



รายงานการวิจัย

ผลของสมบัติทางวิทยากระแสนและกายภาพเคมีของสารผสมโพลีแซคคาไรด์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร
ต่อระบบต้นแบบอาหารแช่แข็ง

Influences of Rheological and Physicochemical Properties of Mixed Polysaccharide-
Modified Tapioca Starch on Frozen Food Model System

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ผลของสมบัติทางวิทยากระแสและกายภาพเคมีของสารผสมโพลีแซคคาไรด์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร
ต่อระบบต้นแบบอาหารแช่แข็ง

Influences of Rheological and Physicochemical Properties of Mixed Polysaccharide-
Modified Tapioca Starch on Frozen Food Model System

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวัม ไทยอุดม

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2557

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปร 2 ชนิดคือแป้งอะซิไทเลต (AS) หรือแป้งโซเดียมออกซิไดซ์ซีซีเนต (SSO) กับไฮโดรคอลลอยด์ 3 ชนิด ได้แก่ เพคติน (P) แคปลา-คาราจีแนน (K) และ โลคัสปินกัม (L) ในระบบอาหารแช่แข็ง ที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านวิทยากระแสเพื่อพฤติกรรมการไหล ค่าความหนืดและคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติก อัตราการละลายของผลึกแข็งด้วยการแช่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาวัดอัตราการละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง DSC ที่มีอัตราส่วนของแป้งดัดแปรต่อสารไฮโดรคอลลอยด์ที่แตกต่างกันได้แก่ 0:3, 1:2, 2:1 และ 3:0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ในสารละลายซีเตรทบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH แตกต่างกัน ในสภาวะที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติด้านวิทยากระแสบว่าสารละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudo plastic โดยตัวอย่าง K มีค่าความหนืดสูงสุด ตามด้วยตัวอย่าง L AS SSO และ P ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสม AS กับไฮโดรคอลลอยด์จะมีความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่าง SSO กับไฮโดรคอลลอยด์ และตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับ L จะมีความหนืดสูงกว่า K และ P ตามลำดับ ตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแป้งดัดแปรกับ K หรือ L มีค่าความหนืดลดลงเมื่อลดสัดส่วนของ K หรือ L ส่วนในกรณีที่มีผสมกับเพคตินค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดสัดส่วนของ P

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติวิสโคอีลาสติกโดยวัดที่ค่าความถี่ 2 Hz ที่ 1% strain โดยการลดอุณหภูมิของสารลงจาก 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ของสารผสมทั้งหมดพบว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่ามอดุลัสสะสม (G') สูงขึ้นทันทีที่อุณหภูมิลดลงถึง -2 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสค่า G' สูงขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิถึง -4 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส แบบ Frequency sweep โดยกำหนดให้ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.1- 100 Hz โดยกำหนดให้ % strain คงที่ที่ 1 พบว่าค่า G' ของตัวอย่างชนิดเดียวกันที่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้ง AC กับ K หรือ L มีค่า G' ต่ำกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของ SSO กับ K หรือ L ในขณะที่ สารผสมระหว่าง AC กับ P ค่า G' มีค่าสูงกว่าสารผสมระหว่าง SSO กับ P ที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์เท่ากัน โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่าง K หรือ L กับแป้งดัดแปรค่า G' มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแป้งดัดแปร ในขณะที่ สารผสมระหว่าง P กับแป้งดัดแปรค่า G' สูงขึ้นเมื่อเพิ่มเพิ่มสัดส่วนของแป้งดัดแปร

เมื่อพิจารณาอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งพบว่าตัวอย่าง K มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งช้ากว่าตัวอย่าง L AS OSS และ P ตามลำดับ และเมื่อศึกษาในสารผสมของแป้งดัดแปร AS

หรือ OSS กับ K หรือ L พบว่าอัตราการละลายลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ K หรือ L ในขณะที่สารผสมของแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับ P มีอัตราการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ P โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมของ P กับแป้งดัดแปร AS หรือ SSO จะมีอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่เร็วกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของ K หรือ L กับแป้งดัดแปร AS หรือ SSO ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงความร้อนพบว่าค่า Peak Temperature, T_p และค่า Temperature on set, T_o ของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยว เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ที่เท่ากันพบว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของ SSO กับไฮโดรคอลลอยด์มีแนวโน้มว่าค่า T_o มีค่าสูงกว่า ในขณะที่มีแนวโน้มของค่า ΔH และ T_p ต่ำกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของ AS กับไฮโดรคอลลอยด์ โดยในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสค่า T_p และ T_o มีค่าต่ำกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีการใช้พลังงานเพื่อสลายผลิตภัณฑ์น้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส

เมื่อพิจารณาผลของค่า pH ที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติกโดยวัดค่า G' ที่ความถี่ 1 Hz และ 1 % strain และคุณสมบัติเชิงความร้อน (โดยเปรียบเทียบที่ pH 3.5 และ 6.5) คุณสมบัติด้านความหนืด และอัตราการละลาย (โดยเปรียบเทียบที่ 3.5 5.0 6.5 และ 8.0) ที่มีอัตราส่วนของแป้งกับไฮโดรคอลลอยด์แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างที่เป็นสารละลายเดี่ยวตัวอย่างที่มีค่า pH 3.5 มีค่า G' สูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ pH 6.5 ส่วนค่าความหนืดของแป้ง AS และ L พบว่ามีค่าความหนืดเรียงตามความหนืดสูงสุดดังต่อไปนี้คือที่ pH 6.5, 5.0, 3.5 และ 8.0 ส่วนแป้ง SSO และ P มีลำดับความหนืดเรียงจากมากไปน้อยดังนี้คือที่ PH 3.5, 5.0, 6.5 และ 8.0 ส่วน K มีลำดับความหนืดเรียงจากมากไปน้อยดังนี้คือที่ PH 8.0, 6.5, 5.0 และ 3.5 ในกรณีที่เป็นสารผสมระหว่าง AS หรือ SSO กับ K, L หรือ P ทุกอัตราส่วนพบว่าที่ pH 3.5 มีค่า G' สูงกว่าที่ pH 6.5 ทั้งระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครส ส่วนค่าความหนืดของ AS กับ K ทุกอัตราส่วนที่ pH 6.5 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 8.0, 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ ในขณะที่สารผสมของ SSO กับ K ทุกอัตราส่วนที่ pH 8.0 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 6.5, 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความหนืดของ AS กับ L ทุกอัตราส่วนที่ pH 6.5 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 5.0, 8.0 และ 3.5 ตามลำดับ ในขณะที่สารผสมของ SSO กับ L ทุกอัตราส่วนที่ pH 5.0 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 6.5, 8.0 และ 3.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความหนืดของ AS หรือ SSO กับ P ทุกอัตราส่วนพบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของ pH ที่แตกต่างกันต่ออัตราการละลายพบว่าในกรณีของสารเดี่ยวอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่า pH ในกรณีของสารผสมระหว่างแป้ง AS หรือ SSO กับ K ทุกอัตราส่วนพบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ pH 3.5 และ 5.0 มีอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่ต่ำ

กว่าที่เตรียมที่ 6.5 และ 8.0 ส่วนสารผสมระหว่าง AS กับ L ที่ค่า pH 6.5 มีอัตราการละลายสูงสุด และ pH 8.0 มีอัตราการละลายต่ำสุด สารผสมระหว่าง SSO กับ L อัตราการละลายไม่ขึ้นกับค่า pH โดยที่ pH 6.5 และ 3.5 มีอัตราการละลายสูงกว่าที่ pH 5.0 และ 8.0 ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่าง AS หรือ SSO กับ P พบว่าตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรดจะมีอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งต่ำกว่าตัวอย่างที่มี pH 6.5 และ 8.0

แป้งดัดแปรหรือไฮโดรคอลลอยด์ที่ศึกษาในครั้งนี้มีผลต่อคุณสมบัติของอาหารที่แตกต่างกัน ขึ้นกับส่วนผสม อัตราส่วน และค่าความเป็นกรด - ต่างแตกต่างกัน การที่ผู้ประกอบการต้องการเลือกใช้แป้งดัดแปรชนิดใด ผสมร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดใด ต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของอาหารแช่แข็ง ส่วนผสมที่มีในอาหารรวมถึงกระบวนการผลิตของอาหารแต่ละชนิด หรืออาจจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ของแป้งหรือไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นเพิ่มเติมเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่แท้จริงของผู้ผลิต

Abstract

The objective of this study was to determine the effect of mixed substances of modified starches (acetylated starch: AS and sodium octenylsuccinate; SSO) and hydrocolloids (pectin: p, **K**-carrageena: K, and locus bean gum: L) on rheological properties and melting rate in frozen food model. The study of melting rate was carried out at -20°C for 24 hrs and the rate was determined at 25°C. The thermal characterization of the mix samples with different ratio of modified starch to hydrocolloid (0:3, 1:2, 2:1, and 3:0) was determined using DSC. The samples with final concentration of the mix at 1.5% and with or without 16% sucrose were determined for those properties in the varied pH which was adjusted by citrate buffer.

The results showed that all samples had pseudo-plastic flow behavior at 25°C. The samples containing K, L, AS, SSO, and P in order showed the highest to the lowest viscosity. The mixed samples of hydrocolloids and AS were more viscous than those with SSO. The mixes containing L, K and P with modified starch exhibited had the highest to the lowest viscosity in order. Decreasing the ratio of K or L to modified starch resulted in the decrease of sample viscosity while increasing P concentration to the samples containing modified starch showed increasing in viscosity.

Considering to the viscoelastic properties of samples measured at 2 Hz, 1% strain with a decrease of temperature from 0 to -10°C, the results showed that samples without sucrose gave a high value of G' after the temperature was reduced to -2°C while the samples with sucrose gave the high value of G' at temperature lower than -4°C. However, G' of samples with sucrose was lower than that of samples without sucrose at -10°C, measured at 0.1- 100 Hz, 1% fixed strain with a frequency sweep mode. At the same ratio of modified starch to hydrocolloid, samples with AC and K or L gave a lower G' value than the ones with SSO and K or L while the samples with AC and P showed the higher G' than that of samples containing SSO and P. G' decreased when modified starch was increased in samples containing K or L and modified starch but G' increased when modified starch was increased in samples containing P.

For the study of melting rate of ice crystals, the results exhibited that ice crystals melted from the most slowly to the fastest in samples containing such hydrocolloids or modified starches in the following order: K < L < AS < OSS < P. The melting rate of

mixed samples containing AS or OSS and K or L decreased when increasing K or L. The rate increased in samples containing AS or OSS with P when increasing the concentration of P. Samples containing modified starch and K or L melted slower than samples containing modified and P. Samples containing sucrose melted faster than those without sucrose.

The results of thermal properties showed that samples containing modified starch and hydrocolloid had the lower values of peak temperature (T_p) and temperature on set (T_o) than the samples without modified starch and hydrocolloid. T_p and ΔH of samples containing SSO and hydrocolloid were higher than those of samples with AS which was in contrast to T_o . T_o and T_p in samples with sucrose were lower than those in samples without sucrose. The energy for ice crystal melting in samples with sucrose was lower than that of samples without sucrose.

Considering to the effect of pH on viscoelastic properties measured for G' (at 1 Hz, 1% strain), thermal properties (at pH 3.5 and 6.5), viscosity, and melting rate (at pH 3.5, 5.0, 6.5, and 8.0) of samples containing the various ratio of modified starch and hydrocolloid compared with the solution without modified starch or hydrocolloid, the results showed that the latter samples had the higher G' at pH 3.5 than at pH 6.5. The viscosity of samples containing AS and L at a different pH increased in the following order: pH at 6.5 > 5.0 > 3.5 > 8.0 while the one of samples with SSO and P increased in the following order: 3.5 > 5.0 > 6.5 > 8.0. The samples (with or without sucrose) with AS or SSO and K, L, or P at any ratio of such starch and hydrocolloid had the G' at pH 3.5 higher than at pH 6.5. Viscosity of samples containing AS and K increased in the following order: pH at 6.5 > 8.0 > 5.0 > 3.5 while the one of samples containing SSO and K increased in the following order: pH at 8.0 > 6.5 > 5.0 > 3.5. The viscosity of samples with AS and L increased in the following order: pH at 6.5 > 5.0 > 8.0 > 3.5 while the one of samples containing SSO and L increased in the following order: pH at 5.0 > 6.5 > 8.0 > 3.5. The viscosity of samples with AS or SSO and P decreased with increasing pH.

The melting rate of ice crystals in samples with individual hydrocolloid or modified starch increased with increasing pH value. The melting rate of samples with AS or SSO and K at pH 3.5 and 5.0 was lower than that of samples prepared at pH 6.5

and 8.0. Samples with AS and L at pH 6.5 melted the fastest while the samples at pH 8.0 melted the most slowly. Samples containing SSO and L prepared at pH 6.5 and 3.5 melted faster than those at pH 5.0 and 8.0. Melting rate of samples containing AS or SSO and P at pH 3.5 and 5.0 was lower than that of samples at pH 6.5 and 8.0.

Modified starches or hydrocolloids used in this study influenced the properties of frozen food differently that depended on the composition of food, formulation, ratio of both substances, and pH. Thus, if the food manufacturers or producers would like to use such modified starches and hydrocolloids in their frozen food, they should consider to what type of modified starches and hydrocolloids should be used and how they should be prepared to get the suitable quality and property of such frozen food as well as the composition, processing and their interaction might be more examined.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนเงินวิจัย ขอขอบคุณสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้โอกาสและเวลาแก่ผู้วิจัยในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 3 และศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณคุณหทัยชนก นพจรูญศรี และคุณกัลยา ชันธรัตน์ที่ช่วยสละเวลาเป็นผู้ช่วยวิจัยในงานวิจัยชิ้นนี้จนประสบผลสำเร็จมาเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์ได้เช่นนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
2. บริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
วิทยากระแสของไหล (Rheology).....	7
แป้งดัดแปร (Modified Starch).....	9
คาราจีแนน.....	12
โลคัสปีนกัน.....	13
เพคติน.....	14
การเกิดปฏิสัมพันธ์ของไบโอโพลิเมอร์	16
3. วัสดุและวิธีการ	
3.1 วัตถุดิบ.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	20
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	23
4.	ผลการทดลองและการวิจารณ์	
4.1	ผลของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ต่อคุณภาพทาง วิทยากระแส.....	24
4.1.1	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนน.....	25
4.1.2	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัม.....	26
4.1.3	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับเพคติน.....	27
4.2	กลไกยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร กับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ในอาหารแช่แข็ง.....	29
4.2.1	ผลต่ออัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง	30
4.2.1.1	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนนต่ออัตราการละลาย.....	30
4.2.1.2	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัมต่ออัตราการละลาย.....	31
4.2.1.3	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิด โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเล เตทกับเพคตินต่ออัตราการละลาย.....	31
4.2.2	ผลต่อคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก	35
4.2.2.1	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเล เตทกับแคปปา-คาราจีแนนต่อสมบัติวิทยากระแส.....	38
4.2.2.2	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเล เตทกับโลคัสปีนัมต่อสมบัติวิทยากระแส.....	38
4.2.2.3	ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเล เตทกับเพคตินต่อคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก.....	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลต่อสมบัติความร้อน.....	43
4.2.3.1 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนนต่อสมบัติเชิงความร้อน.....	47
4.2.3.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับ โลคัสปีนัมต่อสมบัติเชิงความร้อน.....	48
4.2.3.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับเพคตินต่อสมบัติเชิงความร้อน.....	49
4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ	50
4.3.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อสมบัติวิทยากระแส.....	50
4.3.1.1 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก.....	55
4.3.1.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติความหนืด.....	57
4.3.1.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก.....	58
4.3.1.4 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติความหนืด.....	61
4.3.1.5 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับ เพคตินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก.....	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.6 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตท กับเพคตินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันต่อสมบัติความหนืด.....	67
4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราการละลาย.....	68
4.3.2.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตท กับ แคปปา-คาราจีแนนต่ออัตรา การละลาย.....	70
4.3.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตท กับ โคล์สปีนกัมต่ออัตรา การละลาย.....	71
4.3.2.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตท กับ เพคตินต่ออัตราการละลาย.....	75
4.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการแยกเฟส.....	77
4.3.3.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับแคปปา-คาราจีแนนต่อการแยกเฟส.....	78
4.3.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับโคล์สปีนกัมต่อการแยกเฟส.....	81
4.3.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตทกับเพคตินต่อการแยกเฟส.....	81
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ประวัติผู้วิจัย.....	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตอบสนองต่อการให้แรงกระทำต่อวัสดุ 3 ประเภท.....	7
2.2 ช่วง Linear viscoelastic range (LVR) ของตัวอย่าง.....	8
2.3 โครงสร้างแป้งดัดแปร AS.....	10
2.4 โครงสร้างของแป้ง SSO.....	11
2.5 โครงสร้างของคาราจีแนนทั้ง 3 ชนิด.....	13
2.6 กลไกการเกิดเจลของคาราจีแนน.....	13
2.7 โครงสร้างโมเลกุลของโลคัสปีนกัม.....	14
2.8 ชนิดและสมบัติของเพคติน.....	15
2.9 ประเภทของการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลิเมอร์ 2 ชนิดในสารละลาย	17
2.10 การอยู่ร่วมกันของไบโอโพลิเมอร์กับคอลลอยด์ในสถานะที่ Volume fraction ของเฟส กระจายมีค่าสูง.....	18
2.11 ประเภทของการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลิเมอร์กับคอลลอยด์	18
2.12 การอยู่ร่วมกันของไบโอโพลิเมอร์แลคอลลอยด์.....	19
3.1 การวัดอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง.....	22
4.1 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และสารไฮโดรคอลลอยด์ ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เต็ม น้ำตาลทรายร้อยละ 16.....	26
4.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทิเลเตด หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับแคปปา- คาราจีแนนที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เต็ม น้ำตาลทรายร้อยละ 16.....	27
4.3 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทิเลเตด หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับโลคัสปีนกัมที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เต็มน้ำตาลทรายร้อยละ 16	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประอะซีทิลเลเตท หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับเพคตินที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทราย ร้อยละ 16.....	29
4.5 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประอะซีทิลเลเตท โดย วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16.....	32
4.6 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประอะซีทิลเลเตท โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและ ไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16.....	33
4.7 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประอะซีทิลเลเตท โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและ ไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16.....	34
4.8 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประ หรือไฮโดรคอลลอยด์ ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็น กรด-ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลชูโครสร้อยละ 16.....	37
4.9 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังตัดแประ หรือไฮโดรคอลลอยด์ ที่มี %strain 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลชูโครสร้อยละ 16.....	37
4.10 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซีทิลเลเตทหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับ แคปซาคาราจีแนน ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และ มีค่าความเป็นกรด-ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลชูโครสร้อยละ 16.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट ที่มี %strain 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16.....	40
4.12 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16.....	41
4.13 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट ที่มี %strain 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16.....	42
4.14 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट ที่มี %strain 1 และความถี่ 1 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็ม และไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16.....	45
4.15 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट ที่มี %strain 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16.....	46
4.16 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งดัดแปรหรือไฮโดรคอลลอยด์ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส หรือระบบที่มีน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	53
4.17 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งดัดแปรหรือไฮโดรคอลลอยด์ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส หรือระบบที่มีน้ำตาลซูโครสที่มี %strain 1 และความถี่ระหว่าง 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ความหนืดของตัวอย่างแป้งตัดแประอะซิทีเลเตท แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต แคปปา- คาราจีแนน โลคัสปีนกัม และ เพคติน ในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความ เป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราเฉือน 0- 300 1/s.....	54
4.19 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซิทีเลเตท ในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	56
4.20 มอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซิทีเลเตทในระบบ ที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติม น้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	57
4.21 ความหนืดของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซิทีเลเตทในระบบที่ ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติม น้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	60
4.22 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างโลคัสปีนกัมกับตัวอย่างแป้งอะซิทีเลเตทในระบบที่ ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติม น้ำตาลซูโครสหรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	62
4.23 มอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างโลคัสปีนกัมกับตัวอย่างแป้งอะซิทีเลเตทในระบบที่ ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติม น้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.24 ความหนืดของสารผสมระหว่างโลคัสป็นกัมกับตัวอย่างแบ่งอะซิทีเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	64
4.25 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างเพคตินกับตัวอย่างแบ่งอะซิทีเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	66
4.26 มอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างเพคตินกัมกับตัวอย่างแบ่งอะซิทีเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มี %strain 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5.....	67
4.27 ความหนืดของสารผสมระหว่างเพคตินกับตัวอย่างแบ่งอะซิทีเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส หรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส หรือเติมน้ำตาลซูโครส ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	69
4.28 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับแบ่งอะซิทีเลเตทหรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตในระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	73
4.29 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างโลคัสป็นกัมกับแบ่งอะซิทีเลเตทหรือแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตในระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งอะซีทิลเลเตทหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตในระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0.....	76
4.31 ความเสถียรของตัวอย่างสารเดี่ยวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส.....	79
4.32 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับแป้งอะซีทิลเลเตทหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส.....	80
4.33 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างโลคัสปีนัมกับแป้งอะซีทิลเลเตทหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส	82
4.34 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งอะซีทิลเลเตทหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส.....	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AS	=	Acetylated starch
DSC	=	Differential scanning calorimeter
G'	=	Storage modulus
G''	=	Loss modulus
ΔH	=	delta H
Hz	=	Hertz
K	=	K -carageenan
L	=	Locust bean gum
P	=	Pectin
Pa	=	Pascal
To	=	Temperature on set
Tp	=	Peak temperature
s	=	secondary
SSO	=	Starch sodium octenyl succinate

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ธรรมชาติของการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารโดยทั่วไปเพื่อให้ได้ความรู้สึกในขณะรับประทาน (mouthfeel) มักนิยมใช้สารประกอบที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์และ/หรือสารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) มากกว่า 1 ชนิดเสมอ นอกจากจะช่วยในเรื่องของการดัดแปรสภาพทางวิทยากระแสน้ำให้เหมาะสมแล้วยังช่วยให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารเป็นไปได้อย่างราบรื่นและประหยัด ความสนใจในการใช้โพลีแซคคาไรด์จำพวกแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกำลังเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารภายในประเทศมากขึ้น เนื่องจากแป้งดัดแปรเหล่านี้ได้ถูกเปลี่ยนแปลงสภาพและสมบัติทางกายภาพเคมีให้เหมาะกับการใช้งานในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละประเภท อย่างไรก็ตามการใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพียงอย่างเดียวในการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอาจไม่สามารถตอบสนองต่อโจทย์ในภาคอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับผู้ใส่ใจในสุขภาพ ผลิตภัณฑ์อาหารผู้สูงอายุและผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งบางประเภทที่มีส่วนประกอบของโพลีแซคคาไรด์ เนื่องจากแป้งดัดแปรชนิดนี้ยังคงมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน เช่น การเกิดเจล การเกิดพักร (Retrogradation) การเยิ้ม (Syneresis) ในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน การนำสารไฮโดรคอลลอยด์ เช่น คาราจีแนน (Carrageenan) กัม (Gum) โปรตีน และวุ้น (Agar) มาใช้ร่วมกับแป้งดัดแปรดังกล่าวจึงน่าจะเป็นทางออกหนึ่งที่ตอบคำถามของภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีการเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งเมื่อมีการผันผวนของอุณหภูมิ (Temperature fluctuation) ได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงสมบัติวิทยากระแสน้ำ และกายภาพเคมีของระบบที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ได้แก่ แป้งโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนต (Starch Sodium Octenyl Succinated, SSO) และแป้งอะซิไทเลต (Acetylated Starch, AS) โดยดูถึงปัจจัยซึ่งได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่นและชนิดของประจุในระบบที่ส่งผลต่อการเข้ากันได้ (Compatibility) ของแป้งดัดแปรดังกล่าวกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ ได้แก่ คาราจีแนน โลกัสบีนกัม (Locust bean gum) และเพคติน (Pectin) นอกจากนี้ยังศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ผันผวนต่อการต้านการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ในระบบจำลองของอาหารแช่แข็งด้วย การทดลองดังกล่าวจะช่วยตอบปัญหาในภาคอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งและเป็นการหาองค์ความรู้ใหม่ในสายงานวิชาการด้านไฮโดรคอลลอยด์เพื่อให้ทราบถึงกลไกของสารผสมแป้งมัน

สำปะหลังดัดแปรกับการาจีแนน โลกัสปีนกัม และเพคตินที่อาจจะยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารประเภทแช่แข็งอันจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อให้ทราบถึงผลของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสะและกายภาพเคมี
2. เพื่อให้ทราบถึงกลไกยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ในอาหารแช่แข็ง
3. เพื่อให้ทราบถึงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างและความหนาแน่นประจุต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ
4. เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสะและกายภาพเคมีที่อาจลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง
5. เพื่อถ่ายทอดวิทยาการความรู้สู่ภาคเอกชนหรือผู้ที่สนใจทั่วไป

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนการทดลองใหญ่ๆ ได้แก่

1. การศึกษาผลของการเข้ากันได้ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ แคปทาการาจีแนน โลกัสปีนกัมกัม และเพคติน ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสะและกายภาพเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป
2. ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างและความหนาแน่นประจุต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ แคปทา-การาจีแนน โลกัสปีนกัม และเพคติน
3. ศึกษากลไกยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ได้แก่ แคปทา-การาจีแนน โลกัสปีนกัม และเพคตินในระบบอาหารแช่แข็งต้นแบบ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

สมบัติทางวิทยากระแสะ เช่น ความหนืด และสมบัติทางกายภาพเคมี เช่น การเกิดเจลหรือการหลอมละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าพลังงานของการสร้างพันธะและลักษณะเนื้อสัมผัส ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผสมกับสารไฮโดรคอลลอยด์ได้แก่ แคปทา-การา-

จีแนน โลกัสปินกัม และเพคติน ซึ่งผลดังกล่าวอาจส่งเสริมหรือยับยั้งการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบอาหารแช่แข็งได้ เนื่องมาจากการสร้างพันธะหรือการเกิดการรวมตัว หรือผลึกกันของสายโมเลกุลของสารประเภทโพลีแซคคาไรด์ทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้ถ้าเป็นการสร้างพันธะก็อาจทำให้เกิดโครงสร้างเจล (Gel structure) ที่แข็งแรง หรือโครงสร้างที่ไม่เป็นเจล (Non-gel formation) แต่อาศัยกลไกการแพร่กระจายของมวลสารในการป้องกันการเคลื่อนตัวของโมเลกุลน้ำในส่วนที่ไม่แข็งตัวในระบบอาหารแช่แข็งได้ ทำให้ลดอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่เมื่ออุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงไป ในขณะเดียวกันการผสมของสารโพลีแซคคาไรด์หรือไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิดก็อาจเกิดการเข้ากันไม่ได้ (Incompatibility) ทำให้เกิดการแยกเฟส (Phase separation) ซึ่งอาจทำมีผลในระดับที่แตกต่างจากกรณีแรกต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งได้ ทั้งนี้ผลดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยก็อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของสภาวะแวดล้อมในระบบ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นของประจุบนสายโพลีแซคคาไรด์ เป็นต้นด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งในเชิงยับยั้งหรือส่งเสริมการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่นี้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ได้แก่ แคปทา-คาราจีแนน โลกัสปินกัม และเพคตินและปัจจัยต่างๆ ข้างต้นที่กล่าวมาแล้วนั้นยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

ผลิตภัณฑ์อาหารหลายๆ ชนิด โดยเฉพาะอาหารเพื่อสุขภาพและอาหารสำหรับผู้สูงอายุบางประเภท เช่น น้ำสลัดไขมันต่ำ เจลลี่ลดความอ้วน และเครื่องดื่มที่ทำรู้สึกอึดท้องแต่มีปริมาณแคลอรีต่ำ มักนิยมใช้โพลีแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้เพื่อพัฒนาโครงสร้าง ตลอดจนรูปลักษณ์และเนื้อสัมผัสให้มีลักษณะเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค การใช้สารโพลีแซคคาไรด์เพียงชนิดเดียวอาจทำให้คุณสมบัติทางด้านต่างๆ เช่น สมบัติวิทยากระแส สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางประสาทสัมผัสไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อเทียบกับการใช้สารโพลีแซคคาไรด์ร่วมกับสารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งอาจจะเป็นโปรตีน สารจำพวกโพลีแซคคาไรด์ หรือโอลิโกแซคคาไรด์ โพลีแซคคาไรด์ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารในปัจจุบันมักเป็นแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ ซึ่งถือเป็นการลดต้นทุนในการผลิตให้ต่ำกว่าการใช้สารโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ แป้งดัดแปรที่นิยมใช้ในประเทศไทยได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และแป้งดัดแปรอะซิเทเตท ส่วนสารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่ คาราจีแนน โลกัสปินกัม และเพคติน

แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และแป้งอะซิเทเตท เป็นแป้งดัดแปรที่เตรียมได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังมาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี (Chemical property) เพื่อให้เหมาะสมกับการนำมาใช้ผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เพิ่มความทนทานต่อแรงเฉือน ลดการเกิดฟักร เพิ่มความต้านทานต่อการไหลลดอุณหภูมิในการหลอมตัว และละลายได้ในน้ำเย็น เป็นต้น

แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต เกิดจากกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification) ด้วยกรดซัคซินิก ภายใต้สภาวะที่เป็นต่าง (Trubiano, 1986) ทำให้แป้งดัดแปรชนิดนี้สามารถเกิดเจลได้แม้ใน

สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนแป้งอะซิทิเลตเกิดจากกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันโดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งด้วยหมู่อะเซทิล (Acetyl group) โดยหมู่อะเซทิลที่เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแป้งจะยับยั้งการรวมตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ทำให้แป้งมีสมบัติต้านทานการคืนตัวหรือการเกิดพัคหลังจากการทำให้เย็นตัวลงได้ ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มความคงตัวของอาหารแช่แข็งในระหว่างการละลายได้ (Sodhi and Singh, 2005; Huang, Schols, Jin, Sulmann, and Voragen 2007) ทั้งแป้ง SSO และ AS จึงนิยมนำมาใช้ในการเพิ่มความคงตัวหรือลดการเกิดริ้วรอยแตกในอาหารแช่แข็ง เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ไส้ขนมพายต่างๆ ซอส ซุปกระป๋อง อาหารเด็กเล็ก อาหารเพื่อสุขภาพบางชนิด เป็นต้น (Wurzburg, 1995)

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตภัณฑอาหารส่วนใหญ่ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นโปรตีน และไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นคาร์โบไฮเดรต สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากคาร์โบไฮเดรตมักมีราคาถูกกว่าและมีขั้นตอนในการผลิตง่ายกว่าโปรตีน ทำให้ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากคาร์โบไฮเดรตเป็นที่นิยมใช้มากกว่า เช่น สารจำพวกกัม (Gum) ได้แก่ โลกัสปีนกัม (Locust bean gum, LBG) กวากัม (Guar gum) สารสกัดจากสาหร่ายทะเลหรือวุ้น (Agar) เช่น คาราจีแนน (Carrageenan) และสารที่สกัดได้จากเปลือกผลไม้ตระกูลส้ม เช่น เพคติน (Pectin) จัดเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์จำพวกนี้ส่วนใหญ่มักใช้เพื่อเพิ่มความหนืด ปรับปรุงสมบัติทางวิทยากระแส และเพิ่มความคงตัวของระบบอิมัลชัน (Huang, Kennedy, Li, Xu and Xie, 2007; Igoe, 1982; Norziah, Foo and Karim, 2006; Tye, 1988; Yoshimura, Takaya and Nishinari, 1996; 1998;) ส่วนการใช้เพื่อลดการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่จากการผันผวนของอุณหภูมิในการเก็บรักษามักมีการศึกษาโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียวในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง เช่น ในไอศกรีม และเจลลี่ต่างๆ (Buyong and Fenema, 1988; Flores and Goff, 1999; Fuchigami and Teramoto, 2003; Goff, Cadwell, Stanley and Maurice, 1993; Goff, Ferdinando and Schorsch, 1999; Harper and Shoemaker, 1983; Patmore, Goff and Fernandes, 2003; Regand and Goff, 2002; 2003; Sutton, Lips and Piccirillo, 1996; Tanaka, Hatakeyama and Hatakeyama, 1998) โดยทั้งนี้ Buyong และ Fenema (1988) รายงานว่าปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ไม่ถึงร้อยละ 2 (w/w) สามารถลดการเกิดผลึกน้ำแข็งได้น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยโลกัสปีนกัมและกวากัมมีผลต่อการลดขนาดผลึกน้ำแข็งได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose) โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) และคาราจีแนน ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมลงไปนั้นจะช่วยลดจำนวนน้ำที่จะถูกทำให้แข็งตัวนั่นเอง ส่วน Goff และคณะ (1993) และ Regand และ Goff (2002, 2003) เสนอว่าไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizers) ช่วยชะลอการโตของผลึกน้ำแข็งหลังจากการเกิดนิวเคลียสของผลึก

(Nucleation) โดยกลไกของการแพร่กระจายของมวลสาร (Mass diffusion) ของไฮโดรคอลลอยด์ที่ไม่ก่อตัวเป็นเจล ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิผันผวนหรือในระหว่างการเก็บรักษาหรือขนส่งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งกลไกการยับยั้งหรือป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus; G') ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของสมบัติวิทยากระแส โดยพบว่าเมื่อมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในระบบอาหารแช่แข็งมักพบว่าส่วนของของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen serum) มีค่า G' เพิ่มขึ้น และมีลักษณะความหนืดมากขึ้นด้วย

Fernandez, Martino, Zaritzky, Guignon และ Sanz (2007) ได้ศึกษาการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ 2 ชนิด ได้แก่ โลกัสปีนัม หรือ กัวกัมผสมกับแซนแทนกัม (Xanthan gum) เพื่อปรับลักษณะเนื้อสัมผัสและลดการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบอาหารแช่แข็งที่มีสารละลายซูโครสเป็นส่วนประกอบ พบว่า การผสมโลกัสปีนัมกับแซนแทนช่วยลดขนาดของผลึกน้ำแข็งลงได้ โดยการสร้างโครงร่างตาข่ายคล้ายเจลเพื่อลดการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกในขณะที่อุณหภูมิมีการผันผวน

สำหรับการศึกษาผลของการผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปและสารไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหารนั้นยังไม่มีใครศึกษากันมากนัก Norziah, Foo และ Karim (2006) ได้ศึกษาสมบัติวิทยากระแสของสารผสมระหว่างวุ้น (agar) จาก *Gracilaria changii* กับแคปปา-คาราจีแนน พบว่าสัดส่วนของสารผสมทั้งสองในอัตราส่วนที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของสารผสม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแคปปา-คาราจีแนนจะทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลของระบบซึ่งวัดในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่า G' และค่า G'' (Loss modulus) ลดลง ขณะเดียวกันการเสถียรภาพของเจลจากวุ้นจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวุ้นที่การผสมแคปปา-คาราจีแนน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดการเสถียรภาพแบบการแตกตัวของโครงสร้าง (Fractional deformation) เกิดขึ้นได้มากกว่าในกรณีหลัง เพราะการเกิดการแยกเฟส (Phase separation) ในระบบนั่นเอง ส่วน Ntawukliayo, De Smedt, Demeester และ Remon (1996) ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ของการใช้แซนแทนผสมกับ SSO ในการป้องกันการเกิดและตกผลึกของการแขวนลอยในยาน้ำ (Medical syrup) โดยพบว่าพฤติกรรมการไหลของยาน้ำนี้มีลักษณะเป็น Viscoelastic มากขึ้น ซึ่งลักษณะรูปแบบพฤติกรรมการไหลแบบนี้จะช่วยให้ยาน้ำเกิดผลึกของสารแขวนลอยได้ช้าลง

