปลงจาก Nunes, 2003)

การศึกษาความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลาย บรรจุตัวอย่างปริมาณ 25 มล. ลงในหลอดหมุนเหวี่ยงขนาด 50 มล. เหวี่ยงไล่ฟองอากาศที่ 190xg นาน 2 นาที แล้วนำไปแช่เยือกแข็ง (-20°C) นาน 22 ชม. จากนั้นทำการละลาย (30°C) นาน 2 ชม. นับเป็น 1 รอบ ทำจนครบ 10 รอบ สุ่มตัวอย่างในรอบที่ 1, 3, 5 และ 10 มาบันทึกน้ำหนักและนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 3500xg เป็นเวลา15 นาที แยกส่วนใสตอนบนออกและชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ (ดัดแปลงจาก Sae-kang and Supantharika, 2006)

การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ จัดสิ่งทดลองแบบ 3×2 แฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด วิเคราะห์ผลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ สรุปผลกรทดลอง

Table 1 Textural properties of TS/kCAR mixtures containing sucrose (0% and 10%).

TS/kCAR	Sucrose	Textural properties					
Ratio	(%)	Hardness1 (N)	Hardness2 (N)	Cohesiveness	Springiness	Gumminess	Adhesiveness
10/0	0	0.64 ± 0.05 bE	0.37 ± 0.03 cF	0.12 ± 0.05 bD	0.83 ± 0.02 bD	0.07 ± 0.01 bE	0.03 ± 0.01 cE
9.5/0.5		0.67 ± 0.04 bE	0.48 ± 0.01 bE	0.06 ± 0.01 cE	0.73 ± 0.03 cE	0.04 ± 0.00 bE	0.05 ± 0.00 bD
9/1		2.02 ± 0.02 aB	1.25 ± 0.02 aB	0.34 ± 0.01 aB	1.49 ± 0.01 aA	0.52 ± 0.02 aC	0.23 ± 0.00 aB
10/0	10	0.75 ± 0.02 cD	0.65 ± 0.01 cD	0.52 ± 0.05 aA	0.90 ± 0.01 bC	0.60 ± 0.03 bB	0.05 ± 0.00 cD
9.5/0.5		1.08 ± 0.02 bC	0.91 ± 0.03 bC	0.29 ± 0.06 bC	0.82 ± 0.02 cD	0.42 ± 0.02 cD	0.08 ± 0.00 bC
9/1		3.80 ± 0.01 aA	2.67 ± 0.02 aA	0.28 ± 0.01 bC	1.22 ± 0.02 aB	0.90 ± 0.00 aA	0.36 ± 0.01 aA

Table 2 The percentage of syneresis of TS/kCAR mixtures from freeze-thaw method (1, 3, 5 and 10 cycles) comparison between 0% and 10% sucrose.

TS/kCAR	Sucrose	Water separation (%)			
Ratio	(%)	Cycle 1	Cycle 3	Cycle 5	Cycle 10
10/0	0	1.37 ± 0.00 cC	58.59 ± 0.24 bB	63.32 ± 0.18 aA	ND
9.5/0.5		27.00 ± 0.66 bB	59.30 ± 0.14 aA	63.47 ± 0.03 aA	ND
9/1		49.63 ± 0.29 aA	56.26 ± 0.21 cC	ND	ND
10/0	10	0.0D	0.65 ± 0.17 bF	8.31 ± 1.18 cD	28.58 ± 0.7 b
9.5/0.5		0.04 ± 0.03 bD	10.07 ± 0.49 dE	17.12 ± 1.28 bC	29.66 ± 1.14 b
9/1		1.63 ± 0.49 aC	11.16 ± 0.11 aD	28.25 ± 0.5 aB	38.36 ± 1.29 a

Assays were performed in triplicate.
-Means ± S.D. values followed by different small letters within the same column are significantly different ($p \le 0.05$) at 0% sucrose or 10% sucrose.
-Means ± S.D. values followed by different capital letters within the same column are significantly different ($p \le 0.05$) at 0% sucrose and 10% sucrose.

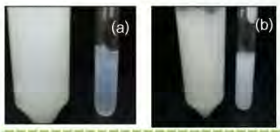


Figure 1 TS/kCAR mixture 10/0(a) and 9/1(b) after freeze-thawing for 5 cycles

ในระบบที่ปราศจากซูโครสที่อัตราส่วน TS/kCAR = 9/1 จะมีค่าสมบัติด้านเนื้อสัมผัสทุกค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเติมซูโครสจะมีผลให้ค่า Hardness, Gumminess และ Adhesiveness มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ซูโครสมีผลต่อค่า Cohesiveness โดยทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่มี kCAR ปริมาณน้อย (Table 1) การเติมซูโครสยังช่วยลดปริมาณของเหลวที่แยกออกมาภายหลังการแช่แข็งและละลายได้ (Table 2) เมื่อพิจารณาลักษณะตัวอย่างที่ผ่านวงจรแช่แข็ง-ละลายรอบที่ 5 จนถึง 10 ตัวอย่างจะมีโครงสร้างเปลี่ยนไป โดยมีลักษณะเปลี่ยนจากตัวอย่างที่ลักษณะคล้ายเจลใสเป็นสีขาวขุ่น กลายเป็นโครงสร้างพรุนคล้ายเส้นใยฟองน้ำ (Figure 1) ทำให้เกิดการดูดน้ำกลับอย่างรวดเร็วและไม่สามารถวัดค่าได้

สรุป จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าการเติม kCAR และซูโครสสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสและความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลายของเจลแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่มีลักษณะเป็นเจลและมีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังได้

เอกสารอ้างอิง

Nunes, M. C., P. Batista, A. Raymundo, M.M. Alves, I. Sousa. 2003. Vegetable proteins and milk puddings. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** 31: 21-29.
Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong and T. Suwonsichon. 2007. Thermal and rheological properties of tapioca starch and xyloglucan mixtures in the presence of sucrose. **Food Res. Int.** 40: 239-248.
Sae-kang, V. and M. Suphantharika. 2006. Influence of pH and xanthan gum addition on freeze-thaw stability of tapioca starch pastes. **Carbohyd. Polym.** 65: 371-380.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และโครงการทุนวิจัยร่วมคุณสาหกรรมระหว่างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กับบมูลนิธิส่งเสริมการวิจัยในมหาวิทยาลัยเพื่อคุณสาหกรรมไทย (KU-TURPIF) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย
ขอขอบคุณบริษัท Siam Modified Starch และ FMC Biopolymer ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลังและแคปปา-คาร์ราจีแนนตามลำดับ