ส่วนผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบของสารผสมระหว่างโพลีแซคคาไรด์และ/หรือไฮโดรคอลลอยด์ 2 ชนิด พบได้ในการศึกษาของ Norziah, Foo และ Karim (2006) ดังกล่าวข้างต้น โดยเมื่อลดค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลงต่ำกว่า 4.5 จะทำให้เจลที่ได้จากการผสมวุ้นกับแคปปา-คาราจีแนนมีความเปราะและเสถียรภาพของเจลเมื่อมีแรงกระทำได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความ

เป็นกรด-ด่างต่ำจะทำให้พื้นที่ที่เกิดพันธะ (Junction zones) ลดลง (Normand, Lootens, Eleonora, Kevin and Aymard, 2000) เพราะระบบมีสายโซ่พันธะที่จะมาสร้างพื้นที่เกิดพันธะ ลดลงซึ่งถือเป็นผลของ Acid hydrolysis ส่วนผลของความหนาแน่นของประจุในระบบต่อสมบัติ วิทยากระแสของสารผสมระหว่างโพลีแซคคาไรด์ เช่น แป้งข้าวโพดและไฮโดรคอลลอยด์ ที่พบว่า ไอโอตา-คาราจีแนนต่อการเกิดเจลและการเกิดฟักรของแป้งข้าวโพด ในการทดลองของ Funami, Noda, Hiroe, Asai, Ikeda และ Nishinari (2008) ที่มีโมโนวาเลนต์ของประจุบวก (Monovalent cation) และปราศจากเกลือการเติมไอโอตา-คาราจีแนนจะลดอุณหภูมิของการเกิดเพสต์ (Pasting temperature) แต่อุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อในระบบมีไดวาเลนต์ของประจุบวก (Divalent cation) ซึ่งมีผลเกี่ยวเนื่องกับการเกิด Thermodynamic incompatibility ของไอโอตา-คาราจีแนน และแป้งข้าวโพด de Jong และ van de Velde (2007) ได้ศึกษาความหนาแน่นของประจุในระบบ เจลผสมระหว่างสารโพลีแซคคาไรด์ตั้งแต่โพลีแซคคาไรด์ที่มีประจุเป็นกลาง เช่น กาแลคโตแมนแนน (Galactomannan) จนถึงโพลีแซคคาไรด์ที่มีประจุเป็นลบต่อหนึ่งหน่วยโมโนแซคคาไรด์ เช่น ไอโอตา-คาราจีแนน ทั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของประจุมีผลโดยตรงต่อการเกิดการแยกเฟสแบบจุลภาค (Micro-phase separation) อันส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสต่อระบบของผสมนี้

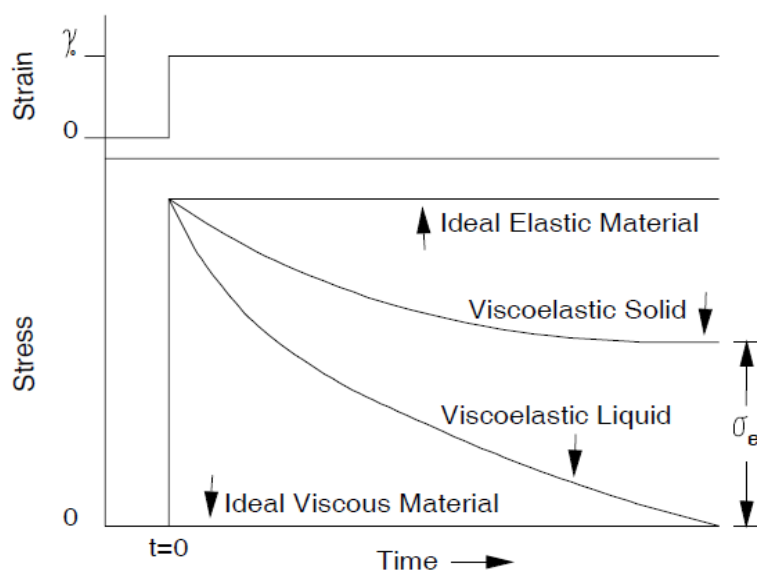
จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าสมบัติวิทยากระแสและกายภาพเคมีของการผสมกันระหว่างโพลีแซคคาไรด์และไฮโดรคอลลอยด์มีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นและชนิดของประจุในระบบ และชนิดของโพลีแซคคาไรด์และไฮโดรคอลลอยด์เองด้วย แต่การศึกษาในส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ถือว่าเป็นวัตถุดิบภายในประเทศที่มีการผลิตในลักษณะของสินค้าส่งออกกับไฮโดรคอลลอยด์อื่นๆ ยังไม่มีการศึกษากันมากนัก การศึกษาในงานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาผลของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสและกายภาพเคมี และเพื่อศึกษากลไกยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดร-คอลลอยด์ชนิดต่างๆ ในอาหารแช่แข็ง ตลอดจนศึกษาถึงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างและความหนาแน่นประจุต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ และในท้ายที่สุดเพื่อศึกษาและให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสและกายภาพเคมีที่อาจลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์อาหารในระบบต้นแบบอาหารแช่แข็งด้วย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยากระแสของไหล (Rheology)

วิทยากระแส เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Flow) และการเสียรูป (Deformation) ของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง (Steffe, 1996) วัสดุแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) โดยของแข็งเป็นวัสดุที่มีการเสียรูปร่างแปรผันตามแรงกระทำ (Force) วัสดุประเภทนี้จะมีค่าความเค้นแปรผันตรงกับ ความเครียด เมื่อไม่มีแรงกระทำวัสดุสามารถคืนรูปกลับมาสู่ร่างเดิมได้ ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ได้แก่ สปริง เป็นต้น ส่วนวัสดุประเภทของเหลว เมื่อให้แรงกระทำวัสดุจะเกิดการไหลและเมื่อหยุดให้แรงกระทำวัสดุไม่สามารถคืนกลับสู่รูปเดิมได้ เช่น การให้แรงกระทำกับน้ำเพื่อให้เกิดการไหล เมื่อหยุดให้แรงน้ำจะไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ สำหรับวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติกนั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของแข็ง และของเหลว เมื่อให้แรงกระทำแก่วัสดุประเภทนี้ วัสดุจะเสียรูป เช่นเดียวกับของเหลวแต่เมื่อยกเลิกแรงกระทำจะเกิดการคืนรูปเช่นเดียวกับของแข็ง แต่การคืนรูปไม่สามารถกลับคืนเหมือนเดิมโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสียรูปของวัสดุ ทั้ง 3 ประเภทแสดงดังรูปที่ 2.1

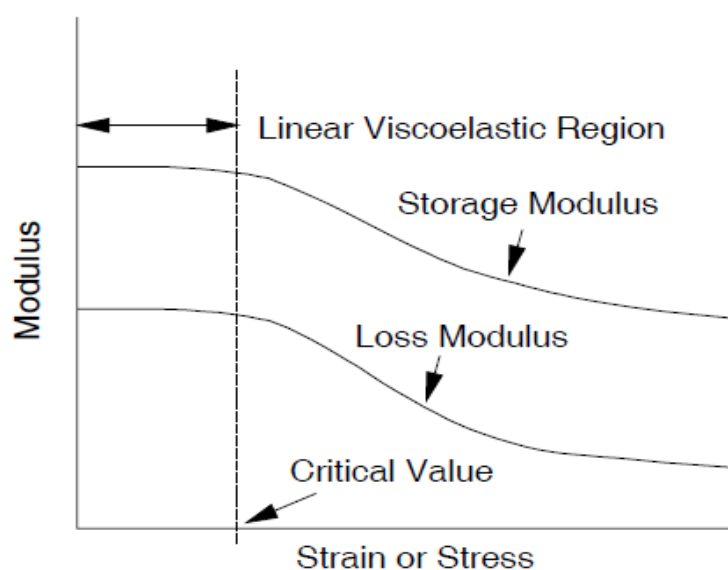


รูปที่ 2.1 การตอบสนองต่อการให้แรงกระทำต่อวัสดุ 3 ประเภท
แหล่งที่มา: Steffe (1996)

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทางวิทยากระแสคือ Rheometer มีทั้งแบบที่ควบคุมความเค้น (Stress controlled) และควบคุมความเครียด (Strain controlled) โดยมีหัววัด (probe) ที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดแรงกระทำต่อตัวอย่างซึ่งมีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดเหมาะกับตัวอย่างในแต่ละประเภทเช่น Concentric cylinder, Cone and Plate, Parallel Plate และ Rectangular Torsion เป็นต้น

การทดสอบคุณลักษณะทางวิทยากระแส สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภท คือ

ก) การทดสอบประเภท Stationary tests เช่น การทดสอบแบบหมุน (Rotational test) สามารถหาค่าความหนืด ค่า Yield stress ค่า Thixotropy และค่า Normal force เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการควบคุมคุณภาพอาหาร ประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิต



รูปที่ 2.2 ช่วง Linear viscoelastic range (LVR) ของตัวอย่าง
แหล่งที่มา: Steffe (1996)

ข) การทดสอบประเภท Dynamic tests เช่น การทดสอบแบบสั่น (Oscillatory test) ค่าตัวแปรของสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus, G') และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') (Tabilo-Munizaga and Barbosa-Canovas, 2005)

ในการทดสอบแบบ Dynamic test จะมีการทดสอบความเหมาะสมของช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลอง โดยให้ค่าความเค้นหรือค่าความเครียดแกตัวอย่าง ซึ่งจะเรียกว่า Stress sweep หรือ Strain sweep ถ้าพบว่าค่าโมดูลัส-สะสม และค่าโมดูลัสสูญเสีย แปรผันตามความถี่ จะเรียกช่วงความถี่นี้ว่า Linear viscoelastic range หรือช่วง LVR ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อให้แรงกระทำต่อของแข็งในรูปแบบกราฟรูปไซน์ (Sine curve) การสูญเสียรูปร่างก็จะเกิดขึ้นในรูปแบบกราฟรูปไซน์ที่เหมือนกับความเค้น ดังนั้น กราฟรูปไซน์ที่ได้จะทำมุมต่างกัน 0 องศา หรือซ้อนทับกันพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเค้นและความเครียด เกิดอยู่ในเฟสเดียวกัน (In phase) แต่เมื่อให้แรงกระทำสูงสุดแก่ของเหลวจะไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้ เนื่องจากวัตถุเกิดการไหล ในกรณีนี้กราฟรูปไซน์ของความเค้นและความเครียดจึงเลื่อนกัน 90 องศา ส่วนวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติก จะมีการเลื่อนของความเค้นและความเครียดต่างกันอยู่ระหว่าง 0-90 องศา ค่าองศานี้เรียกว่า ค่าความต่างของมุมระหว่างเฟส (Phase angle, δ) ซึ่งเป็นอีกดัชนีที่บ่งชี้คุณสมบัติของวัสดุ โดยค่าความต่างของมุมระหว่างเฟสนี้มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสีย ดังสมการที่ 2-1

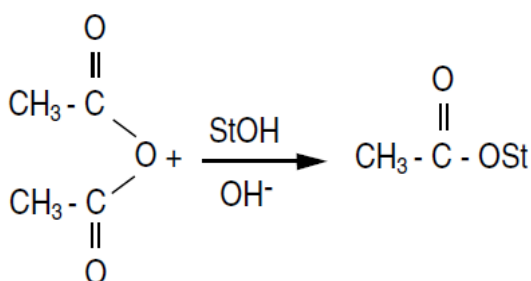
$$\tan \delta = G''/G' \dots\dots\dots(2-1)$$

แป้งดัดแปร (Modified Starch)

แป้งดัดแปรตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (Starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ (สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล, 2545) ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ชี้บ่งต่าง ๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2535) เนื่องจากแป้งดิบโดยทั่วไปมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ความหนืดของแป้งไม่คงที่ตลอดกระบวนการผลิต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำ จึงมีการนำแป้งมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเหมาะสมก่อนการนำไปใช้งานโดยการดัดแปรแป้งมี 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี (Chemical modification) วิธีทางกายภาพ (Physical modification) และ วิธีทางชีวภาพ (Biological modification) แป้งดัดแปรที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้แป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมอาหารอย่างหลากหลาย เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง เมื่อต้มสุกจะให้เจลที่มีสีใส แต่ยังมีข้อจำกัดของการใช้แป้ง ได้แก่ การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ของแป้ง ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวกันของสายอะไมโลส เป็นผลให้คุณภาพของอาหารมีการเปลี่ยนแปลง และมีความไม่แน่นอนเนื่องมาจากความหนืดไม่เหมาะสม มีความแปรปรวนอันเนื่องมาจาก สายพันธ์ของแป้งมันสำปะหลัง อายุการเก็บเกี่ยว สภาพแวดล้อมในการปลูก และมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้มีการแปรรูปแป้งเพื่อให้มีความเหมาะสม และควบคุมคุณภาพของแป้งให้มีความแน่นอน ปัจจุบันได้มีการผลิตแป้งดัดแปรที่มีความหลากหลาย ทำให้ผู้ผลิตอาหารสามารถเลือกใช้ให้เหมาะกับอาหารในแต่ละชนิดโดยทั่วไปแป้งดัดแปรจะแบ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือทางเคมี กายภาพ และการแปรรูปทางเทคโนโลยีชีวภาพ (กลั่นรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ในที่นี้จะยกตัวอย่างแป้งดัดแปรที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งเป็นแป้งดัดแปรทางเคมีโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันเพื่อไปแทนที่ (Substitution) หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในสายโพลีแซคคาไรด์ เพื่อป้องกันการเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของสายอะไมโลสทำให้ลดหรือป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของโพลีแซคคาไรด์ สำหรับแป้งดัดแปรที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ชนิดคือแป้งดัดแปรอะซิทิเลต (AS) และแป้งโซเดียมออกเทนิลซัลเฟต (SSO)

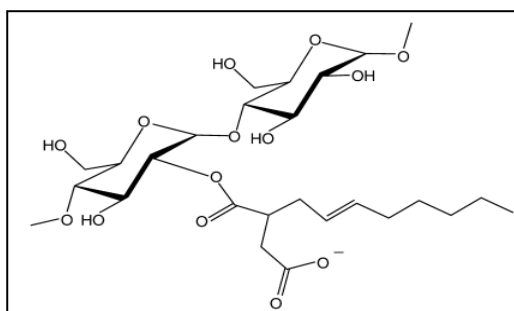
แป้งดัดแปร AS เป็นแป้งดัดแปรประเภทเอสเทอร์ฟิเคชันที่มีหมู่อะซิetyl (Acetyl) แทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของสายโพลีแซคคาไรด์ (รูปที่ 2.3) ซึ่ง Food and Drug Administration (FDA) อนุญาตให้ใช้ในอาหารได้โดยให้มีค่า Acetyl ไม่เกินร้อยละ 2.5 ทั้งนี้มีการนำแป้งชนิดนี้มาประยุกต์ใช้ในอาหารเพื่อใช้เป็นสารปรุงแต่งอาหาร โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารให้ความคงตัว และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร (BeMiller and Whistler, 1996)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแป้งดัดแปร AS

แหล่งที่มา : Whistler et al., 1984

แป้ง SSO เป็นแป้งดัดแปรที่มีการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลูโคสด้วยออกเทนิลซัคซิเนต (รูปที่ 2.4) ทำให้แป้งมีคุณสมบัติทั้งชอบและไม่ชอบน้ำอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน โดยแป้ง SSO จะไปดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสของน้ำและน้ำมันก่อให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มล้อมรอบอนุภาคเม็ดไขมันโดยจะหันส่วนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่มีในโมเลกุลของกลูโคสเข้าจับกับส่วนที่เป็นน้ำในเฟสต่อเนื่องและหันส่วนที่เป็นโมเลกุลของออกเทนิลซัคซิเนตจับกับอนุภาคเม็ดไขมัน (Murphy, 2000) EU อนุญาตให้ใช้แป้ง SSO ในอาหารได้โดยมีเลข E number คือ E1450 และองค์การอาหารยา (Food and Drug Administration, FDA) อนุญาตให้ผลิตเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมอาหารได้โดยสามารถใช้ Octenyl succinic anhydride ได้ไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนักแป้งโดยมีระดับการแทนที่ (Degree of substitution, DS) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 Tesch และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลของการใช้แป้ง SSO เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในระบบอิมัลชัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้ง SSO ช่วยให้อิมัลชันเสถียรด้วยแรง Steric ซึ่งเป็นผลจากแป้ง SSO ดูดซับที่ผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมันตรงบริเวณที่มีหมู่ออกเทนิลซัคซิเนตด้วยแรงไฮโดรโฟบิก โดยที่ระบบอิมัลชันที่เกิดจากแป้ง SSO ไม่ขึ้นกับความเป็นกรด-ด่าง และ Ionic strength ในขณะที่ใช้โปรตีนเวย์เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งทำให้อิมัลชันเสถียรด้วยแรง Electrostatical ทำให้ความเสถียรของระบบอิมัลชันขึ้นกับ ความเป็นกรด-ด่าง และ Ionic strength จากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า แป้ง SSO สามารถช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน และทำให้สามารถลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระหว่างกระบวนการลดขนาดได้เล็กสุดถึง 1 ไมโครเมตร นอกจากนี้แป้ง SSO ยังใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดในอาหารได้โดยการสร้างพันธะไฮโดรโฟบิกระหว่างโมเลกุลของสายอะไมโลสและอะไมโลพิกติน ทำให้เกิดโครงสร้าง 3 มิติเกิดเป็นเจลที่ช่วยให้อิมัลชันมีลักษณะทางวิทยากระแสที่เปลี่ยนแปลงไปโดยทำให้ความหนืด และ มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น (Ortega-Ojeda et al., 2005)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแป้ง SSO

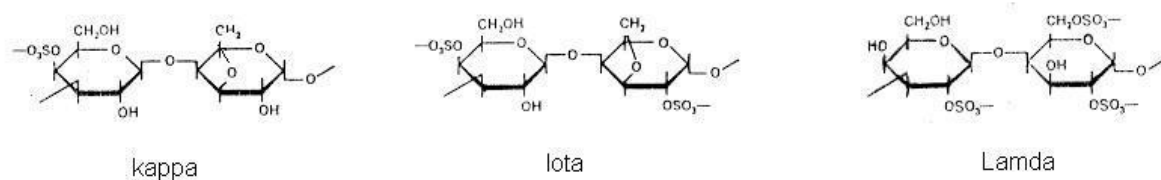
แหล่งที่มา : Nilson et al. (2007)

คาราจีแนน

คาราจีแนน เป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร ผลิตจากสาหร่ายทะเลสีแดง (Red seaweed) คาราจีแนนเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากกาแลคโตส (Galactose) และ 3, 6-Anhydrogalactose (3, 6-AG) ที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยกรดซัลฟูริก คาราจีแนนแต่ละประเภทยามีสมบัติการละลาย (Solubility) และการเกิดเจล (Gelation) แตกต่างกันไป (BeMiller and Whistler, 1996) โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามจำนวนและตำแหน่งของหมู่ซัลเฟตได้ 3 ประเภท คือ แคปปา (Kappa, **K**) ไอโอตา (Iota, **I**) และแลมดา (Lamda, **λ**) (รูปที่ 2.5)

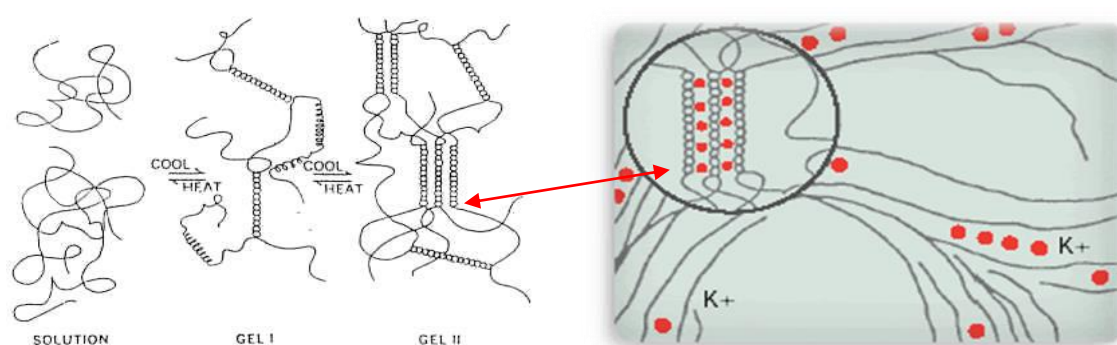
แคปปา-คาราจีแนน (**K**-carrageenan) ละลายได้ดีในน้ำร้อน เมื่อสารละลายแคปปา-คาราจีแนนเย็นตัวลงจะเกิดเจลที่มีลักษณะแข็งเปราะ ซึ่งแคปปา-คาราจีแนนสามารถเกิดเจลได้ทั้งกับน้ำและนม เจลจะแข็งแรงขึ้นถ้ามีประจุของโพแทสเซียม (K^+) และเจลจะคงตัวต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มากกว่า 3.8 แต่เจลจะไม่ทนต่อการแช่แข็งและการละลาย (Freez thaw stability) ไอโอตา-คาราจีแนน (Iota carrageenan) จะมีจำนวนกลุ่มซัลเฟตมากกว่าแคปปา-คาราจีแนนประมาณร้อยละ 25-50 ทำให้ความไวต่อประจุของโพแทสเซียมลดลง เจลที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะอ่อนนุ่มกว่าเจลที่เกิดจากแคปปา-คาราจีแนน ส่วนแลมดา-คาราจีแนน (Lambda carrageenan) มีกลุ่มซัลเฟตในตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 6 และไม่เกิดการปิดวงที่คาร์บอนตำแหน่ง 3 และ 6 จึงมีผลทำให้ไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล (BeMiller and Whistler, 1996)

คาราจีแนนที่อยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างเป็น Random coil เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิด Polymer network เป็น 3 มิติ แต่ละสายจะรวมตัวเข้าเกิด Junction point เมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะมีการเกาะตัวกันของ Junction point มากขึ้นทำให้เกิดการแข็งตัวของเจล ซึ่งแคปปา-คาราจีแนนและไอโอตา-คาราจีแนนจะเกิดเจลแบบ Thermoreversible aqueous gel โดยมีกลไกการเกิดเป็น Double-helix carrageenan polymers (รูปที่ 2.6) ถ้าผสมโคลด์สปีนกับกับแคปปา-คาราจีแนน จะช่วยเสริมให้มี Gel strength เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเนื้อเจลจากที่เปราะและแตกง่ายเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและลดการเกิดการเยิ้ม (syneresis) (Spagnuolo et al., 2005)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคาราจีแนนทั้ง 3 ชนิด

แหล่งที่มา : Food Network Solution, Online, 2010



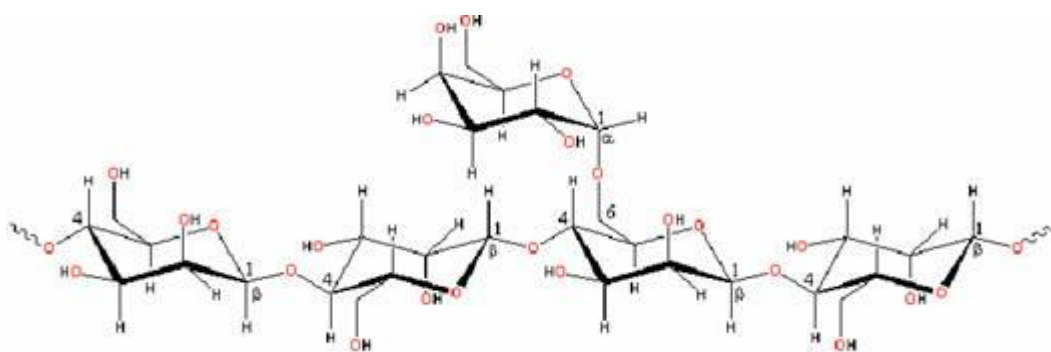
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจลของคาราจีแนน

แหล่งที่มา : ดัดแปลงจาก Carbohydrate Technology, Online, 2011

Locust bean gum

โลคัสปินกัมได้จาก Endosperm ของเมล็ดต้น Carob (*Ceratonia siliqua*) ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกในแถบเมดิเตอร์เรเนียน โมร็อกโกและ โปรตุเกส โลคัสปินกัมไม่สามารถละลายในน้ำเย็นต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดเมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 95 °C หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโลคัสปินกัมให้มีสมบัติพองตัวได้ในน้ำเย็นและนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์นม โครงสร้างของโลคัสปินกัมเป็น โพลีเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตสต่อกันด้วยพันธะ 1,6 อัตราส่วนของ แมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 4:1 ดังรูปที่ 2.7 โดยลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จึงทำให้โมเลกุลมีส่วนที่เป็นสายหลักของแมนโนสที่เรียกว่า Smooth สลับกับส่วนที่เป็นกิ่งแขนง (BeMiller and Whistler, 1996)

โลคัสปินกัมไม่สามารถเกิดเจลได้ต้องนำมาผสมกับแซนแทนกัมจึงจะทำให้เกิดเจล ได้ หรืออาจผสมรวมกับแคปลา-คาราจีแนนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจล (Gel strength) และลดการเกิดการเยิ้ม น้ำ หน้าที่หลักของโลคัสปินกัมคือ เพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชันและยับยั้งการเกิดการเยิ้ม น้ำ ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอส ขนมหวาน เนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อ ในเนยแข็งโลคัสปินกัมช่วยเร่งให้เกิด Coagulation เร็วขึ้น และทำให้ได้เนื้อตะกอนของ Curd เพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 10 ในไอศกรีม โลคัสปินกัม จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อเนียน (BeMiller and Whistler, 1996)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum

แหล่งที่มา : <http://www.lsbu.ac.uk/water/hyloc.html>

เพคติน (pectin)

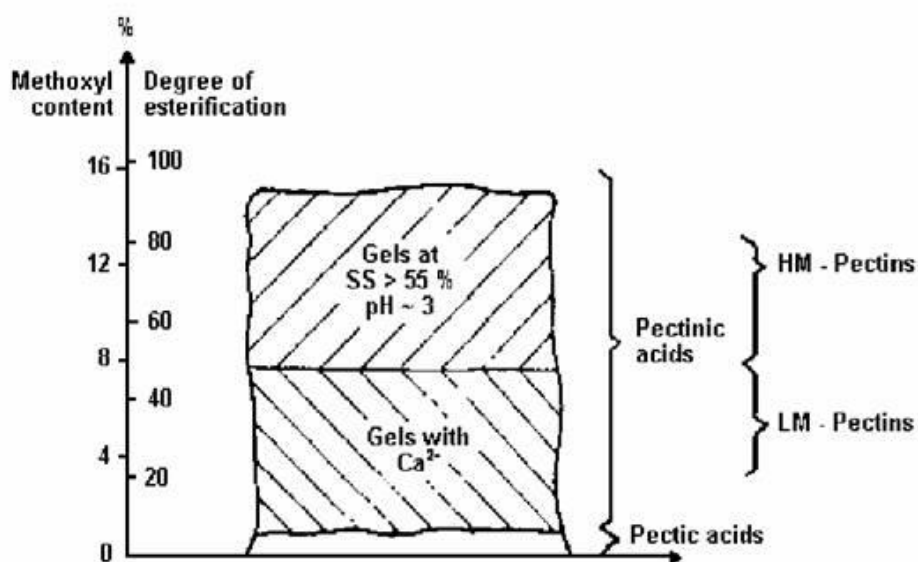
เพคติน เป็น Heteropolysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยโพลิเมอร์ของ D-galacturonic acid (ประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักหรือที่เรียกว่า Smooth regions และมีกิ่งแขนง (Hair regions) อาจเป็น Arabinose, Galactose, Rhamnose และบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ที่ D-galacturonic acid จะถูกเอสเทอร์ไฟต์ด้วยหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี Degree of methylation (DM) แตกต่างกัน จึงทำให้เพคตินจากวัตถุดิบแต่ละแหล่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และเป็นโครงสร้าง ที่ ซับซ้อนมากดังรูปที่ 2.8 เป็นโครงสร้างตามสมมุติฐาน (Hypothetical structure) ของ Apple pectin โดย Schols และคณะ (1998)

DM คืออัตราส่วนของหมู่ Methylated galacturonic acid ต่อหมู่ Galacturonic acid ทั้งหมด ที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน จึงทำให้แบ่งประเภทของเพคตินตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด Low methoxyl (LM) ซึ่งจะมีค่า DM น้อยกว่าร้อยละ 50 และชนิด High methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่าร้อยละ 50 (รูปที่ 2.8) เพคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ที่มีค่า

DM สูงถึง 75 % เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา De-esterification จะได้เพคตินชนิด LM เพคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน (BeMiller and Whistler, 1996)

เพคตินชนิด LM สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca^{2+} และมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดตั้งแต่ร้อยละ 10-80 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้จะเป็นชนิด Thermoreversible ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินชนิด HM หรืออะการ์ (รูปที่ 2.8)

เพคตินชนิด HM ใช้กับอาหารที่มี ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.0-3.5 และต้องมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 55 ถึงจะเกิดเจลได้ เพคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิดตาม Gelling time คือ เกิดเจลได้ช้า (Slow set) ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM (BeMiller and Whistler, 1996) เช่น ชนิดเกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณร้อยละ 60 และชนิดเกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณร้อยละ 75 ดังนั้นการนำเพคตินมาใช้ประโยชน์จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร



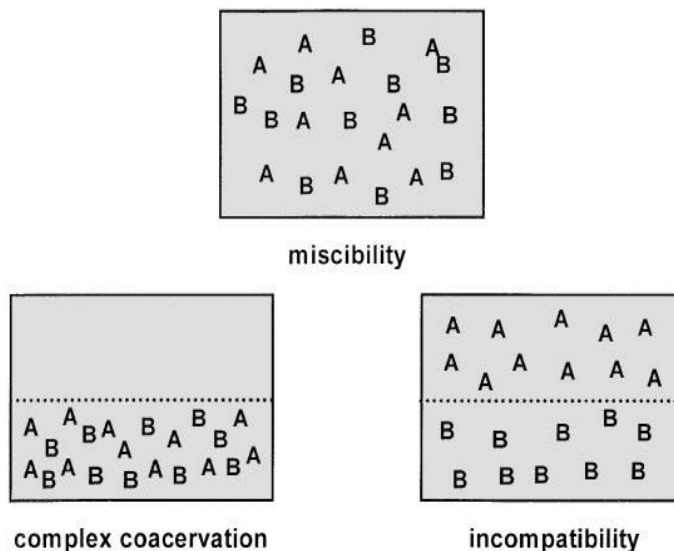
รูปที่ 2.8 ชนิดและสมบัติของเพคติน

แหล่งที่มา : <http://www.genialab.de/inventory/pectinate.htm>

การเกิดปฏิสัมพันธ์ของไบโอโพลีเมอร์

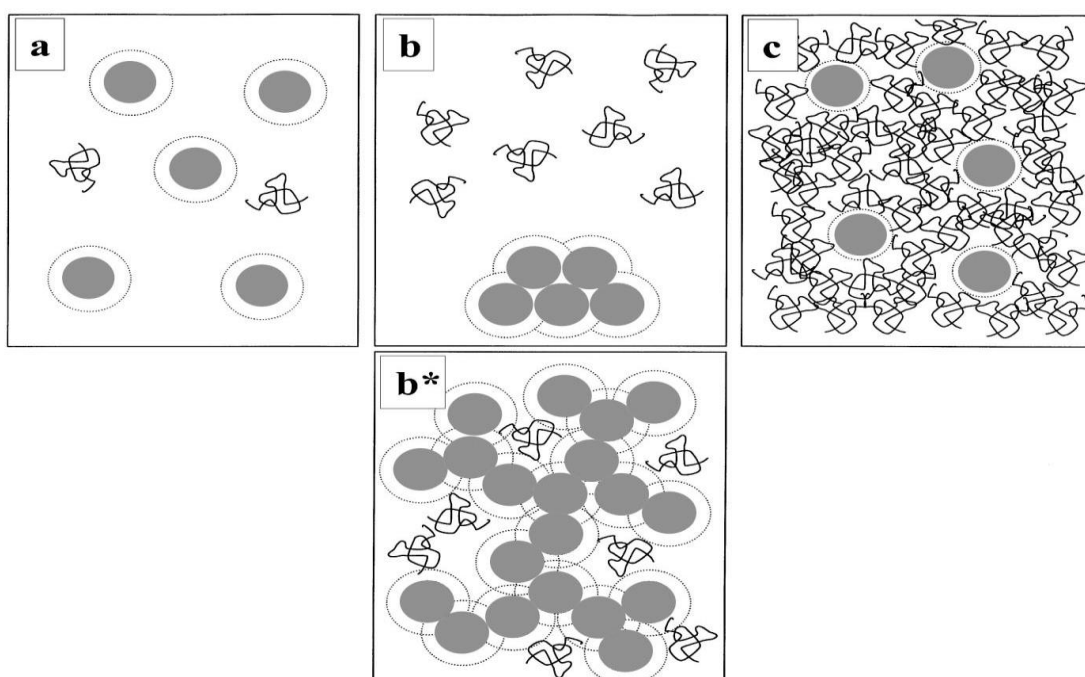
ในสารละลายที่มีสารไบโอโพลีเมอร์อยู่ร่วมกันสามารถแบ่งสถานะของการอยู่ร่วมกันได้ออกเป็น 3 รูปแบบ (Albertsson, 1971) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คือ (1) Incompatibility หรือการอยู่ร่วมกันแบบ Phase separation โดยไบโอโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดการผลักกันของโมเลกุลมากกว่าเกิดแรงดึงดูด ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นของทั้งสองไบโอโพลีเมอร์ (2) Complex coacervation คือการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์สองชนิดที่สารทั้งสองเกิดแรงดึงดูดกันมากกว่าเกิดการผลักกันแล้วเกิดการแยกชั้นของสารละลายเป็นสองชั้นของสารละลายและชั้นของไบโอโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดที่เกิดปฏิสัมพันธ์กัน และ (3) Miscibility เป็นการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์ที่เกิดปฏิสัมพันธ์กันโดยไม่เกิดการแยกชั้นของสารละลาย โดยสารละลายยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไบโอโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดมีความสมดุลกันระหว่างแรงดึงดูดและแรงผลัก ในขณะเดียวกันในระบบของคอลลอยด์จะสามารถพบการอยู่ร่วมกันระหว่างไบโอโพลีเมอร์กับคอลลอยด์มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับชนิดของไบโอโพลีเมอร์ ความเข้มข้นของคอลลอยด์หรือไบโอโพลีเมอร์ รูปที่ 2.10 แสดงการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์กับคอลลอยด์ ในสภาวะที่ไบโอโพลีเมอร์ไม่มีคุณสมบัติในการดูดซับที่พื้นผิวของคอลลอยด์ เช่นในระบบที่มีโปรตีนเกาะกลุ่มกัน เป็นต้น โดยในสภาวะที่มีความเข้มข้นของไบโอโพลีเมอร์ในเฟสต่อเนื่องต่ำระบบจะมีความเสถียร(a) และเมื่อความเข้มข้นของไบโอโพลีเมอร์สูงขึ้นระดับหนึ่งระบบจะไม่เสถียรเนื่องมาจากการเกิด Depletion flocculation (b) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นระบบจะเสถียรเนื่องจากมีความหนืดสูงขึ้นโดยคอลลอยด์เคลื่อนที่ได้ยาก (c) ในขณะเดียวกันถ้าเพิ่มความเข้มข้นของคอลลอยด์ให้สูงขึ้นคอลลอยด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน (Flocculation) แต่ระบบจะเสถียรเนื่องจากคอลลอยด์อยู่ใกล้ชิดกันมาก (b*)

ในขณะเดียวกันในระบบที่มีไบโอโพลีเมอร์ที่สามารถดูดซับที่พื้นผิวของคอลลอยด์ได้จะส่งผลต่อความเสถียรของระบบอิมัลชันโดยการเกิด Bridging flocculation ระหว่างไบโอโพลีเมอร์ที่ดูดซับที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a-c) โดยในสภาวะที่มีไบโอโพลีเมอร์ความเข้มข้นต่ำอาจพบการเกิด Bridging flocculation ระหว่างคอลลอยด์ (a) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไบโอโพลีเมอร์ให้สูงขึ้นไบโอโพลีเมอร์ส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวไปดูดซับที่ผิวของคอลลอยด์ส่งผลให้คอลลอยด์มีความเสถียร (b) และเมื่อความเข้มข้นของไบโอโพลีเมอร์สูงเกินปริมาณของไบโอโพลีเมอร์ที่ไปดูดซับที่ผิวอนุภาคของคอลลอยด์ ไบโอโพลีเมอร์ที่สูงเกินจะส่งเสริมให้เกิด Depletion flocculation (c)



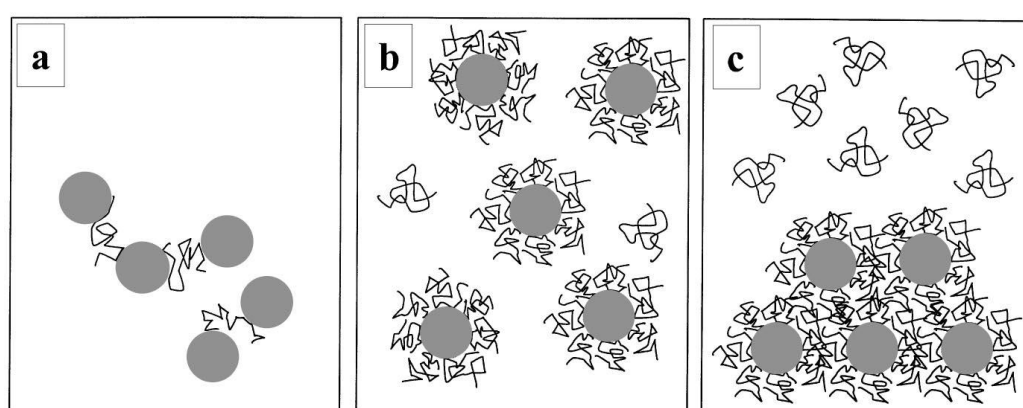
รูปที่ 2.9 ประเภทของการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์ 2 ชนิดในสารละลาย
แหล่งที่มา : Syrbe et al., 1998

สำหรับระบบที่มีไบโอโพลีเมอร์ ที่สามารถสร้างเจลได้ดังรูปที่ 2.12 (a-c) ระบบจะมีความเสถียร โดยอนุภาคคอลลอยด์จะถูกกักอยู่ในโครงสร้างของเจล (a) ส่วนระบบที่มีทั้งไบโอโพลีเมอร์ที่สามารถเกิดเจลที่มีความเข้มข้นเพียงพอและมีไบโอโพลีเมอร์ที่สามารถดูดซับที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ระบบจะมีความเสถียรโดยไบโอโพลีเมอร์ที่สามารถดูดซับที่ผิวของอนุภาคของคอลลอยด์จะไปดูดซับที่ผิว และจะถูกกักอยู่ในโครงสร้างเจลของไบโอโพลีเมอร์อีกชนิดที่สร้างเจลได้(b) ในขณะที่ถ้าความเข้มข้นของไบโอโพลีเมอร์ที่สามารถเกิดเจลได้มีความเข้มข้นไม่เพียงพอระบบจะไม่เสถียรจากการเกิด Bridging flocculation ได้เนื่องจากไบโอโพลีเมอร์ที่สร้างเจลได้เกิดการจับกันเองที่ส่วนปลายของสายไบโอโพลีเมอร์ (c)



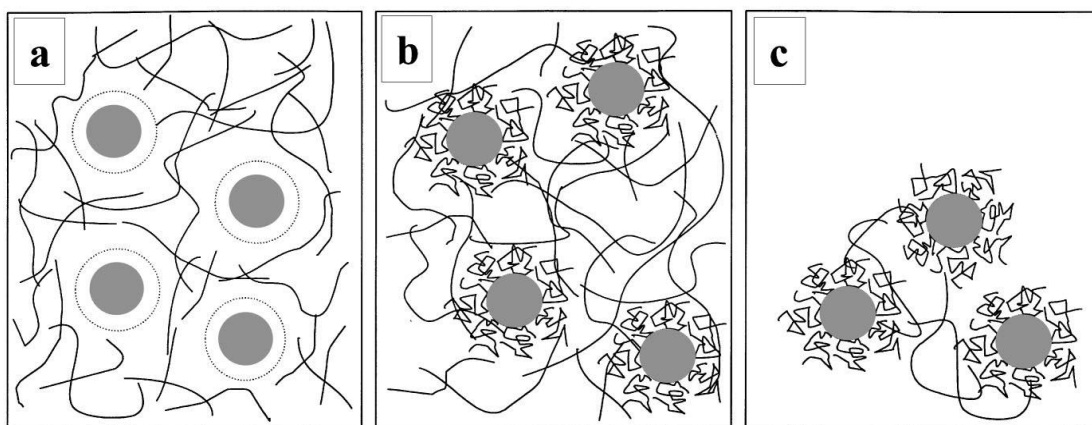
รูปที่ 2.10 การอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์กับคอลลอยด์ในสถานะที่ Volume fraction ของเฟสกระจายมีค่าสูง (a) ระบบมีความเสถียร (b) การเกิด Depletion flocculation (c) ระบบมีความเสถียร และ (b*) Pseudostability

แหล่งที่มา : Syrbe et al., 1998



รูปที่ 2.11 ประเภทของการอยู่ร่วมกันของไบโอโพลีเมอร์กับคอลลอยด์ (a) การเกิด Bridging flocculation (b) ระบบมีความเสถียร (c) การเกิด Depletion flocculation

แหล่งที่มา : Syrbe et al., 1998



รูปที่ 2.12 การอยู่ร่วมกันของไบโอโพลิเมอร์กับคอลลอยด์ (a) ไบโอโพลิเมอร์ที่ไม่ดูดซับที่ผิวอนุภาค คอลลอยด์สร้างโครงสร้าง 3 มิติ กักอนุภาคให้อยู่ในโครงสร้าง 3 มิติ (b) ไบโอโพลิเมอร์จะเคลื่อนที่ไปดูดซับที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกกัก และ (c) การเกิด Depletion Flocculation ในกรณีที่ไบโอโพลิเมอร์ที่สร้างเจลมีไม่เพียงพอ

แหล่งที่มา : Syrbe et al., 1998

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

- 3.1.1 แป้งดัดแปรชนิดอะซิทิเลเตด และแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต ได้รับอนุเคราะห์จาก บริษัทเยนเนรัลสตาร์ช จำกัด
- 3.1.2 เพคตินชนิดละลายได้ในน้ำเย็น ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท FMC Technologies Co., Ltd ประเทศไทย
- 3.1.3 แคปปา-คาราจีแนน (κ -carrageenan) จากบริษัท FMC Technologies Co., Ltd รัฐเทกซัสประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.4 โลคัสบีนกัน (Locust bean gum, LBG) จากบริษัท FMC Technologies Co., Ltd ประเทศสเปน
- 3.1.5 น้ำตาลทราย ยี่ห้อมิตรผล
- 3.1.6 Citric acid และ tri-sodium citrate ยี่ห้อ Carlo-Erba reagent

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องวัดวิทยากระแส (Controlled stress Rheometer, TA instrument AR-G2, New Castle, DE, USA) และโปรแกรมสำเร็จรูปของเครื่อง (TA Instruments Advantage Software, version 5.0.1, US)
- 3.3.2 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter, Mettler Teledo รุ่น MP220, Switzerland)
- 3.3.3 ตู้แช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส (ULT2540-5V36, Kendo Laboratory products, Asheville, USA)
- 3.3.4 เครื่องวัดคุณสมบัติเชิงความร้อน (Pyris Diamond DSC, Perkin Elmer, Connecticut, USA)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การศึกษาผลของการเข้ากันได้ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสาร

ไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพทางวิทยากระแสและกายภาพเคมี

3.3.1.1 การเตรียมสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์

เตรียมสารผสมโดยผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (SSO หรือ AS) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (แคปปา-คาราจีแนน โลกัสปินกัม และเพคติน) ให้มีความเข้มข้นรวมเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก เตรียมได้โดยนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์แห้งผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนมันสำปะหลังดัดแปรต่อไฮโดรคอลลอยด์เท่ากับ 3:0, 2:1, 1:2 และ 0:3 ส่วน แล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปละลายในสารละลาย Citrate buffer ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ก่อนนำมาให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.3.1.2 การศึกษาสมบัติวิทยากระแส

นำสารผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.1 ที่พักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนมาศึกษาสมบัติวิทยากระแส ด้วยวิธีทดสอบ Flow behavior โดยใช้เครื่องวัดวิทยากระแส (Controlled stress Rheometer, TA instrument AR-G2, New Castle, DE, USA) และโปรแกรมสำเร็จรูปของเครื่อง (TA Instruments Advantage Software, version 5.0.1, US) โดยใช้ parallel plate ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร เพิ่มความเร็วรอบ 0 -300 1/s ภายในระยะเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการวัดอย่างน้อย 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ส่วนการศึกษากการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสสะสม จะนำตัวอย่างสารผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.1 ที่พักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนมาติดตามการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 2 องศาเซลเซียส โดยค่อยๆ ลดอุณหภูมิของตัวอย่างจาก 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส กำหนดให้ค่าร้อยละ Strain คงที่ที่ร้อยละ 1 และความถี่คงที่ที่ 2 Hz หลังจากนั้นทำการวัดคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสโดยกำหนดให้ร้อยละ strain คงที่ที่ร้อยละ 1 และค่าความถี่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.1 – 100 Hz โดยใช้ Parallel plate ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อม (Environment temperature controlled) ด้วยเครื่องวัดวิทยากระแส

3.3.1.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

นำตัวอย่างสารผสมในข้อ 3.3.1.1 ที่ทิ้งไว้ให้เย็นที่ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนมาทดสอบหาค่าการหลอมละลายด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามวิธีการของ (Goff et al., 1993) โดย calibrate Indium ก่อนแล้วค่อย calibrate วิถีวัด ซึ่งการ Calibrate วิถีวัด และวัดจริงจะใช้วิธีเดียวกันดังนี้

ก) ลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้ลดต่ำลงด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่ออนาที จากนั้น คงอุณหภูมิไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส 5 นาที เพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสมบูรณ์

ข) ติดตามการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ดูดเข้าไปเพื่อทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็ง โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -20 องศาเซลเซียส ไปที่ 10 องศาเซลเซียสด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที

ค) ลดอุณหภูมิจาก 10 องศาเซลเซียสไปที่ -20 องศาเซลเซียสด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงอุณหภูมิที่ -20 องศาเซลเซียส 1 นาที จำนวน 5 รอบเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมละลายเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิหลายรอบ

3.3.2. ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างและความหนาแน่นประจุต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์

เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1.1 โดยเตรียมใน Citrate buffer ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 และ 8.0 นำตัวอย่างที่ได้นี้ไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆตามหัวข้อ 3.3.1.2 และ 3.3.1.3

3.3.2.1 ศึกษาผลของส่วนผสมแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ต่ออัตราการละลายผลึกน้ำแข็ง โดยวัดอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งของส่วนผสมของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ โดยดัดแปลงจากวิธีของ Bolliger และคณะ (2000)



รูปที่ 3.1 การวัดอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง

นำส่วนผสมของแป้งดัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ใส่ลงในถ้วยพลาสติกขนาด 4 ออนซ์ให้มีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนมาวางบนตะแกรงลวดขนาด 15 x 15 เซนติเมตรและขนาดรูตะแกรงลวดเท่ากับ 2 x 2 มิลลิเมตร ซึ่งวางอยู่บนบีกเกอร์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.1) เริ่มจับเวลาทันที ชั่งน้ำหนักทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 90 นาที และคำนวณหาร้อยละการละลายของดัดแปรที่ 3-1

$$\text{ร้อยละการละลาย (\%Mass loss)} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างแห้งแข็งในส่วนที่ละลาย} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งแข็งเริ่มต้น}} \dots\dots\dots(3-1)$$

3.3.2.2 ศึกษาผลของส่วนผสมแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ต่อการแยกชั้นของส่วนผสม หลังเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นำตัวอย่างในข้อ 3.3.2.1 ที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเทใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 25 มิลลิลิตร หยดสารละลายไอโอดีนเข้มข้นร้อยละ 1 จำนวน 3-4 หยดเขย่าให้ตัวอย่างเข้ากันดี แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการอยู่ร่วมกันของตัวอย่าง

3.4 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

เนื่องจากตัวอย่างแป้งดัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้มีหลายตัวอย่างจึงได้กำหนดสัญลักษณ์ขึ้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายและกระชับดังนี้

สัญลักษณ์ที่ใช้อธิบายตัวอย่าง 7 หลักประกอบไปด้วย



หลักที่ 1 คือชนิดของแป้งดัดแปร A = Acetylated starch, O = Octenyl succinated starch และ N = ไม่มีแป้งในสารผสม

หลักที่ 2 คือสัดส่วนของแป้งที่มีในส่วนผสม

หลักที่ 3 คือชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ P = Pectin, K = Kappa carageenan, L = Locust bean Gum, และ N = ไม่มีสารไฮโดรคอลลอยด์

หลักที่ 4 คือสัดส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีในส่วนผสม O = ไม่มีไฮโดรคอลลอยด์

หลักที่ 5 คือระบบสารละลาย B = ในสารละลายบัฟเฟอร์อย่างเดียว, S = ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีน้ำตาลซูโครส 16%

หลักที่ 6 และ 7 คือ ค่าความเป็นกรดต่างของบัฟเฟอร์ 35 = ค่าความเป็นกรด-ต่าง 3.5, 50 = ค่าความเป็นกรด-ต่าง 5.0, 65 = ค่าความเป็นกรด-ต่าง 6.5 และ 80 = ค่าความเป็นกรด-ต่าง 8.0

4.1 ผลของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ต่อคุณภาพทางวิทยากระแส

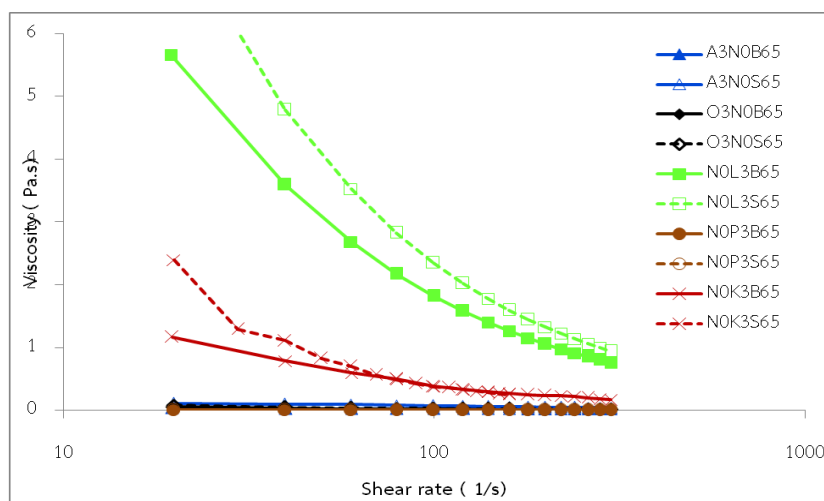
จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างแป้งดัดแปรและสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ที่เตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 วัดด้วยเครื่องวัดวิทยากระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งเดิมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสพบว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีความหนืดแตกต่างกัน (รูปที่ 4.1) โดยตัวอย่างที่เตรียมจาก แคปปา-คาราจีแนนมีค่าความหนืดสูงที่สุด เนื่องจากตัวอย่างสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (BeMiller and Whistler, 1996) ในขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมจากโลคัสบีนกันซึ่งเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดในตัวอย่างอาหารมีความหนืดต่ำรองลงมา ส่วน

ตัวอย่างที่เตรียมจากเพคติน ซึ่งเป็นเพคตินที่ผ่านการดัดแปรให้สามารถละลายในน้ำเย็นได้นั้นมีความหนืดต่ำที่สุด ทั้งนี้เพคตินถือว่าเป็นสารที่สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มี Ca^{2+} หรือในสภาวะที่มีน้ำตาลสูงกว่าร้อยละ 55 (www.genialab.de/inventory/pectinate.htm) ซึ่งการทดลองครั้งนี้ไม่มีการเติม Ca^{2+} และเติมน้ำตาลสูงสุดเพียงร้อยละ 16 ทำให้เพคตินไม่สามารถเกิดเจลได้ โดยตัวอย่างสารละลายเพคตินจะมีความหนืดต่ำสุด

ตัวอย่างที่เตรียมจากแป้งดัดแปรชนิดอะซิทิเลเตดมีค่าความหนืดสูงกว่าแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตเล็กน้อยอันเป็นผลมาจากหมู่อะซิเลตมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี ทำให้โมเลกุลของน้ำในเฟสต่อเนื่องมีน้อย ในขณะที่หมู่ออกเตนิลที่มีในแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนต ซึ่งเป็นสารประเภทไฮโดรโฟบิกที่ไม่ชอบน้ำจะ ส่งผลให้ค่าความหนืดของแป้งดัดแปรชนิดอะซิทิเลเตดมีค่าสูงกว่าแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนต และตัวอย่างทุกตัวอย่างที่เตรียมในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมในบัฟเฟอร์อย่างเดียว อันเป็นผลมาจากน้ำบางส่วนจะถูกใช้เพื่อละลายน้ำตาลซูโครสทำให้มีน้ำในระบบต่อเนื่องน้อยกว่าระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส เมื่อวิเคราะห์การไหลของตัวอย่างโดยใช้สมการ Power's law คือ $\sigma = K(\dot{\gamma})^n$ เมื่อ n คือ Flow behavior index, $n = 1$ (Newtonian fluid), $0 < n < 1$ (Pseudo plastic fluid), $1 < n < \infty$ (Dilatants fluid), σ = shear stress (Pa), $\dot{\gamma}$ = shear rate (1/s) และ K = consistency index (Pa.s) พบว่าทุกตัวอย่างมีคุณสมบัติการไหลแบบ Pseudo plastic อันเนื่องมาจากมีค่า flow behavior index (n) น้อยกว่า 1 (Steffe, 1996) (ไม่แสดงข้อมูล ณ ที่นี้) โดยค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนให้กับตัวอย่าง

4.1.1 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเตดกับ แคปปา-คาราจีแนน

ผลของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับแคปปา-คาราจีแนน ต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส ที่มีสัดส่วนของแป้งดัดแปรต่อไฮโดรคอลลอยด์ 1:2 และ 2:1 (รูปที่ 4.2) พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแคปปา-คาราจีแนนมากกว่าจะมีค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของแคปปา-คาราจีแนนน้อยกว่า โดยตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรอะซิทิเลตจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนต ทั้งนี้เนื่องจากแป้งอะซิทิเลตมีส่วนที่ผสมน้ำได้มากกว่าแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตที่มีทั้งส่วนของที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในโมเลกุล



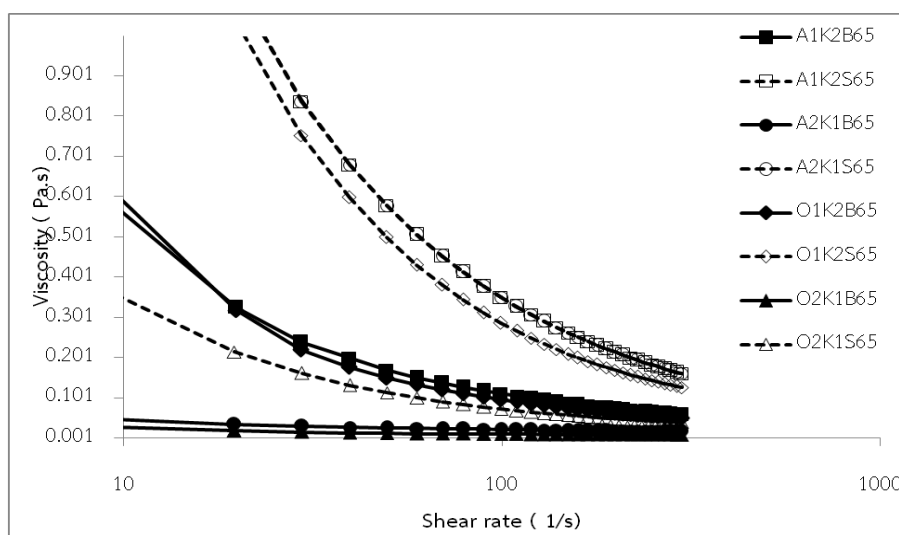
รูปที่ 4.1 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และสารไฮโดรคอลลอยด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16

ส่วนตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากผลของปริมาณน้ำที่เหลือในตัวอย่างที่มีซูโครสน้อยกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีซูโครส ตัวอย่าง A1K2S65 มีค่าความหนืดที่อัตราเฉือน 50 /s เท่ากับ 0.579 Pa.s ในขณะที่ A1K2B65 มีค่าความหนืด 0.170 Pa.s โดยตัวอย่าง A2K1S65, O1K2S65 และ O2K1S65 มีค่าความหนืด เป็น 0.249, 0.501 และ 0.114 Pa.s ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง A2K1B65, O1K2B65 และ O2K1B65 มีค่าความหนืดเป็น 0.026, 0.151 และ 0.013 Pa.s ตามลำดับ

4.1.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเพนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับโลคัสปีนัม

ผลของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับโลคัสปีนัมต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสน์ที่มีสัดส่วนของแป้งดัดแปรต่อไฮโดรคอลลอยด์ 1:2 และ 2:1 (รูปที่ 4.3) พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของโลคัสปีนัมมากกว่าจะมีค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของโลคัสปีนัมน้อยกว่า นั้นแสดงว่าโลคัสปีนัมมีผลต่อค่าความหนืดมากกว่าแป้งดัดแปร อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรอะซิทิเลตจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรโซเดียมออกเพนิลซัคซิเนตเหมือนในตัวอย่างของการจีแนนข้างต้น ส่วนตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสเนื่องจากผลของปริมาณน้ำอิสระที่เหลืออยู่

น้อยในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในระบบ โดยตัวอย่าง A1L2S65 มีค่าความหนืดที่อัตราเฉือน 50 /s เป็น 1.983 Pa.s ในขณะที่ A1L2B65 มีค่าความหนืด 1.289 Pa.s โดยตัวอย่าง A2L1S65, O1K2S65 และ O2L1S65 มีค่าความหนืด เป็น 0.505, 1.661 และ 0.487 Pa.s ตามลำดับ ในขณะที่ ตัวอย่าง A2L1B65, O1L2B65 และ O2L1B65 มีค่าความหนืดเป็น 0.4273, 1.304 และ 0.268 Pa.s ตามลำดับ



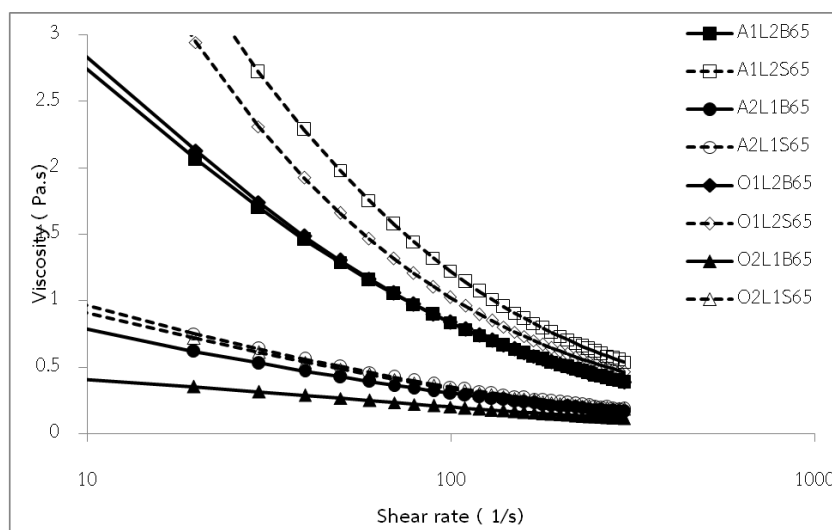
รูปที่ 4.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทิเลเทท หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับแคปปา- คาราจีแนนที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16

4.1.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลเททกับ เพคติน

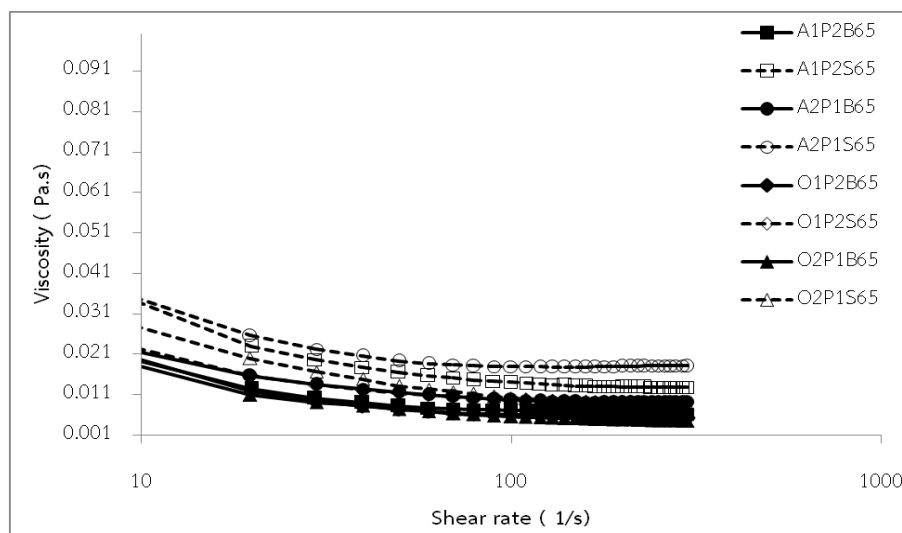
ผลของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับเพคตินต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส ที่มีสัดส่วนของแป้งดัดแปรต่อไฮโดรคอลลอยด์ 1:2 และ 2:1 (รูปที่ 4.4) พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ เพคตินมากกว่าจะมีค่าความหนืดจะต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเพคตินต่ำเช่นเดียวกับผลที่พบในระบบที่มีโลกส์บินกัมข้างต้น โดยตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรอะซิทิเลเททจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสจะให้ค่าความหนืดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสประมาณ 2 เท่า โดยตัวอย่าง

A1P2S65 มีค่าความหนืดที่อัตราเฉือน 50 /s เป็น 0.0165 Pa.s ในขณะที่ A1P2B65 มีค่าความหนืด 0.008 Pa.s โดยตัวอย่าง A2P1S65, O1P2S65 และ O2P1S65 มีค่าความหนืด เป็น 0.0193, 0.0115 และ 0.0131 Pa.s ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง A2P1B65, O1P2B65 และ O2P1B65 มีค่าความหนืดเป็น 0.0116, 0.0075 และ 0.0074 Pa.s ตามลำดับ

โดยสรุปของการศึกษาวิทยาการผสมของสารผสมระหว่างไฮโดรคอลลอยด์ กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมแคปปา-คาราจีแนนซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้เกิดเจลในอาหารเมื่อผสมกับแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด ค่าความหนืดของตัวอย่างจะลดลงตามอัตราส่วนของแป้งดัดแปรที่เพิ่มขึ้น โดยอาจเป็นผลมาจากแป้งดัดแปรทั้งสองชนิดไปขัดขวางการสร้างโครงสร้างของเจลแคปปา-คาราจีแนนส่งผลให้มีความหนืดลดลง เช่นเดียวกับ ตัวอย่างที่มีโลคัส-ปินกัมเป็นสารผสม ซึ่งโลคัสปินกัมเป็นสารเพิ่มความข้นหนืดในอาหาร การผสมแป้งดัดแปรที่มีความหนืดน้อยกว่าโลคัสปินกัม จึงส่งผลให้ความหนืดลดลงตามสัดส่วนของแป้งที่เติมลงไป ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารผสมของเพคตินกับแป้งดัดแปรพบว่าค่าความหนืดน้อยกว่าตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมของไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าแป้งดัดแปรมีผลต่อค่าความหนืดน้อยกว่าชนิดของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ แต่อัตราส่วนของแป้งดัดแปรต่อไฮโดรคอลลอยด์กลับมีผลต่อค่าความหนืดที่ได้แตกต่างกันไป



รูปที่ 4.3 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทิเลเตด หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับโลคัสปินกัมที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทิเลเตด หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับเพคตินที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสภาวะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16

4.2 กลไกยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งของสารผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ในอาหารแช่แข็ง

กลไกการยับยั้งและลดหรือเพิ่มอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งในสารผสมแป้งมันสำปะหลังกับไฮโดรคอลลอยด์ติดตามโดยการวัดอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง โดยตัวอย่างที่มีอัตราการละลายเร็วกว่า จะบ่งบอกถึงขนาดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า และ/หรืออาจมีเฟสกระจายของส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ที่สามารถป้องกันความร้อนได้น้อยกว่า รวมถึงติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกเมื่อค่อยๆลดอุณหภูมิของตัวอย่างลง และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DSC เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็ง

หลังจากเตรียมตัวอย่างสารผสมของแป้งดัดแปรกับสารประกอบไฮโดรคอลลอยด์ที่มีสัดส่วนแตกต่างกันแล้วให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำตัวอย่าง 50 กรัมใส่ลงในถ้วยพลาสติกแล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาวัดอัตราการละลายโดยควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมขณะวัดให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสตลอดเวลาการวัด 90 นาที โดยเริ่มจับเวลาทันทีที่นำตัวอย่างออกจากถ้วยพลาสติก

4.2.1 ผลต่ออัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง

4.2.1.1 ผลของสารผสมแบ่งตัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต หรือแบ่งอะซิทิเลเตทกับแคปปา- คาราจีแนนต่ออัตราการละลาย

ผลของอัตราการละลายของตัวอย่างสารละลายที่เตรียมโดยใช้สารเพียงชนิดเดียว (รูปที่ 4.5 ก.,ข.) พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราการละลายมากคือสารละลายที่มีแบ่งตัดแปรเพียงอย่างเดียว โดยตัวอย่างในสารละลายซูโครสจะมีอัตราการละลายสูงกว่าตัวอย่างในบัฟเฟอร์ อันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับน้ำตาลซูโครสตรงบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกับน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ยับยั้งการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Baek, Yoo and Lim, 2004) ส่งผลให้น้ำส่วนดังกล่าวเป็นส่วนที่ไม่เกิดผลึก ในขณะที่เดียวกันน้ำที่สร้างพันธะกับน้ำตาลจะลดการเคลื่อนที่เพื่อไปสร้างผลึกน้ำแข็ง (Liu and Lelievre ,1992) ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กและง่ายต่อการละลายเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ตัวอย่างที่มีแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตในระบบที่ไม่มีซูโครสจะมีอัตราการละลายร้อยละ 0.65 ต่อนาที่ ส่วนตัวอย่างที่มีแบ่งตัดแปรชนิดอะซิทิเลเตทมีอัตราการละลายร้อยละ 0.55 ต่อนาที่ (รูปที่ 4.5 ก.) แต่เมื่อมีน้ำตาลในระบบตัวอย่างดังกล่าวที่เป็นสารละลายของแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตมีอัตราการละลายร้อยละ 1.06 ต่อนาที่ และตัวอย่างที่มีแบ่งอะซิทิเลเตทมีอัตราการละลายร้อยละ 1.26 ต่อนาที่ (รูปที่ 4.5 ข.) แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ของแบ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับน้ำตาลซูโครสมีผลต่อการชะลอการละลายของผลึกน้ำแข็งในระบบดังกล่าวมากกว่าแบ่งอะซิทิเลเตท

ส่วนตัวอย่างที่มีแคปปา-คาราจีแนนเพียงอย่างเดียวพบว่าตัวอย่างในระบบที่มีซูโครสจะมีอัตราการละลายร้อยละ 0.01 ต่อนาที่ ซึ่งจะมีความแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่มีซูโครส (อัตราการละลายร้อยละ 0.26 ต่อนาที่) และจะพบว่าตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมระหว่างแบ่งตัดแปรกับแคปปา -คาราจีแนน จะมีอัตราการละลายที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือตัวอย่างที่มีซูโครสโดยมีอัตราการละลายที่ช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่มีซูโครสทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากน้ำตาลซูโครสได้สร้างพันธะกับน้ำในระบบ ทำให้น้ำในระบบเหลือน้อยในขณะที่เดียวกันแคปปา- คาราจีแนนมีคุณสมบัติในการเกิดเจลจึงสามารถเก็บกักและป้องกันการละลายของผลึกน้ำแข็งได้ ทำให้ในระบบที่มีสารละลายซูโครสเมื่อมีผลึกน้ำแข็งจากน้ำที่เหลือน้อยจึงเกิดการละลายได้ช้ากว่าในระบบที่ไม่มีซูโครส ส่งผลให้มีอัตราการละลายที่ต่ำกว่านั่นเอง ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าอัตราการละลายยังขึ้นกับสัดส่วนของแบ่งตัดแปรต่อแคปปา -คาราจีแนนในส่วนผสม ตัวอย่างที่มีแบ่งตัดแปรมากกว่าจะมีอัตราการละลายที่มากกว่าเนื่องจากสัดส่วนของคาราจีแนนที่สามารถเกิดเจลเพื่อช่วยห่อหุ้มและป้องกันการละลายของผลึกน้ำแข็งลดลง ทำให้อัตราการละลายในตัวอย่างดังกล่าวเพิ่มขึ้นหรือละลายได้รวดเร็วกว่าอีกตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม Buyong และ Fenema (1998) ได้รายงานว่ปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่น้อยกว่าร้อยละ 2 เช่น

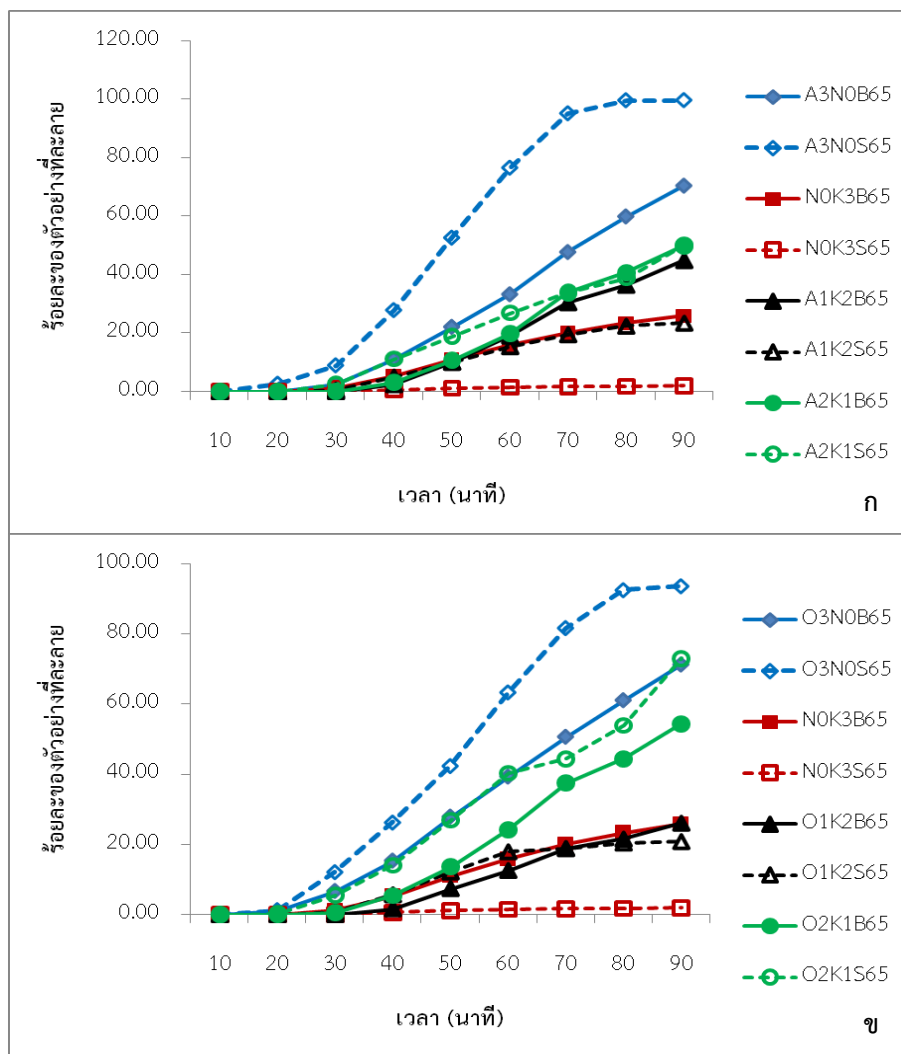
คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส โซเดียมอัลจิเนต กวักัม โลคัสปีนกัม และ คาราจีแนน จะสามารถลดปริมาณการเกิดผลึกน้ำแข็งได้ถึงร้อยละ 3 และการเพิ่มปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์จะเป็นการลดปริมาณของน้ำที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งเช่นกัน

4.2.1.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนตหรือแป้งอะซิทิเลเททกับโลคัสปีนกัมต่ออัตราการละลาย

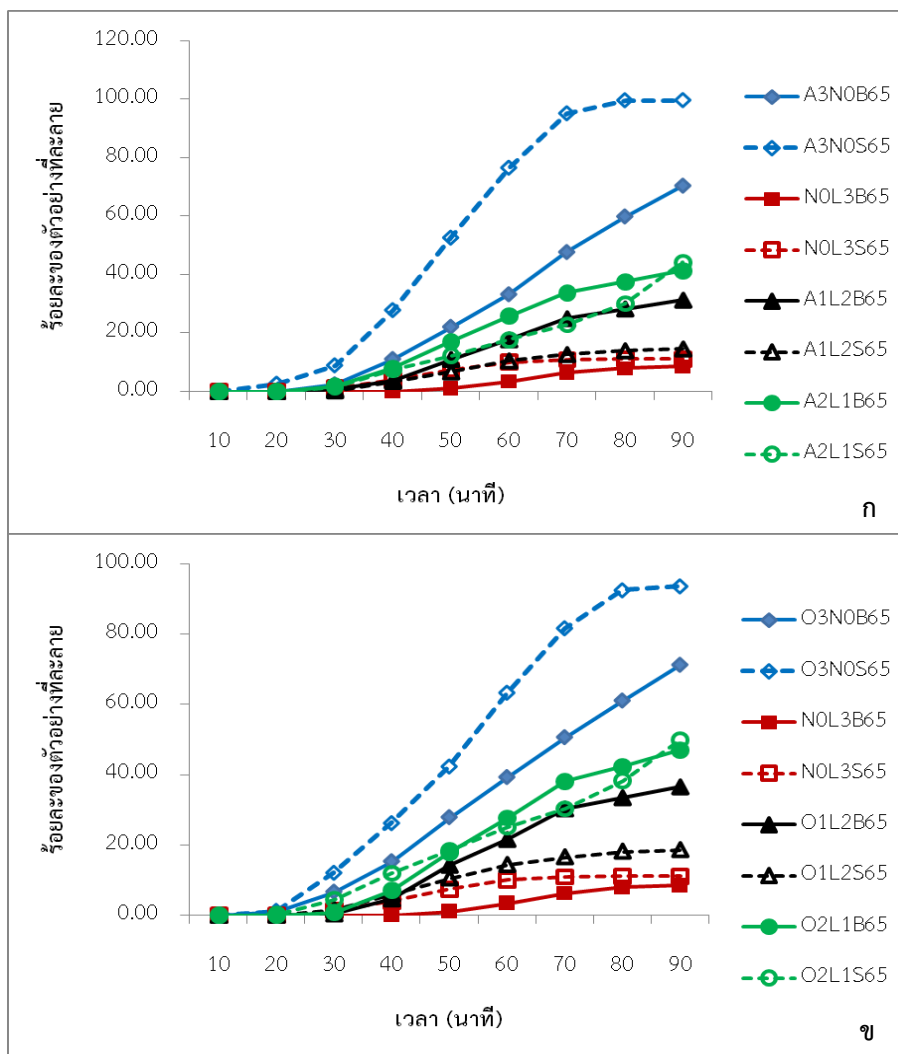
อัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในสารละลายที่มีโลคัสปีนกัมเพียงอย่างเดียวพบว่าอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีแป้งดัดแปรเป็นส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.6) ทั้งนี้เป็นผลมาจากโลคัสปีนกัมเป็นสารที่มีความหนืดสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นสายยาว และยังมีคุณสมบัติอุ้มน้ำได้สูง (BeMiller and Whistler, 1996) กว่าแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้สามารถเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างโพลีเมอร์ได้ดีกว่าและเป็นการป้องกันความร้อนที่จะส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งละลายโดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับโลคัสปีนกัมในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะละลายได้ช้ากว่าระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้ตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับโลคัสปีนกัมจะมีอัตราการละลายขึ้นกับปริมาณของแป้งดัดแปรที่มีในสารผสม โดยผลการทดลองให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับแคปปา- คาราจีแนน ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1

4.2.1.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิด โซเดียมออกเทนิลซัคซินเนตหรือแป้งอะซิทิเลเททกับเพคตินต่ออัตราการละลาย

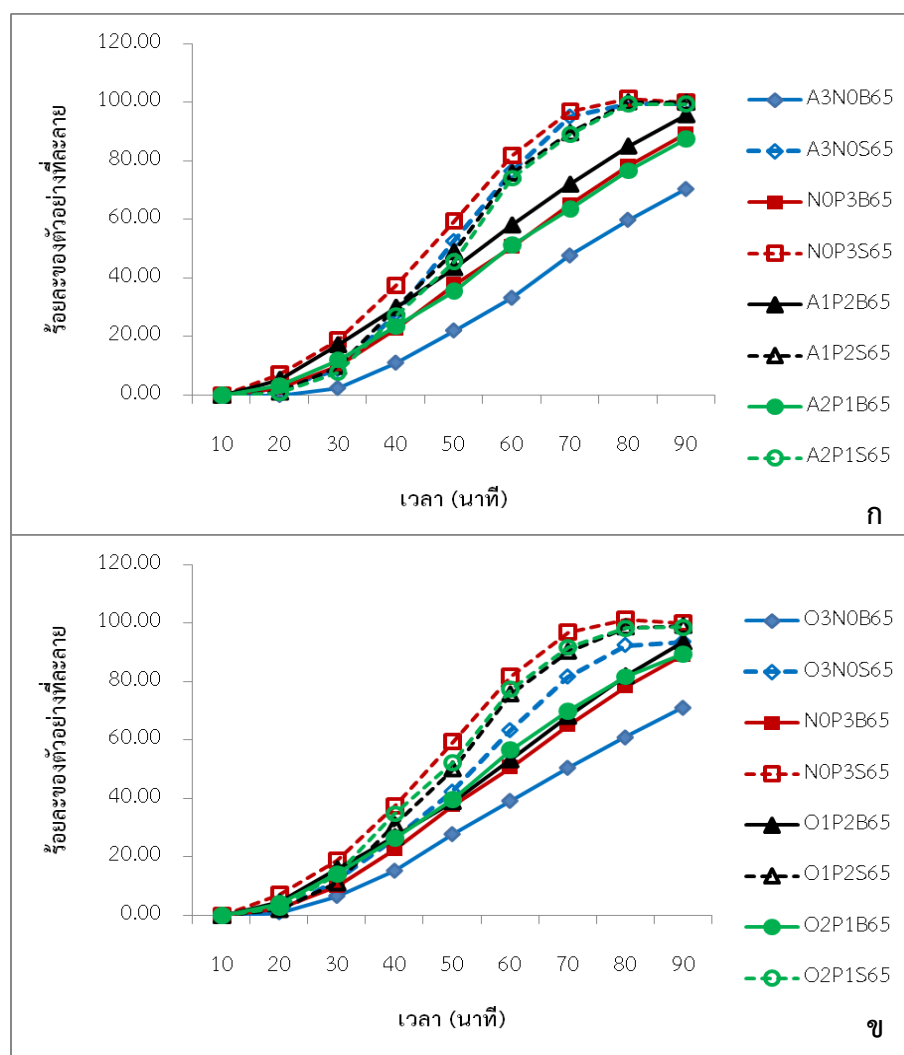
อัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างที่มีเพคตินเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.7 ก.,ข.) จะสูงกว่าอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างที่มีแคปปา -คาราจีแนนหรือโลคัสปีนกัมเป็นส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว โดยตัวอย่างที่มีสารเพียงอย่างเดียวของเพคติน แคปปา- คาราจีแนน หรือโลคัสปีนกัมในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายเท่ากับร้อยละ 0.85, 0.26 และ 0.06 ต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่ระบบที่มีน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายร้อยละ 1.36, 0.01 และ 0.17 ต่อนาทีตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเพคตินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นเพคตินที่มีการดัดแปรให้สามารถละลายน้ำเย็นได้ซึ่งอาจมีผลต่อโครงสร้างและความสามารถในการเกิดเจลของเพคตินเอง และทั้งนี้ค่าความหนืดของเพคตินมีค่าต่ำกว่าไฮโดรคอลลอยด์ตัวอื่นส่งผลให้มีความสามารถในการอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้น้อย และป้องกันความร้อนที่จะมาทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็งได้น้อยกว่าไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ส่งผลทำให้มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งที่เร็วกว่าตัวอย่างที่เตรียมจากไฮโดรคอลลอยด์อีก 2 ชนิดเมื่ออุณหภูมิสภาพแวดล้อมในการศึกษาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทีเลต (ก) หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต (ข) กับแคปทา-คาร์ราจีแนนที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16



รูปที่ 4.6 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทีเลต (ก) หรือ โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต (ข) กับโลคัสปีนัมที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16



รูปที่ 4.7 อัตราการละลายของตัวอย่างส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอะซิทีเลเตด (ก) หรือ โซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนต (ข) กับเพคตินที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน โดยวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด ต่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลทรายร้อยละ 16

อัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างที่เป็นสารผสมของเพคตินกับแป้งดัดแปรพบว่าในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสอันเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของซูโครสกับน้ำจะยับยั้งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำที่จะไปเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง เมื่อคำนวณอัตราร้อยละของการละลายของผลึกน้ำแข็งพบว่าตัวอย่าง A1P2B65, A2P1B65, O1P2B65 และ O2P1B65 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.5$)

เช่นเดียวกับในตัวอย่างในระบบที่มีซูโครสพบว่าตัวอย่าง A1P2S65, A2P1S65, O1P2S65 และ O2P1S65 มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.5$) และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้แป้งดัดแปรชนิดเดียวกันด้วยอัตราส่วนที่เท่ากันพบว่าอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในระบบที่ไม่มีซูโครส ตัวอย่างที่มีเพคตินเป็นส่วนผสมจะมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ผสมกับโลคัสปีนัมและแคปปา-คาราจีแนน ตามลำดับ ส่วนในระบบที่มีซูโครสพบว่าตัวอย่างที่มีเพคตินเป็นส่วนผสมยังมีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งสูงที่สุด ตามด้วย แคปปา-คาราจีแนน และ โลคัสปีนัม ตามลำดับ

4.2.2 ผลต่อคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติก โดยตัวอย่างจะถูกลดอุณหภูมิจาก 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่าง ทุกๆ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ตามด้วยการวัดคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ที่ -10 โดยมีค่า ร้อยละของ strain คงที่ที่ 1 และค่าความถี่ของการวัดเปลี่ยนแปลงจาก 0.1-100 เฮิร์ต

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยเมื่อพิจารณาในกรณีของตัวอย่างที่ไม่มีการผสมระหว่างไฮโดรคอลลอยด์กับแป้งดัดแปร จะพบว่าค่ามอดุลัสสะสมในกลุ่มของตัวอย่างนี้ที่มีซูโครสในระบบจะมีอัตราการเพิ่มค่ามอดุลัสสะสมช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบจะเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบจะมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ -4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำกับน้ำตาลซูโครสสร้างพันธะไฮดรอกซิลทำให้น้ำบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่ไม่เกิดการแข็งตัวเป็นผลึก (unfreezable water) และลดการเคลื่อนที่ของน้ำที่ไปสร้างผลึกน้ำแข็งให้มีขนาดใหญ่ (Spies and Hosene, 1982) จึงทำให้ค่ามอดุลัสสะสมซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะคล้ายของแข็ง (Solid-like behavior) ของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลมีอัตราการเพิ่มค่าดังกล่าวเร็วกว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาล

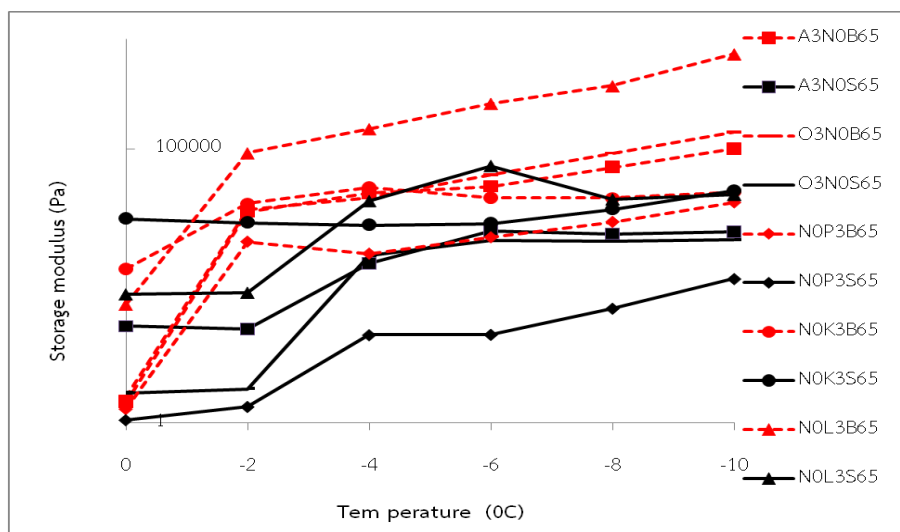
อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างที่เตรียมจากแคปปา-คาราจีแนนมีค่าค่อนข้างจะคงที่ตลอดช่วงที่อุณหภูมิลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากเจลของแคปปา-คาราจีแนน ทำหน้าที่เสมือนฉนวนป้องกันความเย็นทำให้น้ำเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งได้ช้ากว่าตัวอย่างอื่นๆ ขณะเดียวกันน้ำที่ถูกกักอยู่ในโครงสร้างเจลของแคปปา-คาราจีแนน จะเคลื่อนที่เพื่อสร้างให้ผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้นได้ยากส่งผลให้มอดุลัสสะสมมีค่าคงที่ตลอดการลดอุณหภูมิ

ส่วนตัวอย่างที่เตรียมจากเพคตินพบว่าค่ามอดุลัสสะสมมีการเพิ่มขึ้นได้น้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งอาจแสดงถึงว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างอื่นๆ อันเป็นผลมาจากการตัดแปรคุณสมบัติด้านการละลายน้ำเย็นของเพคติน ทำให้น้ำอาจเกิดการสร้างพันธะไฮดรอกซิลกับโมเลกุลของเพคติน เช่นเดียวกับที่สร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำตาลซูโครส ทำให้น้ำเกิดการเคลื่อนที่เพื่อสร้างผลึกน้ำแข็งได้ลดลง และผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดเล็กส่งผลให้พบอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งที่เร็วกว่าตัวอย่างอื่นดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

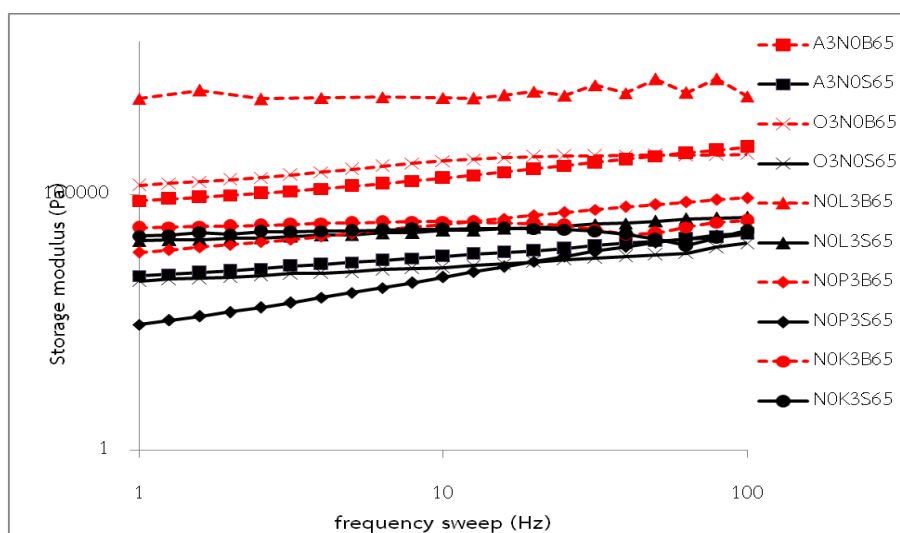
จากรูปที่ 4.9 เมื่อวัดคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของตัวอย่างสารละลายอย่างเดี่ยว เช่น สารละลายของไฮโดรคอลลอยด์ที่ไม่มีส่วนผสมของสารอื่นผสมอยู่ด้วยโดยให้ความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 0.1 – 100 เฮิร์ต พบว่าเส้นกราฟของมอดุลัสสะสมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดช่วงของความถี่ที่ใช้ศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับในระบบเดียวกัน ตัวอย่างที่เตรียมจากโลคัสปินกัมแสดงค่ามอดุลัสสะสมสูงสุดซึ่งอาจเป็นผลมาจากโมเลกุลของโลคัสปินกัมที่มีกิ่งก้านมาก (BeMiller and Whistler, 1996) ส่งผลให้แสดงส่วนที่เป็น Solid-like behavior ได้มากกว่าตัวอย่างไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ส่วนตัวอย่างที่เตรียมจากเพคตินให้ค่าต่ำสุดดังเหตุผลที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

ทั้งนี้ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงกว่าในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส เพราะโอกาสการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบที่ไม่มีซูโครสมากกว่าในระบบที่มีซูโครส แต่ทั้งนี้พบว่าตัวอย่างที่เตรียมจากแคปปา-คาราจีแนนในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำหรือสารละลายของน้ำตาลถูกกักอยู่ในโครงสร้างเจลของแคปปา-คาราจีแนน และสรุปได้ว่าปฏิสัมพันธ์ของคาราจีแนนกับน้ำตาลนั้น โครงสร้างเจลของแคปปา-คาราจีแนนเป็นส่วนที่แสดงคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติกมากกว่าเป็นผลมาจากน้ำหรือน้ำตาลในระบบ

สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารละลายแป้งอะซิทิเลตจะมอดุลัสสะสมน้อยกว่าตัวอย่างที่เป็นสารละลายแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนต ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่แป้งอะซิทิเลตมีหมู่อะซิติดลที่มีคุณสมบัติอุ้มน้ำ (water holding capacity) ส่งผลให้น้ำบริเวณดังกล่าวยากที่จะเคลื่อนที่ หรือเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง หรือในขณะเดียวกันโมเลกุลของน้ำตาลบางส่วนจะแทรกอยู่ในโพลิเมอร์ของอะไมโลเพคตินทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่เพื่อสร้างเป็นผลึกน้ำแข็ง ในขณะที่แป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนต ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำดังนั้นจึงมีน้ำอิสระอยู่มากกว่าและสามารถเคลื่อนที่และสร้างเป็นผลึกน้ำแข็งได้มากกว่าน้ำที่อยู่ในตัวอย่างสารละลายแป้งอะซิทิเลต ทำให้ในระบบที่เป็นแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตมีผลึกน้ำแข็งเยอะและมีขนาดใหญ่กว่าระบบที่เป็นสารละลายแป้งอะซิทิเลตส่งผลให้ตัวอย่างที่เป็นแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตแสดงค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าตัวอย่างแป้งอะซิทิเลต



รูปที่ 4.8 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร หรือไฮโดรคอลลอยด์ ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16



รูปที่ 4.9 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร หรือไฮโดรคอลลอยด์ ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16

4.2.2.1 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับ แคปตา-คาราจีแนนต่อสมบัติวิทยากระแส

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้งสองชนิดกับแคปตา-คาราจีแนน (รูปที่ 4.10 ก., ข.) จะพบว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบจะมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่าง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นหลังจากอุณหภูมิลดไปที่ -4 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่างเช่นกัน แสดงว่าน้ำตาลซูโครสมีส่วนช่วยในการลดอุณหภูมิในการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบได้อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสสะสมจะขึ้นกับสัดส่วนของแป้งดัดแปร ตัวอย่างที่มีแป้งดัดแปรมากกว่าค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของแป้งน้อยกว่าเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณของน้ำในตัวอย่างลดลง solid-like behavior ของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งมากขึ้น หรืออาจเกิดจากผลของเจลแคปตา-คาราจีแนนที่ความเข้มข้นมากๆ ทำให้โครงสร้างของระบบแข็งแรงมากขึ้นลักษณะ solid-like behavior จึงมีมากขึ้น แต่เมื่อลดอุณหภูมิของระบบลงถึง -10 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.11 ก และ ข) กลับพบว่าค่ามอดุลัสสะสมของระบบที่มีปริมาณน้ำมากกว่า (ระบบที่มีแป้งดัดแปรน้อยหรือไม่มีซูโครส) จะค่ามากกว่าระบบที่มีส่วนผสมในระบบที่ประกอบไปด้วยแป้งดัดแปร คาราจีแนนและน้ำตาลซูโครส นั้นแสดงว่าการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบที่มีแป้งดัดแปร คาราจีแนน และไม่มีซูโครสจะเกิดขึ้นมากกว่าในอีกระบบหนึ่ง เพราะน้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับแป้งดัดแปร คาราจีแนน และน้ำตาลซูโครสในระบบดังกล่าวยังคงมีปริมาณมากทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งได้มากกว่าเมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงถึง -10 องศาเซลเซียส

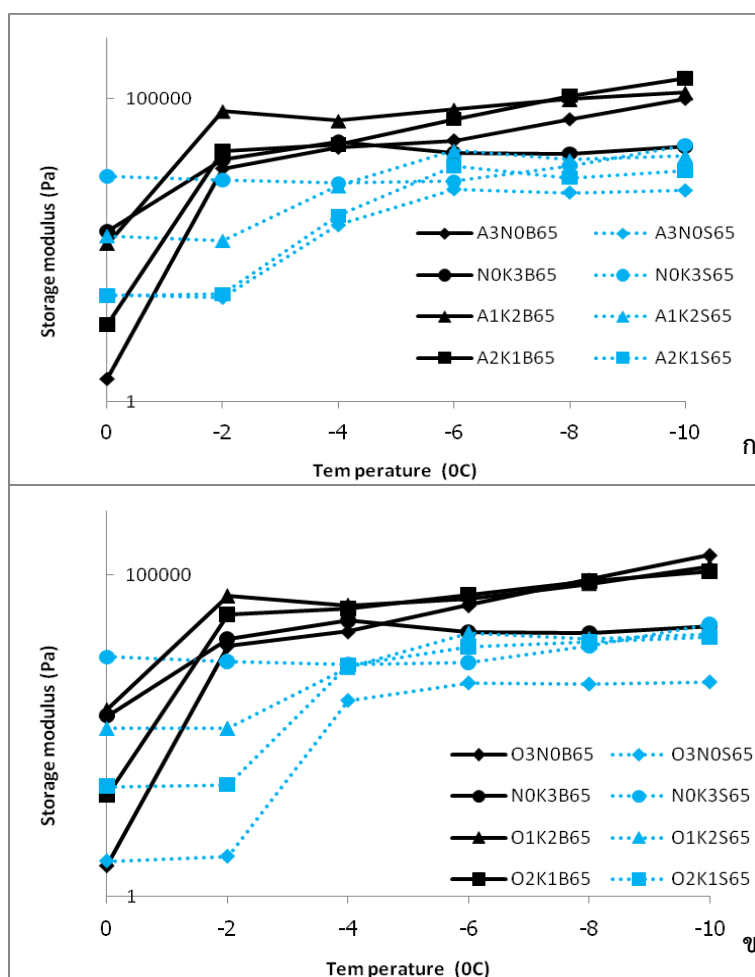
4.2.2.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับ โลคัสปินกัมต่อสมบัติวิทยากระแส

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้งสองชนิดกับโลคัสปินกัม (รูปที่ 4.12 ก และ ข) พบว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่างแสดงว่าในตัวอย่างดังกล่าวนี้มีน้ำอิสระที่สามารถกลายเป็นผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก ทำให้การเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสที่มีค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นหลังจากอุณหภูมิลดไปที่ -4 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่าง ผลที่ได้สอดคล้องกับกรณีของตัวอย่างที่มีการใช้แคปตา-คาราจีแนนเป็นส่วนผสม

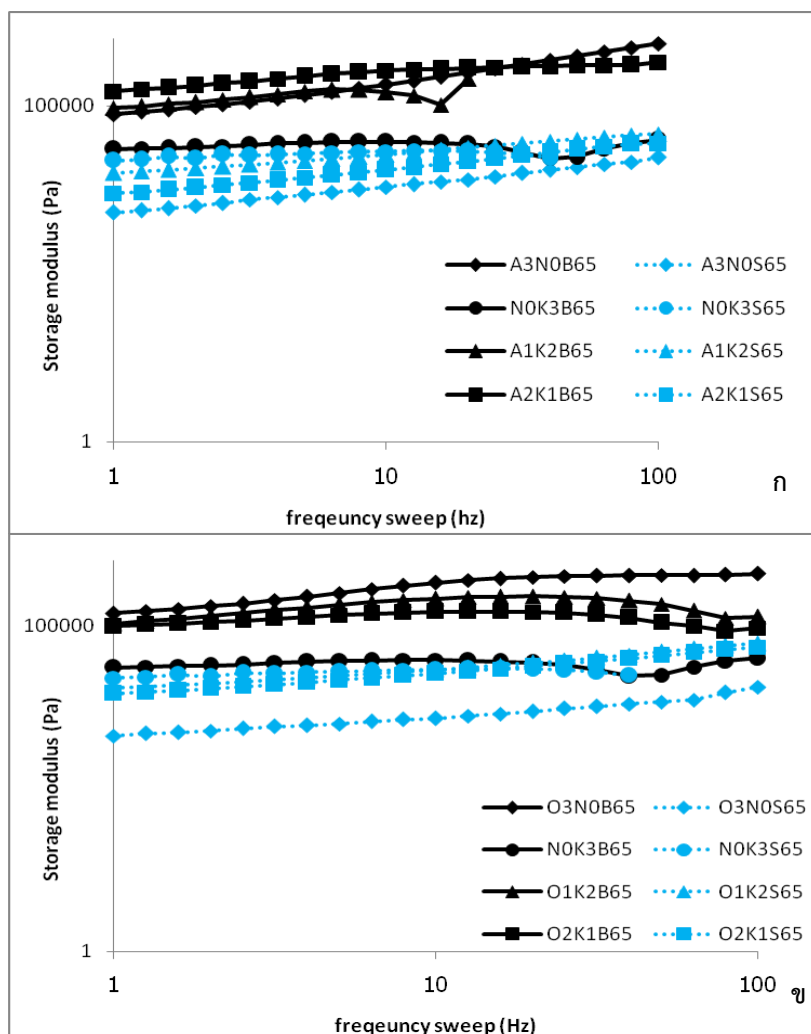
อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสสะสมที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.13 ก และ ข) จะขึ้นกับสัดส่วนของแป้งดัดแปร ตัวอย่างที่มีแป้งดัดแปรมากกว่าค่ามอดุลัสสะสมจะมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของน้ำอิสระที่สามารถเกิดผลึกน้ำแข็งได้ในระบบมีมากกว่า แต่ตัวอย่างที่มีโลคัส

บีนกัมมากกว่าจะมีความหนืดมากกว่า ส่งผลให้น้ำอิสระเคลื่อนเพื่อเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งได้ยากกว่า จึงทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างที่มีปริมาณโพลีบีนกัมที่น้อยกว่า

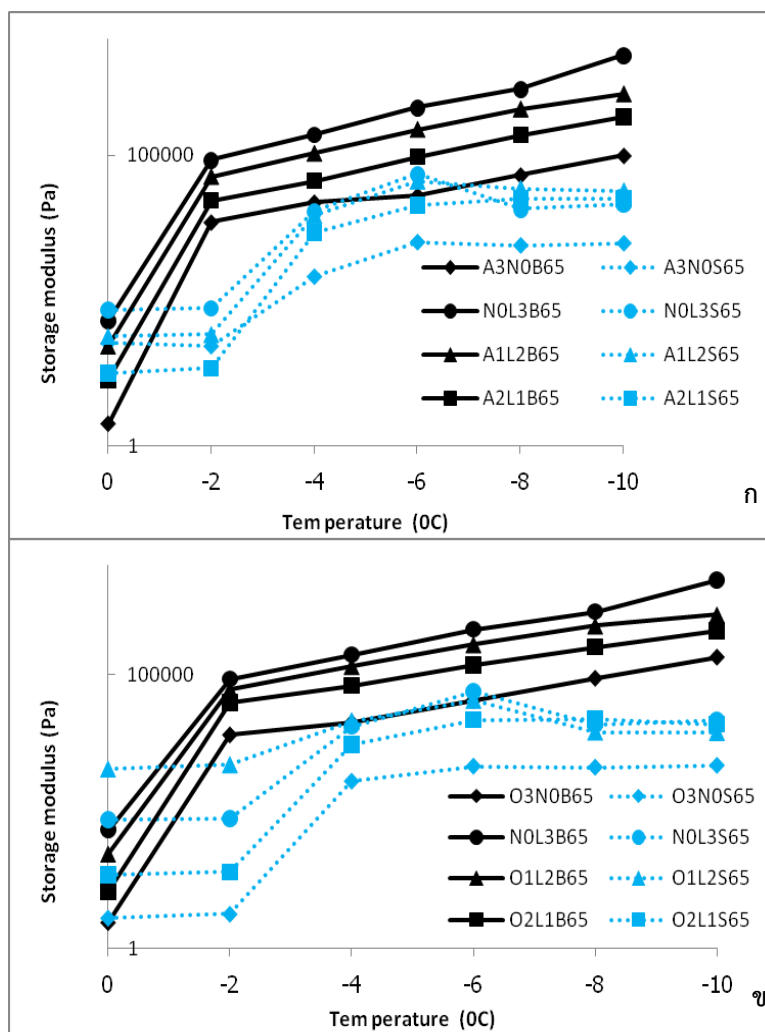
ส่วนตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาล น้ำตาลซูโครสอย่างเห็นได้ชัด และดูเหมือนว่าในระบบตัวอย่างสำหรับการศึกษานี้ น้ำตาลซูโครสจะแสดงบทบาทของปัจจัยหลักในการควบคุมการเกิดผลึกน้ำแข็งได้เด่นชัดกว่าแป้งดัดแปรและการจั่นแนน อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบ ค่ามอดุลัสสะสมมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่อุณหภูมิของตัวอย่างได้ -2 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ค่ามอดุลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดช่วงการลดอุณหภูมิ



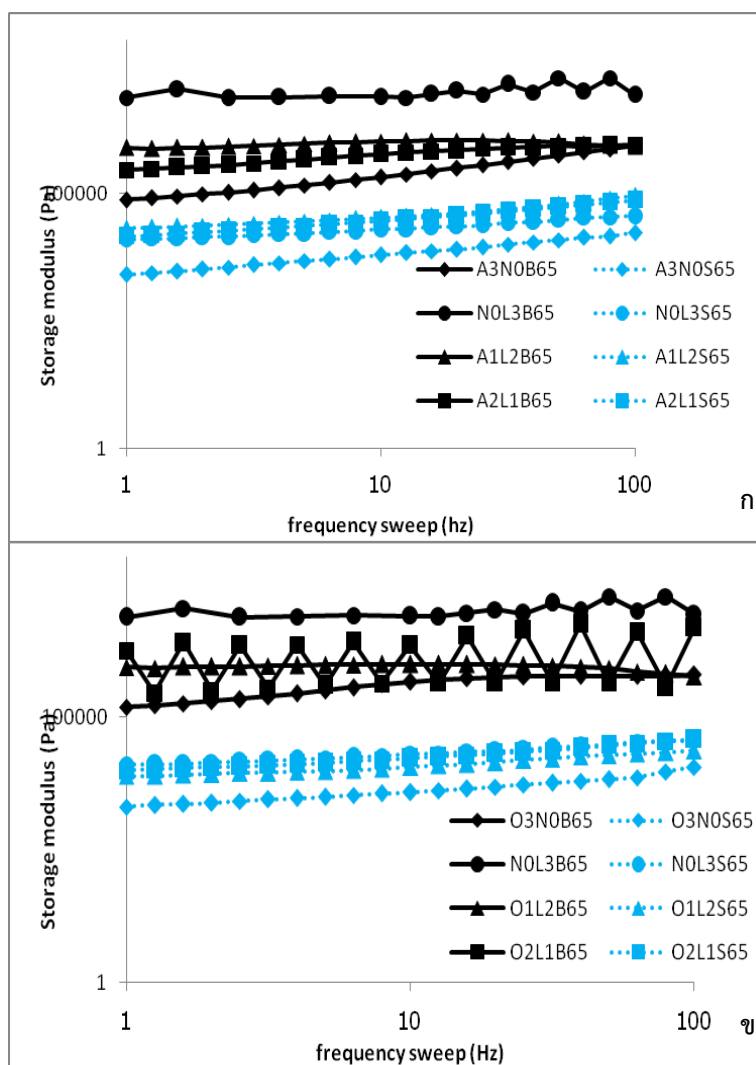
รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซีทิลเลเตท (ก) หรือแป้งโซเดียมออกซิไดซ์ (ข) กับแคปไซซินที่มีสัดส่วนต่างๆ ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสภาวะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16



รูปที่ 4.11 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลเตท (ก) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัค-
ซิเนต (ข) กับแคปทา-คาราจีแนน ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ
-10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสภาวะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16



รูปที่ 4.12 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทิเลต (ก) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัค-ซิเนต (ข) กับโพลีสปินกัมที่มีสัดส่วนต่างๆ ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสภาวะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ



รูปที่ 4.13 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทิเลเตด (ก) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต (ข) กับโพลีสปีนัมที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เต็มและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16

4.2.2.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับ เพคตินต่อคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างสารผสมระหว่าง แป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับเพคติน (รูปที่ 4.14 ก., ข.) พบว่า ตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบมีค่า มอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่างและมีแนวโน้มคงที่ หลังจากลดอุณหภูมิให้ต่ำลง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นหลังจาก อุณหภูมิลดไปที่ -4 องศาเซลเซียส ยกเว้นตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งดัดแปรชนิด โซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต ที่ค่ามอดุลัสสะสมเริ่มสูงขึ้นที่ -6 องศาเซลเซียส แล้วจึงคงที่หลังจากนั้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเพคตินซึ่งผ่านการดัดแปรโครงสร้างเพื่อให้สามารถ ละลายในน้ำเย็นได้ กับหมู่ออกเทนิลในแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต ส่งผลให้เกิดการลดการ เคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำ หรือลดปริมาณน้ำอิสระที่เกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง โดยค่ามอดุลัสสะสมที่ อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.15 ก และ ข) จะขึ้นกับสัดส่วนของแป้งดัดแปร ตัวอย่างที่มีแป้ง ดัดแปรมากกว่าค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัส สะสมมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นผลมาจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นได้ช้ากว่า หรือน้อยกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสนั่นเอง

4.2.3 ผลต่อสมบัติด้านความร้อน

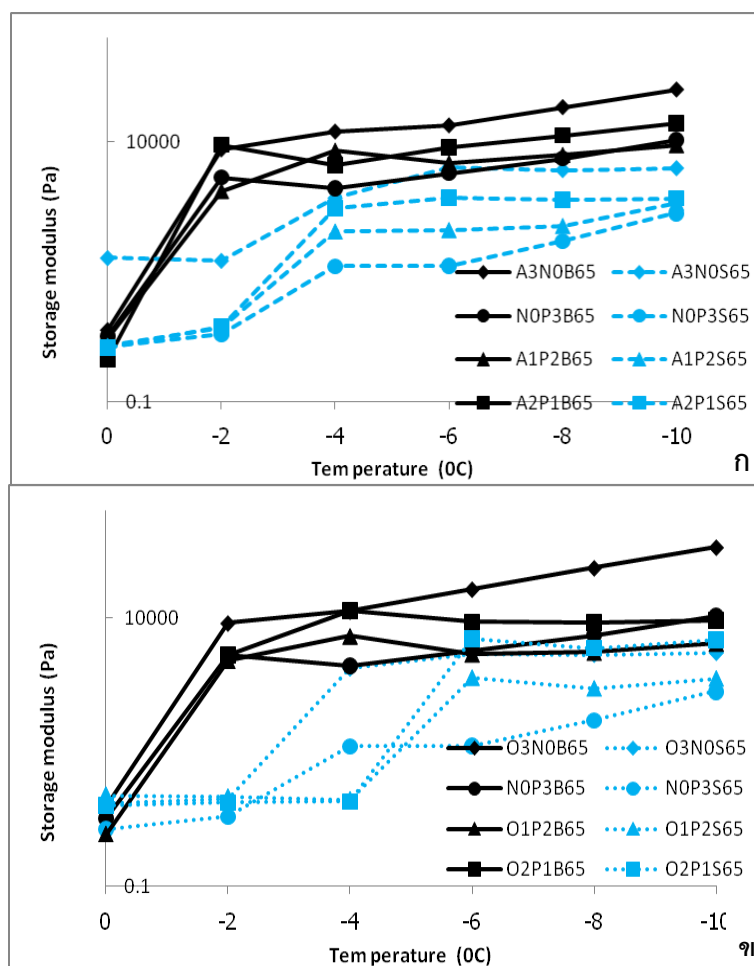
นำตัวอย่างของสารผสมที่เตรียมโดยการให้ความร้อนในสารละลายบัฟเฟอร์ทั้งที่เดิมและไม่เติมน้ำตาลซูโครส แล้วทิ้งไว้ให้เย็นข้ามคืนก่อนนำตัวอย่างไปวัดค่าการนำความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน (DSC) โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แข็งด้วยการลดอุณหภูมิไว้ที่ -20 องศาเซลเซียสนาน 5 นาทีก่อนที่จะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิไปที่ 10 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็ว 1 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยรายงานผลเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (ΔH) ในกรณีที่มีค่าเป็นลบ (exothermic) ซึ่งบ่งบอกถึงการคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะใหม่ หรือถ้ามีค่าเป็นบวก (Endothermic) หมายถึงการดูดพลังงานเพื่อสลายพันธะของผลึกน้ำแข็ง ส่วนค่า Temperature on set (T_o) คืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดการหลอมละลายผลึกน้ำแข็ง และ Peak of temperature (T_p) ที่บ่ง บอถึงอุณหภูมิที่เกิดการหลอมละลาย

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารละลายที่ไม่มีการผสมสารอื่นเข้าด้วยกัน พบว่า ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่า T_o ต่ำกว่าตัวอย่างที่เตรียมในสารละลายบัฟเฟอร์อย่างเดียว (A3N0B65, O3N0B65, N0P3B65, N0L3B65, N0K3B65 มีค่า T_o เท่ากับ -3.29, -3.08, -3.58, -3.41 และ -3.63 องศาเซลเซียสตามลำดับ) ส่วนตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีค่า T_o ดังต่อไปนี้คือ

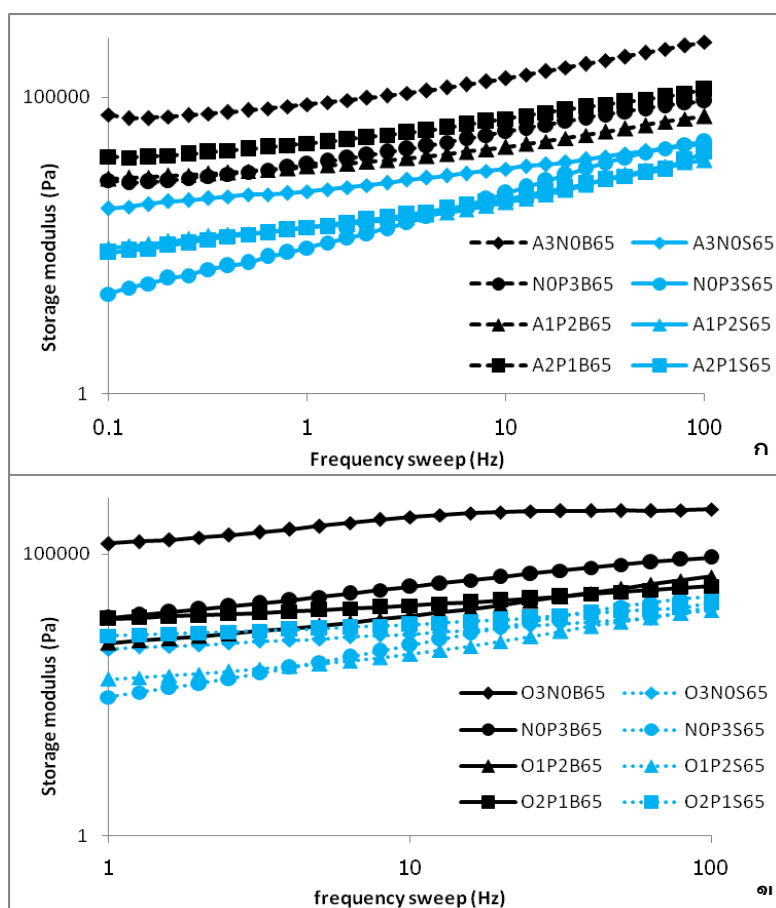
A3N0S65, O3N0S65, NOP3S65, NOL3S65, NOK3S65 มีค่า T_o คือ -5.29, -6.08, -6.11, -5.94 และ -6.44 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในข้อ 4.3 โดยจากการทดลองพบว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบจะเริ่มละลายได้เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส และผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสจะละลายหมดภายใน 1 ชั่วโมง ยกเว้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแคปปา-คาราจีแนน หรือโลคัสปินกัม ซึ่งเป็นผลมาจากตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีส่วนของน้ำที่ไม่เกิดการแช่แข็ง (unfreezable water) มากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการละลายผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส แต่ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของแคปปา-คาราจีแนน หรือโลคัสปินกัมนั้น จะมีการละลายของผลึกน้ำแข็งได้ช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของแคปปา-คาราจีแนน หรือโลคัสปินกัม เพราะการเคลื่อนตัวของน้ำในการละลายถูกจำกัดด้วยโครงสร้างเจลของส่วนผสมของแคปปา-คาราจีแนน หรือความหนืดของโลคัสปินกัมนั่นเอง

สำหรับค่า ΔH ของตัวอย่าง A3N0B65, O3N0B65, NOP3B65, NOL3B65, NOK3B65 มีค่าเท่ากับ 259.53, 277.93, 263.44, 267.32 และ 276.31 จูลตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครส ตัวอย่าง A3N0S65, O3N0S65, NOP3S65, NOL3S65, NOK3S65 มีค่า ΔH เท่ากับ 154.82, 192.76, 177.53, 189.29 และ 188.71 จูลตามลำดับ ทั้งนี้จะพบว่าทุกตัวอย่างมีค่า ΔH เป็นบวก แสดงว่าระบบมีการดูดพลังงานความร้อนเข้าไปเพื่อสลายโครงสร้างของผลึกน้ำแข็ง โดยตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบจะมีการดูดพลังงานมากกว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครส เพื่อใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็งซึ่งหมายถึงตัวอย่างมีขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่กว่าหรือมีจำนวนปริมาณของผลึกน้ำแข็งมากกว่า

เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่เกิดการหลอมละลาย (T_p) พบว่า ตัวอย่างสารผสมที่มีสารเพียงตัวเดียวและไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบมีค่า T_p มากกว่า 0 องศาเซลเซียส (A3N0B65, O3N0B65, NOP3B65, NOL3B65, NOK3B65 มีค่า T_p เท่ากับ 1.19, 0.63, 0.93, 0.35 และ 1.09 องศาเซลเซียสตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการละลายของผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างดังกล่าว มีการละลายที่อุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครส ซึ่งมีค่า T_p ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่าง (A3N0S65, O3N0S65, NOP3S65, NOL3S65, NOK3S65 มีค่า T_p เท่ากับ -1.11, -2.22, -1.93, -1.63 และ -2.15 องศาเซลเซียสตามลำดับ) ทั้งนี้ Beak และ คณะ (2004) รายงานถึงความสัมพันธ์ของค่า T_p ของการละลายผลึกน้ำแข็งกับปริมาณน้ำตาลว่าค่า T_p จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาล



รูปที่ 4.14 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีลเตท (ก) หรือแป้งไฮเดียมออกเทนิลซัค-ซิเนต (ข) กับ เพคตินที่มีสัดส่วนต่างๆ ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 0.1 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในสถานะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16



รูปที่ 4.15 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมแป้งอะซิทีเลเตท (ก) หรือแป้งโซเดียมออกเตนิลซัค-ซิเนต (ข) กับ เพคตินที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรดต่าง 6.5 ในสภาวะที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16

4.2.3.1 ผลของสารผสมแบ่งตัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิกซัคซิเนตหรือแบ่งอะซิทิเลตกับ แคลป-การาจี้แนตต่อสมบัติเชิงความร้อน

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารผสมระหว่างแบ่งตัดแปรทั้ง 2 ชนิด กับ แคลป-การาจี้แนตทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ค่า T_o ของตัวอย่าง A1K2B65, A2K1B65, O1K2B65, O2K1B65, A1K2S65, A2K1S65, O1K2S65, O2K1S65 มีค่าดังต่อไปนี้คือ -4.62, -4.52, -4.50, -4.43, -7.38, -7.13, -7.23 และ -7.15 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนค่า T_p ของตัวอย่าง A1K2B65, A2K1B65, O1K2B65, O2K1B65, A1K2S65, A2K1S65, O1K2S65, O2K1S65 เท่ากับ -0.75, -0.39, -0.76, -0.44, -2.79, -2.75, -2.76, -2.61 องศาเซลเซียสตามลำดับ

โดยพบว่าตัวอย่างที่มีแคลป-การาจี้แนตในสัดส่วนที่มากกว่าจะมีแนวโน้มของค่า T_o และ T_p น้อยกว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแคลป-การาจี้แนตในส่วนผสมน้อยกว่าซึ่งเป็นผลมาจากแคลป-การาจี้แนตที่มีความสามารถในการเกิดเจลสามารถที่จะอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากกว่า ทำให้มีน้ำที่จะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าส่งผลให้ใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็งน้อยกว่า

ส่วนตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบพบว่าค่า T_o และ T_p น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบ อย่างไรก็ตามพบว่าค่า T_o และ T_p ของตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแบ่งตัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับแคลป – การาจี้แนตทั้งที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครส มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายของแบ่งตัดแปรหรือแคลป-การาจี้แนตเพียงชนิดเดียว ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินอาจเกิดปฏิสัมพันธ์กัน ส่งผลให้น้ำอิสระอยู่นอกโครงสร้างของเจลแคลป-การาจี้แนต หรืออยู่นอกโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมากขึ้น และส่งผลให้น้ำอิสระเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้เพื่อหลอมละลายผลึกน้ำแข็งจึงลดลง

เมื่อพิจารณาค่า ΔH ของตัวอย่าง A1K2B65, A2K1B65, O1K2B65, O2K1B65, A1K2S65, A2K1S65, O1K2S65, O2K1S65 พบว่ามีค่าเท่ากับ 270.73, 279.11, 265.82, 274.43, 187.76, 180.98, 186.82 และ 186.45 จูลตามลำดับ โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบมีค่า ΔH น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสในระบบและพบว่าตัวอย่างที่มีแคลป-การาจี้แนตในสัดส่วนที่มากกว่ามีแนวโน้มว่าค่า ΔH น้อยกว่าเช่นกันซึ่งเป็นผลมาจากแคลป-การาจี้แนตที่มีความสามารถในการเกิดเจลสามารถที่จะอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากกว่า และมีปริมาณผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.2.3.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิคซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับ โลคัสปีนัมต่อสมบัติเชิงความร้อน

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด กับโคัสปีนัมทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ค่า T_o ของตัวอย่าง A1L2B65, A2L1B65, O1L2B65, O2L1B65, A1L2S65, A2L1S65, O1L2S65 และ O2L1S65 เท่ากับ -4.71, -4.68, -4.58, -4.64, -7.19, -7.39, -7.38 และ -7.27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่า T_p เท่ากับ -0.12, -0.19, -0.15, 0.02, -2.78, -2.48, -2.45 และ -3.02 องศาเซลเซียสตามลำดับ ตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตกับโคัสปีนัมในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส พบว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแป้งอะซิทิเลตมากกว่าโคัสปีนัมจะมีค่า T_o สูงกว่าแต่มีค่า T_p ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนแป้งอะซิทิเลตน้อยกว่าโคัสปีนัม แสดงว่าแป้งอะซิทิเลตมีผลต่อการหลอมละลายของผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างดังกล่าวน้อยกว่าโคัสปีนัม อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้ตรงกันข้ามกับในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส นั่นหมายถึงว่าเมื่อระบบมีน้ำตาลซูโครส ปริมาณน้ำในระบบอาจเหลือน้อยจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและน้ำในระบบ ทำให้น้ำที่เหลือสามารถทำปฏิกิริยาหรือรวมตัวกับแป้งอะซิทิเลตได้น้อย ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งอะซิทิเลตมากขึ้นอุณหภูมิเริ่มต้นในการหลอมละลายของผลึกน้ำแข็งและอุณหภูมิที่หลอมละลายผลึกในระบบได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากโมเลกุลบางส่วนของแป้งอะซิทิเลตที่อาจจะละลายไม่หมดก็เป็นได้ อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีแป้งออกเทนนิคซัคซิเนตเป็นส่วนผสมในระบบให้ผลตรงกันข้ามกับตัวอย่างที่มีแป้งอะซิทิเลต โดยในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสค่า T_p จะแปรผกผันและค่า T_o จะแปรผกผันกับปริมาณแป้งโซเดียมออกเทนนิคซัคซิเนตในระบบ ซึ่งผลที่ได้สลับกับระบบที่มีน้ำตาลซูโครส นั่นหมายความว่าไม่ว่าในระบบจะประกอบไปด้วยแป้งดัดแปรชนิดใดก็ตาม น้ำตาลซูโครสจะมีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งโดยทำให้ระบบมีผลึกน้ำแข็งน้อยลงจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายผลึกลดลงหรือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนักก็ละลายผลึกน้ำแข็งดังกล่าวได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสารละลายที่มีโพลีแซคคาไรด์หรือไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว พบว่าทั้งค่า T_o และ T_p มีค่าลดลงทั้งระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสเช่นเดียวกับกรณีของสารผสมของแป้งดัดแปรกับแคปบา-คาร์ราจีแนน โดยอาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริสัมพันธ์ของโคัสปีนัมกับอะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินของแป้งดัดแปรในระบบนี้ดังที่กล่าวมาแล้ว

เมื่อพิจารณา ΔH ของตัวอย่าง A1L2B65, A2L1B65, O1L2B65, O2L1B65, A1L2S65, A2L1S65, O1L2S65 และ O2L1S65 พบว่ามีค่าดังนี้คือ 285.50, 275.96, 272.38, 269.70, 178.16, 191.11, 187.35 และ 190.85 จูล ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้พบว่าระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีค่า ΔH น้อยกว่าระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสค่า ΔH จะแปรผกผันกับปริมาณแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดในส่วนผสม ในขณะที่ในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสค่า ΔH แปร

ผันตรงกับปริมาณแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด ซึ่งจากผลดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ที่แน่ชัดของสารผสมโลคัสปีนกับกับแป้งดัดแปรต่อค่า ΔH ได้

4.2.3.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดออกเทนิคซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลเตทกับเพคตินต่อสมบัติเชิงความร้อน

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด กับเพคตินทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส พบว่า ค่า T_o ของตัวอย่าง A1P2B65, A2P1B65, O1P2B65, O2P1B65, A1P2S65, A2P1S65, O1P2S65, O2P1S65 มีค่าเท่ากับ -4.62, -4.36, -4.56, -3.45, -6.88, -6.72, -6.87 และ -6.78 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนค่า T_p ของตัวอย่าง A1P2B65, A2P1B65, O1P2B65, O2P1B65, A1P2S65, A2P1S65, O1P2S65, O2P1S65 มีค่าเท่ากับ -0.84, -0.28, -1.01, -0.27, -2.65, -2.67, -2.62 และ -2.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยค่า T_o และ T_p ทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสจะแปรผันตรงกับสัดส่วนของแป้งดัดแปรทั้งแป้งอะซิทิเลเตท และแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และเช่นเดียวกับสารผสมของแป้งดัดแปรกับแคปปา-คาราจีแนน หรือ โลคัสปีนกับที่พบว่าค่า T_o และ T_p ของสารผสมแป้งดัดแปรกับเพคตินมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายของแป้งดัดแปรหรือเพคตินเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซูโครสมีผลโดยตรงต่อค่า T_o และ T_p ที่ลดลง แสดงว่าซูโครสลดการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบ ส่วนปฏิสัมพันธ์ของแป้งดัดแปรต่างชนิดกันกับเพคตินไม่ได้แสดงผลอย่างเด่นชัดต่อการเกิดหรือหลอมละลายของผลึกน้ำแข็ง

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด กับเพคติน ทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ค่า ΔH ของตัวอย่าง A1P2B65, A2P1B65, O1P2B65, O2P1B65, A1P2S65, A2P1S65, O1P2S65, O2P1S65 มีค่าเท่ากับ 274.12, 257.29, 273.00, 268.28, 185.76, 183.72, 187.56 และ 161.52 จูลตามลำดับ โดยค่า ΔH จะแปรผกผันกับปริมาณแป้งดัดแปรทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้ในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสค่า ΔH จะมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสเหมือนตัวอย่างอื่นๆ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการเข้ากันได้ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

4.3.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อสมบัติวิทยากระแส

การวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแสของตัวอย่างที่เป็นแป้งดัดแปร หรือไฮโดรคอลลอยด์ หรือสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) สมบัติการไหล (Flow behavior) โดยจะวัดตัวอย่างหลังจากที่เตรียมทิ้งไว้ค้างคืนเพื่อให้ตัวอย่างเกิดปฏิสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) โดยใช้หัววัดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ความเร็วในการวัดเริ่มต้นตั้งแต่ 1 – 300 1/s ภายในระยะเวลา 5 นาที และ 2) การวัดคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติก โดยใช้ หัววัดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ภายในระบบปิดที่สามารถควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมได้ โดยทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสสะสมที่ความถี่คงที่เท่ากับ 1 Hz และร้อยละของ strain เท่ากับ 0.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส และวัดในโหมดของ frequency sweep ที่ความถี่ของการสั่นอยู่ระหว่างจาก 0.1-100 เฮิร์ตโดยกำหนดให้ ร้อยละของ strain คงที่ที่ 0.1

เมื่อลดอุณหภูมิให้กับสารละลายตัวอย่างพบว่าทุกตัวอย่างที่เตรียมในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิถึง -4 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.16) ส่วนตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสทุกตัวอย่างค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิถึง -2 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของตัวอย่างสารละลายที่มีเพียงตัวอย่างเดียวในสถานะที่มีน้ำตาล ค่ามอดุลัสสะสมที่ค่าความถี่ 1 Hz และมีค่าร้อยละของ strain 0.1 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.17) พบว่า ตัวอย่าง NOK3B65, NOL3B65, NOP3B65, A3N0B65, O3N0B65, NOK3B35, NOL3B35, NOP3B35, A3N0B35, และ O3N0B35 มีค่ามอดุลัสสะสมดังนี้คือ 22,690, 747,000, 73,565, 75,070, 152,500, 36,500, 599,000, 360,000, 299,000 และ 296,000 Pa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส ตัวอย่าง NOK3S65, NOL3S65, NOP3S65, A3N0S65, O3N0S65, NOK3S35, NOL3S35, NOP3S35, A3N0S35 และ O3N0S35 มีค่ามอดุลัสสะสม เท่ากับ 15,500, 12,500, 286.15, 2,582.2, 2,030.93, 21,105, 95,900, 31,385, 2,102 และ 21,354 Pa ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างเดียวกันแต่มีค่าความเป็นกรดต่างแตกต่างกันพบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ยกเว้นตัวอย่างที่เตรียมจากแป้งอะซิทิเลตที่พบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดในระหว่างการเตรียมตัวอย่าง ส่งผลให้ทั้งแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตและไฮโดรคอลลอยด์ต่างๆมีขนาดของ

โพลีเมอร์สั้นลง ส่งผลให้ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในโครงสร้างโพลีเมอร์ลดลง น้ำจึงกลายเป็นผลึกน้ำแข็งได้มากขึ้นค่ามอดูลัสสะสมจึงมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการไหล พบว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning behaviour คือค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนให้กับตัวอย่าง ตัวอย่างที่เป็นสารละลายของแป้งอะซิทิเลเตดชนิดเดียวกัน (รูปที่ 4.18ก) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่ต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ในระบบน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยค่าความหนืดของตัวอย่าง A3N0B35, A3N0B50, A3N0B65, A3N0B80, A3N0S35, A3N0S50, A3N0S65 และ A3N0S80 ที่อัตราเฉือน 100 1/s มีค่าเท่ากับ 0.025, 0.030, 0.031, 0.021, 0.048, 0.060, 0.076 และ 0.043 Pa.s ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.5 มีความหนืดสูงสุดตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0, 3.5 และ 8.0 ตามลำดับ

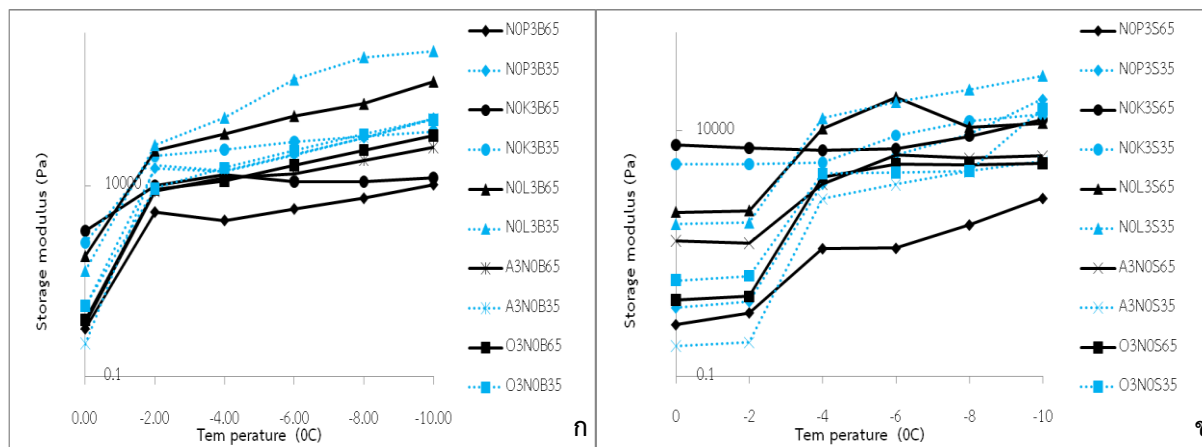
ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารละลายของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.18ข) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลในตัวอย่างดังกล่าวที่ต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่นๆ ทั้งนี้ ค่าความหนืดของตัวอย่าง O3N0B35, O3N0B50, O3N0B65, O3N0B80, O3N0S35, O3N0S50, O3N0S65, และ O3N0S80 ที่อัตราเฉือน 100 1/s มีค่าเท่ากับ 0.026, 0.0123, 0.0123, 0.008, 0.029, 0.021, 0.020 และ 0.014 ตามลำดับ โดยพบว่าตัวอย่างที่มีค่าความหนืดสูงสุด ได้แก่ตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 และ 8.0 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งออกเทนิกซึ่งมีประจุเป็นบวกในสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นกลาง ค่าความหนืดจะต่ำเนื่องจากแต่ละสายโพลีเมอร์ของแป้งจะเกิดการผลักกันของประจุลบให้แต่ละสายอยู่ห่างกัน แต่ในสถานะเป็นกรดที่มี +H ไอออนเหล่านี้จะไปดบังความแรงของประจุลบในสายโพลีเมอร์ของแป้งทำให้แต่ละสายโพลีเมอร์เข้าใกล้ชิดกันมากขึ้นผลที่ได้คือความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารละลายของแคปปา-คาราจีแนนเพียงชนิดเดียว (รูปที่ 4.18ค) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่ต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ ทั้งนี้ค่าความหนืดของตัวอย่าง N0K3B35, N0K3B50, N0K3B65, N0K3B80, N0K3S35, N0K3S50, N0K3S65 และ N0K3S80 ที่อัตราเฉือน 100 1/s คือ 0.006, 0.103, 0.387, 0.4285, 0.0134, 0.642, 0.704 และ 0.756 Pa.s ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่มีความหนืดสูงสุดเรียงตามลำดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นดังนี้ 8.0, 6.5, 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ โดยจะพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่าง กับค่าความหนืดมีทิศทางตรงกันข้ามกับ

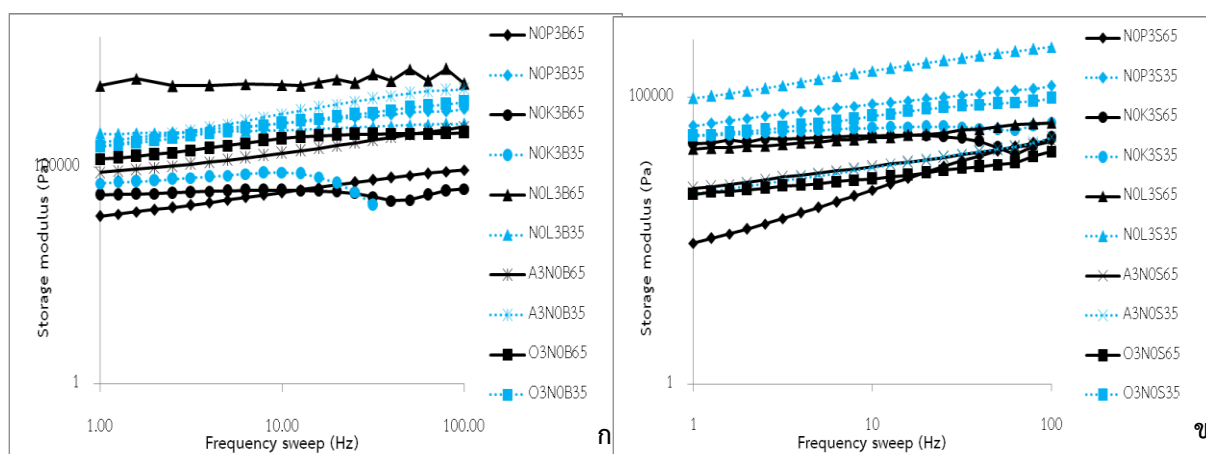
ตัวอย่างที่มีแป่งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตแม้ว่าจะมีประจุเหมือนกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแคปปา-คาราจีแนน ซึ่งเป็นสารที่สามารถเกิดเจลได้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง แต่ในสภาวะกรดสูงๆ ประจุบวกของไฮโดรเจนไอออนอาจไปยับยั้งประสิทธิภาพของการเกิด random coil และการเกิดเจลของแคปปา-คาราจีแนนได้ทำให้การเกิดเจลลดลง โดยพบว่าแคปปา-คาราจีแนน คงตัวได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง > 3.8 (BeMiller and Whistler, 1996)

ในตัวอย่างที่เป็นสารละลายของโลคัสปินกัมเพียงชนิดเดียว (รูปที่ 4.18ง) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบเช่นเดียวกับทุกระบบ โดยค่าความหนืดของตัวอย่าง NOL3B35, NOL3B50, NOL3B65, NOL3B80, NOL3S35, NOL3S50, NOL3S65, และ NOL3S80 ที่อัตราเฉือน 100 1/s มีค่าเท่ากับ 1.687, 1.798, 1.829, 1.727, 2.088, 2.286, 2.351 และ 2.096 Pa.s ตามลำดับ ตัวอย่างที่มีความหนืดสูงสุดได้แก่ตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.5, 5.0, 3.5 และ 8.0 ตามลำดับ ค่าความหนืดของโลคัสปินกัมมีค่าความหนืดสูงสุดในช่วงที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นกลางและกรดอ่อนๆ ในสภาวะที่เป็นกรด หรือด่าง สูงเกินไปอาจส่งผลต่อการจัดเรียงตัวกันของโพลีเมอร์ของโลคัสปินกัมทำให้ค่าความหนืดลดลงได้

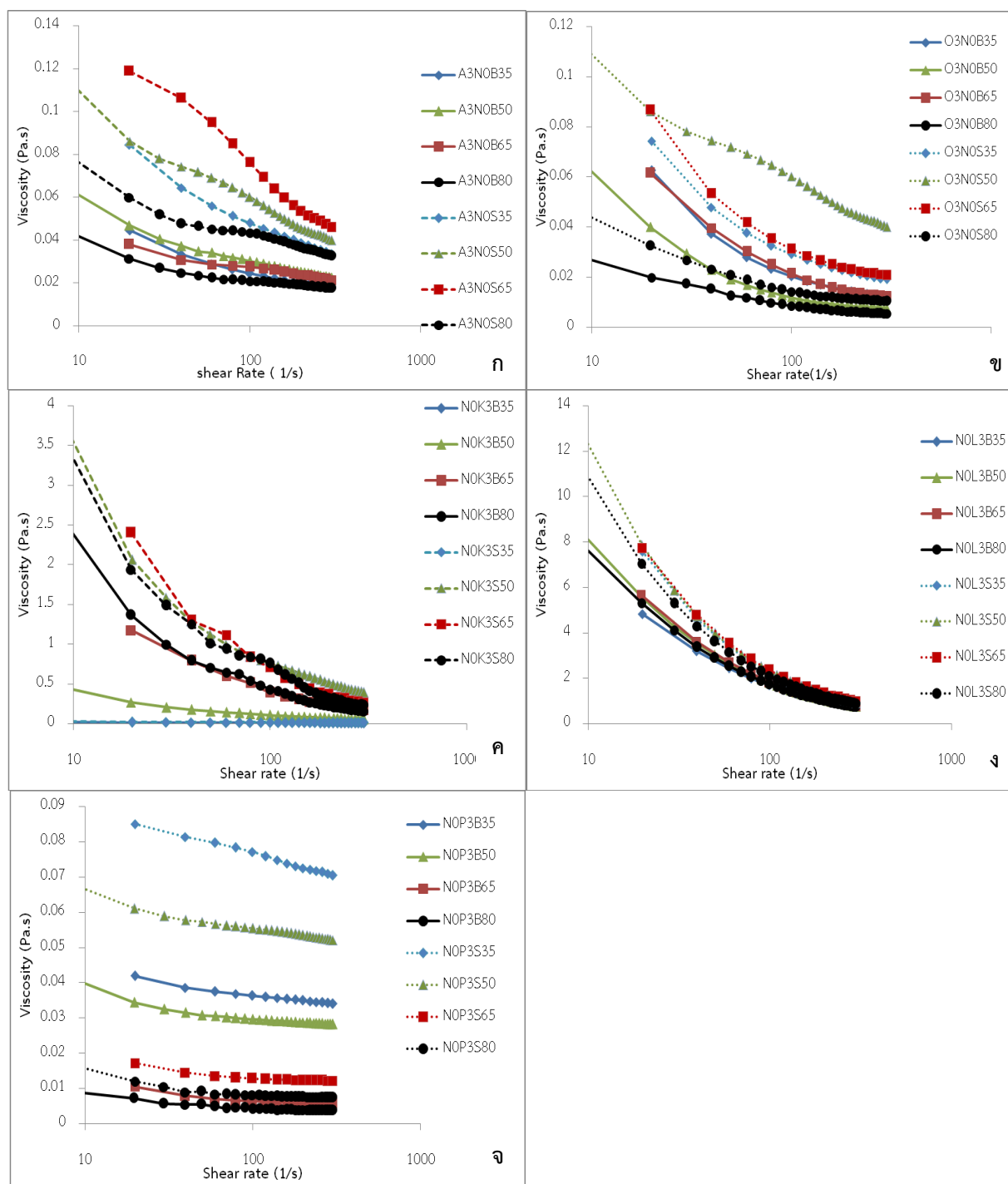
ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารละลายของเพคตินเพียงชนิดเดียว (รูปที่ 4.18จ) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ และค่าความหนืดของตัวอย่าง NOP3B35, NOP3B50, NOP3B65, NOP3B80, NOP3S35, NOP3S50, NOP3S65 และ NOP3S80 ที่อัตราเฉือน 100 1/s มีค่าเท่ากับ 0.036, 0.030, 0.006, 0.004, 0.077, 0.055, 0.013 และ 0.008 Pa.s ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่มีความหนืดสูงสุดเรียงตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้แก่ 3.5, 5.0, 6.5 และ 8.0 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะในสภาวะที่เป็นกรดเพคตินจะมีความหนืดสูงกว่าในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง



รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งตัดแปรรหรือไฮโดรคอลลอยด์ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส (ก) หรือระบบที่มีน้ำตาลซูโครส (ข) ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



รูปที่ 4.17 มอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งตัดแปรรหรือไฮโดรคอลลอยด์ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส (ก) หรือระบบที่มีน้ำตาลซูโครส (ข) ที่มีร้อยละ strain เท่ากับ 1 และความถี่ระหว่าง 0.1-100 Hz ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



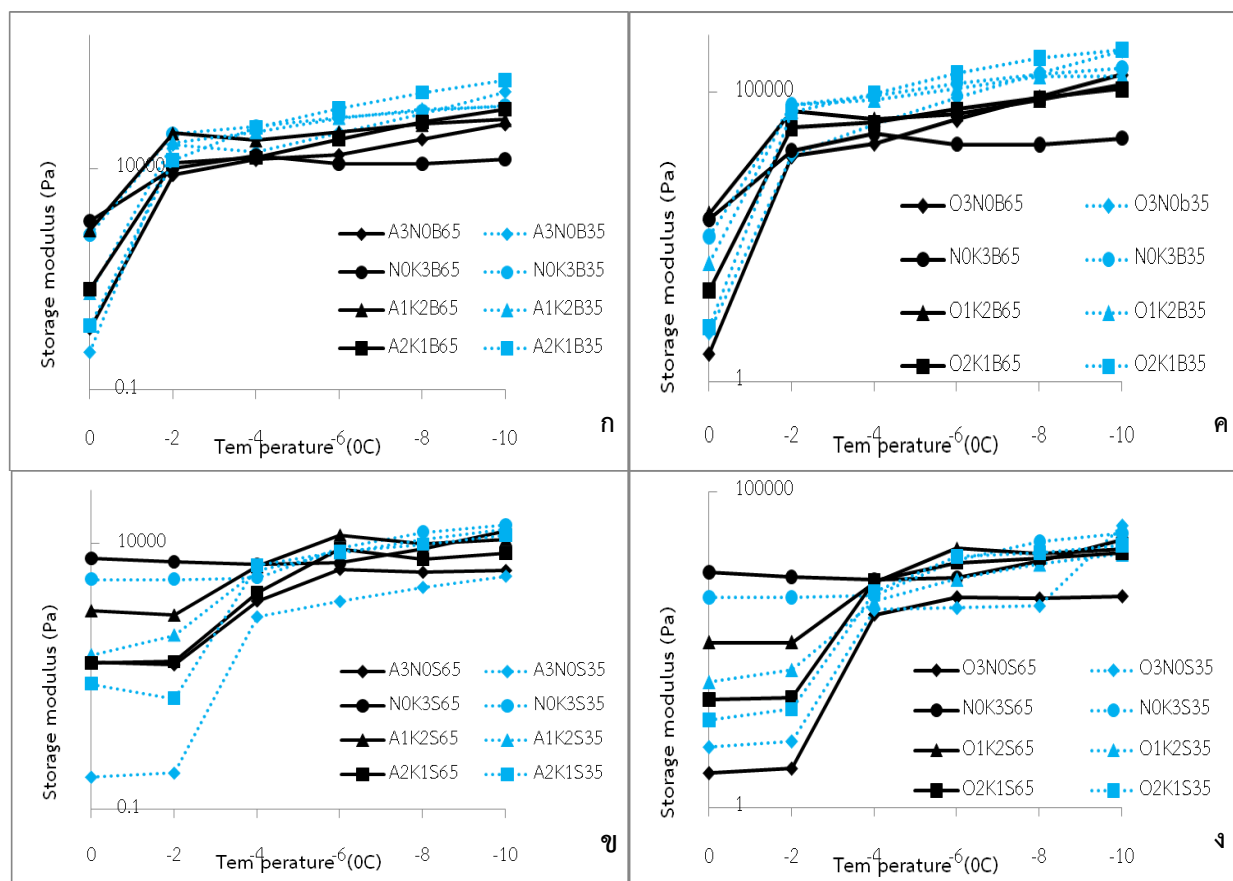
รูปที่ 4.18 ความหนืดของตัวอย่างแป้งดัดแปรอะซิทีเลต (ก) แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินेट (ข) แคปปา-คาราจีแนน (ค) โคล์สปีนัม (ง) และ เพคติน (จ) ในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราเฉือน 0- 300 1/s

4.3.1.1 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา- คาราจีแนนต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

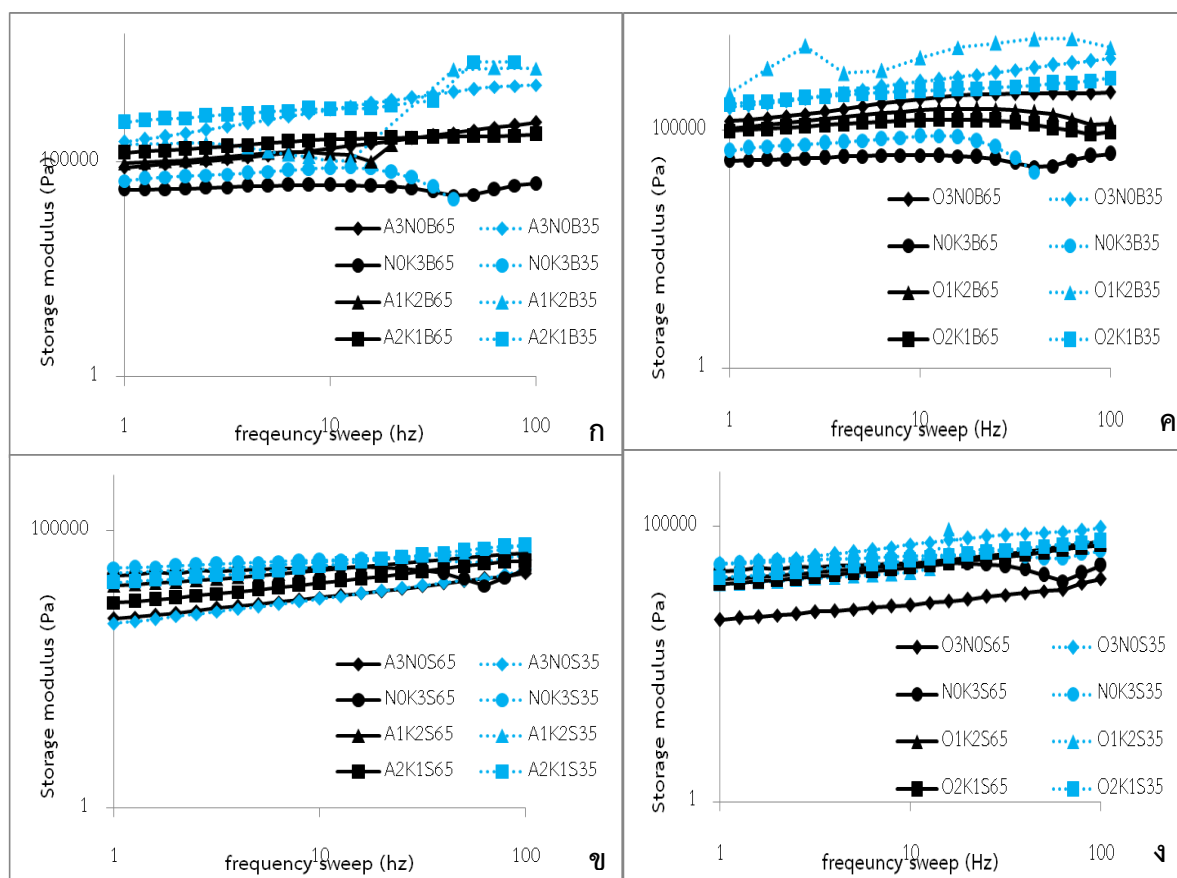
ผลจากการลดอุณหภูมิของตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกันลงที่ละเอียดกึ่งเล็กน้อยทำให้คุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติกของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา-คาราจีแนน แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ก-ง โดยพบว่าการลดอุณหภูมิลงที่ -2 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมยังคงที่และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิลดถึง -4 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับตัวอย่างที่เป็นสารละลายเดี่ยว

เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสสะสมเมื่อให้ความถี่ที่ 1 Hz และ Strain คงที่ที่ 0.1% (รูปที่ 4.20 ก-ข) ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส A3N0B65, N0K3B65, A1K2B65, A2K1B65, ได้แก่ 75,070 22,690 93,300 และ 166,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S65, N0K3S65, A1K2S65, A2K1S65, ได้แก่ 2,583 15,500 10,074.5 และ 5,010.5 Pa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส A3N0B35, N0K3B35, A1K2B35, A2K1B35, ได้แก่ 299,000 36,500 255,000 และ 853,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S35, N0K3S35, A1K2S35, A2K1S35, ได้แก่ 3,446 21,105 17,180 และ 11,360 Pa ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในตัวอย่างที่มีแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต (รูปที่ 4.20 ค-ง) ค่ามอดุลัสสะสมที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลตัวอย่าง O3N0B65, N0K3B65, O1K2B65, O2K1B65, ได้แก่ 152,500 22,690 106,900 และ 96,635 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S65, N0K3S65, O1K2S65, O2K1S65, ได้แก่ 2,030.93 15,500 10,905 และ 9,060.5 Pa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส O3N0B35, N0K3B35, O1K2B35, O2K1B35, ได้แก่ 296,000 36,500 585,000 และ 345,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S35, N0K3S35, O1K2S35, O2K1S35, ได้แก่ 21,353.67 21,105 18,20 11,825 Pa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากันพบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ทั้งที่เตรียมจากแป้งอะซิทิเลตและที่เตรียมจากจากโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตให้ค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าตัวอย่างที่ 6.5 ทั้งระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ซึ่งอาจเนื่องมาจากในสภาวะความเป็นกรดสูงจะทำลายโครงสร้างของแป้งดัดแปรดังกล่าวมากขึ้น จึงส่งผลให้น้ำอิสระที่ทำปฏิกิริยากับแป้งในสภาวะกรดมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปผ่านการศึกษาถึงกระเกิดผลึกน้ำแข็งจึงมีปริมาณน้ำแข็งที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับในสภาวะความเป็นกรดต่ำ (ด่างสูง)



รูปที่ 4.19 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซิทิเลตในแบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



รูปที่ 4.20 โมดูลัสสะสมของสารผสมระหว่างแคปπα-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซีทิลเลตในระบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5

4.3.1.2 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซีทิลเลตกับแคปπα-คาราจีแนน ต่อสมบัติความหนืด

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการไหลของตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซีทิลเลต หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับแคปπα-คาราจีแนนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกัน (รูปที่ 4.21 ก-ง) พบว่าตัวอย่างทุกตัวมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning behaviour คือค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนให้กับตัวอย่าง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ ค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ

ของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา-คาราจีแนน (รูปที่ 4.21 ก-ข) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่อัตราเฉือน 100 1/s ของตัวอย่าง A1K2B35, A1K2B50, A1K2B65, A1K2B80 มีค่าเท่ากับ 0.0073, 0.0144, 0.1113 และ 0.1065 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง A2K1B35, A2K1B50, A2K1B65 และ A2K1B80 มีค่าเท่ากับ 0.0111, 0.01956, 0.0226 และ 0.01778 Pa.s ตามลำดับ ค่าความหนืดของตัวอย่างที่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่าง A1K2S35, A1K2S50, A1K2S65, A1K2S80 มีค่าเท่ากับ 0.0157, 0.1949, 0.3507 และ 0.37 Pa.s ตามลำดับ ส่วนในตัวอย่าง A2K1S35, A2K1S50, A2K1S65 และ A2K1S80 มีค่าเท่ากับ 0.0210, 0.0380, 0.1676 และ 0.1266 Pa.s ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความหนืดที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วยค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ โดยค่าความหนืดของตัวอย่างขึ้นกับสัดส่วนของแคปปา-คาราจีแนน ตัวอย่างที่มีแคปปา-คาราจีแนนมากกว่า ค่าความหนืดจะสูงกว่ายกเว้นที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง -3.5 ที่พบว่าตัวอย่างที่มีแคปปา-คาราจีแนนมากกว่าจะมีความหนืดน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เสถียรต่อกรดของแคปปา-คาราจีแนนดังที่กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วนั่นเอง (BeMiller and Whistler, 1996)

สำหรับค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซินเตกับแคปปา-คาราจีแนนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.21 ค-ง) ตัวอย่าง O1K2B35, O1K2B50, O1K2B65, O1K2B80 มีค่าเท่ากับ 0.0068, 0.0133, 0.0963 และ 0.0997 Pa.s ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง O2K1B35, O2K1B50, O2K1B65 และ O2K1B80 มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.0085, 0.0121, 0.0102 และ 0.0120 Pa.s ตามลำดับ ค่าความหนืดของตัวอย่างที่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่าง O1K2S35, O1K2S50, O1K2S65, O1K2S80 มีค่าเท่ากับ 0.0163, 0.2560, 0.2876 และ 0.3113 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง O2K1S35, O2K1S50, O2K1S65 และ O2K1S80 มีค่าเท่ากับ 0.0135, 0.0212, 0.0571 และ 0.0654 Pa.s ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตัวอย่างเดียวกันแต่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกันพบว่าตัวอย่างมีค่าความหนืดสูงตามค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 มีค่าสูงสุดตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าในระบบดังกล่าวสภาวะความเป็นด่างจะช่วยในเรื่องการคงสภาพและความเสถียรของระบบได้ดีกว่าที่สภาพเป็นกรด

4.3.1.3 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเตนิลซัคซินเตหรือแป้งอะซิทิเลตกับไกล์สปีนกับต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

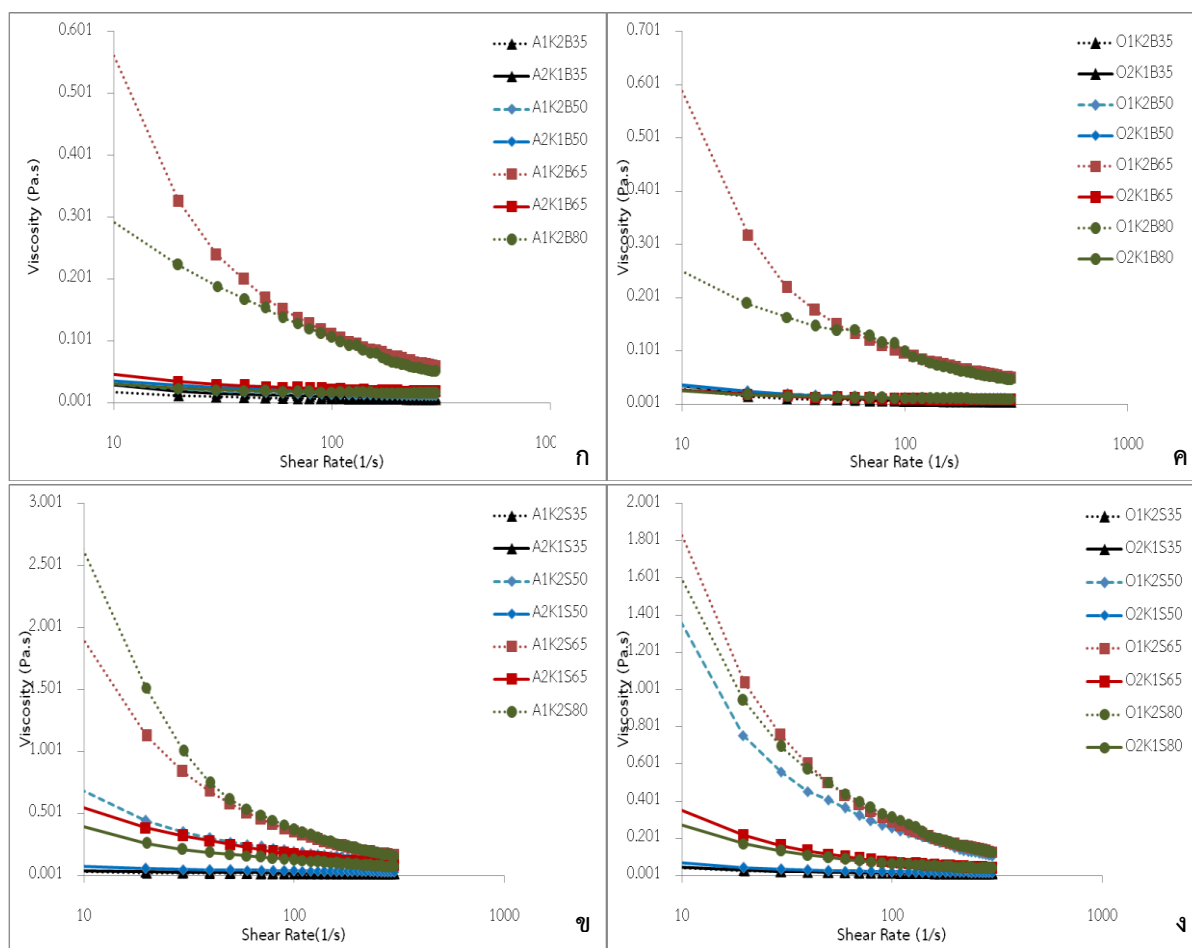
ในระบบที่เป็นบัฟเฟอร์ทั้งที่มีแป้งออกเตนิลและแป้งอะซิทิเลตเป็นส่วนผสมค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อลดอุณหภูมิไปที่ -2 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ -4 องศาเซลเซียสสำหรับระบบที่มีน้ำตาลซูโครส (รูปที่ 4.22 ก-ง) และในระบบ

ที่มีน้ำตาลซูโครสค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส เช่นเดียวกับผลการทดลองที่มีแคลปา-คาราจีแนนเป็นส่วนผสม

เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสสะสมเมื่อให้ความถี่ที่ 2 Hz และ Strain คงที่ที่ร้อยละ 1 (รูปที่ 4.23 ก-ง) ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างแป้งดัดแปรอะซิทิเลตกับโลคัสปินกัม (รูปที่ 4.23 ก-ข) ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส A3N0B65, N0L3B65, A1L2B65, A2L1B65 มีค่าเท่ากับ 75,070, 7,470,000 788,000 และ 291,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S65, N0L3S65, A1L2S65, A2L1S65, ได้แก่ 2,583, 12,500, 20,760 และ 14,465 Pa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ตัวอย่าง A3N0B35, N0L3B35, A1L2B35, A2L1B35 มีค่ามอดุลัสสะสมเท่ากับ 299,000, 599,000, 50,100,000 และ 329,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S35, N0L3S35, A1L2S35, A2L1S35 มีค่ามอดุลัสสะสมเท่ากับ 3,446 95,900 65,870 และ 8,930 Pa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่สัดส่วนของแป้งต่อโลคัสปินกัมเท่ากัน ตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาล และในระบบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกันค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแป้งดัดแปร แสดงว่าในระบบที่มีสภาวะเป็นกรดมากขึ้น โครงสร้างของแป้งอาจถูกทำลาย ทำให้น้ำอิสระที่เคยสร้างพันธะยึดติดกับโมเลกุลของแป้งหรือโลคัสปินกัมหรือถูกห่อหุ้มด้วยโมเลกุลของแป้งหรือโลคัสปินกัมมีโอกาสหรือหลุดรอดออกจากโครงสร้างของแป้งได้ ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระที่จะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งได้มากขึ้นที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ค่ามอดุลัสสะสมจึงเพิ่มมากขึ้นในสภาวะดังกล่าว

เมื่อพิจารณาในตัวอย่างที่มีแป้งโซเดียมออกซาลิเลต (รูปที่ 4.23 ค-ง) ค่ามอดุลัสสะสมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลในตัวอย่าง O3N0B65, N0L3B65, O1L2B65, O2L1B65 มีค่าเท่ากับ 152,500, 7,470,000, 855,000 และ 1,760,000 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S65, N0L3S65, O1L2S65, O2L1S65 มีค่าเท่ากับ 2,031 12,500 7,689 และ 9,826 Pa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส O3N0B35, N0L3B35, O1L2B35, O2L1B35 มีค่ามอดุลัสสะสมเท่ากับ 296,000, 599,000, 111,000 และ 735,000 Pa ตามลำดับ ส่วนในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S35, N0L3S35, O1L2S35, O2L1S35 มีค่ามอดุลัสสะสมเท่ากับ 21,353.67, 95,900, 51,500 และ 25,245 Pa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่สัดส่วนของแป้งดัดแปรต่อโลคัสปินกัมเท่ากันพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ทั้งระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส ซึ่งเหตุผลน่าจะมาจากเหตุผลเดียวกันข้างต้นในระบบของแป้งแปรอะซิทิเลตกับโลคัสปินกัม และเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกันพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของแป้งดัด

แปรส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ ยกเว้นในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของมอดุลัสสะสมในระบบดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งดัดแปร และค่าความเป็นกรด-ด่างด้วย



รูปที่ 4.21 ความหนืดของสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนนกับตัวอย่างแป้งอะซีทิลเลตในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซินเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0

4.3.1.4 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับ โลคัสปีนัมต่อสมบัติความหนืด

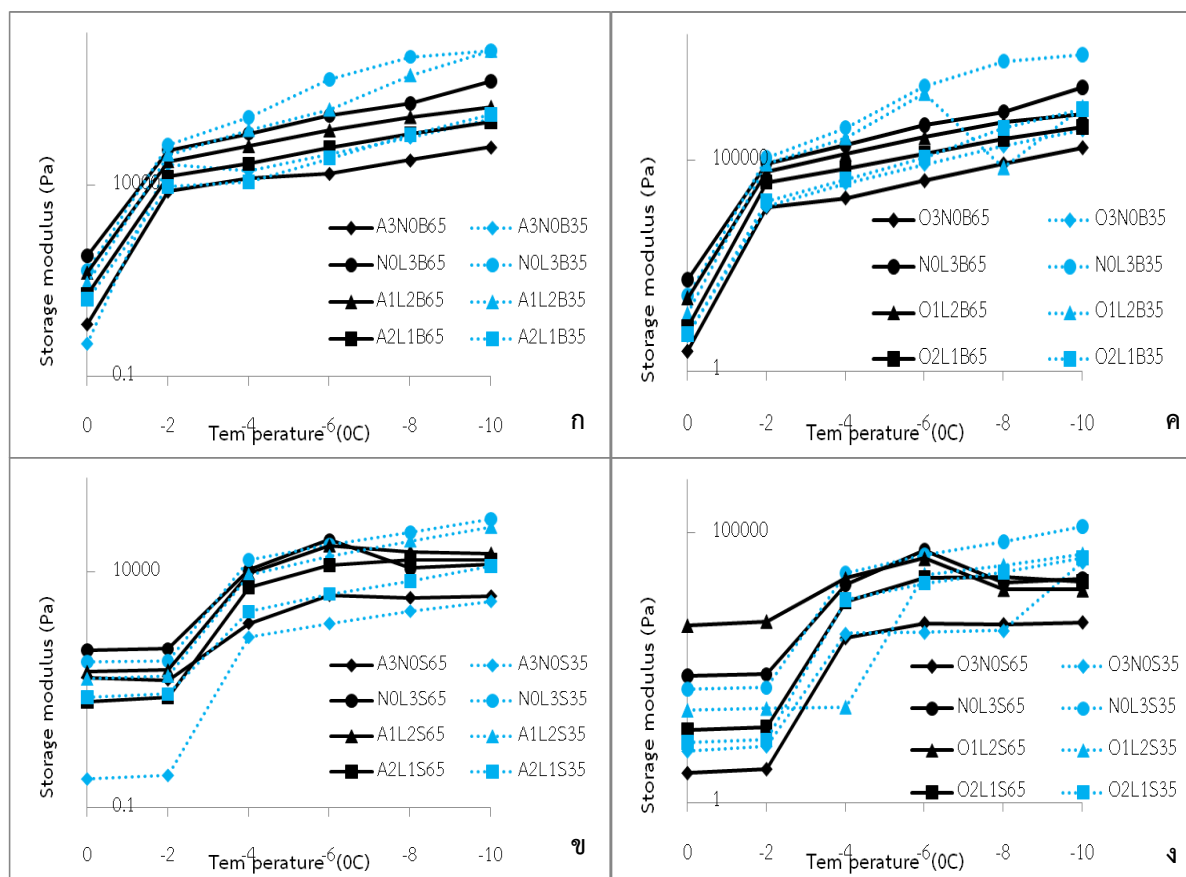
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการไหลของตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซิทิเลต หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับโกล์สปีนัมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน (รูปที่ 4.24 ก-ง) พบว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning behaviour คือค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนให้กับตัวอย่าง ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่ต่างกันโดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ

ค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตกับโกล์สปีนัม (รูปที่ 4.24 ก-ข) ในอัตราส่วนที่ต่างกันที่อัตราเฉือน 100 1/s ของตัวอย่าง A1L2B35, A1L2B50, A1L2B65, A1L2B80 มีค่าเท่ากับ 0.7278, 0.8157, 0.8375 และ 0.8021 Pa.s ตามลำดับ ส่วนในตัวอย่าง A2L1B35, A2L1B50, A2L1B65 และ A2L1B80 มีค่าเท่ากับ 0.2036, 0.2563, 0.3068 และ 0.2468 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งค่าความหนืดที่ได้กลับลดลงแต่เมื่อเพิ่มปริมาณโกล์สปีนัมกลับทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นจึงน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากการโกล์สปีนัมมากกว่าแป้งดัดแปรอะซิทิเลตในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส

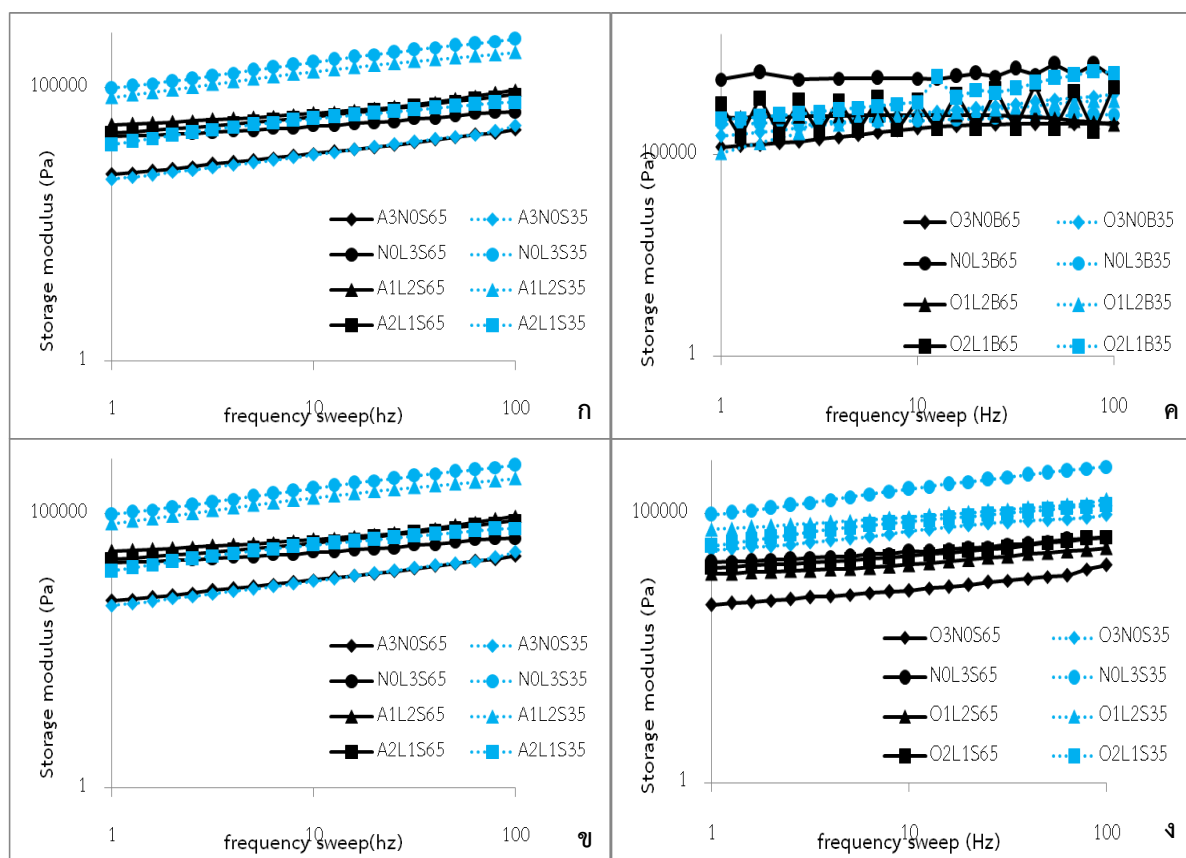
ส่วนค่าความหนืดของตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสในระบบของตัวอย่าง A1L2S35, A1L2S50, A1L2S65, A1L2S80 พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.0226, 1.1240, 1.2253 และ 1.0228 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง A2L1S35, A2L1S50, A2L1S65 และ A2L1S80 มีค่าเท่ากับ 0.3118, 0.3989, 0.3529 และ 0.3192 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลข้างต้นในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส แต่จะพบว่าน้ำตาลซูโครสจะช่วยให้ระบบมีค่าความหนืดมากขึ้นกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส

สำหรับค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับโกล์สปีนัม (รูปที่ 4.24 ค-ง) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ตัวอย่าง O1L2B35, O1L2B50, O1L2B65, O1L2B80 มีค่าเท่ากับ 0.79, 0.9078, 0.8403 และ 0.7692 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง O2L1B35, O2L1B50, O2L1B65 และ O2L1B80 มีค่าเท่ากับ 0.1733, 0.2868, 0.2014 และ 0.2146 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลที่ได้เช่นเดียวกับในส่วนของระบบที่มีแป้งอะซิทิเลตกับโกล์สปีนัม นั้นแสดงให้เห็นว่าแป้งออกเทนิลซัคซิเนตมีผลในการเพิ่มค่าความหนืดให้แก่ระบบดังกล่าวได้น้อยกว่าโกล์สปีนัม ส่วนค่าความหนืดของตัวอย่างที่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่าง O1L2S35, O1L2S50, O1L2S65, O1L2S80 มีค่าเท่ากับ 0.9081, 1.0336, 1.0273 และ 0.9654 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง O2L1S35, O2L1S50, O2L1S65 และ O2L1S80 มีค่าเท่ากับ 0.2980, 0.3323, 0.3388 และ 0.3702 Pa.s ตามลำดับ ผลที่ได้นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลข้างต้นใน

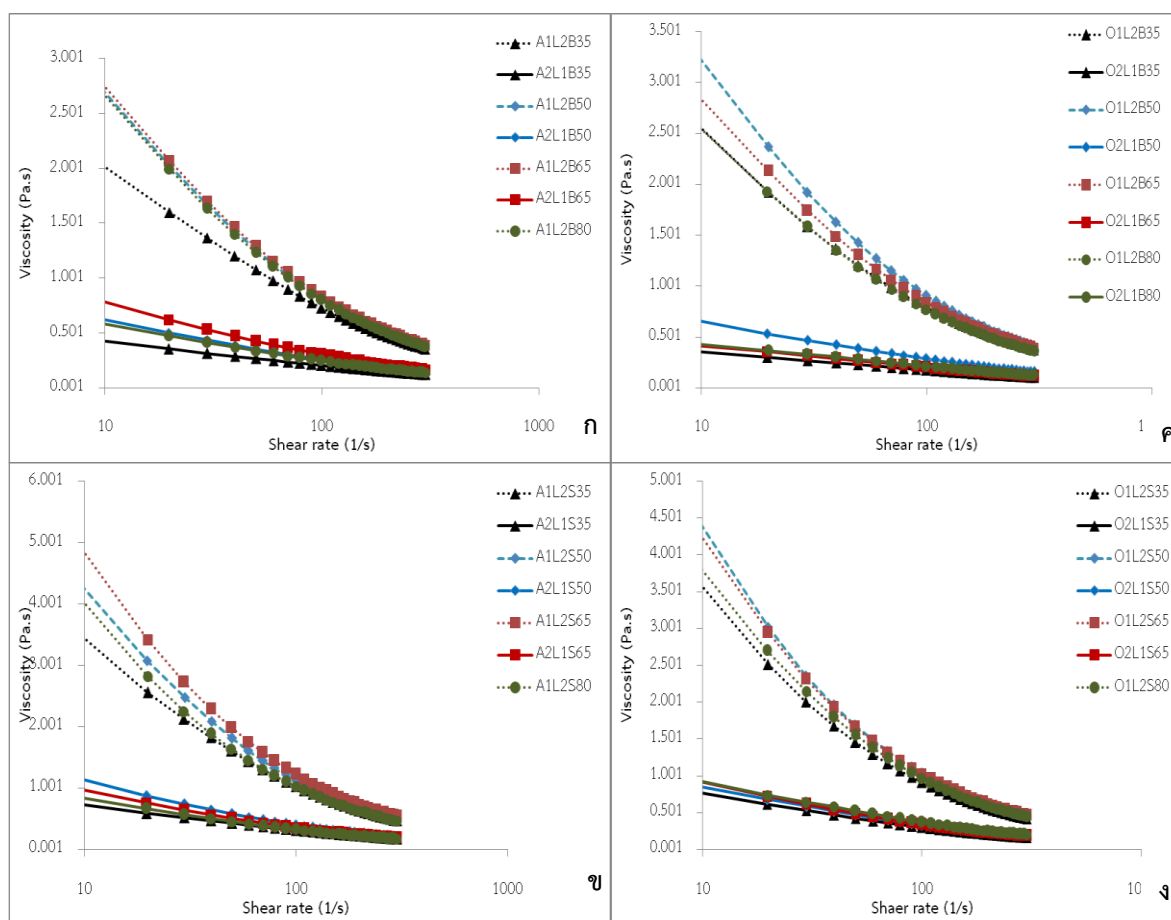
ระบบที่ไม่มีซูโครสแต่ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของโลคัส
 บีนกัมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.22 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างโลคัสบีนกัมกับตัวอย่างแป้งอะซีทิลเลเททในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



รูปที่ 4.23 มอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างโกลด์สปินกัมกับตัวอย่างแป้งอะซิทิเลตในระบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเตนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



รูปที่ 4.24 ความหนืดของสารผสมระหว่างโลคัสป็นกับกับตัวอย่างแป้งอะซิทิเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0

4.3.1.5 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับเพคติน ต่อสมบัติวิสโคอีลาสติก

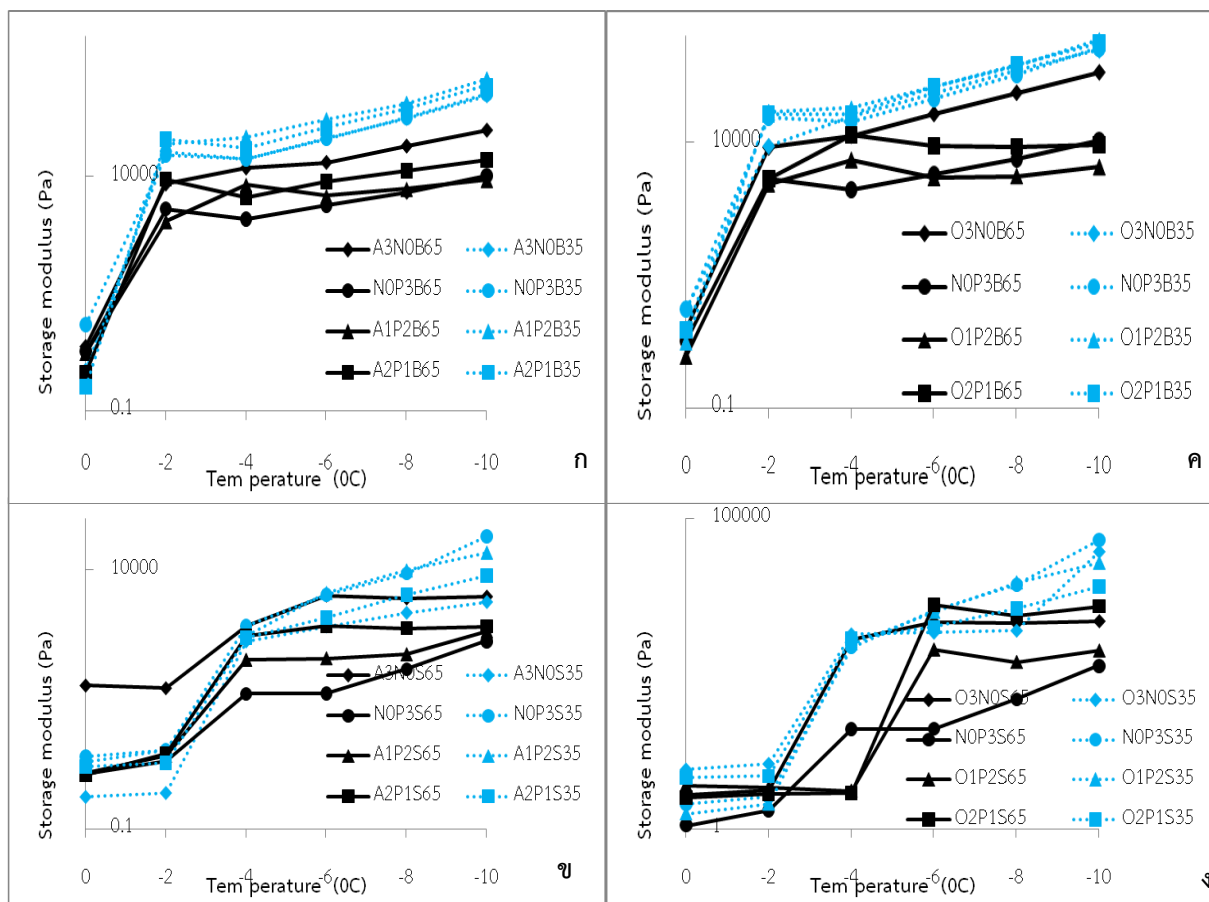
เมื่อลดอุณหภูมิของตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับเพคตินจาก 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าในระบบที่เป็นบัฟเฟอร์ทั้งที่มีแป้งออกเทนิลและแป้งอะซิทิเลตเป็นส่วนผสมค่ามอดุลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อลดอุณหภูมิไปที่ -2 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ -4 องศาเซลเซียสสำหรับระบบที่มีน้ำตาลซูโครส แสดงว่าซูโครสช่วยในการชะลอการเกิดผลึกน้ำแข็งได้ ยกเว้นตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนต กับเพคตินที่ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ -6 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.25 ก-ง) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบที่มีความซับซ้อนและมีส่วนประกอบมากขึ้นจะมีผลโดยตรงน้ำอิสระภายในระบบที่จะเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งทำให้อุณหภูมิของการทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งลดลง

เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสสะสมเมื่อให้ความถี่ที่ 2 Hz และ Strain คงที่ที่ร้อยละ 1 พบว่า ค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส A3N0B65, NOP3B65, A1P2B65, A2P1B65 มีค่าเท่ากับ 75,070, 7,356.5, 6,723 และ 16,570 Pa ตามลำดับ ส่วนในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S65, NOP3S65, A1P2S65, A2P1S65 มีค่าเท่ากับ 2,583, 286.15, 633.4 และ 639 Pa ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าเพคตินและแป้งดัดแปรช่วยในเรื่องของการลดปริมาณน้ำอิสระที่จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งได้ในระดับหนึ่งแต่ซูโครสจะมีผลต่อการชะลอการเกิดผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่า

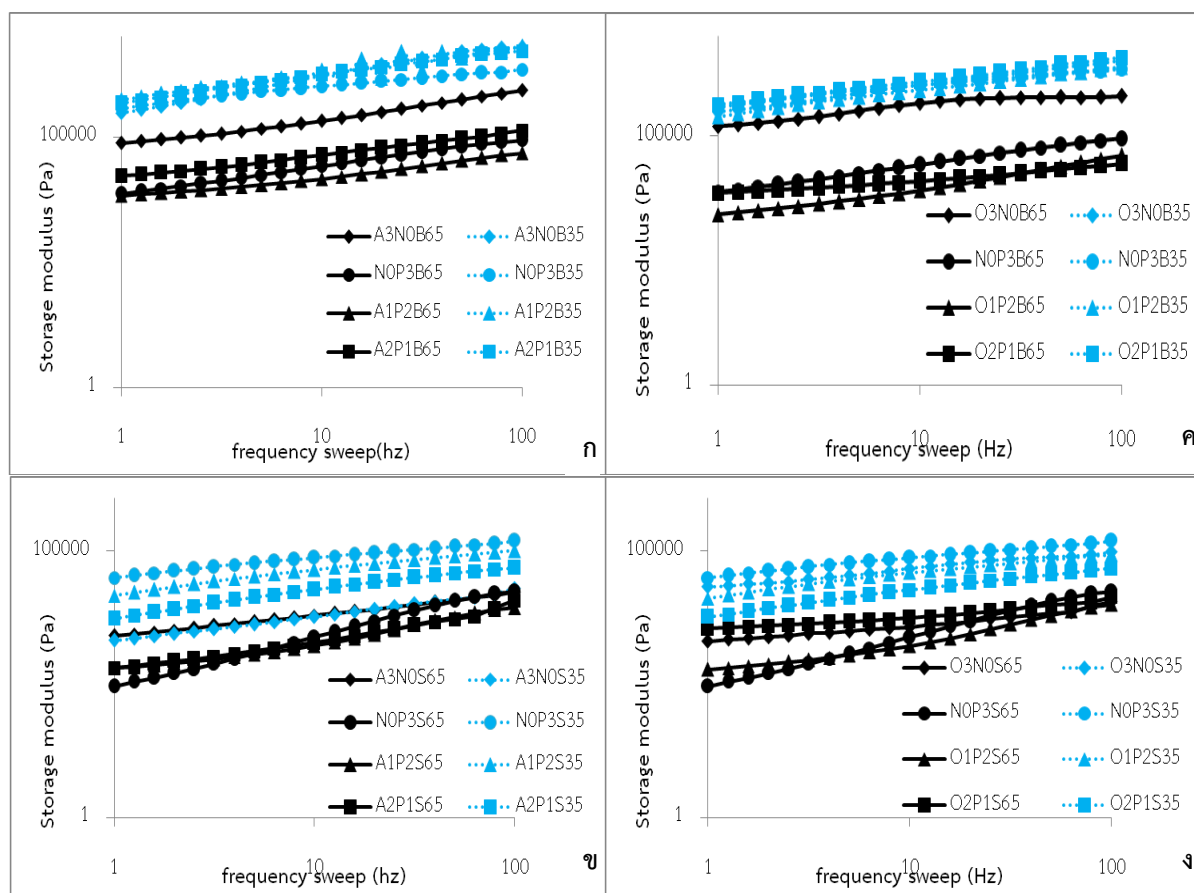
เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส A3N0B35, NOP3B35, A1P2B35, A2P1B35 มีค่าเท่ากับ 299,000, 360,000, 558,000 และ 474,000 Pa ตามลำดับ ส่วนระบบที่มีน้ำตาลซูโครส A3N0S35, NOP3S35, A1P2S35, A2P1S35 จะมีค่าเท่ากับ 3,446 31,385 14,590 และ 5,333 Pa ตามลำดับ (รูปที่ 4.26 ก-ข) ซึ่งผลที่ได้น่าจะเกิดจากผลของซูโครสเป็นปัจจัยหลักมากกว่าผลของแป้งดัดแปรและเพคติน

เมื่อพิจารณาในตัวอย่างที่มีแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซินเนต ค่ามอดุลัสสะสมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลตัวอย่าง O3N0B65, NOP3B65, O1P2B65, O2P1B65 ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเท่ากับ 152,500, 7,356.5, 2,612.5 และ 7,106.5 Pa ตามลำดับ และในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S65, NOP3S65, O1P2S65, O2P1S65 ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเท่ากับ 2,030.93, 286.15, 594.6 และ 3,532.5 Pa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ตัวอย่างในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส O3N0B35, NOP3B35, O1P2B35, O2P1B35 ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเท่ากับ 296,000, 360,000, 239,000, และ 417,000 Pa ตามลำดับ ส่วนในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส O3N0S35, NOP3S35, O1P2S35, O2P1S35 ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเท่ากับ 21,353.67, 31,385, 12,995 และ 5,844 Pa ตามลำดับ (รูปที่ 4.26 ค-ง) แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง

ลดลงส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งในระบบได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่เคยทำปฏิกิริยาได้กับสารผสมเหล่านั้นเพิ่มมากขึ้นจากการที่สารเหล่านั้นถูกไฮโดรไลซ์ทำให้โครงสร้างอ่อนแอลงในสภาวะกรด



รูปที่ 4.25 ค่ามอดุลัสสะสมของสารผสมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวอย่างแบ่งอะซิทีลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแบ่งโซเดียมออกซิเจนคลอไรด์ที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ 2 Hz ที่อุณหภูมิ 0 ถึง -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 หรือ 6.5



รูปที่ 4.26 โมดูลัสสะสมของสารผสมระหว่างเพคตินกับตัวอย่างแป้งอะซีทิลเลตในแบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มี strain ร้อยละ 1 และความถี่ของการสั่น 0.1-100 Hz อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง 3.5 หรือ 6.5

4.3.1.6 ผลของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งดัดแปรอะซีทิลเลตกับเพคตินต่อสมบัติความหนืด

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการไหลของตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซีทิลเลต หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับเพคตินที่มีค่าความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน (รูปที่ 4.27 ก-ง) พบว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning behavior คือค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนให้กับตัวอย่าง ค่าความเป็นกรดต่างที่ต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลที่ต่างกันโดยกลุ่มตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสค่าความหนืดจะสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ ค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่างผสมระหว่าง

แป้งอะซิทีเลตกับเพคติน (รูปที่ 4.27 ก-ข) ในอัตราส่วนที่ต่างกันที่อัตราเฉือน 100 1/s ของตัวอย่าง A1P2B35, A1P2B50, A1P2B65, A1P2B80 มีค่าเท่ากับ 0.0225, 0.0202, 0.0071 และ 0.0056 Pa.s ตามลำดับ A2P1B35, A2P1B50, A2P1B65 และ A2P1B80 มีค่าเท่ากับ 0.0179, 0.0208, 0.0098 และ 0.0085 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งในระบบที่มีปริมาณแป้งดัดแปรและเพคตินที่แตกต่างกันนี้ให้ค่าความหนืดที่ไม่แตกต่างกันเท่าไร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในระบบสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซิทีเลตกับเพคตินเมื่อไม่มีน้ำตาลซูโครสจะให้ค่าความหนืดไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารผสมทั้งสอง ส่วนค่าความหนืดของตัวอย่างดังกล่าวในระบบที่มีน้ำตาลพบว่าค่าความหนืดของตัวอย่าง A1P2S35, A1P2S50, A1P2S65, A1P2S80 มีค่า 0.0488, 0.0403, 0.0140 และ 0.0104 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง A2P1S35, A2P1S50, A2P1S65, และ A2P1S80 มีค่าเท่ากับ 0.0361, 0.0407, 0.0179 และ 0.0182 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับระบบสารผสมของแป้งดัดแปรอะซิทีเลตกับเพคตินเมื่อไม่มีน้ำตาลซูโครส แต่จะเห็นได้ชัดว่าน้ำตาลซูโครสจะมีผลต่อค่าความหนืดในตัวอย่างสารผสมระหว่างระหว่างแป้งดัดแปรอะซิทีเลตกับเพคตินอย่างมีนัยสำคัญ

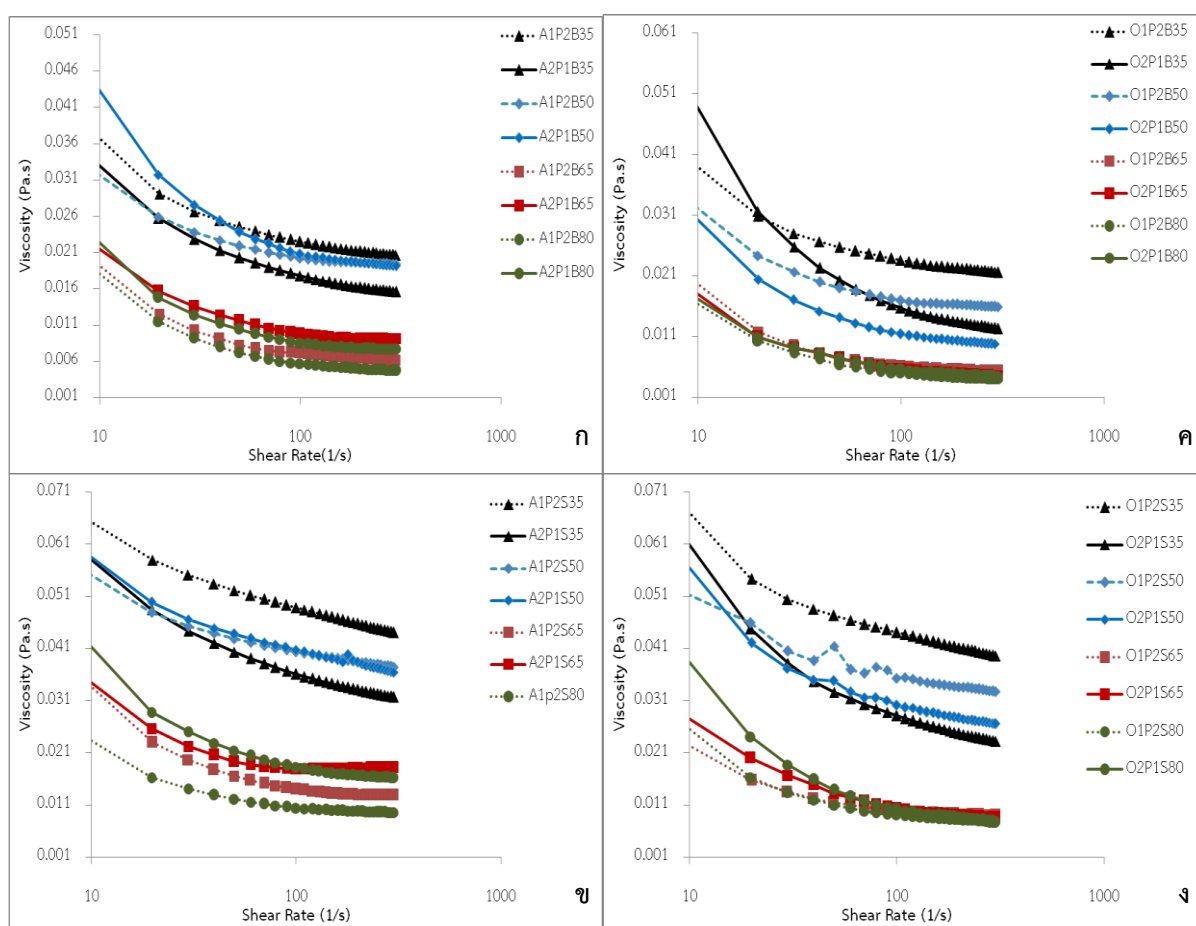
สำหรับค่าความหนืดของตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตกับเพคติน (รูปที่ 4.27 ค-ง) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าตัวอย่าง O1P2B35, O1P2B50, O1P2B65 และ O1P2B80 มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.0235, 0.0169, 0.0060 และ 0.0049 Pa.s ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง O2P1B35, O2P1B50, O2P1B65 และ O2P1B80 มีค่าเท่ากับ 0.0157, 0.0114, 0.0056 และ 0.0056 Pa.s ตามลำดับ ค่าความหนืดของตัวอย่างที่มีน้ำตาลในระบบของตัวอย่าง O1P2S35, O1P2S50, O1P2S65, O1P2S80 มีค่าเท่ากับ 0.0441, 0.0353, 0.0098 และ 0.0090 Pa.s ตามลำดับ O2P1S35, O2P1S50, O2P1S65 และ O2P1S80 มีค่าเท่ากับ 0.0281 0.0301 0.0103 และ 0.0101 Pa.s ตามลำดับ ซึ่งผลสรุปในภาพรวมของตัวอย่างผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตกับเพคตินคล้ายกันกับผลสรุปของแป้งดัดแปรอะซิทีเลตกับเพคตินดังกล่าวข้างต้น

4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราการละลาย

ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราการละลายของตัวอย่างเดี่ยวและตัวอย่างสารผสมของแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนต หรือ แป้งดัดแปรอะซิทีเลต กับ แคปไซซิน-คาร์ราจีแนน โลคัส ปีนัม และ เพคติน ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยนำตัวอย่างสารผสมที่ผ่านการให้ความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องตัวอย่างประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในถ้วยพลาสติกขนาด 4 ออนซ์ แล้วนำไปแช่ที่ - 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน

นำมาวัดอัตราการละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ละลายทุกๆ 10 นาที แล้วคำนวณร้อยละของอัตราการละลายต่อนาที ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.28 – 4.29

ในตัวอย่างที่เป็นสารเดี่ยวของแป้งอะซีทิลเลเตท หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่ออัตราการละลาย โดยตัวอย่างในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีขนาดใหญ่และจำนวนมากกว่าในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส



รูปที่ 4.27 ความหนืดของสารผสมระหว่างเพคตินกับตัวอย่างแป้งอะซีทิลเลเตทในระบบที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ก) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ข) หรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส (ค) หรือเติมน้ำตาลซูโครส (ง) ที่มีอัตราเฉือน 1-300 1/s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0

ตัวอย่างที่เป็นสารละลายของแคปปา - คาราจีแนน พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 และ 5.0 อัตราการละลายของตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และ 8.0 พบว่าอัตราการละลายของตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส อย่างไรก็ตามที่แคปปา - คาราจีแนนซึ่งเป็นสารที่เกิดเจลได้ ซึ่งโมเลกุลของน้ำหรือผลึกน้ำแข็งจะถูกกักไว้ในโครงสร้างของเจล ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่าง จึงไม่มีความสัมพันธ์ต่ออัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งอย่างชัดเจนนัก ในขณะที่ตัวอย่างที่เป็นสารละลายของโลคัส บินกัมพบว่า อัตราการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีอัตราการละลายที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสยกเว้นตัวอย่างที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ที่พบว่าตัวอย่างที่มีซูโครสมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีซูโครส ส่วนตัวอย่างสารละลายของเพคตินพบว่าอัตราการละลายเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส เช่นเดียวกับตัวอย่างที่เป็นสารละลายเพียงชนิดเดียวของแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด ซึ่งผลดังกล่าว (รูปที่ 4.28) อาจให้ข้อสรุปในภาพรวมของผลความเป็นกรด-ด่างในระบบที่เป็นสารละลายของแป้งดัดแปรกับคาราจีแนนว่ามีความสามารถในการชะลอการละลายของผลึกน้ำแข็งได้ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงไป ยกเว้นมระบบที่มีเพียงคาราจีแนนเพียงอย่างเดียวที่พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างกับผลของน้ำตาลซูโครสช่วยชะลอการละลายของผลึกน้ำแข็งได้เป็นอย่างดี

4.3.2.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเตทิลซัลเฟตหรือแป้ง อะซิทิเลเตด กับ แคปปา-คาราจีแนนต่ออัตราการละลาย

ผลของความเป็นกรด-ด่างในตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับแคปปา- คาราจีแนนแสดงในรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาผลของส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซิทิเลเตดกับแคปปา-คาราจีแนน ต่ออัตราการละลายพบว่าในตัวอย่างที่มีแคปปา-คาราจีแนน ร้อยละ 1 และ แป้งอะซิทิเลเตดร้อยละ 0.5 ตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาล โดยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งน้อยที่สุด ตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ในขณะที่ตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และ 8 มีอัตราการละลายที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ในขณะที่ตัวอย่างที่มีแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.5 และแป้งอะซิทิเลเตดร้อยละ 1 ในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีอัตราการละลายที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งที่ต่ำที่สุด ตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 6.5 และ 8 ตามลำดับ สำหรับอัตราการละลายในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสตัวอย่างที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีอัตราการละลายสูงสุด ตามด้วย

ตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 6.5 และ 5.0 ตามลำดับ แสดงว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่ออัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งในการทดลองนี้

ในกรณีของตัวอย่างที่มีแ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตร้อยละ 0.5 ผสมกับแคปทา-คาราจีแนนร้อยละ 1 พบว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาลในระบบมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลในระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระบบที่มีน้ำตาลผลึกน้ำแข็งจะถูกชะลอการเกิดการละลายได้มากกว่าจากผลของปฏิสัมพันธ์ของ แ่งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปทา-คาราจีแนนที่ช่วยการเคลื่อนตัวของน้ำอิสระในระบบและช่วยป้องกันความร้อนเพื่อใช้ในการหลอมละลายจากสภาวะแวดล้อมภายนอกของระบบได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกันพบว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสอัตราการละลายมีแนวโน้มสูงตามค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่วนในระบบที่มีน้ำตาลพบว่าตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 มีอัตราการละลายที่ต่ำที่สุดตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 8.0 และ 6.5 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ อาจไม่มีความชัดเจนในเรื่องของผลความเป็นกรด-ด่างของระบบต่ออัตราการละลายมากนัก เมื่อพิจารณาสัดส่วนของแ่งดัดแปรต่อแคปทา-คาราจีแนนพบว่าอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งขึ้นกับปริมาณของแ่งดัดแปร ตัวอย่างที่มีแ่งดัดแปรมากกว่ามีแนวโน้มว่าจะมีอัตราการละลายมากกว่าในทุกๆ ค่าความเป็นกรด-ด่าง นั้นแสดงให้เห็นว่าแ่งดัดแปรในกรณีนี้ไม่ได้ช่วยชะลอหรือลดการละลายของผลึกน้ำแข็งเลย

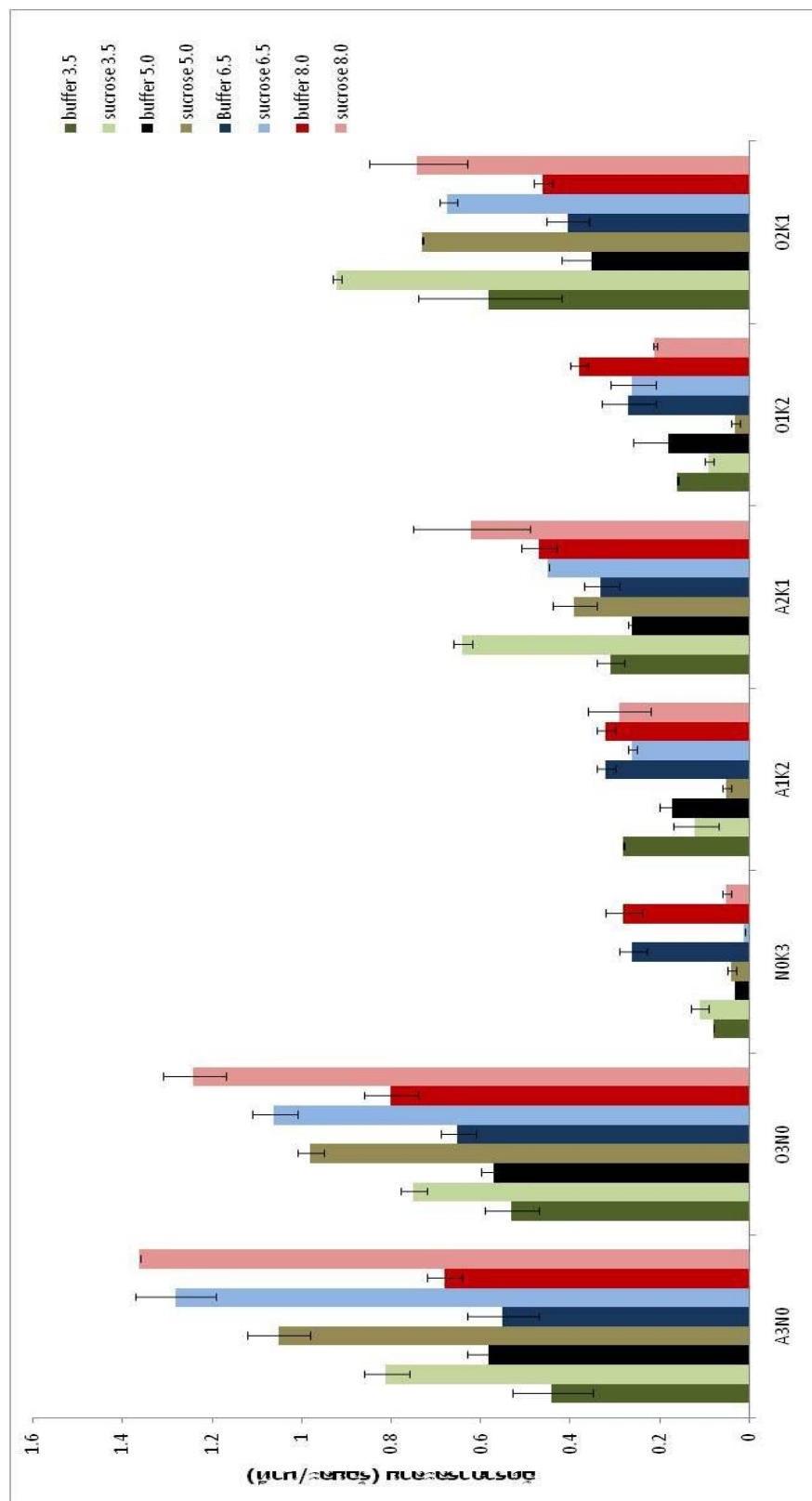
4.3.2.2 ผลของสารผสมแ่งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแ่งอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัมต่ออัตราการละลาย

ผลของความเป็นกรด-ด่างในตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแ่งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับโลคัสปีนัมแสดงในรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณาผลของส่วนผสมระหว่างแ่งดัดแปรอะซิทิเลเตทกับโลคัสปีนัม พบว่าทั้งตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแ่งร้อยละ 0.5 และร้อยละ 1 ในระบบที่มีน้ำตาลมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่เหมือนกับการศึกษาในข้อ 4.6.3 ยกเว้นตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ที่พบว่าในระบบที่มีน้ำตาลมีอัตราการละลายที่สูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่สภาวะต่างๆ เช่นนี้ ทำให้โครงสร้างของระบบแ่งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับโลคัสปีนัมมีการสลายตัว การพองโครงสร้างผลึกน้ำแข็งจึงลดลงทำให้อัตราการละลายเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระบบของตัวอย่างที่มีเพียงแ่งดัดแปรและมีส่วนผสมของน้ำตาลซูโครสจะให้อัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งมากกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ซึ่งน่าจะมาจากในระบบที่ไม่มีซูโครสจะมีผลึกน้ำแข็งที่มากกว่า ทำให้การละลายเกิดขึ้นได้น้อยหรือช้ากว่าในอีกระบบ

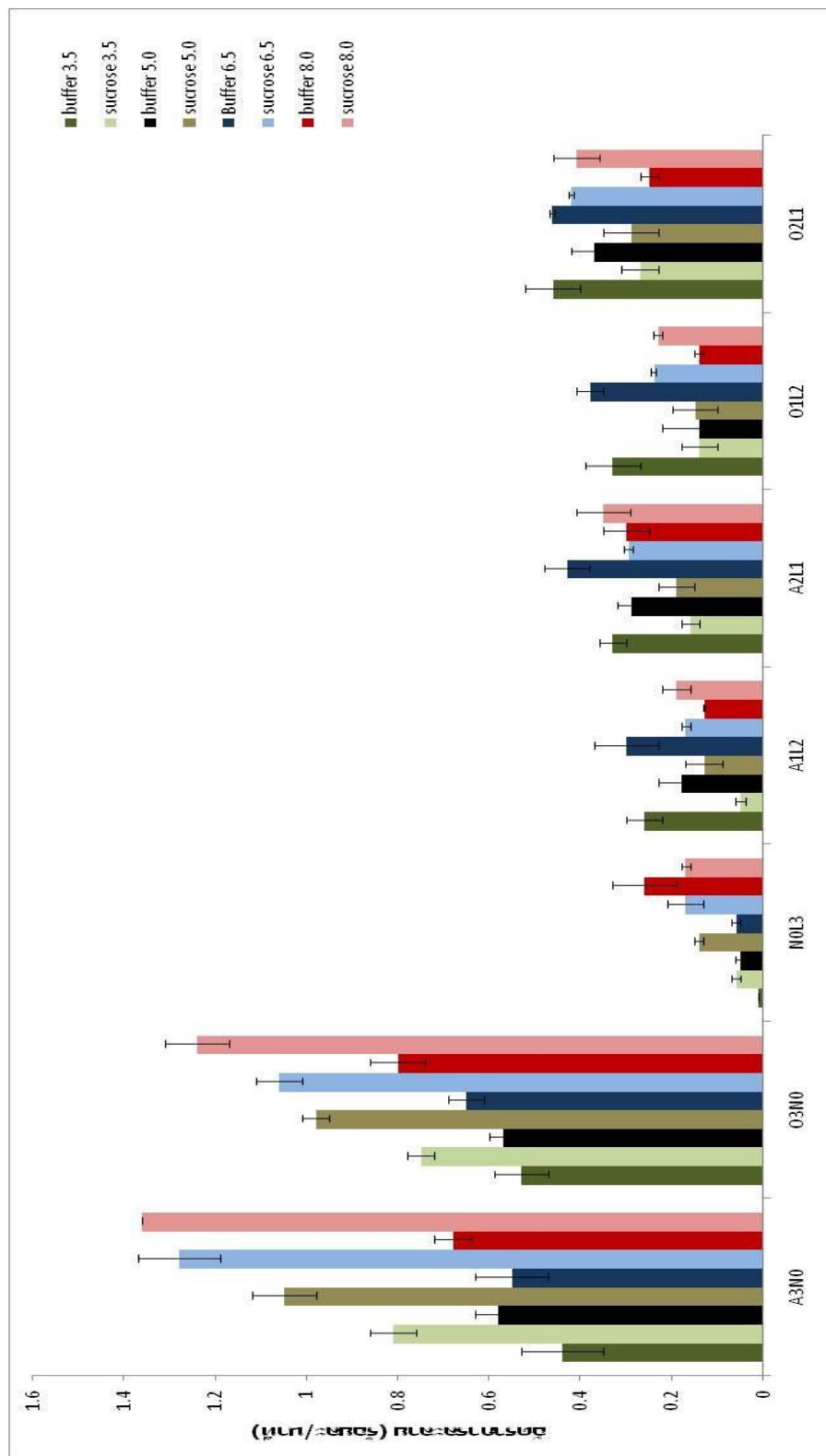
ส่วนในตัวอย่างที่มีเฉพาะโลคัสปีนัมชนิดเดียวก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างงปังข้างต้น ยกเว้นในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 จะพบว่าในตัวอย่างที่มีและไม่มีซูโครสไม่มีความแตกต่างในเรื่องของอัตราการละลายอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาผลรวมของปฏิสัมพันธ์

ระหว่างแป้งตัดแปรและโลคส์ป็นกัมกลับพบว่าตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสจะสามารถชะลอการละลายหรือให้ค่าอัตราการละลายที่ต่ำกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสและแป้งตัดแปรและโลคส์ป็นกัม น้ำตาลซูโครสและแป้งอาจแย่งน้ำอิสระเพื่อใช้ในการละลายของโลคส์ป็นกัมทำให้โครงสร้างโลคส์ป็นกัมสามารถสร้างโครงสร้างคล้ายเจลห่อหุ้มผลึกน้ำแข็งและชะลอการเคลื่อนตัวของน้ำในระหว่างสภาวะการละลายของระบบได้ ทำให้อัตราการละลายในระบบดังกล่าวมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามในสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.0 กลับให้ผลตรงกันข้าม ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างดังกล่าวมีฤทธิ์เป็นด่างสูง อาจทำลายโครงร่างของโครงสร้างที่คล้ายเจลของโลคส์ป็นกัมทำให้ความร้อนในสภาวะแวดล้อมสามารถเข้าไปมีผลต่อการละลายของผลึกน้ำแข็งในระบบดังกล่าวได้มากกว่าในระบบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอื่นๆ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของแป้งตัดแปรต่อโลคส์ป็นกัม พบว่าอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งขึ้นกับปริมาณของแป้งตัดแปร ตัวอย่างที่มีแป้งตัดแปรมากกว่ามีแนวโน้มว่าจะมีอัตราการละลายมากกว่าในทุกๆ ค่าความเป็นกรด-ด่าง แสดงว่าแป้งตัดแปรไม่มีผลต่อการช่วยรักษาผลึกน้ำแข็งหรือชะลอการละลายของผลึกน้ำแข็งแต่อย่างใด



รูปที่ 4.28 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนกับแป้งอะซีทิลเลตหรือแป้งซีเดียออกเคทนิลซ์ซินในระบอบที่เดิมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสที่มีความเป็นกรดต่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0



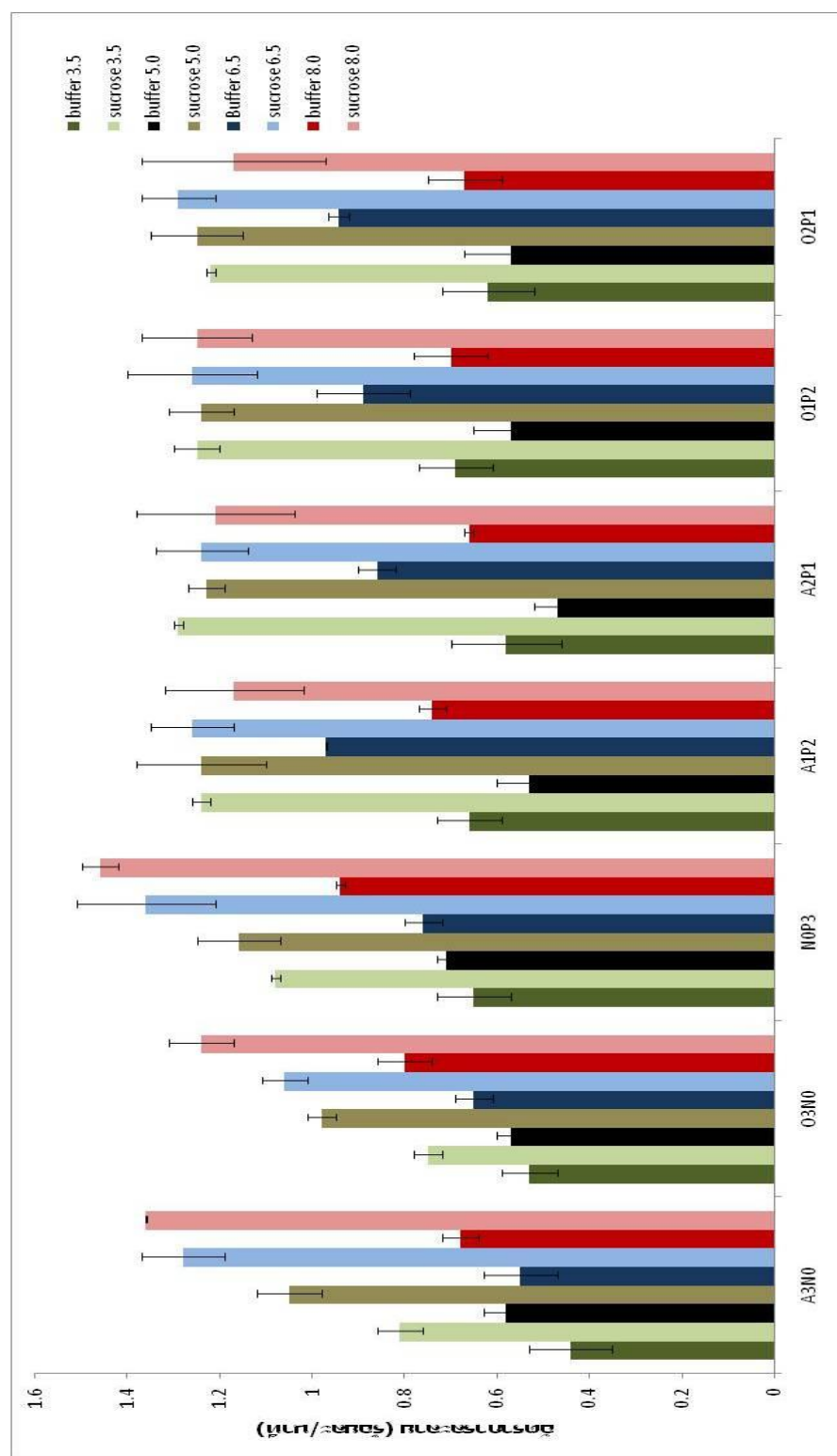
รูปที่ 4.29 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างไลค์สปีนกับแป้งอะซิทิเลตหรือแป้งโซเดียมออกเพนิลซัคซิไนด์ในระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาล ซูโครสที่มีความเข้มข้นต่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0

4.3.2.3 ผลค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนต หรือแป้งอะซิทิเลตกับเพคตินต่ออัตราการละลาย

ผลของความเป็นกรด-ด่างในตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับเพคตินแสดงในรูปที่ 4.30 จากผลการทดลองพบว่าในตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบ ไม่ว่าจะเป็นสารละลายแป้งดัดแปรเดี่ยวๆ เพคตินเพียงชนิดเดียว และสารละลายผสม อัตราการละลายในตัวอย่างดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสเป็นส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลมีผลเป็นอย่างมากต่ออัตราการละลายในระบบการศึกษาในตัวอย่างนี้ อย่างไรก็ตามผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าต่ำๆ (ค่าความเป็นกรดสูง) ในตัวอย่างที่มีเฉพาะเพคตินแสดงให้เห็นว่าอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าในตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูงเพคตินจะสามารถสร้างโครงสร้างที่คล้ายเจลได้ดีกว่าที่สภาวะความเป็นกรดต่ำ ทำให้โครงสร้างเจلدังกล่าวชะลอการเคลื่อนตัวของน้ำในผลิตภัณฑ์น้ำแข็งจึงลดอัตราการละลายได้ (Regand and Goff, 2003)

เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนในการผสมแป้งดัดแปรและเพคตินในอัตราส่วนที่ต่างกันพบว่า ส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปรอะซิทิเลตกับเพคตินในระบบที่มีน้ำตาลมีอัตราการละลายที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาล และเมื่อพิจารณาในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสของตัวอย่างที่มีแป้งอะซิทิเลตร้อยละ 0.5 กับเพคตินร้อยละ 1.0 ตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 มีอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งน้อยที่สุด ตามด้วยตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 8.0 และ 6.5 ตามลำดับ ส่วน ในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่ออัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง โดยทิศทางของอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งให้ผลเช่นเดียวกันกับในระบบที่มีสัดส่วนของแป้งอะซิทิเลตร้อยละ 1 กับเพคตินร้อยละ 0.5

ส่วนผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตกับเพคตินพบว่าทั้งตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแป้งร้อยละ 0.5 และร้อยละ 1 ในระบบที่มีน้ำตาลมีอัตราการละลายที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลเช่นกัน โดยอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งให้ผลเช่นเดียวกับตัวอย่างที่มีแป้งอะซิทิเลตทุกประการ เมื่อเปรียบเทียบชนิดและสัดส่วนของแป้งและเพคตินต่ออัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งพบว่าในระบบที่มีน้ำตาลค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากันมีอัตราการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.30 อัตราการละลายของสารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งอะซิทิเลตหรือแป้งโซเดียมออกซิเจนในระบอบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครสที่มีความเป็นกรดต่าง 3.5, 5.0, 6.5 หรือ 8.0

4.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการแยกเฟส

การศึกษาการแยกเฟสของแป้งดัดแปรหรือสารประกอบไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นสารละลายที่มีส่วนประกอบเพียงชนิดเดียวและเป็นสารผสมด้วยการนำตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีแล้วทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิลิตรใส่ลงในหลอดพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตรแล้วตั้งทิ้งไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อสังเกตการแยกชั้นของตัวอย่าง ทั้งนี้ตัวอย่างที่มีแป้งจะหยดสารละลายไอโอดีนร้อยละ 1 จำนวน 3 หยด เพื่อให้เกิดการย้อมติดสีน้ำเงินของ อะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินของแป้ง แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากไอโอดีนสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ซัลเฟตได้ ดังนั้นในตัวอย่างที่เป็นแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตซึ่งมีหมู่ซัลเฟตในโครงสร้าง หลังจากหยดสารละลายไอโอดีนได้สักพัก สีน้ำเงินจะจางหายไปเนื่องจากไอโอดีนจะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตส่งผลให้ไม่สามารถสังเกตสีน้ำเงินที่ระบุส่วนของแป้งได้

ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการแยกเฟสของแป้งดัดแปร หรือไฮโดรคอลลอยด์ในสารละลายที่มีส่วนประกอบเพียงชนิดเดียว แสดงในรูปที่ 4.31 โดยตัวอย่างที่เป็นแป้งดัดแปรอะซิไเลเตท พบว่า ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 จะพบส่วนของซีรัมที่อยู่ส่วนบนของหลอดตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสประมาณ 10 มิลลิลิตรส่วนในระบบที่มีน้ำตาลพบส่วนซีรัมประมาณ 2-3 มิลลิลิตร นั้นหมายความว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 นี้ตัวอย่างที่มีและไม่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมจะมีพบว่ามี การแยกเฟสเกิดขึ้นในตัวอย่าง ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 พบปริมาตรของชั้นซีรัมในตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาล 5 มิลลิลิตรโดยไม่พบการแยกชั้นในตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครส ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีชั้นซีรัมในตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลประมาณ 2 มิลลิลิตรโดยไม่พบการแยกชั้นในตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครส แสดงว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้น การเกิดการแยกเฟสจะลดลง ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้น สมดุลประจุบวกและลบ ตลอดจนสมดุลของแรงผลักรวมและแรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลในสารละลายเปลี่ยนแปลงไป แรงดึงดูดจะมีอิทธิพลน้อยกว่าแรงผลักรวมทำให้การจับกลุ่มกันเป็นส่วนๆ ของสารชนิดเดียวกันลดลง (Syrbe et al., 1998) ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 พบการตกตะกอนของแป้งอะซิไเลเตทอย่างเห็นได้ชัดเจนนี้อาจเนื่องมาจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 8.0 มีค่าความเป็นด่างสูงทำให้การคลายตัวและการสร้างพันธะกับน้ำของโครงสร้างกิ่งก้านของแป้งอะซิไเลเตทลดลง จึงเกิดการยึดจับของกิ่งก้านสาขาของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในโครงสร้างของแป้งเองได้ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.0 นี้เป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการผลิตแป้งดังกล่าวในกระบวนการอะซิไเลเตท โดยในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีการตกตะกอนได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส (ตรงบริเวณที่เป็นสีน้ำเงิน) โดยชั้นซีรัมอยู่ด้านบนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตร (ในระบบที่ไม่มีน้ำตาล) และ 17 มิลลิลิตร (ในระบบที่มีน้ำตาล)

ส่วนตัวอย่างที่เป็นแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลพบการแยกชั้นของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตโดยมีปริมาตรของซีรัมประมาณ 7 มิลลิลิตร และ 5 มิลลิลิตร ในระบบที่มีน้ำตาลที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 พบการตกตะกอนของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่ก้นหลอดทดลองโดยส่วนซีรัมอยู่ด้านบนที่มีปริมาตรประมาณ 10 มิลลิลิตร ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารละลายของเพคติน โลคัสปีนัมและ แคปปา- คาราจีแนนเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งอย่างเดียวนั้นไม่พบการแยกชั้นของไฮโดรคอลลอยด์ทุกค่าความเป็นกรด-ด่าง ทั้งในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส นอกจากนี้ยังพบว่า สารละลายของแคปปา-คาราจีแนนเพียงอย่างเดียวที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ไม่เกิดเจลทั้งที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสและที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครสก็ไม่เกิดเจลเช่นกัน

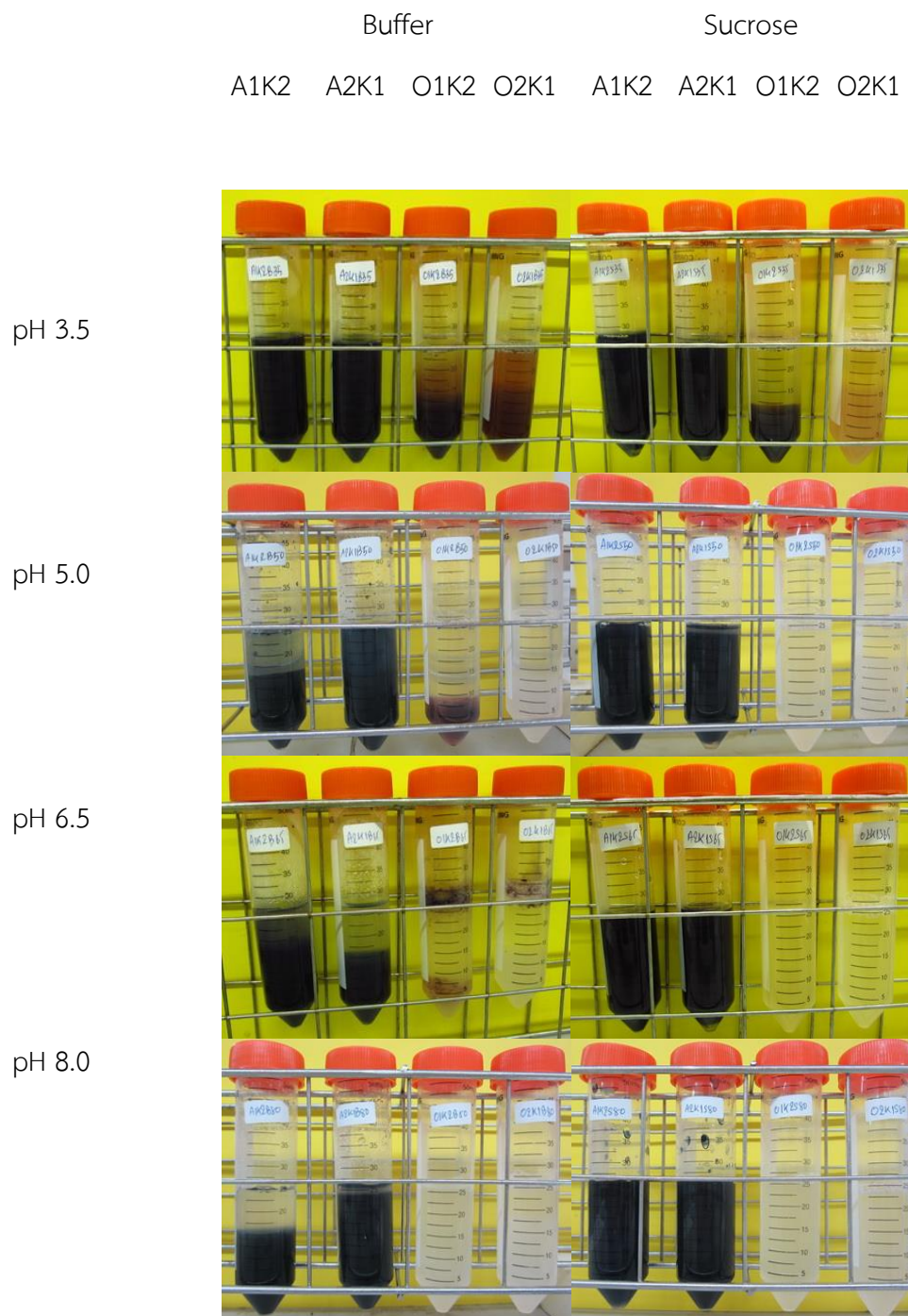
4.3.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา-คาราจีแนนต่อการแยกเฟส

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันมีผลต่อการแยกชั้นของสารผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา-คาราจีแนนดังแสดงในรูป 4.32 ตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแป้งอะซิทิเลตต่อแคปปา-คาราจีแนน 1:2 ในสภาวะที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครสที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 ไม่พบการแยกชั้นของแป้งกับแคปปา- คาราจีแนน ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 6.5 และ 8.0 พบการแยกชั้นระหว่างแป้งดัดแปรกับแคปปา-คาราจีแนนในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส แต่ไม่พบการแยกชั้นในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำทำให้สารไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองไม่เกิดการรวมตัวกัน ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะทำให้โครงสร้างของสารไฮโดรคอลลอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสายสั้นๆ ซึ่งมีผลต่อการรวมตัวกันได้มากกว่าในกรณีของสายยาว

อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีสัดส่วนของ แป้งอะซิทิเลตต่อแคปปา-คาราจีแนน 2:1 ในระบบที่ไม่มีน้ำตาลไม่พบการแยกชั้นที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 และพบการแยกชั้นเพียงเล็กน้อยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 และพบการแยกชั้นที่ชัดเจนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 และ 6.5 ส่วนในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสพบการแยกชั้นเพียงเล็กน้อยในตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 โดยไม่พบการแยกชั้นของตัวอย่างที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง อื่นๆ ส่วนตัวอย่างที่มีแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตผสมกับแคปปา-คาราจีแนนพบการแยกชั้นในทุกตัวอย่าง



รูปที่ 4.31 ความเสถียรของตัวอย่างสารเดี่ยวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ในระบบที่มี (S) และไม่มีน้ำตาลซูโครส (B)



รูปที่ 4.32 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างแคปลา-คาราจีแนนกับแป้งอะซีทิลเลเตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส

4.3.2.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับโลคัสปีนัมต่อการแยกเฟส

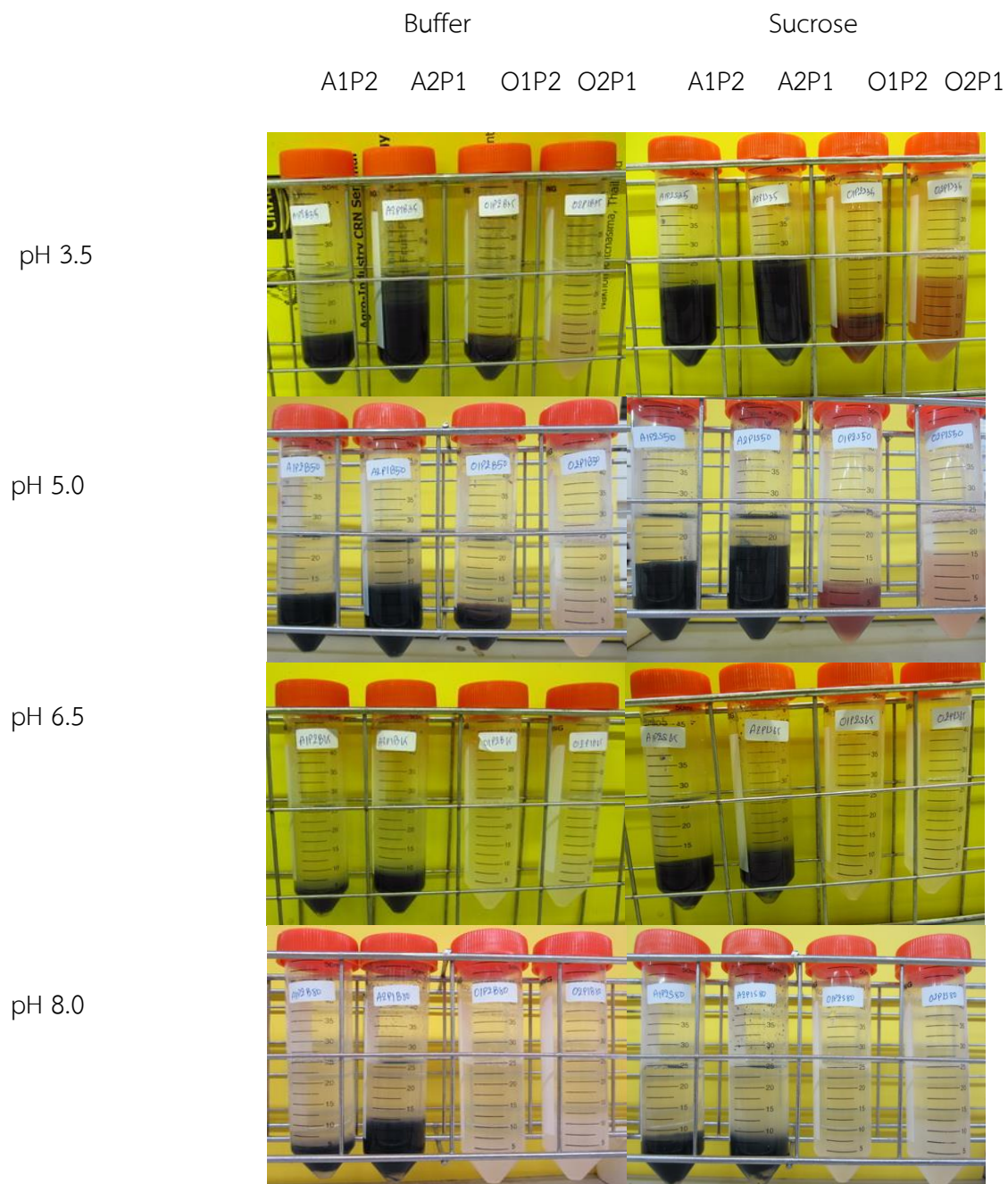
จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลต ไม่พบการแยกชั้นทุกตัวอย่าง ทุกค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความหนืดของโลคัสปีนัมที่มีความหนืดสูงทำให้ป้องกันการแยกชั้นของแป้งดัดแปรกับโลคัสปีนัมดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.33

4.3.3.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารผสมแป้งดัดแปรชนิดโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับเพคตินต่อการแยกเฟส

จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตหรือแป้งอะซิทิเลตกับเพคตินพบการแยกชั้นทุกตัวอย่าง ทุกค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของเพคตินที่มีค่าน้อยในขณะที่แป้งดัดแปรเป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ใหญ่มีน้ำหนักมากส่งผลให้ตกตะกอนนอนที่ก้นหลอดทดลอง โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสจะมีปริมาตรของชั้นซีรัมน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส และพบว่าที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 พบปริมาตรของชั้นซีรัมน้อยกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง อื่นๆดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างโลคัสปิ่นกัมกับแป้งอะซิทิเลเตดหรือแป้งโซเดียมออกเทนนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส



รูปที่ 4.34 ความเสถียรของตัวอย่างสารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งอะซีทิลเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตที่มีสัดส่วนและค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันในระบบที่มีและไม่มีน้ำตาลซูโครส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรได้แก่ แป้งอะซิทิเลตหรือ แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆได้แก่ เพคติน แคปปา-คาราจีแนน และ โลคัสปีนัม จะส่งผลต่อคุณภาพทางวิทยากระแสนแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่เตรียมจากแป้งอะซิทิเลตผสมกับไฮโดรคอลลอยด์จะมีค่าความหนืดสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่เป็นแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และตัวอย่างที่ผสมโลคัสปีนัม จะมีค่าความหนืดที่สูงกว่า แคปปา-คาราจีแนน และ เพคตินตามลำดับ ตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแป้งดัดแปรกับแคปปา-คาราจีแนนหรือโลคัสปีนัมค่าความหนืดจะลดลงเมื่อลดอัตราส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ ในขณะที่สารผสมของแป้งดัดแปรกับเพคตินค่าความหนืดจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแป้งดัดแปร โดยกลุ่มที่เติมน้ำตาลซูโครสจะมีค่าความหนืดสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส

2. ผลของสารผสมแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติก พบว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่ามอดุลัสสะสมสูงขึ้นที่ -4 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความถี่ 1 Hz และ 1% strain พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของตัวอย่างชนิดเดียวกันที่เติมน้ำตาลซูโครสมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตกับแคปปา-คาราจีแนน หรือโลคัสปีนัมมีค่ามอดุลัสสะสมต่ำกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปปา-คาราจีแนนหรือ โลคัสปีนัม ในขณะที่ สารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตกับเพคตินมีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าสารผสมระหว่างโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับเพคตินที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์เท่ากัน โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแคปปา-คาราจีแนน หรือโลคัสปีนัมกับแป้งดัดแปรค่ามอดุลัสสะสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแป้งดัดแปร ในขณะที่สารผสมระหว่างเพคตินกับแป้งดัดแปรค่ามอดุลัสสะสมสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเพิ่มสัดส่วนของแป้งดัดแปร

3. ผลของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติเชิงความร้อนของผลึกน้ำแข็ง พบว่าค่า T_p และค่า T_o ของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่เป็นสารละลายเดี่ยว เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ที่เท่ากันพบว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับไฮโดรคอลลอยด์มีแนวโน้มว่าค่า T_o มีค่าสูงกว่า ในขณะที่มีแนวโน้มของค่า ΔH และ T_p ต่ำกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแป้งอะซิทิเลตกับไฮโดรคอลลอยด์ โดยในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสค่า T_p และ T_o มี

ค่าต่ำกว่าในระบบที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส โดยตัวอย่างที่มีน้ำตาลซูโครสมีการใช้พลังงานเพื่อสลายผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส

4. ผลของสารผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ต่ออัตราการละลายของผลึกน้ำแข็ง พบว่าตัวอย่างที่เติมน้ำตาลซูโครสมีอัตราการละลายที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่มีน้ำตาลซูโครส ตัวอย่างแคปปา-คาราจีแนน มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งช้ากว่าตัวอย่าง โลคัสปีนัม แป้งอะซิทิเลเตด แป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต และเพคตินตามลำดับ และเมื่อศึกษาในสารผสมของแป้งดัดแปรอะซิทิเลเตดหรือโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปปา-คาราจีแนนหรือโลคัสปีนัมพบว่าอัตราการละลายลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแคปปา-คาราจีแนนหรือโลคัสปีนัม ในขณะที่สารผสมของแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดกับ เพคตินมีอัตราการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเพคติน โดยตัวอย่างที่เป็นสารผสมของเพคตินกับแป้งดัดแปร จะมีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งที่เร็วกว่าตัวอย่างที่เป็นสารผสมของแคปปา-คาราจีแนน หรือคัสปีนัมกับแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิด

5. ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ พบว่าค่าความหนืดของแป้งอะซิทิเลเตด และโลคัสปีนัม พบว่ามีค่าความหนืดเรียงตามความหนืดสูงสุดดังต่อไปนี้คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5, 5.0, 3.5 และ 8.0 ส่วนแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตและเพคตินมีลำดับความหนืดเรียงจากมากไปน้อยดังนี้คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5, 5.0, 6.5 และ 8.0 ส่วนแคปปา-คาราจีแนน มีลำดับความหนืดเรียงจากมากไปน้อยดังนี้คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0, 6.5, 5.0 และ 3.5 ส่วนค่าความหนืดของแป้งอะซิทิเลเตดกับ แคปปา-คาราจีแนน ทุกอัตราส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 8.0, 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ ในขณะที่สารผสมของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปปา-คาราจีแนน ทุกอัตราส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 6.5 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความหนืดของแป้งอะซิทิเลเตด กับโลคัสปีนัม ทุกอัตราส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 5.0 8.0 และ 3.5 ตามลำดับ ในขณะที่สารผสมของแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับโลคัสปีนัม ทุกอัตราส่วนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0 มีค่าความหนืดสูงสุดตามด้วย 6.5 8.0 และ 3.5 ตามลำดับ ส่วนค่าความหนืดของแป้งอะซิทิเลเตดหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับเพคตินทุกอัตราส่วนพบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้น

6. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อคุณสมบัติด้านวิสโคอีลาสติกของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่เป็นสารละลายเดี่ยวตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีค่ามอดุลัสสะสม สูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในกรณีที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลเตดหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปปา-คาราจีแนน

โลคส์ป็นกัมหรือเพคตินทุกอัตราส่วนพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 มีค่ามอดูลัสสะสมสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ทั้งระบบที่เติมและไม่เติมน้ำตาลซูโครส

7. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อคุณสมบัติด้านอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งของสารผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ พบว่าในกรณีของสารเดี่ยวอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่าง ในกรณีของสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับแคปปา-คาราจีแนน ทุกอัตราส่วนพบว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 และ 5.0 มีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งที่ต่ำกว่าที่เตรียมที่ 6.5 และ 8.0 ส่วนสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลต กับโลคส์ป็นกัมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 มีอัตราการละลายสูงสุด และค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 มีอัตราการละลายต่ำสุด สารผสมระหว่างแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับโลคส์ป็นกัม มีอัตราการละลายไม่ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และ 3.5 มีอัตราการละลายสูงกว่าที่ 5.0 และ 8.0 ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารผสมระหว่างแป้งอะซิทิเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนตกับเพคติน พบว่าตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรดจะมีอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งต่ำกว่าตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และ 8.0

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองในครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาความสัมพันธ์ของแป้งดัดแปร 2 ชนิดคือ แป้งอะซิทิเลตหรือแป้งโซเดียมออกเทนิลซัคซิเนต กับไฮโดรคอลลอยด์ 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งยังมีแป้งดัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์อีกหลายชนิด ที่ยังจำเป็นต้องศึกษาเพิ่ม เพื่อประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้แป้งดัดแปรหรือไฮโดรคอลลอยด์ให้เหมาะสมกับอาหารแช่แข็ง กระบวนการผลิต และต้นทุนการผลิต

2. การทดลองในครั้งนี้ศึกษาในโมเดลที่มีส่วนผสมไม่ซับซ้อนคือมีเพียง น้ำ น้ำตาล และค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาความสัมพันธ์ของแป้งดัดแปรกับไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งในระบบอาหารแช่แข็งจริง อาจมีความซับซ้อนของส่วนผสมในอาหารและกระบวนการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเหล่านั้นเพิ่มเติมเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการที่แท้จริงของผู้ผลิตได้

3. อุณหภูมิที่ใช้ศึกษาโมเดลของอาหารแช่แข็งในครั้งนี้คือ -20 องศาเซลเซียส เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ อย่างไรก็ตามก็มีอาหารแช่แข็งอีกหลายประชนิดที่มีกระบวนการแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ รวมถึงเครื่องมือและประสิทธิภาพที่ใช้ เพื่อลดอุณหภูมิของอาหารแช่แข็ง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คุณภาพของอาหารแช่แข็งแตกต่างกันที่ผู้ผลิตจำเป็นต้องพิจารณาเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. (2545). การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. ได้จาก <https://sites.google.com/site/l2techcom/-9>
- Baek, M.H. Yoo, B. and Lim, S.T. 2004. Effects of sugars and sugar alcohols on thermal transition and cold stability of corn starch gel. **Food Hydrocolloids**. 18:133-142.
- BeMiller, J. N. and Whistler, R. L. 1996. Carbohydrates in Fennema, O. R. (Ed) 1996. Food Chemistry. 3rd Ed. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Bolliger, S., Wildmoser, H., Goff, H.D. andTharp, B.W. 2000. Relationships between ice cream mix viscoelasticity and ice crystal growth in ice cream.**International of Dairy Journal**.10:791-797.
- Buyong, N. and Fenema, O. 1988. Amount and size of ice crystals in frozen samples as influenced by hydrocolloids. **Journal of Dairy Science**. 71:2630-2639.
- de Jong, S. and van de Velde, F. 2007. Charge density of polysaccharide controls microstructure and large deformation properties of mixed gel. **Food Hydrocolloids**. 21:1172-1187.
- Fernandez, P.P. Martino, M.N., Zaritzky, N.E., Guignon , B. and Sanz, P.D. 2007. Effects if locust bean, xanthan and guar gums on the ice crystals of a sucrose solution frozen at high pressure. **Food Hydrocolloids**. 21:507-515.
- Flores, A.A. and Goff, H.D. 1999. Ice crystal size distributions in dynamically frozen model solutions and ice cream as affected by stabilizers. **Journal of Dairy Science**. 82: 1399-1407.
- Fuchigami, M. and Teramoto, A. 2003. Texture and structure of high-pressure-frozen gellan gum gel. **Food Hydrocolloids**. 17:895-899.
- 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**. 22:1273-1282.

- Goff, H.D., Cadwell, K.B., Stanley, D.W. and Maurice, T.J. 1993. The influence of polysaccharides on the glass transition in frozen sucrose solutions and ice cream. **Journal of Dairy Science**. 76:1268-1277.
- Goff, H.D., Ferdinando, D. and Schorsch, C. 1999. Fluorescence microscopy to study galactomannan structure in frozen sucrose and milk protein solutions. **Food Hydrocolloids**. 13:353-362.
- Harper, E.K. and Shoemaker, C.F. 1983. Effects of locust bean gum and selected sweetening agents on ice recrystallization rates. **Journal of Food Science**. 48:1801-1803.
- Huang, M., Kennedy, J.F., Li, B., Xu, X. and Xie, B.J. 2007. Characteristics of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: A texture profile analysis study. **Carbohydrate Polymers**. 69:411-418.
- Huang, J., Schols, H.A., Jin, Z., Sulmann, E., and Voragen, A.G.J. 2007. Pasting properties and (chemical) fine structure of acetylated yellow pea starch is affected by acetylation reagent type and granule size. **Carbohydrate Polymer**. 68: 397-406.
- Igoe, R.S. 1982. Hydrocolloid interaction useful in food systems. *Food Technology*. 36:72-74.
- Liu, H. and Lelievre, J. 1992. Transitions in frozen gelatinized-starch systems studied by differential scanning calorimetry. **Carbohydrate polymer**. 19:179-183.
- Murphy, P. 2000. In G.O. phillips, and P.A. Williams (Ed). **Handbook of Hydrocolloids**. Boca Raton: CRC Press. p.41-65.
- Nilsson, L., Leeman, M., Wahlund, K. G. and Bergenstahl, B. 2006. Mechanical degradation and changes in conformation of hydrophobically modified starch. **Biomacromolecules**. 7: 2671-2679.
- Normand, V., Lootens, D.L., Eleonora, A., Kevin, P.P. and Aymard, P. 2000. New insight into agarose gel mechanical properties. **Biomacromolecules**. 1:730-738.
- Norziah, M.H., Foo, S.L. and Karim, A.Abd. 2006. Rheological studies on mixtures of agar (*Gracilaria changii*) and K-carrageenan. **Food Hydrocolloids**. 20:204-217.

- Ntawukliyyo, J.D., De Smedt, S.C., Demeester, J. and Remon, J.P. 1996. Stabilization of suspensions using sucrose esters and low substitutes n-octenylsuccinate starch-xanthan gum associations. **International Journal of Pharmaceutics**. 128:73-79.
- Patmore, J.V., Goff, H.D. and Fernandes, S. 2003. Cryo-gelation of galactomannans in ice cream model systems. **Food Hydrocolloids**. 17:161-169.
- Regand, A. and Goff, H.D. 2002. Effects of biopolymers on structure and ice recrystallization in dynamically frozen ice cream model systems. **Journal of Dairy Science**. 85:2722-2732.
- Regand, A. and Goff, H.D. 2003. Structure and ice recrystallization in frozen stabilized ice cream model systems. **Food Hydrocolloids**. 17:95-102.
- Sodhi, N. S. and Singh, N. 2005. Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. **Journal of Food Engineering**. 70:117-127.
- Spagnuolo, P.A., Goff, H.D., Dalgleish, D.G. and Morris, E.R. 2005. Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micells and polysaccharide stabilizers. **Food Hydrocolloids**. 19:371-377.
- Spies, R.D. and Hosney, R.C. 1982. Effect of sugar on starch gelatinization. **Cereal Chemistry**. 59:128-131.
- Steffe, J. F. 1996. **Rheological Methods in Food Processing**. Freeman Press, Michigan
- Sutton, R.L., Lips, A. and Piccirillo, G. 1996. Recrystallization in aqueous fructose solutions as affected by locust bean gum. **Journal of Food Science**. 61:746-748.
- Syrbe, A. Bauer, W. and Klostermeyer, H. 1998. Polymer science concept in dairy systems - an overview of milk protein and food hydrocolloid interaction. **International of Dairy Journal**. 8:179-193.
- Tabilo-Munizaga, G. and Barbosa-Canovas, G.V. 2005. Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**. 67:147-156.
- Tanaka, R., Hatakeyama, T. and Hatakeyama, H. 1998. Formation of locust bean gum hydrogel by freezing-thawing. **Polymer International**. 45:118-126.

- Trubiano, P.C. 1986. **Succinate and substitutes succinate derivatives of starch**. In O.B. Wurzburg (Ed.) *Modified starches properties and uses*. Boca Raton. FL: Crane Russk Press.
- Tye, R.J. 1988. The rheology of starch/carrageenan systems. **Food Hydrocolloids**. 2:259-266.
- Wurzburg, O.B. 1995. **Modified starches**. In A.M. Stephen (Ed.) *Food polysaccharides and their applications* (pp. 83-85). New York: Marcel Dekker.
- Yoshimura, M., Takaya, T. and Nishinari, K. 1996. Effects of konjac glucomannan on the gelatinisation and retrogradation of corn starch as determined by rheology and differential scanning calorimetry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 44:2970-2976.
- Yoshimura, M., Takaya, T. and Nishinari, K. 1998. Rheological studies on mixtures of corn starch and konjac-glucomannan. **Carbohydrate Polymer**. 35:71-79.
- Whistler, R. L., Bemiller, J. N. and Paschall, E. F. 1984. **Starch: Chemistry and Technology**, 2nd ed, Academic Press, New York.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวัม ไทยอุดม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ (เกียรตินิยม อันดับ 2) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขนในปีการศึกษา 2535 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538 จากนั้นเข้าทำงานเป็นพนักงานของรัฐ ในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก่อนได้ทุนรัฐบาลแคนาดาและทุนพัฒนาอาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเพื่อศึกษาปริญญาเอก ณ University of Guelph, Ontario ประเทศแคนาดาในปีการศึกษา 2541 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545 เพื่อเข้าทำหน้าที่เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจนกระทั่งปัจจุบัน

ประสบการณ์ทำงาน/ฝึกอบรม

- ปี พ.ศ. 2546 ได้รับทุนรัฐบาลเยอรมันเข้าฝึกอบรมเรื่อง Modern Biotechnology and Technology Transfer ณ ประเทศเยอรมัน เป็นเวลา 10 เดือน
- ปี พ.ศ. 2548 ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ปี พ.ศ. 2551 ดำรงตำแหน่งรองผู้อำนวยการศูนย์สหกิจศึกษาและพัฒนาอาชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ปี พ.ศ. 2551 ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์สหกิจศึกษาและพัฒนาอาชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ปี พ.ศ. 2554 ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์กิจการนานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานโดดเด่น

- ปี พ.ศ. 2550 งานวิจัยร่วมกับบริษัทแดรี่ โฮม จำกัด เรื่อง “การเพิ่มเมลาโทนิનธรรมชาติในนมพลาสเจอไรส์” ซึ่งเป็นงานวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่สถานประกอบการในโครงการ iTAP ของ สวทช. โครงการแรกของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี