



รายงานการวิจัย

ผลของอันตรกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแคปปา-คาราจีแนน  
ต่อการตกผลึกน้ำแข็งใหม่ในไอศกรีม  
(The Interaction Effect between Modified Tapioca Starch and Kappa-  
Carrageenan on Ice Recrystallization in Milk Ice Cream)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

ผลของอันตรกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแคลป้า-การาจี้แนน  
ต่อการตกผลึกน้ำแข็งใหม่ในไอศกรีม  
(The Interaction Effect between Modified Tapioca Starch and Kappa-  
Carrageenan on Ice Recrystallization in Milk Ice Cream)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวัม ไทยอุดม

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวหทัยชนก นพจรูญศรี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2557

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ 1) ศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (HPS) แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไดสตาร์ชฟอสเฟต (HPDS) หรือ โลคัส-บีนกัมกับแคปลา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสและระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนม 2) ศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัส-บีนกัมกับแคปลา-คาราจีแนนต่อลักษณะทางกายภาพของไอศกรีม ได้แก่ ค่าการขึ้นโฟม อัตราการละลาย และค่าความแข็งของไอศกรีม 3) ศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัส-บีนกัมกับแคปลา-คาราจีแนนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง จากการวิเคราะห์ด้วยภาพ โดยใช้ Heating and cooling stage และการทำ Temperature sweep ตัวอย่างสารละลายซูโครสและส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกตัวอย่างจะแปรความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และ 16 กำหนดความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวเป็นร้อยละ 0.3 และแปรระดับความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัส-บีนกัมในช่วงร้อยละ 0.255-0.3 ผลต่างของความเข้มข้นสารให้ความคงตัวที่ใช้จะถูกเติมให้ครบร้อยละ 0.3 โดยใช้แคปลา-คาราจีแนน

จากการศึกษาในระบบซูโครสพบว่า ตัวอย่างสารละลายซูโครสที่ไม่เติมสารให้ความคงตัว สารละลายซูโครสที่เติม โลคัส-บีนกัม แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลและค่าความหนืดปรากฏของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครส ตัวอย่างที่เติมสารให้ความคงตัวมีค่าความหนืดปรากฏมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมสารให้ความคงตัว ค่าความหนืดปรากฏของระบบสารละลายซูโครสที่มี โลคัส-บีนกัมกับแคปลา-คาราจีแนนจะมีค่ามากกว่าระบบสารละลายซูโครสที่ใช้แป้ง HPS หรือ แป้ง HPDS กับแคปลา-คาราจีแนน เมื่อพิจารณาในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่มีสารให้ความคงตัว ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวกับแคปลา-คาราจีแนนมีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนประเภท Time dependent shear thinning ผลของความเข้มข้นซูโครสต่อพฤติกรรมการไหลพบว่า ระดับความเข้มข้นของซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ทั้งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่ใส่และใส่สารให้ความคงตัว นอกจากนี้ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมสารให้ความคงตัวจะมีค่าความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด ค่า Thixotropy และค่า โมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกเมื่อใช้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมดังกล่าวกับแคปลา-คาราจีแนนในทางกลับกันส่งผลให้ค่าดัชนีพฤติกรรม การไหลลดลง

ค่าโมดูลัสสะสมและค่าความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ส่งผลให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความคงตัวมากขึ้น ผลของปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคปลา-คาราจีแนน ส่งผลให้ค่าการขึ้นโฟมมีค่าสูงขึ้น ระดับความเข้มข้นสารละลายซูโครสร้อยละ 12 หรือร้อยละ 16 ไม่มีผลต่อการขึ้นโฟมของ

ไอศกรีม นั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนนส่งผลให้ ไอศกรีมมีความสามารถในการกักเก็บอากาศเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าความแข็งสูงขึ้น และมีอัตราการละลายสูงกว่าตัวอย่างไอศกรีมที่ใช้โลคัสบีนัมกับกับแคลป้า-คาราจีแนน ซึ่งค่าความแข็งที่สูงขึ้นสอดคล้องกับค่าร้อยละการ โตะของผลึกน้ำแข็ง โดยค่าร้อยละการ โตะของผลึกน้ำแข็งของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสบีนัมกับกับแคลป้า-คาราจีแนน จะมีค่าต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนน เมื่อส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังผ่าน การทำ Temperature sweep จะมีการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบ Melt-refreeze โดยส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมที่ได้โลคัสบีนัมจะมีค่าร้อยละการ โตะของผลึกน้ำแข็งต่ำที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีมที่มีแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนนและตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี โลคัสบีนัมกับกับแคลป้า-คาราจีแนน นั้นแสดงว่าปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนน สามารถชะลอการ โตะของผลึกน้ำแข็งในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ ผลของสารละลายน้ำตาล ชูโครสต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งพบว่าผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี สารละลายชูโครสร้อยละ 16 จะมีขนาดผลึกน้ำแข็งเล็กและมีค่าร้อยละการ โตะของผลึกน้ำแข็งต่ำกว่า ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายชูโครสร้อยละ 12 เนื่องจากปริมาณของแข็งในส่วน พร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายชูโครสร้อยละ 16 จะมีปริมาณมากกว่า ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการเปลี่ยน สถานะจากน้ำเป็นผลึกน้ำแข็งในของการปั่นน้อยกว่าส่วนพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายชูโครส ร้อยละ 12

ปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS กับแคลป้า-คาราจีแนนและแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนน ช่วยเพิ่ม ค่าการขึ้น โฟมให้กับ ไอศกรีมและสามารถชะลอการ โตะของผลึกน้ำแข็งได้ ดังนั้น สามารถนำแป้ง HPS กับ แคลป้า-คาราจีแนนและแป้ง HPDS กับแคลป้า-คาราจีแนน มาใช้ในการลดลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเกล็ดค น้ำแข็งที่เกิดจากการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งใน ไอศกรีมนม

## Abstract

The objectives of this research were 1) to study the effects of interaction between modified starches (hydroxypropyl starch: HPS or hydroxypropyl distarch phosphate: HPDS) or Locust bean gum (LBG) and  $\kappa$ -carrageenan ( $\kappa$ CG) on the rheological properties in sucrose solutions and ice cream mixes, 2) to study the effects of interaction between modified starches or LBG and  $\kappa$ CG on the physical properties of milk ice cream such as overrun, melting rate and hardness, and 3) to study the effects of interaction between modified starches or LBG and  $\kappa$ CG on ice recrystallization in ice cream through image analysis using heating and cooling stages for a temperature sweep. The sucrose concentration of all samples was varied at 12 and 16% (w/w). The total concentration of modified starch or LBG and  $\kappa$ CG for each sample was fixed at 0.3% (w/w) by varying the modified starch or LBG in the range of 0.255-0.3% (w/w) and the subtraction of modified starch or LBG from total concentration was the percentage of added  $\kappa$ CG.

Flow behaviors of sucrose solutions with or without modified starches or LBG (control sample) were Newtonian. The sucrose concentrations did not affect the flow behavior or the apparent viscosity of any of the sucrose solution samples. The apparent viscosity of sucrose solution containing LBG/ $\kappa$ CG was higher than that of sucrose solution containing HPS/ $\kappa$ CG or HPDS/ $\kappa$ CG. For ice cream mixes, flow behaviors of samples containing HPS or HPDS were Newtonian. Samples containing HPS/ $\kappa$ CG, HPDS/ $\kappa$ CG or LBG/ $\kappa$ CG were time dependent on shear thinning. The sucrose concentrations did not affect the flow behavior of the ice cream mixes. Adding  $\kappa$ CG to the mixes gave more apparent viscosity, consistency index, thixotropy and storage modulus but less flow index value.

The storage modulus and consistency index in ice cream mixes were higher than those in the control samples. This might be attributed to the addition of  $\kappa$ CG. Consequently, the stability of the ice cream and their structures were improved. The overruns of the ice cream

containing HPS/ $\kappa$ CG or HPDS/ $\kappa$ CG were higher than those of LBG/ $\kappa$ CG. Interaction between HPS or HPDS and  $\kappa$ CG improved the incorporation of air bubbles into the ice cream mixes. However, sucrose concentrations did not affect the overruns of the ice cream. Ice cream with HPS/ $\kappa$ CG or HPDS/ $\kappa$ CG melted faster than ice cream with LBG/ $\kappa$ CG. The percentage of ice crystal growth of ice cream containing LBG/ $\kappa$ CG was lower than that of ice cream containing HPS/ $\kappa$ CG or HPDS/ $\kappa$ CG. This might be due to the phase separation between LBG and  $\kappa$ CG. The hardness of ice cream containing LBG/ $\kappa$ CG was lower than that of HPDS/ $\kappa$ CG. The type of ice recrystallization of all ice cream mixes after the temperature sweep was melt-refrozen. Ice crystal size of samples containing 16% sucrose was smaller than that of samples containing 12% sucrose solution. The total solid of the ice cream mixes affected the glass transition in the freezing process. Ice crystal growth of ice cream containing HPDS/ $\kappa$ CG was less than that of ice cream containing LBG/ $\kappa$ CG. This means that the interaction between HPDS/ $\kappa$ CG can slow down the ice crystal growth in ice cream better than LBG/ $\kappa$ CG.

In conclusion, the interaction of HPS/ $\kappa$ CG and HPDS/ $\kappa$ CG can improve the overruns and retard ice crystal growth that reduces the ice defects in milk ice cream.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้เงินทุนสนับสนุนและอุปกรณ์เครื่องมือในการวิจัย ขอขอบคุณคุณคุณสัมพันธ์ วิริยะ ไวยะ กรรมการผู้จัดการ คุณธนาพร ดาวเรียง ผู้จัดการพนักงานขาย คุณเกษมสานต์ พงษ์เจตสุพรรณ พนักงานขาย บริษัท รัชมอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำการทดลองและเก็บข้อมูล พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย จนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.เมตตา เจริญพานิช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี และคุณสุพัทธาศรีจิ๋ว เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำการทดลองและเก็บข้อมูล พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์ศูนย์เครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกแก่ผู้คณะวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณคุณคุณหทัยชนก นพจรูญศรีที่ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัยที่ดีเยี่ยมจนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	6
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>8</b>
2.1 ไอศกรีม.....	8
2.2 ขั้นตอนการผลิตไอศกรีมในระดับอุตสาหกรรม.....	10
2.3 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม.....	12
2.3.1 การเกิดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม.....	12
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดผลึกน้ำแข็ง.....	13
2.3.3 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง.....	15
2.3.4 ประเภทของการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม.....	16
2.4 แป้งคัดแปร.....	17
2.5 การจีเนน.....	20
2.6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์.....	22



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1	ประเภทของแรงภายใน โมเลกุลหรือพันธะที่เกิดในส่วนผสมระหว่าง โปรตีนและโพลีแซคคาไรด์.....	23
2.6.2	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ต่อระบบอิมัลชัน.....	24
2.7	วิทยากระแสของไหล.....	26
2.7.1	วิทยากระแสของไหล.....	26
2.7.2	รูปแบบพฤติกรรมการไหล.....	27
3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	32
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	32
3.2	วัตถุดิบ.....	32
3.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร.....	33
3.4	สูตรส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง.....	33
3.4.1	สูตรส่วนผสมของระบบสารละลายซูโครส.....	33
3.4.2	สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	34
3.5	กรเตรียมตัวอย่าง.....	34
3.5.1	การเตรียมส่วนผสมของระบบสารละลายซูโครส.....	34
3.5.2	การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและตัวอย่างไอศกรีม ตัดแปลงจากวิธีการของ Marshall and Arbuckle (1996) และ Goff, Verespej and Smith (1999).....	34
3.5.3	การปั่นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	34
3.6	การศึกษาและการทดสอบคุณลักษณะของสารละลายน้ำตาลซูโครส.....	36
3.7	การทดสอบคุณลักษณะของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและผลิตภัณฑ์ไอศกรีม.....	37
3.7.1	การศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....	37
3.7.2	ขนาดผลึกน้ำแข็งของไอศกรีมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	38
3.7.3	อัตราการละลายของไอศกรีม.....	38
3.7.4	ความแข็งของไอศกรีม.....	39
3.7.5	การขึ้นโฟมของไอศกรีม.....	39
3.8	การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9	สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	40
<b>4</b>	<b>ผลการทดลองและวิจารณ์.....</b>	<b>41</b>
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน.....	41
4.2	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปลา- การาจีแนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส.....	42
4.2.1	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบสารละลาย น้ำตาลซูโครส.....	42
4.2.2	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัม กับแคลปลา-การาจีแนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีม.....	50
4.3	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีม.....	61
4.3.1	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่อค่าการขึ้น โฟมของไอศกรีม.....	61
4.3.2	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่ออัตราการละลายของไอศกรีม.....	63
4.3.3	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่อค่าความแข็งของไอศกรีม.....	67
4.4	ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับ แคลปลา-การาจีแนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งใน ไอศกรีมนม.....	68
<b>5</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>78</b>
	รายการอ้างอิง.....	80
	ภาคผนวก ก (วิธีการทดลอง).....	86
	ภาคผนวก ข (ผลการทดลอง).....	94
	ประวัติผู้เขียน.....	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เวลาและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอไรเซชันส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....10
3.1	สูตรส่วนผสมของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสสำหรับการเตรียมตัวอย่าง 100 กรัม.....35
3.2	สูตรส่วนผสมของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสำหรับการเตรียมตัวอย่าง 100 กรัม..... 36
4.1	คุณสมบัติเชิงความร้อนของสารให้ความคงตัวจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องDSC.....42
4.2	ค่าความหนืดปรากฏของระบบสารละลายซูโครสที่อัตราเลื่อน 50 รอบต่อวินาที.....46
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดและค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของสารละลายน้ำตาลซูโครส.....47
4.4	ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนมที่อัตราเลื่อน50 รอบต่อวินาที..... 58
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....55
4.6	ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนม..... 56
4.7	ค่าความชันของกราฟระหว่างร้อยละการละลายกับเวลา.....65
4.8	อัตราการละลายของไอศกรีมนมที่มีสารให้ความคงตัวต่างชนิดกัน..... 66
4.9	ขนาดของผลึกน้ำแข็งก่อนและหลังการทำ Temperature sweep และค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม.....69

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	เครื่องแลกเปลี่ยนความเย็นแบบมีใบมีคจุดผิวในกระบวนการผลิตไอศกรีม.....13
2.2	แสดงรูปแบบการเกิดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งใน ไอศกรีม.....17
2.3	การเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน.....20
2.4	ปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชพอสเฟตกับ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต.....20
2.5	โครงสร้างของคาราจีแนนทั้ง 3 ชนิด..... 22
2.6	กลไกการเกิดเจลของคาราจีแนน.....22
2.7	ผลของไบโอพอลิเมอร์ต่อระบบที่มีอนุภาคแขวนลอย.....25
2.8	กลไกการยับยั้งการแยกเฟสของแคปไซซิน-คาราจีแนนในสารผสมระหว่างเคซีนไมเซลล์ และ โพลีแซคคาไรด์.....26
2.9	การตอบสนองต่อการให้แรงกระทำต่อวัสดุ 3 ประเภท..... 28
2.10	หัววัดสำหรับเครื่องวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแส.....28
2.11	แสดงช่วง Linear viscoelastic range (LVR) ของตัวอย่าง.....31
2.12	กราฟแสดงรูปแบบพฤติกรรมการไหลของพวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา.....31
3.1	ส่วนควบคุมอุณหภูมิ Heating and cooling stage.....40
3.2	ชุดควบคุมอุณหภูมิต่อกับกล้องจุลทรรศน์.....40
4.1	ผลของ LBG แป้ง HPS และแป้ง HPDS ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพฤติกรรมการไหล ของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ12 และร้อยละ 16..... 48
4.2	ค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสียของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครส ร้อยละ 12 และร้อยละ 16.....49
4.3	ค่า Thixotropy ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้จากการเข้าสมการ Power law's model ที่ความเข้มข้นของซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16..... 57
4.4	ค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสียของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี ซูโครสเข้มข้นร้อยละ12 และร้อยละ 16..... 59
4.5	พฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16.....60
4.6	ค่าการขึ้นโพนของไอศกรีมนมที่มีส่วนผสมของสารให้ความคงตัวต่างชนิดกัน ที่ระดับความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส ก) ร้อยละ 12 ข) ร้อยละ 16..... 62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 อัตราการละลายของไอศกรีมนมที่มีสารให้ความคงตัวต่างชนิดกันความเข้มข้นซูโครส ร้อยละ 12 และร้อยละ 16.....	66
4.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ Temperature sweep.....	70
4.9 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีโลคัสบีนกัมความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12.....	72
4.10 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีแป้ง HPS ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12.....	73
4.11 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีแป้ง HPDS ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12.....	74
4.12 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีโลคัสบีนกัมความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16.....	75
4.13 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีแป้ง HPS ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16.....	76
4.14 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีแป้ง HPDS ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 .....	77

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SMP	=	Skim milk powder
MSNF	=	Milk solid not fat
LBG	=	Locust bean gum
HPS	=	Hydroxy propyl starch
HPDS	=	Hydroxy propyl distarch phosphate
$\kappa$ CG	=	Kappa-carrageenan
Tween 80	=	Polyoxyethylene sorbitan monooleate
Pa	=	Pascal
s	=	Second
$^{\circ}$ C	=	Degree celsius
mL	=	Millilitre
$\mu$ L	=	Microlitre
min	=	Minute
$\mu$ m	=	Micrometer
$\mu$ l	=	Microliters
g	=	Gram
h	=	Hour
$G'$	=	Storage modulus
$G''$	=	Loss modulus
$\eta$	=	Apparent viscosity
Hz	=	Hertz

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไอศกรีม (Ice cream) เป็นของหวานที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นเด็กหรือผู้ใหญ่ โดยเฉพาะประเทศไทยที่มีสภาพอากาศร้อน ไอศกรีมจึงจัดว่าเป็นของหวานยอดฮิตที่ช่วยให้คลายร้อนได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันพบว่าไอศกรีมมีวางขายอยู่ทั่วทุกที่ เช่น ร้านไอศกรีมตามห้างสรรพสินค้า หรือไอศกรีมรถเข็น เป็นต้น ไอศกรีมเป็นระบบคอลลอยด์ที่ซับซ้อน (Marshall Goff and Hartel, 2003) โดยจะประกอบไปด้วย ฟองอากาศ ผลึกน้ำแข็ง และส่วนของเหลวที่ไม่แข็งตัว เป็นต้น เนื่องจากเป็นของหวานที่มีการอัดอากาศเข้าสู่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2532) ไอศกรีมเป็นของหวานที่มีส่วนประกอบหลายชนิด ได้แก่ ไขมัน (Fat) สารให้ความหวาน (Sweetener) สารให้ความคงตัว (Stabilizer) อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ฯลฯ ซึ่งแต่ละส่วน ประกอบล้วนมีผลต่อลักษณะโดยรวมที่ดีของไอศกรีมที่แตกต่างกัน เช่น ไขมันช่วยเพิ่มรสชาติทำให้ไอศกรีมมีเนื้อนุ่มและสร้าง body ให้แก่ไอศกรีม สารให้ความหวาน ช่วยปรับปรุงคุณภาพ ด้านเนื้อไอศกรีมพร้อมทั้งช่วยเพิ่มรสชาติ และสารให้ความคงตัว ช่วยเพิ่มความเนียนให้แก่ไอศกรีม (วรรณ ตังเจริญชัยและวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2532) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ส่วนประกอบแต่ละชนิดล้วนมีผลต่อคุณลักษณะของไอศกรีม นอกจากส่วนประกอบแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อไอศกรีมแล้วยังพบว่า กระบวนการผลิต อาทิ เช่น ขั้นตอนการผสมส่วนผสมเวลาในการผสม ระยะเวลาในการบ่ม ระยะเวลาในการอัดอากาศล้วนมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะโดยรวมของไอศกรีม (Hartel, 1996) คุณลักษณะของไอศกรีมที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ คือไอศกรีมที่มีลักษณะเนื้อไม่เรียบเนียน ซึ่งมีสาเหตุมาจากขนาดของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมโดยขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้เมื่อรับประทานเข้าไปจะมีขนาดเฉลี่ยอยู่ใน ช่วง 20-55 ไมโครเมตร (Hartel, 1996) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับจำนวนและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ (Berger, 1990) ลักษณะที่เป็นตำหนิในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่พบได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเกล็ดน้ำแข็ง (Iciness) ลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายเม็ดทราย (Sandiness) เป็นต้น โดยลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเกล็ดน้ำแข็งจะเกิดจากการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม (Ice recrystallization) สามารถเกิดได้ในขั้นตอนการเก็บรักษาหรือการขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากเนื้อไอศกรีมหลังจากการปั่นจะมีลักษณะค่อนข้างเหลว เนื้อเนียน และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Ice cream mix) ยังไม่เปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งทั้งหมดดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลึกน้ำแข็งจะหลอมรวมกัน ในขณะที่เดียวกันเมื่ออุณหภูมิลดลงน้ำที่อยู่รอบ ๆ ผลึกน้ำแข็งจะแข็งตัวเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม ส่งผลให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเกล็ดน้ำแข็ง นอกจากลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเกล็ดน้ำแข็งที่เป็นตำหนิในผลิตภัณฑ์

ไอศกรีมแล้วยังพบว่ามีลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายเม็ดทราย โดยลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายเม็ดทรายอาจเกิดจากปริมาณของน้ำตาลแลคโตสที่มีมากเกินไปซึ่งแลคโตส (Lactose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) 1 โมเลกุลกับน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) รวมตัวกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิดเบต้า-1, 4 แลคโตสจะตกผลึกอย่างช้า ๆ ในระหว่างการเก็บรักษา (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2532) ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลแลคโตสสูง จะควบคุมผลึกของน้ำตาลแลคโตสไม่ให้มีขนาดใหญ่ ถ้าผลึกของน้ำตาลแลคโตสมีขนาดมากกว่า 30 ไมครอน จะทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายเม็ดทราย เมื่อบริโภคจะรู้สึกสากลิ้น โดยขนาดเฉลี่ยของผลึกแลคโตสที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 10 ไมครอน ซึ่งการควบคุมขนาดผลึกแลคโตสในไอศกรีมทำได้โดยควบคุมอุณหภูมิของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมให้ลดลงอย่างรวดเร็วในขั้นตอนการปั่น (Freezing) เพื่อให้เกิดนิวเคลียสผลึกขนาดเล็กและมีปริมาณมาก หรือการใส่แลคโตสผงที่มีขนาดเล็กลงไปในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (กองบรรณาธิการ TRN, 2550)

สารให้ความคงตัวเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในไอศกรีม ส่วนมากนิยมใช้สารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) ได้แก่ กัวร์กัม (Guar gum) โลคัสบีนัม (Locust bean gum) แคปพา-คาราจีแนน (K-carrageenan) แซนแทนกัม (Xanthan gum) และเจลาติน (Gelatin) เป็นต้น ซึ่งจะทำหน้าที่เพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมของไอศกรีม ช่วยสร้าง body ให้แก่ไอศกรีม ทำให้ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อเนียน (วรรณ ตังเจริญชัย และ วิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2532) นอกจากนี้ ยังมีส่วนช่วยในการต้านทานการหลอมละลาย (Melting rate) และช่วยยับยั้งการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาหรือการขนส่ง (Regand and Goff, 2003)

แคปพา-คาราจีแนน เป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้รับความนิยมในการผลิตไอศกรีมระดับอุตสาหกรรม (Marshall Goff and Hartel, 2003) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแคปพา-คาราจีแนนจะถูกใช้เป็นสารให้ความคงตัวอันดับสอง (Secondary stabilizer) ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Soukoulis et al., 2008) โดยใช้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 0.05 เพื่อป้องกันการเกิดการแยกเฟส (Phase separation) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้เป็นสารให้ความคงตัวอันดับหนึ่ง (Primary stabilizers) และโปรตีน แรงกระทำจะเป็นแรงที่เกิดจากชนิดของประจุ เนื่องจากในโมเลกุลของคาราจีแนน จะมีหมู่ซัลเฟต สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ที่มีประจุบวกในโมเลกุลของโปรตีนได้ (Bourriot, Garnier and Doublier, 1999; Langendorff et al., 2000; Thaiudom and Goff, 2003; Soukoulis et al., 2008) ในผลิตภัณฑ์นมจะนิยมใช้เป็นตัวช่วยในการลดการแยกเฟสได้โดยการดูดซับของสาย Helix ของแคปพา-คาราจีแนนบนเคซีนไมเซลล์และสร้างโครงสร้างตาข่ายเจล (Gel network) ทำให้ เคซีนไมเซลล์สามารถแขวนลอยในสารละลายได้ (Dalgleish and Morris, 1988; Snoeron, Payens, Jeunink and Both, 1975) จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปผลของสารให้ความคงตัวประเภทไฮโดรคอลลอยด์ต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมได้ดังนี้ 1) สารให้ความคงตัวช่วยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับการควบคุมการโตของผลึกน้ำแข็ง (Budiaman and Fennema, 1987a, b;





ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้หมู่แอซิติลเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลของแป้ง ซึ่งจะสามารถยับยั้งการรวมตัวกันของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน ทำให้แป้งสามารถต้านทานการคืนตัวหลังจากเกิดเจลและทำให้เย็นลงได้ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชัน แป้งซัคซินิล เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันใช้หมู่ Succinate เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคส แป้งที่ได้จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เพิ่มความแข็งแรงของเจล (Gel strength) และเพิ่มความคงตัวของอาหารแช่เยือกแข็ง หลังผ่านทำการละลาย (Thawing) แป้งไฮดรอกซีโพรพิล เป็นแป้งที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับโพรพิลีนออกไซด์ในสถานะเบส มีความคงตัวต่อการแช่แข็ง การละลาย และการเก็บในที่เย็น แป้งเปียกที่ได้มีความใสและมีเนื้อสัมผัสที่ดี เหมาะกับการใช้ทำอาหารที่ต้องเก็บในสถานะเย็น (กล้วยฉาบ คุกกี้ และเค้ก คุกกี้ ปิยะจอมขวัญ, 2543) แป้งไฮดรอกซีแอซิติลเป็นแป้งอีเทอร์ที่ไม่มีประจุ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับเอทิลีนออกไซด์ในสถานะเบส ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด ใช้เคลือบกระดาษที่นำมาใช้กับอาหาร (Moser, 1986)

นอกจากนี้การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังยังสามารถทำได้ด้วยวิธีการเชื่อมข้าม (Cross-link) โดยใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยามากกว่า 1 หมู่ฟังก์ชันทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามและเรียกสารเคมีนั้นว่า Cross-linking reagent เช่น แอซิดิกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Sodium trimetaphosphate) และฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ (Phosphorus oxychloride) เป็นต้น โมเลกุลภายในของแป้งที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะจับตัวกันแน่นทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ไม่มีการทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้ง โดยพันธะโควาเลนต์ที่เกิดจากการเชื่อมข้ามจะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งไว้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้งโดยเพิ่มความหนืดของแป้งเปียกที่ร้อนทำให้แป้งเปียกมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง เพิ่มความเหนียวให้แก่เม็ดแป้งที่พองตัว ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งให้เหมาะแก่การหุงต้ม (Rutenberg and Solarek, 1984)

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการนำแป้งดัดแปรมาใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมนั้นพบในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น สิวัด ไทยอุดม (2548) ศึกษาผลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่อคุณสมบัติทางวิทยาการของไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคในไอศกรีมกะทิ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังชนิด SWI และ FT-999 พบว่ารูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมกะทิที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเป็นแบบ Time independent shear thinning ที่มีลักษณะการไหลคล้ายการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) Surapat and Rugthavon (2009) ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง  $\alpha$ -starch-MT01 โดยใช้เป็นสารทดแทนไขมันในไอศกรีมกะทิ ซึ่งแปรระดับการแทนที่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 8 เมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืด ค่าการขึ้นโฟมมีค่ามากขึ้น แต่ไม่มีผลต่ออัตราการละลายและค่าพีเอช และเมื่อแทนที่ไขมันด้วยแป้งร้อยละ 1 ร่วมกับการใส่อิมัลซิไฟเออร์ชนิดโมโนกลีเซอไรด์หรือไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 0.1 จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของไอศกรีมส่งผลให้มีค่าการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสมากที่สุด Thaiudom, Singchan and Saeli (2008) ทำการเปรียบเทียบผลของสารให้ความคงตัวจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและสารให้ความคงตัวทางการค้า ต่ออัตราการเกิดโฟมและอัตราการขึ้นฟูของไอศกรีม โดยใช้แป้งซัคซินิล แป้งแอซิติล แป้งไฮดรอกซีโพรพิล Fulfill 400 โคล์สปีนกัมและกัวร์กัมความเข้มข้นร้อยละ

0.02 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการขึ้นฟูของไอศกรีมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อัตราการขึ้นฟูและความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพิ่มขึ้น หลังเติมสารให้ความคงตัวทางการค้า (กัวร์กัมและ โลกัสบีนกัม) และสารให้ความคงตัวจากแป้งมันสำปะหลัง (แป้งซัคซินิลและแป้งไฮดรอกซีโพรพิล) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางวิทยากระแสและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเช่น ชนิดของสารให้ความคงตัว ระดับความเข้มข้นที่ใช้ ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ แต่ในส่วนผลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่อสมบัติทางวิทยากระแสและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมยังไม่มีการศึกษากันมากนัก ซึ่งแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ในประเทศ ประกอบกับ ไฮโดรคอลลอยด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาแพงและค่าใช้จ่ายในการส่งสินค้าสูง จึงถือเป็นทางเลือกใหม่ในการนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมาช่วยลดต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมไอศกรีม

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคปปา-คาราจีแนนและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิล แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไคสตาร์ซฟอสเฟตหรือ โลกัสบีนกัมกับแคปปา-คาราจีแนนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครส ระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม และคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความแข็ง อัตราการละลาย ค่าการขึ้นฟู ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังร่วมหรือทดแทนการใช้สารให้ความคงตัวทางการค้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิล แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไคสตาร์ซฟอสเฟต โลกัสบีนกัมกับแคปปา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสและระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิล แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไคสตาร์ซฟอสเฟต โลกัสบีนกัมกับแคปปา-คาราจีแนนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

1.2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิทยากระแสและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งของไอศกรีมเมื่อมีการใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิล แป้งไฮดรอกซีโพรพิล-ไคสตาร์ซฟอสเฟต โลกัสบีนกัมกับแคปปา-คาราจีแนน

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับแคปไซ-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบสารละลายซูโครสและระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมให้ผลเช่นเดียวกับ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนน

1.3.2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับแคปไซ-คาราจีแนนในส่วนผสมพร้อม ทำไอศกรีมสามารถชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมให้ผลเช่นเดียวกับปฏิสัมพันธ์ ระหว่างโลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนน

1.3.3 Cryo-gel และการแยกเฟส (Phase separation) ที่อาจเกิดในระบบส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมและไอศกรีมที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับแคปไซ-คาราจีแนนหรือโลคัสบีนกับกับแคปไซ- คาราจีแนนช่วยป้องกันการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมได้

1.3.4 สมบัติทางวิทยากระแสของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับแคปไซ-คาราจีแนนหรือ โลคัส- บีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนนมีความสัมพันธ์กับการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม

### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ไอศกรีมนม ดัดแปลงจากสูตร ไอศกรีมทางการค้า (Marshall, Goff and Hartel, 2003) ประกอบด้วย ไขมันเนย (Butter fat) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก น้ำตาลทรายขาว (Sucrose) ร้อยละ 12 และร้อย ละ 16 โดยน้ำหนัก โลคัสบีนกับ (Locust bean gum) หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ร้อยละ 0.2775 โดย น้ำหนัก แคปไซ-คาราจีแนน (K-carrageenan) ร้อยละ 0.015 โดยน้ำหนัก ส่วนของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน เนย (Milk solid not fat, MSNF) ซึ่งได้จากนมผงพร้อมมันเนย (Skim milk powder, SMP) ร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก และอิมัลซิไฟเออร์ Tween 80 ร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

1.4.2 ไอศกรีมนมที่เป็นสูตรควบคุม (Control) มีส่วนประกอบเหมือน ไอศกรีมนมในข้อ 1.4.1 แต่ไม่เติมสารให้ความคงตัว (Stabilizer)

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

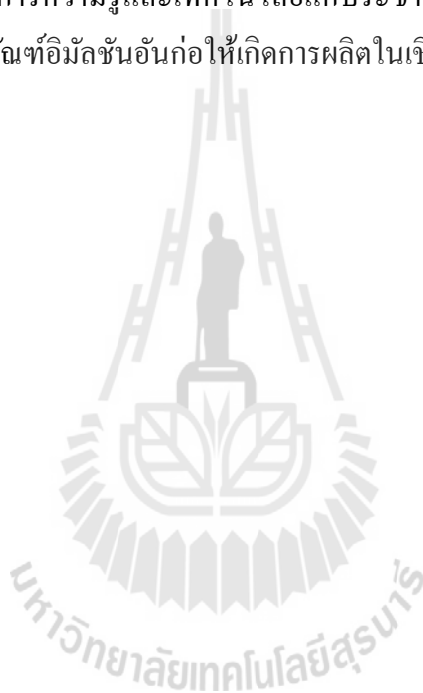
การวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 2 ชนิดคือ 1) แป้ง ไฮโดรอกซีโพรพิลและ 2) แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไคสตาร์ชฟอสเฟตกับแคปไซ-คาราจีแนน เปรียบเทียบกับผล ของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง โลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนน ต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสของระบบ สารละลายซูโครสและระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมขนาดของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ค่า ร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็ง ค่าความแข็ง ค่าการขึ้น โฟม และอัตราการหลอมละลายของผลิตภัณฑ์ ไอศกรีม

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้รับองค์ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรและแคลปา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสและการตกผลึกของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งในไอศกรีม ซึ่งผลที่ได้มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

1.6.2 สามารถปรับเปลี่ยนหรือเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังตัดแปรซึ่งผลิตมากในประเทศเพื่อใช้ร่วมหรือทดแทนการใช้สารให้ความคงตัวทางการค้าในสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

1.6.3 สามารถเผยแพร่องค์ความรู้ต่อผู้วิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องหรือนักวิจัยผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ทั้งนี้ยังเป็นการบริการความรู้และเทคโนโลยีแก่ประชาชนและ/หรือภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ไอศกรีมหรือผลิตภัณฑ์อิมัลชันอันก่อให้เกิดการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไอศกรีม

ไอศกรีม เป็นระบบคอลลอยด์หรือระบบอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water) ประกอบด้วยฟองอากาศ (Air bubble) ผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) เม็ดไขมันที่เกิดจากการรวมตัวกันบางส่วน (Partially-coalesced fat globule) เป็น โครงสร้างตาข่ายของไขมัน (Fat network) โดยที่ส่วนประกอบเหล่านี้กระจายตัวอยู่ในส่วนของของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen mix) ที่มีน้ำตาล โปรตีน โพลีแซคคาไรด์และน้ำ (Marshall, Goff and Hartel, 2003) เนื่องจากไอศกรีมมีส่วนประกอบหลายชนิด ได้แก่ นมผง (Milk powder) ไขมันเนย (Butter fat) สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizers) สารให้ความหวาน (Sweetener) เป็นต้นซึ่งส่วนประกอบแต่ละชนิดล้วนมีความสำคัญต่อคุณภาพของไอศกรีมต่างกัน เช่น ไขมัน ช่วยเพิ่มรสชาติทำให้ไอศกรีมมีเนื้อนุ่ม สารให้ความหวานช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของไอศกรีมและช่วยเพิ่มรสชาติ เป็นต้น (วรรณฯ ตั้งเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2531)

การใส่ส่วนผสมที่สมดุลจะทำให้ได้ไอศกรีมที่มีลักษณะดี เนื้อเนียน เมื่อผ่านการปั่น (Freezing) จะทำให้ไอศกรีมมีอัตราการขึ้น โฟม (Overrun) สูง มีอัตราการหลอมละลาย (Melting rate) ต่ำโดยส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมเหล่านี้มีบทบาทและหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

##### 2.1.1 ไขมัน

ไขมันเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญใน ไอศกรีม โดยจะทำหน้าที่ให้กลิ่นรส ความรู้สึกในปาก (Mouth-feel) ช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเป็นเนื้ออาหาร นอกจากนี้ยังช่วยให้ไอศกรีมมีรสมันอร่อย เนื้อสัมผัสเรียบเนียน เนื่องจากไขมันช่วยทำให้ฟองอากาศใน โครงสร้างของ ไอศกรีมมีขนาดเล็กและละเอียด (Varnam and Sutherland, 1994; Marshall et al., 2003) โดยปริมาณไขมันตามมาตรฐานกำหนด ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2544 กำหนดไว้ว่าไอศกรีมคัดแปลงต้องมีไขมันทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก (กองบรรณาธิการ TRN, 2550) โดยไขมันนมจัดเป็นแหล่งไขมันหลักที่ใช้ในการผลิต ไอศกรีม

##### 2.1.2 ไขมันนมไม่รวมมันเนย (Milk solid not fat, MSNF)

ไขมันนมไม่รวมมันเนย มีหน้าที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อไอศกรีม เนื่องจากโปรตีนช่วยเพิ่มเนื้อและต้านแรงกัศเคียวให้กับ ไอศกรีม ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการใน ไอศกรีม ทำให้อัตราการขึ้น โฟมสูงขึ้นโดยไม่ทำให้เนื้อ ไอศกรีมแตกง่าย แหล่งของ MSNF ที่ดีที่สุด คือ นมสด แต่เนื่องจาก นมสดในประเทศไทยมีราคาสูง การขนส่งและเก็บรักษายาก ดังนั้นเราจึงนิยมใช้นมผงชนิดต่าง ๆ แทนการใช้นมสด

แหล่งของ MSNF ที่มักใช้ในการผลิตไอศกรีมคือ นมผงขาดมันเนย นมข้นจืด นมข้นหวาน นมผง เวย์โปรตีน และเคซีนท เป็นต้น (กองบรรณาธิการ TRN, 2550)

### 2.1.2 สารให้ความหวาน

สารให้ความหวานที่นำมาใช้ในไอศกรีมมีหลายชนิด ได้แก่ ซูโครส (Sucrose) กลูโคส (Glucose) ฟรุคโตส (Fructose) น้ำผึ้ง (Honey) และคอร์นไซรัป (Corn syrup) เป็นต้น สารให้ความหวาน นอกจากจะให้ความหวานแก่ผลิตภัณฑ์แล้วยังช่วยเพิ่มความหนืด (Viscosity) เพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไอศกรีมให้ดีขึ้น และลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของสารให้ความหวานมีผลต่อจุดเยือกแข็งของไอศกรีม โดยสารให้ความหวานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะทำให้จุดเยือกแข็งของไอศกรีมลดลงได้มากกว่าสารให้ความหวานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่แข็งตัวในไอศกรีมหลังการปั่นไอศกรีม (Hartel, 2001)

### 2.1.3 สารให้ความคงตัว

สารให้ความคงตัวเป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ ที่ช่วยให้ความคงตัวต่อผลิตภัณฑ์ โดยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็ง สารที่มักนำมาใช้เป็นสารให้ความคงตัว ได้แก่ โลกัสบีนัม (Locust bean gum) กัวร์กัม (Guar gum) แซนแทนกัม (Xanthan gum) โซเดียมแอลจิเนต (Sodium alginate) และคาราจีแนน (Carrageenan) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose) เป็นต้น สารให้ความคงตัวสามารถช่วยป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ในไอศกรีมโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะการเก็บที่อุณหภูมิไม่คงที่ สารให้ความคงตัว ทุกชนิดมีสมบัติในการอุ้มน้ำสูง ซึ่งมีผลทำให้เนื้อสัมผัสเรียบเนียน และช่วยให้ไอศกรีมละลายช้าลง แต่ไม่มีผลต่อจุดเยือกแข็ง (Marshall et al., 2003) ในอุตสาหกรรมไอศกรีมมักใช้สารให้ความคงตัวหลายชนิดร่วมกัน หรือใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งจะทำได้ผลดีกว่าการใช้สารให้ความคงตัวหรืออิมัลซิไฟเออร์เดี่ยว ๆ (กองบรรณาธิการ TRN, 2550) การใช้สารให้ความคงตัวมากเกินไปจะทำให้ไอศกรีม มีเนื้อหยาบและมีลักษณะเนื้อแน่นเกินไป (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ, 2531) นอกจากนี้ปริมาณและชนิดของสารให้ความคงตัวที่ใช้ยังขึ้นกับองค์ประกอบหรือชนิดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เวลาในการแปรรูป ความดัน อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเก็บรักษา (Hartel, 1996)

### 2.1.4 อิมัลซิไฟเออร์

อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) เป็นสารที่มีทั้งส่วนที่สามารถสร้างพันธะกับน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่สามารถสร้างพันธะกับไขมัน (Lypophilic) จึงสามารถที่จะแทรกอยู่ที่ผิวระหว่างเม็ดไขมันและน้ำในเนื้อไอศกรีม ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำและไขมัน ทำให้ไอศกรีมคงลักษณะอิมัลชันไว้ได้ ไม่เกิดการแยกชั้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการคักอากาศ การขึ้นโฟมของไอศกรีม และความนุ่มเนียนของไอศกรีม นอกจากนี้ยังช่วยให้ไอศกรีมมีรอยละของการขึ้น โฟมสม่ำเสมอ ฟองอากาศมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างของไอศกรีม อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ส่วนมากเป็นสารพวกโมโนกลีเซอไรด์หรือไดกลีเซอไรด์ เช่น Polyethylene glycol sorbitan monostearate (Tween 60) Polyoxyethylene (80) sorbitan monooleate (Tween 80) และ กลีเซอรอล เป็นต้น

### 2.1.6 สารปรุงแต่งกลิ่นรสและสี

สารปรุงแต่งกลิ่นรสมีหน้าที่สร้างความนิยมในกลุ่มผู้บริโภค ส่วนสีจะช่วยดึงดูดความสนใจให้กับผลิตภัณฑ์ (วรรณงา ตั้งเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ, 2531) โดยสารปรุงแต่งกลิ่นรสมี 2 ชนิดคือ ละลายได้ในน้ำและละลายได้ในน้ำมัน ซึ่งสารปรุงแต่งกลิ่นรสและสีอาจได้มาจากธรรมชาติ (Natural colors) หรือจากการสังเคราะห์ (Synthetic colors) โดยสารปรุงแต่งกลิ่นรสและสีที่ได้จากธรรมชาติมีความสามารถในการละลายดี แต่ราคาค่อนข้างแพงและอาจต้องใช้ในปริมาณที่มาก (Clarke, 2004)

## 2.2 ขั้นตอนการผลิตไอศกรีมในระดับอุตสาหกรรม

### 2.2.1 การคำนวณส่วนผสมไอศกรีม

การคำนวณส่วนผสมไอศกรีมจะเริ่มจากการกำหนดสูตรไอศกรีมที่ต้องการขึ้นมา จากนั้นจึงกำหนดส่วนประกอบไอศกรีม ปริมาณที่ต้องการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต องค์ประกอบของสารอาหารในวัตถุดิบ แล้วจึงคำนวณหาหน้าหนักของส่วนผสมต่าง ๆ ในไอศกรีม

### 2.2.2 การเตรียมส่วนผสมไอศกรีม

ในการเตรียมส่วนผสมไอศกรีมจะต้องชั่งน้ำหนักของส่วนผสมต่าง ๆ ที่จะใช้ในสูตรแล้วจึงทำการผสม โดยเริ่มจากการผสมส่วนที่เป็นของเหลวก่อน เช่น ครีม นม นมข้น น้ำเชื่อม และอื่น ๆ แล้วจึงค่อย ๆ ให้ความร้อน พร้อมทั้งคนส่วนผสมไปเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส จึงเติมวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง เช่น ชาติุน้ำมันไม่รวมมันเนย น้ำตาล และสารให้ความคงตัว จากนั้นคนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน

ตารางที่ 2.1 เวลาและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

Method	Time	Temperature (°C/°F)
Batch	30 min	69/155
High-Temperature Short time (HTST)	25s	80/175
High-Heat Short time (HHST)	1-3s	90/194
Ultra High Temperature	> 2s	132/280

แหล่งที่มา: Marshall et al. (2003)

### 2.2.3 กระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน (Pasteurization)

หลังจากที่คนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันและส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบแห้งละลายดีแล้วจึงจะเริ่มทำการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurize) ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค การพาสเจอร์ไรซ์ที่เหมาะสมนั้นควรให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่



กำหนดอย่างรวดเร็วและคงที่ ณ อุณหภูมินั้นตามเวลาที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส

#### 2.2.4 โฮโมจีไนเซชัน (Homogenization)

การโฮโมจีไนเซชัน เป็นการลดขนาดของอนุภาคในเฟสกระจาย โดยทำให้เม็ดไขมันที่อยู่ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแตกตัวมีขนาดประมาณ 0.5-3 ไมครอน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของอนุภาคเม็ดไขมันให้มากขึ้น ในกระบวนการนี้จะใช้ความดันสองระดับ โดยความดันที่หนึ่งมีค่าประมาณ 2500-3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าความดันที่สองประมาณ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อสิ้นสุดกระบวนการโฮโมจีไนเซชันจะทำให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นเนื้อเดียวกันและมีความคงตัวเพิ่มขึ้นทำให้เกิดรูปที่เป็นอิมัลชัน และทำให้การปั่นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นไปได้โดยง่าย รวดเร็ว ส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อนุ่ม นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณสารให้ความคงตัวที่ใช้ให้น้อยลง การเพิ่มปริมาณไขมันมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการโฮโมจีไนเซชันลดลงและทำให้เม็ดไขมันมีขนาดใหญ่ขึ้น (วิลโลว์ รังสาทอง, 2547)

#### 2.2.5 การบ่ม (Aging)

การบ่มเป็นกรรมวิธีการเก็บรักษาส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่อุณหภูมิประมาณ 2-4 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มจะนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารให้ความคงตัวและอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ ในการบ่มต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำให้ไขมันละลายจับตัวเป็นของแข็งเกิดการดูดซับของโปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบที่ผิวเม็ดไขมัน รวมทั้งเกิดการอุ้มน้ำของโปรตีนและสารให้ความคงตัว (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ, 2531)

#### 2.2.6 การปั่นไอศกรีม (Freezing)

หลังจากบ่มส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแล้ว นำส่วนผสมดังกล่าวไปเติมอากาศเข้าไปในโครงสร้างของไอศกรีมด้วยเครื่องปั่นไอศกรีม ซึ่งเครื่องปั่นจะมีสารฟริออนหรือแอมโมเนียเป็นสารทำให้เย็น (Coolant) และมีใบมีดขูดผิวผนังภายในเครื่องปั่น เพื่อให้ น้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเปลี่ยนสถานะ น้ำเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งอย่างสม่ำเสมอภายในเครื่อง การเติมอากาศเข้าไปจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เราจะสามารถวัดปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งค่าที่ได้เรียกว่า ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม

#### 2.2.7 การแช่แข็ง (Hardening)

การแช่แข็งเป็นขั้นตอนในการรักษาลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมให้คงอยู่ เนื่องจากไอศกรีมที่ออกจากเครื่องปั่นจะมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ไม่สามารถคงรูปร่างได้ การแช่แข็งในภาชนะบรรจุลดลงเหลือ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า นิยมทำที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส ถึง -30 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการแช่แข็งนี้จะทำให้ไอศกรีมมีปริมาณน้ำที่แข็งตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเพิ่มขึ้น และทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมลดลงจนถึงจุดหนึ่งที่ไม่มีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นอีก ดังนั้นน้ำในไอศกรีมจึงไม่สามารถแข็งตัวได้ทั้งหมด (วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ, 2531)

## 2.2.8 การเก็บรักษา

หลังจากไอศกรีมผ่านการแช่แข็งอาจจำหน่ายทันที หรือเก็บรักษาไว้ไม่เกิน 1-2 สัปดาห์ อาจใช้ห้องแช่แข็งเป็นห้องเก็บรักษาหรือแยกไอศกรีมเก็บไว้ในห้องเก็บรักษาต่างหาก โดยมีอุณหภูมิในช่วง -18 องศาเซลเซียส ถึง -23 องศาเซลเซียส

## 2.3 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม

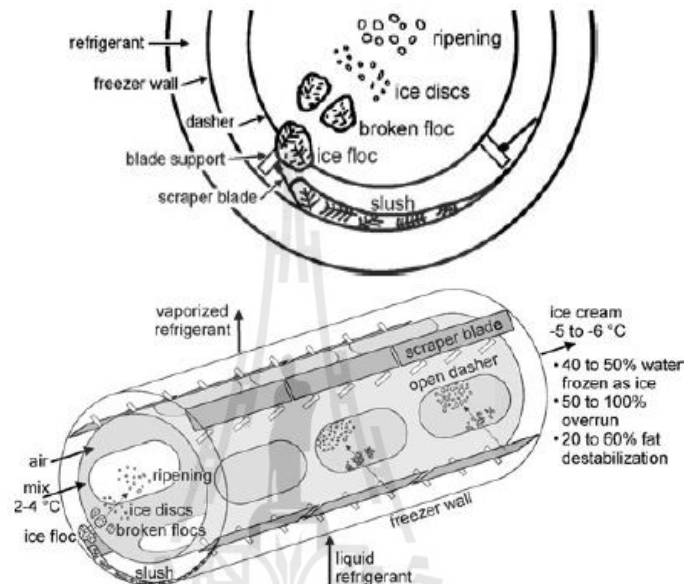
### 2.3.1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystallization) ในไอศกรีม

น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดภายในไอศกรีม ซึ่งจะมีทั้งน้ำที่ผสมลงไปโดยตรงหรือมาจากส่วนผสมต่าง ๆ ได้แก่ น้านม ไข่เหลว น้ำเชื่อม และผลไม้ เป็นต้น โดยจะพบอยู่ในรูปที่เป็นผลึกน้ำแข็งเกือบทั้งหมด น้ำในรูปของผลึกน้ำแข็งเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ไอศกรีมสร้างความรู้สึกสดชื่นแก่ผู้บริโภค ซึ่งน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมประมาณร้อยละ 50 จะถูกเปลี่ยนจากน้ำเป็นน้ำแข็ง ในระหว่างการปั่นไอศกรีมและอีกร้อยละ 50 ในระหว่างการแช่แข็ง (Hardening) (Andreasen and Nielsen, 1998) เนื่องจากไอศกรีมที่ได้จากเครื่องปั่นไอศกรีมมีลักษณะที่ค่อนข้างเหลว ไม่มีรูปร่างที่คงตัว การแช่แข็งทันทีหลังจากปั่นไอศกรีมจะช่วยลดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บไอศกรีม (Ruger, Baer and Kasperson, 2002) Hartel (1996) รายงานว่าความสามารถในการควบคุมการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการผลิตไอศกรีมเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาเนื้อสัมผัส คุณภาพ และอายุการเก็บรักษาไอศกรีม เมื่อเข้าใจกระบวนการเกิดผลึกน้ำแข็ง ตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งในกระบวนการผลิต จะนำไปสู่การปรับปรุงเทคนิคในด้านกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งไอศกรีมที่มีคุณลักษณะดีที่สุด นอกจากนี้การวัดขนาดและการติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมยังเกี่ยวข้องกับการยอมรับของผู้บริโภคโดยตรง โดยขนาดของผลึกน้ำแข็งวิกฤตที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ (Critical threshold detection) ขณะบริโภคไอศกรีมจะอยู่ในช่วง 20-55 ไมโครเมตร (Hartel, 1996) โดยจะถือว่าขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกินกว่าช่วงที่กำหนดเป็นตำหนิของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ผู้ผลิตสามารถตรวจสอบเบื้องต้น อีกทั้งยังสามารถใช้ทำนายอายุการเก็บหรืออุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง

ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการปั่น (Freezing) ไอศกรีม ซึ่งเริ่มจากการนำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเข้าสู่เครื่องปั่นไอศกรีมหรือเครื่องแลกเปลี่ยนความเย็นแบบมีใบมีดขูดผิว (Scraped-surface freezer) ที่มีสารฟรอนหรือแอมโมเนียเป็นสารทำให้เย็น โดยสารทำให้เย็นนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Freezing point) และเกิดนิวเคลียสน้ำแข็ง (Nucleation) จากนั้นนิวเคลียสน้ำแข็งนี้จะขยายขนาดกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) ซึ่งผลึกน้ำแข็งจะเกิดบริเวณผนังด้านในของเครื่องปั่นไอศกรีม จากนั้นใบมีดจะขูดที่ผิวของผนังเครื่องทำให้ผลึกน้ำแข็งมารวมอยู่บริเวณตรงกลางของเครื่องปั่นไอศกรีม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดผลึกน้ำแข็งในระบบสารให้ความหวาน เช่น ศึกษาในระบบสารละลายซูโครส ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม และไอศกรีมที่พบในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น Sodawala and Garside (1990) ศึกษาการเกิดผลึกน้ำแข็งในเครื่องแลกเปลี่ยนความเย็นแบบมีใบมีดขูดผิว ใช้สาร

ละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 10 อธิบายการเกิดผลึกน้ำแข็งด้วยภาพวิดีโอที่ได้จากการบันทึกภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Videomicroscope) Si (2000) ศึกษาสถานะของกระบวนการผลิตไอศกรีมและอธิบายกลไกการเกิดผลึกน้ำแข็งในสารละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 40 โดยดูผ่านกล้องจุลทรรศน์ พบว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 450 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความเย็นแบบมีใบมีดขูดผิวในกระบวนการผลิตไอศกรีม  
แหล่งที่มา: Hartel (1996)

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเกิดผลึกน้ำแข็ง (Factor affecting ice crystallization)

การเกิดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมมีผลจากหลายปัจจัย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ

#### 2.3.2.1 ผลที่มาจากส่วนผสมของไอศกรีม (Formulation effects)

ไอศกรีมประกอบด้วยส่วนผสมหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2.1 ซึ่งส่วนประกอบแต่ละชนิดล้วนมีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม (Julien, 1985; Flack; 1989) Arbuckle (1986) อธิบายว่าส่วนผสมแต่ละชนิดและปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนผสมที่ใช้ มีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมดังนี้

ก) ปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เนื่องจากน้ำมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนสถานะ Glass transition ปริมาณน้ำยังบ่งบอกถึงปริมาณของแข็ง (Total solids) เมื่อศึกษาในสถานะการผลิตเดียวกัน Donhowe, Hartel and Bradley (1991) พบว่าผลึกน้ำแข็งของไอศกรีมที่มีปริมาณของแข็งต่ำจะมีขนาดใหญ่กว่าผลึกน้ำแข็งของไอศกรีมที่มีปริมาณของแข็งสูง เนื่องจาก ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีปริมาณของแข็งต่ำ จะมีปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูง ทำให้ไอศกรีมหลังผ่าน

การบ่มจะมีสัดส่วนของปริมาณผลึกน้ำแข็งในส่วนของน้ำที่แข็งตัว (Ice phase) ต่อปริมาณน้ำทั้งหมดมากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีปริมาณของแข็งสูง เมื่อศึกษาด้วยสภาวะการผลิตเดียวกัน

ข) ชนิดและระดับความเข้มข้นของสารให้ความหวาน เนื่องจากสารให้ความหวานมีผลต่อจุดเยือกแข็งและการเปลี่ยนสถานะ Glass transition โดยพบว่าจุดเยือกแข็งจะแปรตามขนาดและจำนวนโมเลกุลของตัวถูกละลาย Hartel (2001) ทำการเปรียบเทียบผลของสารให้ความหวาน 4 ชนิดต่ออุณหภูมิจุดเยือกแข็ง พบว่า ฟรุคโตสจะลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมได้มากกว่าซูโครสที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน เนื่องจากฟรุคโตสมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จะสามารถเข้าจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่า และเปรียบเทียบผลของคอร์นไซรัป 42DE กับซูโครส พบว่าคอร์นไซรัป 42DE จะมีจุดเยือกแข็งสูงกว่าซูโครส เนื่องจากคอร์นไซรัปเป็นสารพวกแซคคาไรด์สายยาว (Long chain saccharides) ซึ่งสามารถขัดขวางและยับยั้งการเคลื่อนที่เข้าหากันของโมเลกุลน้ำ ส่งผลให้การก่อตัวของนิวเคลียสผลึกน้ำแข็งทำได้ยากและต้องอาศัยระยะเวลาานาน ส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าซูโครส ดังนั้นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารให้ความหวานในปริมาณสูงหรือสารให้ความหวานที่มีมวลโมเลกุลต่ำในปริมาณสูงจะมีค่าจุดเยือกแข็งต่ำ เช่น ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีค่าปริมาณฟรุคโตสสูงใน High fructose corn syrup (HFCS) จะมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับซูโครส

ค) การเพิ่มปริมาณไขมัน (Fat content) เมื่อปริมาณไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่ใช้ในสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก็จะลดลง ส่งผลให้น้ำในสถานะที่เป็นผลึกน้ำแข็ง (Ice-phase volume) ลดลง ดังนั้นขนาดผลึกน้ำแข็งเฉลี่ยเล็กลง (Arbuckle, 1986; Keeney and Kroger, 1974)

ง) ปริมาณธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนย (Milk-solids-not-fat, MSNF) ที่ใส่ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะบอกถึงระดับความเข้มข้นของแลคโตส (Lactose) ปริมาณโปรตีน (Proteins) และเกลือ (Salts) โดยปริมาณ MSNF ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะส่งผลต่อการลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม และการเปลี่ยนสถานะ glass transition ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีปริมาณของ MSNF สูงจะมีจุดเยือกแข็งต่ำ (Hartel, 2001) เมื่อปริมาณ MSNF ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูงขนาดของผลึกน้ำแข็งเฉลี่ยจะมีค่าลดลง (Arbuckle, 1986)

จ) อิมัลซิไฟเออร์ เป็นส่วนประกอบที่มีผลโดยตรงต่อผิวหน้าของเม็ดไขมัน (Fat globules) โดยมีผลต่อการเกิด Fat destabilization ขนาดของฟองอากาศ (Air cells) แต่จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อขนาดของผลึกน้ำแข็ง โดยผลึกน้ำแข็งจะได้รับอิทธิพลจากขนาดของฟองอากาศและปริมาณเม็ดไขมัน Arbuckle (1986) พบว่าในไอศกรีมที่มีอิมัลซิไฟเออร์ จะมีผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่าที่ไม่ใส่อิมัลซิไฟเออร์

ฉ) สารให้ความคงตัว เป็นสารที่เติมลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพื่อควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่เกิดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง (Ice recrystallization) โดยที่ระดับความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.3 ของสารให้ความคงตัวจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะ glass transition (Goff, Caldwell and Stanley, 1993) การใส่สารให้ความคงตัวส่งผลให้ความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และช่วยลดอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งใน

ระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต้นแบบ (Cottrell, Pass and Phillips, 1980) Caldwell (1992) พบว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใส่สารให้ความคงตัวจะมีขนาดเล็กกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัว

### 2.3.2.2 ผลที่มาจากกระบวนการผลิต (Processing effects)

Hartel (1996) รายงานว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และจำนวนของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม คือ เครื่องปั่น ไอศกรีมและสภาวะของกระบวนการผลิตไอศกรีม เครื่องปั่นไอศกรีมมีหลายชนิด หลายแบบให้เลือกใช้ ประกอบกับในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องปั่นไอศกรีมให้ดียิ่งขึ้น โดยเครื่องปั่นที่ได้รับความนิยมคือ เครื่องปั่นแบบมีใบมีดชุดผิว ทั้งในกระบวนการผลิตไอศกรีมแบบกะ (Batch process) และแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั่น ไอศกรีมคือความสามารถของเครื่องในการลดอุณหภูมิส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Draw temperature) หรืออัตราการนำความร้อนออกจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Rate of heat removal) ถ้าเครื่องปั่นสามารถนำความร้อนออกจากส่วนผสมได้เร็ว จะเกิดนิวเคลียสผลึกเป็นจำนวนมากทำให้ปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก (Goff, www, 1995)

### 2.3.3 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง (Ice recrystallization)

การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่แข็งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลึกน้ำแข็ง เช่น จำนวน ขนาด รูปร่าง หรือการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็ง พบในอาหารหลายชนิด รวมทั้งน้ำแข็งบริสุทธิ์ ไอศกรีม น้ำผลไม้แช่แข็ง เนื้อเยื่อพืช และเนื้อสัตว์แช่เยือกแข็ง อัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและธรรมชาติของอาหาร (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)

การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งใน ไอศกรีม เป็นลักษณะของเกล็ดน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal nucleation) และการโตของผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal growth) ในกระบวนการผลิตที่เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากการหลอมและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง ในระหว่างการเก็บรักษาหรือการขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของไอศกรีมขึ้นลงตลอดเวลา (Goff, 1999; Kennedy, 2000) ส่งผลให้เกิดลักษณะที่เป็นตำหนิของไอศกรีม ในการควบคุมคุณภาพของไอศกรีมจะมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็งและหาอัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง (Hartel, 2001)

มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับผลของสารให้ความคงตัวที่สามารถยับยั้งการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งเช่น Miller-Livney and Hartel (1997) ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัวและสารให้ความหวานที่มีผลต่อการชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยใช้สารให้ความหวาน 4 ชนิด คือ คอร์นไซรัป 20DE คอร์นไซรัป 42DE ไฮฟรุกโตสคอร์นไซรัป และซูโครสกับสารให้ความคงตัวทางการค้า 4 ชนิดคือ เจลาติน โลคัสบีนกัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน พบว่าคาราจีแนนและโลคัสบีนกัม มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการชะลอการโตของผลึกน้ำแข็ง โดยอธิบายผลของสารให้ความคงตัวที่มีต่อการโตของผลึกน้ำแข็งว่ามาจากความสามารถของโครงสร้างในการกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ

(Steric hindrance) ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการเก็บไอศกรีม ซึ่งมีส่วนในการชะลอการโตของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมได้

Goff, Ferdinando, and Schorsch (1999) ศึกษาผลของโลคัสปินกัม และกัวร์กัม ต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสและสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีโปรตีนนม พบโครงสร้างตาข่ายของเจลในระบบที่มีโลคัสปินกัม และโปรตีนนม แต่ไม่พบในระบบที่มีกัวร์กัม และโปรตีนนม ทั้งนี้อธิบายว่าโครงสร้างตาข่ายของเจลที่พบมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ โดยโครงสร้างที่เกิดขึ้นจะช่วยชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม ส่วนในระบบที่มีกัวร์กัมและโปรตีนนมซึ่งสามารถชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งน่าจะมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในส่วนหนึ่งของของเหลวที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen phase) รอบ ๆ ผลึกน้ำแข็ง (Goff, 1995) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Regand and Goff (2002) ที่ศึกษาผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แซนแทนกัม โลคัสปินกัม และเจลาตินต่อโครงสร้างและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในระบบไอศกรีม พบว่าแซนแทนกัมหรือโลคัส-ปินกัม ในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสสามารถชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง แต่ในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มี SMP พบว่า แซนแทนกัมเพียงชนิดเดียวที่มีผลในการชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง โดยอธิบายผลของความสามารถในการชะลอการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งว่ามีผลเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างตาข่ายของเจล (Gel network) ของโลคัสปินกัมระหว่างการทำ Freezing-thawing cycles (Blond, 1988; Muhr and Blashard, 1986) อีกที่ เกิด Thermodynamic incompatibility ระหว่างสารให้ความคงตัวและ SMP ในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสอีกด้วย

Patmore, Goff and Fernandes (2003) ศึกษาผลของกาแลกโทแมนแนน 2 ชนิดคือ โลคัสปินกัม และกัวร์กัมที่มีผลต่อระบบไอศกรีม พบว่า โลคัสปินกัมและกัวร์กัมช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสเนียน (Smooth texture) สามารถชะลอการโตของผลึกน้ำแข็งระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ (Constant temperature) และอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง (Fluctuating temperature) ซึ่ง โลคัสปินกัมจะสร้างโครงสร้างตาข่ายเจลแบบอ่อน (Weak gel network) ในระหว่างการทำ Temperature cycling ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติม MSNF โดยไม่พบลักษณะดังกล่าวในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีกัวร์กัม

### 2.3.4 ประเภทของการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม

ประเภทของการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

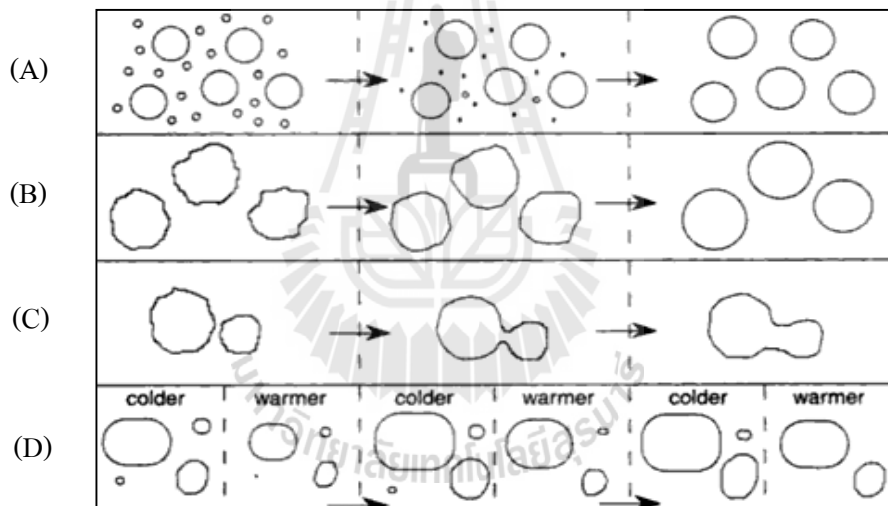
2.3.4.1 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบออสวาล์ไรเฟนนิ่ง (Oswald ripening) เป็นลักษณะการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ขยายโตขึ้นจากการใช้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ส่งผลให้ขนาดเล็กของผลึกน้ำแข็งมีขนาดเพิ่มขึ้น จำนวนผลึกน้ำแข็งลดลง และพลังงานบริเวณผิวหน้าของผลึกน้ำแข็งลดลง ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ การเกิดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบนี้ เป็นผลมาจากความแตกต่างของพลังงานบริเวณผิวหน้าระหว่างผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่และผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก

2.3.4.2 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบไอโซแมส (Isomass) การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบนี้เกิดขึ้น เมื่อผลึกน้ำแข็งมีรูปร่างไม่แน่นอน และอัตราส่วนของผิวหน้าต่อปริมาตรมีค่ามากซึ่งจะทำให้ผลึกน้ำแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีอัตราส่วนของผิวหน้าน้อยลง โดยการตกผลึกของผลึก

น้ำแข็งแบบนี้ จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อผลึกน้ำแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมหรืออัตราส่วนของผิวหน้าผลึกน้ำแข็งมีค่าน้อย ส่งผลให้ขนาดผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้นและมีลักษณะเป็นทรงกลมมากขึ้น

2.3.4.3 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบแอครีชัน (Accretion) เกิดจากผลึกน้ำแข็งที่อยู่ใกล้กันหรือผลึกน้ำแข็งที่สัมผัสกันสามารถรวมตัวเข้าด้วยกันทำให้ขนาดผลึกน้ำแข็งเพิ่มขึ้น แต่จำนวนผลึกน้ำแข็งลดลง และทำให้พลังงานผิวหน้าผลึกน้ำแข็งทั้งหมดลดลงด้วย เนื่องจากอาหารที่มีผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก จะมีการสัมผัสระหว่างผลึกน้ำแข็งจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบนี้ต้องอาศัยการสัมผัสระหว่างผลึกน้ำแข็งที่มีมากพอจึงจะทำให้เกิดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบนี้ได้

2.3.4.4 การตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบ Melt-refreeze เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลึกน้ำแข็งจะละลายส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กลง แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลง น้ำบริเวณใกล้ ๆ กับผลึกน้ำแข็งจะแข็งตัวรวมกับผลึกน้ำแข็ง จึงส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการเกิดการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม (A) Oswald ripening

(B) Isomass (C) Accretion (D) Melt-refreeze

แหล่งที่มา: Goff and Hartel (2005)

## 2.4 แป้งดัดแปร (Modified Starch)

แป้งดัดแปรตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (Starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ (สุพะไซย์ จินดาอุทัยกุล, 2545) ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่าง ๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) เนื่องจากแป้งดิบโดยทั่วไปมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการผลิตทาง

อุตสาหกรรม เช่น ความหนืดของแป้งไม่คงที่ตลอดกระบวนการผลิต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำ จึงมีการนำแป้งมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเหมาะสมก่อนการนำไปใช้งาน โดยการดัดแปรแป้งมี 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี (Chemical modification) วิธีทางกายภาพ (Physical modification) และ วิธีทางชีวภาพ (Biological modification) แป้งดัดแปรที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ในปัจจุบันมีการนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งมากขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มของแป้งดัดแปรเคมีที่มีการแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้งในปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน มี 3 ประเภทได้แก่ ไฮดรอกซีแอลคิลสตาร์ช (Hydroxyalkyl starch) หรือแป้งไม่มีประจุคาร์บอกซิเมทิลสตาร์ช (Carboxymethyl starch) หรือแป้งประจุลบ และแคทไอออนิกสตาร์ช (Cationic starch) หรือ แป้งประจุบวก ซึ่งแป้งไฮดรอกซีแอลคิลสตาร์ช หรือแป้งไม่มีประจุจัดว่าเป็นแป้งที่มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งการละลาย (Freeze-thaw stability) และมีความคงตัวต่อการเก็บในที่เย็น แป้งเปียกมีความใส มีเนื้อสัมผัสที่ดีเหมาะสำหรับการใช้กับอาหารที่ต้องเก็บในสถานะแช่เย็น (Tuschhoff, 1986)

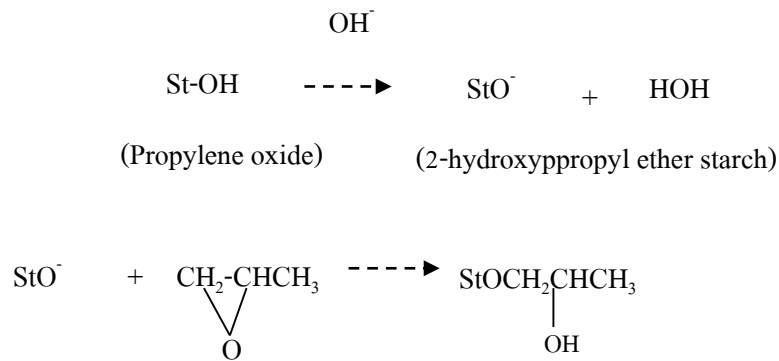
แป้งไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช หรือแป้ง HPS เป็นแป้งในกลุ่มไฮดรอกซีแอลคิลสตาร์ช ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน โดยทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน จากนั้นจึงค่อยทำปฏิกิริยากับโพรพิลีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การดำเนินปฏิกิริยาจะทำในสถานะเบสและเกิดการแทนที่ตรงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติในการจับกับน้ำ จะขัดขวางการเกาะจับกันของโมเลกุลสตาร์ชด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างอ่อนแอลง อุณหภูมิการเกิดเจลลัดในเซชันลดลง ความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น ความใสเพิ่มขึ้น การเกิดรีโทรกราเดชันลดลง สามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น สตาร์ชสุกมีความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลาย และการเก็บรักษาในที่เย็นจึงเหมาะกับการใช้ในอาหารที่ต้องมีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ คือ อาหารแช่เย็นและอาหารแช่เยือกแข็ง (Tuschhoff, 1986) หมู่ไฮดรอกซีโพรพิลสามารถเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและภายนอกเม็ดสตาร์ช ทำให้โครงสร้างเม็ดสตาร์ชอ่อนตัวลงและสายสตาร์ชในบริเวณออสันฐานเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากขึ้น (Choi and Kerr, 2003; Seow and Thevamalar, 1993)

นอกจากนี้การดัดแปรแป้งสามารถทำได้ด้วยวิธีการเชื่อมข้าม (Cross-link) โดยใช้สารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (Cross-link agent) เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (Sodiummetabi sulphite) ฟอสฟอรัสออกไซด์ (Phosphorus oxide) และอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) เป็นต้น เมื่อสารเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์เป็นสารที่นิยมใช้ในการผลิต Cross-linked starch esters โดยทำปฏิกิริยาที่พีเอชประมาณ 11.5 ในสถานะที่มีเกลือหรือไม่มีเกลือ ส่วนมากเกลือที่ใช้คือ โซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมซัลเฟต ซึ่งสตาร์ชดัดแปรที่ได้จัดเป็นไดสตาร์ชฟอสเฟต (Di-starch phosphate) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Wu and Seib, 1990) การเชื่อมข้ามจะเกิดพันธะโควาเลนต์ โดยพันธะที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนมีความแข็งแรงมากขึ้น ลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช อุณหภูมิการเกิดเจลลัดในเซชัน



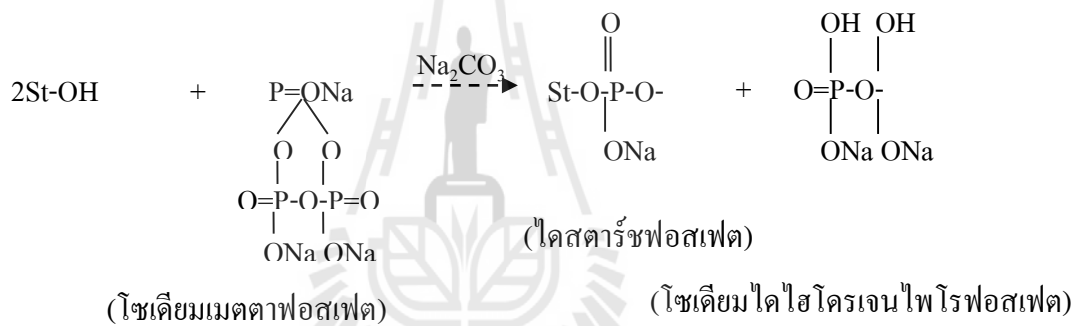
สูงขึ้น ทนต่อความร้อน แรงเหวี่ยง และความเป็นกรดในการแปรรูปอาหาร เพิ่มความหนืดของสตาร์ชที่สูง ร้อน ทำให้สตาร์ชสูญเสียลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง เพิ่มความเหนียวให้แก่สตาร์ชที่พองตัว ทำให้สตาร์ชมีลักษณะ เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แตกออกมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นหนืด ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสตาร์ชให้ เหมาะแก่การหุงต้ม เมื่อเพิ่มระดับการทำครอสลิงจะเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ชซึ่งเหมาะที่จะใช้ใน อาหารที่มีพีเอชต่ำ เช่น ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ ใส่ผลไม้สำหรับผลิตภัณฑ์ขนมอบ และอาหารที่ผ่านการ ให้ความร้อนสูง เช่น อาหารกระป๋อง เป็นต้น (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการนำแป้งคัดแปรมาใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมพบในงาน วิจัยของ ศิววัฒน์ ไทยอุดม (2548) ศึกษาผลของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสของ ไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคในไอศกรีมกะทิ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังชนิด SWI และ FT-999 พบว่า รูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมกะทิที่มีแป้งมันสำปะหลังคัดแปรเป็นแบบ Time independent shear thinning ที่มีลักษณะการไหลคล้ายการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) Thaiudom, Singchan and Saeli (2008) เปรียบเทียบผลของสารให้ความคงตัวจากแป้งมันสำปะหลังคัดแปรและสารให้ ความคงตัวทางการค้าต่ออัตราการเกิดโฟมและอัตราการขึ้นโฟมของไอศกรีม โดยใช้แป้งชัคชินิล แป้ง แอซิทิล แป้งไฮดรอกซีโพรพิล Fulfill 400 โลกัสบีนกัมและกัวร์กัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการขึ้นโฟมของไอศกรีมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อัตราการเกิดโฟมและความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพิ่มขึ้น หลังเติมสารให้ความคงตัวทาง การค้า (กัวร์กัม และ โลกัสบีนกัม) และสารให้ความคงตัวจากแป้งมันสำปะหลัง (แป้งชัคชินิลและแป้ง ไฮดรอกซีโพรพิล) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 Surapat and Rugthavon (2009) ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง  $\alpha$ -starch-MT01 โดยใช้เป็นสารทดแทนไขมันใน ไอศกรีมกะทิ ซึ่งแปรระดับการแทนที่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 8 เมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความ หนืด ค่าการขึ้นโฟมมีค่ามากขึ้น แต่ไม่มีผลต่ออัตราการละลายและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เมื่อแทนที่ ไขมันด้วยแป้ง  $\alpha$ -starch-MT01 ร้อยละ 1 ร่วมกับการใส่อิมัลซิไฟเออร์ชนิดโมโนกลีเซอไรด์หรือ ไดกลี- เซอไรด์ร้อยละ 0.1 จะช่วยปรับคุณภาพของไอศกรีมส่งผลให้มีค่าการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสมาก ที่สุด



### รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน

แหล่งที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2543)



### รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ฟอสเฟตกับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต

แหล่งที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2543)

## 2.5 การเจี๊ยน

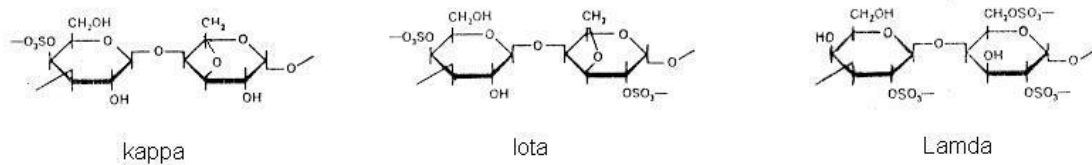
การเจี๊ยน เป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) E-number คือ E 407 ผลิตจากสาหร่ายทะเลสีแดง (Red seaweed) โมเลกุลของการเจี๊ยนเป็น โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากกาแลคโตส (Galactose) และ 3, 6 Anhydrogalactose (3, 6-AG) ที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยกรดซัลฟูริก การเจี๊ยนแต่ละประเภทมีสมบัติการละลาย (Solubility) และการเกิดเจล (Gelation) แตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามจำนวนและตำแหน่งของหมู่ซัลเฟตได้ 3 ประเภท คือ แคปปา (Kappa, **K**) ไอโอตา (Iota, **I**) และแลมดา (Lamda, **λ**) (รูปที่ 2.5)

แคปปา-การเจี๊ยน (**K-carrageenan**) ละลายได้ดีในน้ำร้อน นมร้อน และละลายได้ในน้ำเชื่อมหรือน้ำเกลือที่ร้อน (ความเข้มข้นของน้ำตาลหรือเกลือต่ำกว่าร้อยละ 50) เมื่อสารละลายแคปปา-การเจี๊ยนเย็นตัวลงจะเกิดเจล (Gel) ที่มีลักษณะแข็งเปราะ ซึ่งแคปปา-การเจี๊ยนสามารถเกิดเจลได้ทั้ง

กับน้ำและนม เจลจะแข็งแรงขึ้นถ้ามีประจุของโพแทสเซียม ( $K^+$ ) และเจลจะคงตัวต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มากกว่า 3.8 แต่เจลจะไม่ทนต่อการแช่แข็งและการละลาย (Freezing thawing stability) ไอโอตา-คาราจีแนน (Iota carrageenan) จะมีจำนวนกลุ่มซัลเฟตมากกว่าแคลป์า-คาราจีแนนประมาณร้อยละ 25-50 ทำให้ความไวต่อประจุของโพแทสเซียมลดลง เจลที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะอ่อนนุ่มกว่าเจลที่เกิดจากแคลป์า-คาราจีแนน แลมดา-คาราจีแนน (Lambda carrageenan) มีกลุ่มซัลเฟตในตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 6 และไม่เกิดการปิดวงที่คาร์บอนตำแหน่ง 3 และ 6 จึงมีผลทำให้ไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล

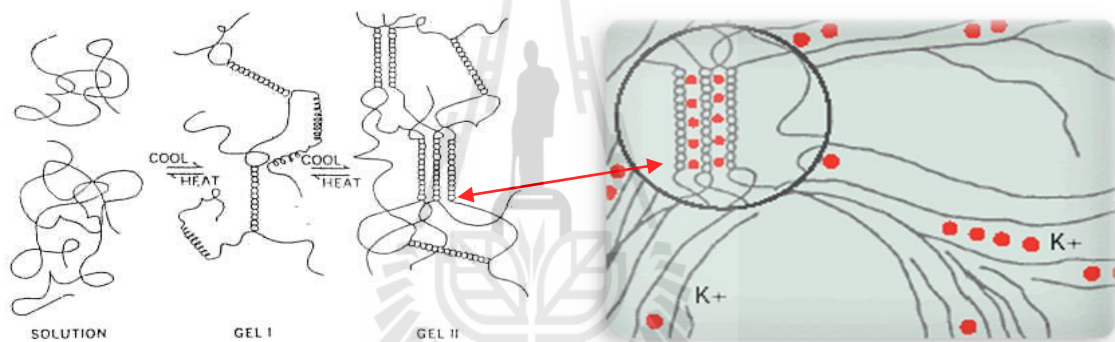
คาราจีแนนที่อยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างเป็น Random coil เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิด Polymer network เป็น 3 มิติ แต่ละสายจะรวมตัวเกิด Junction point เมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะมีการเกาะตัวกันของ Junction point มากขึ้นทำให้เกิดการแข็งตัวของเจล ซึ่งแคลป์า-คาราจีแนนและไอโอตา-คาราจีแนน จะเกิดเจลแบบ Thermoreversible aqueous gel โดยมีกลไกการเกิดเป็น Double-helix carrageenan polymers (รูปที่ 2.6) ถ้าผสม โลคัสทีนกับกับแคลป์า-คาราจีแนนจะช่วยเสริมให้มี Gel strength เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเนื้อเจลจากที่เปราะและแตกง่ายเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและเกิด Syneresis ลดลง (Spagnuolo et al., 2005) เมื่อนำคาราจีแนนไปใช้กับอาหารที่มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบ หมู่ซัลเฟตในโมเลกุลของคาราจีแนนจะสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ที่มีประจุในโมเลกุลของโปรตีนได้ การนำคาราจีแนนไปใช้ประโยชน์กับผลิตภัณฑ์นม เช่น เดิมคาราจีแนนในส่วนผสมของไอศกรีมเพื่อเป็นสารให้ความคงตัว ช่วยให้ส่วนผสมของไอศกรีมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายและ ไม่มีส่วนที่เป็นของเหลวแยกตัวออกมา (Whey off) ระหว่างการเก็บรักษา (Marshall Goff and Hartel, 2003) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แคลป์า-คาราจีแนนจะถูกใช้เป็นส่วนประกอบให้ความคงตัวอันดับสอง (Secondary stabilizer) ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Soukoulis et al., 2008) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 0.05 เพื่อป้องกันการเกิดการแยกเฟส (Phase separation) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบให้ความคงตัวอันดับหนึ่ง (Primary stabilizers) และโปรตีน โดยแรงที่กระทำจะเป็นแรงที่เกิดจากประจุ (Bourriot, Garnier and Doublier, 1999; Langendorff et al., 2000; Thaiudom and Goff, 2003; Soukoulis et al., 2008) การแยกเฟสจะเกิดจากกลไกที่เรียกว่า Depletion flocculation (รูปที่ 2.8) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ระหว่างเฟสของสารละลายไฮโดรคอลลอยด์และเฟสของสารละลายในช่องว่างระหว่างเคซีนไมเซลล์ (Casein micelle) แคลป์า-คาราจีแนนสามารถลดการการแยกเฟสได้โดยการดูดซับของสาย Helix ของแคลป์า-คาราจีแนนบนเคซีนไมเซลล์และสร้างโครงสร้างตาข่ายเจล (Gel network) ทำให้เคซีนไมเซลล์สามารถแขวนลอยในสารละลายได้ (Dalgleish and Morris, 1988; Snoeron, Payens, Jeunink and Both, 1975) นอกจากนี้เมื่อแคลป์า-คาราจีแนนอยู่ในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างจาก Coil เป็น Helix แคลป์า-คาราจีแนนจะสามารถป้องกันการแยกเฟสโดย Helix จะสามารถเชื่อมต่อกับเคซีนซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลป์า-คาราจีแนนและเคซีนจะคล้ายกับผลของ Cryoprotective ของไฮโดรคอลลอยด์ในอาหารหวานแช่แข็ง (Frozen dairy desserts) ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมดังที่ได้กล่าวมาแล้วใน 2.3.3 โดย

กล่าวถึงผลของการใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคปไซ-คาร์ราจีแนนต่อการการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม



### รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด

แหล่งที่มา : Food Network Solution, Online, 2010



### รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน

แหล่งที่มา : ดัดแปลงจาก Carbohydrate Technology, Online, 2011

## 2.6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนนมและโพลีแซคคาไรด์ (Milk protein-polysaccharide interactions)

โปรตีน (Protein) และโพลีแซคคาไรด์ เป็นไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymers) ที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อควบคุมโครงสร้าง (Structure) เนื้อสัมผัส (Texture) และความเสถียร (Stability) ของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยโปรตีนสามารถดึงดูด (Attract) โมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น (Complexation) หรือผลัก (Repulsive) โมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์ออก (Segregation) ตัวอย่างของสารที่มีลักษณะโครงสร้างมีแรงทางประจุ (Polyelectrolyte) ได้แก่ โปรตีนนมสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว เช่น คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และเพคติน (Pectin) เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเหล่านี้จะมีปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากแรงทางประจุ (Electrostatic interaction) เป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการหาความสามารถในการผสมสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำนายได้จากค่าสถานะที่ใช้ในการทดลอง อาทิเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเข้มข้น

ไอออน (Ionic strength) เป็นต้นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อธรรมชาติของโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์แต่ละชนิด ค่าความเข้มข้นไอออนของโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ที่เราต้องการผสมเข้าด้วยกัน ซึ่งส่งผลต่อปฏิสัมพันธ์ที่จะเกิดขึ้นในระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์เข้าด้วยกัน

ค่าแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจะหาได้ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างแรงภายในโมเลกุล (Intermolecular) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนหลัก (Segments) และโซ่ข้าง (Side chain) ของสองโมเลกุล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมของสารละลายและความแตกต่างของแต่ละกลุ่ม เช่น ประจุ (Charged) ความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เป็นต้น โดยค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างแรงภายในโมเลกุลจะบ่งบอกถึงค่าแรงประจุนุติที่เกิดขึ้นจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับโพลีแซคคาไรด์อาจจะทำให้เกิดค่าแรงดึงดูด (Attractive) หรือค่าแรงผลัก (Repulsive) (Dickinson, 1998)

## 2.6.1 ประเภทของแรงภายในโมเลกุลหรือพันธะที่เกิดขึ้นในส่วนผสมระหว่างโปรตีนกับโพลีแซคคาไรด์

2.6.1.1 Covalent เป็นพันธะที่แข็งแรงระหว่างกลุ่มที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเฉพาะ (Specific reactive group) บน Macromolecule ที่ต่างกัน พันธะโควาเลนต์จะเกิดขึ้นในสารผสมระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ที่มีความซับซ้อน

2.6.1.2 Electrostatic เป็นแรงที่เกิดปฏิสัมพันธ์ของหน่วยประจุไฟฟ้า (Coulomb) ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประจุทางไฟฟ้า (Electrical charges) ที่มีลักษณะประจุเหมือนกันหรือประจุนตรงข้ามกัน ถ้าระยะห่างระหว่างหน่วยประจุไฟฟ้าสั้นแสดงว่าพันธะเป็นแบบอ่อน (Weak) ในทางตรงกันข้าม ถ้าระยะห่างระหว่างหน่วยประจุไฟฟ้ามีระยะยาวแสดงว่าเป็นพันธะมีความแข็งแรงขึ้นอยู่กับ Degree of ionization หรือค่าความเข้มข้นของประจุ (Electrolyte concentration)

2.6.1.3 Excluded volume แรงผลักระยะสั้น (Short range repulsive) ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างการซ้อนทับของ Electron cloud

2.6.1.4 Hydrogen bonding เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงปานกลาง อยู่ในช่วง 10-40 กิโลจูลต่อโมลเป็นแรงดึงดูดระยะสั้นของ  $-O-H^{\delta+} \dots \delta^-O < H$  โดยความแข็งแรงของพันธะจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.6.1.5 Hydrophobic เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงปานกลาง 5-10 กิโลจูลต่อโมล เป็นแรงดึงดูดพันธะระยะยาว (Long range attractive) ของกลุ่มของสารที่ไม่มีขั้ว ค่าแรงของพันธะนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส

2.6.1.7 Ion-bridging เป็นแรงเฉพาะของปฏิสัมพันธ์ระหว่างหน่วยประจุไฟฟ้าที่สามารถจับกับ Polyvalent cations โดยเฉพาะ  $Ca^{2+}$

2.6.1.8 Van der Waals เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนภาวะแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ซึ่งจะพบแรง Van der Waals ได้น้อย ในปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับโพลีแซคคาไรด์

## 2.6.2 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ต่อระบบอิมัลชัน

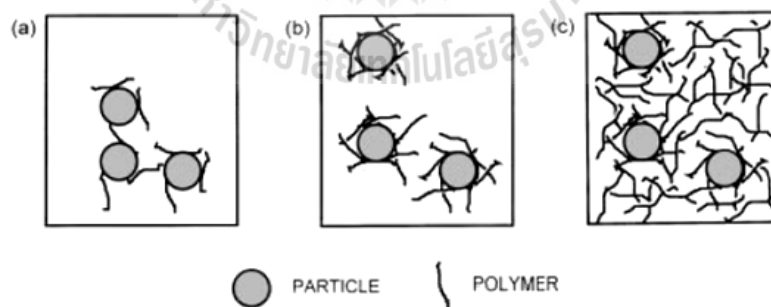
อิมัลชัน เป็นระบบคอลลอยด์ที่พบในอาหาร ซึ่งมีของเหลวเป็นทั้งอนุภาคคอลลอยด์และตัวกลางของเหลวชนิดหนึ่งจะกระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ อยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ของเหลวทั้งสองชนิดนี้จะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน อิมัลชันที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัว ต้องอาศัยอิมัลซิไฟเออร์หรือ Surface-active agents เป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกัน ทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและคงอยู่ได้ (นิธิยารัตนาปนนท์, 2534) ในระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของโพลีแซคคาไรด์และโปรตีน จะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโพลีแซคคาไรด์กับโปรตีนชนิดที่เรียกว่า Associate interaction บริเวณพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (เคซีนไมเซลล์) หรือสามารถดูคล้ายกับโปรตีนที่อยู่บริเวณผิวน้ำรอบ ๆ อนุภาคอิมัลชัน ดังแสดงรูปที่ 2.8 เมื่อโพลีแซคคาไรด์ในระบบเป็นสารที่สามารถเกิดเจล (Gelling agent) เช่นคาร์ราจีแนนหรือเพคติน ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของผลิตภัณฑ์และลักษณะเนื้อสัมผัส ได้แก่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มข้นของประจุบวก (Counterions) เช่น  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  เป็นต้น (Dickinson, 1998) จากรูปที่ 2.8a แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างไบโอพอลิเมอร์สองชนิดในระบบ Binary system ของอนุภาคและสายพอลิเมอร์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ปริมาณสายพอลิเมอร์ที่สามารถดูคล้ายบนพื้นผิวของอนุภาคจะมีจำนวนน้อยและไม่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นผิวของอนุภาคได้ทั้งหมด อนุภาคที่มีสายพอลิเมอร์ดูคล้ายอยู่บนพื้นผิวจะเคลื่อนที่เข้าหากัน เกิดการเชื่อมระหว่างสายพอลิเมอร์เกิดเป็นสะพานเชื่อมระหว่างสองอนุภาคเข้าด้วยกัน เรียกว่า Bridging flocculation เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสายพอลิเมอร์ให้เพียงพอต่อการดูคล้ายบริเวณพื้นผิวอนุภาคมากขึ้น สายพอลิเมอร์จะครอบคลุมแต่ละอนุภาคได้ทั้งหมด ทำให้อนุภาค สามารถแขวนลอยในสารละลายได้ หรือเรียกว่า Steric stabilization (รูปที่ 2.8b) เมื่อเราเพิ่มความเข้มข้นของสายพอลิเมอร์มากกว่าความต้องการของระบบหรือเกินสมดุลของระบบ สายพอลิเมอร์สามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายของเจล (Polymer gel network) ทั้งกับสายพอลิเมอร์ที่ดูคล้ายบนพื้นผิวอนุภาคและสายพอลิเมอร์ที่แขวนลอยในระบบ (รูปที่ 2.8c)

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ต่อระบบอิมัลชัน เช่น Wang et al. (2001) อธิบายการเกิดการแยกเฟสของสารผสมระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Doublier et al. (2000) ศึกษาการแยกเฟสของสารผสมระหว่าง Beta-lactoglobulin (BLG) และ Pullulan อธิบายว่าเกิดจากกลไก Depletion flocculation สารผสมระหว่างโปรตีนที่เป็นก้อนกลม (Sphere) จะกระจายตัวอยู่ใน Semi-dilute solution ของโพลีแซคคาไรด์ที่อยู่ในรูป Coil และสามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายของเจลได้ ในการศึกษาดังกล่าวใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Consistency index,  $K$ ) เป็นค่าบ่งบอกความเข้ากันไม่ได้ (Incompatibility) ระหว่างโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ (Edelman et al., 2001) นอกจากนี้ Croguennoc et al., (2001a) ศึกษาในระบบต้นแบบระหว่างสารผสมเจลาติน (Gelatin) กับเด็กซ์แทรน (Dextran) และระบบต้นแบบของสารผสมระหว่างเบต้าแลคโตโกลบูลิน (Beta-lactoglobulin, BLG) กับแคปป์ลา-คาร์ราจีแนน โดยในสถานการณ์ทดลองมีทั้งการใช้ความร้อนและไม่ใช้ความร้อนกับ BLG ก่อนนำมาผสมกับแคปป์ลา-คาร์ราจีแนน เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างโปรตีนทั้งในรูปแบบโปรตีนธรรมชาติและโปรตีนที่ผ่านความร้อน ที่ระดับความเข้มข้นแคปป์ลา-

การวิจัยพบว่า พบว่า BLG ที่ไม่ผ่านความร้อนจะตกตะกอน (BLG aggregate) เนื่องจาก BLG ที่ไม่ผ่านความร้อนจะมีรูปร่างเป็น Spherical และไม่พบการแยกเฟสในสารผสมระหว่าง BLG ที่ผ่านความร้อนกับ แคลป้า-การวิจัยเน้น ที่ระดับความเข้มข้นของแคลป้า-การวิจัยเน้นสูงจะเกิดการแยกเฟสของโปรตีน (Protein aggregate) นอกจากนี้ยังเพิ่มความซับซ้อนของระบบโดยผสมเพคตินกับสารผสมระหว่างเจลาตินกับเด็กซ์แทรน จากการทดลองดังกล่าวพบว่าเด็กซ์แทรนจะเหนี่ยวนำให้เกิดการแยกออกเป็นสองเฟสที่ไม่เข้ากัน คือ เฟสเจลาตินและเฟสเพคติน (Croguennoc et al., 2001b)

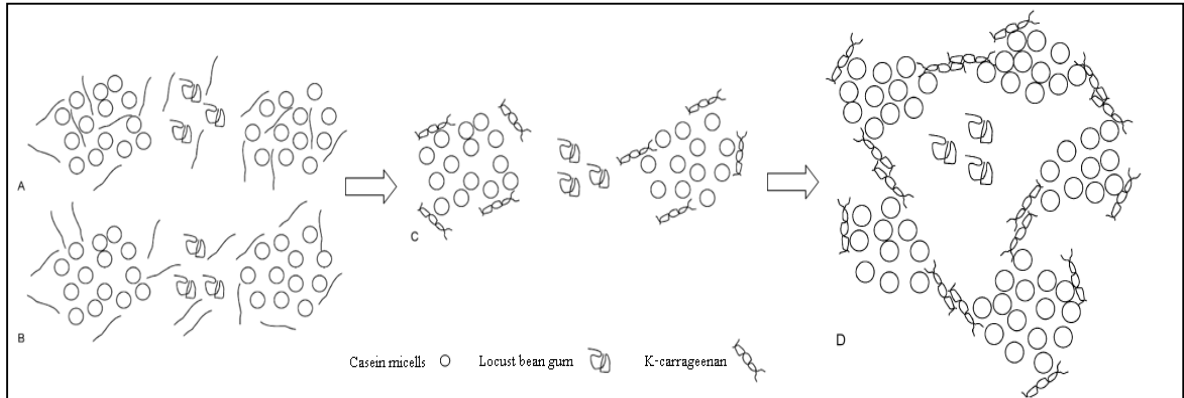
Ding et al. (2002) ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของเจลาตินและเด็กซ์แทรนต่อแรงตึงผิวของระบบสองเฟสที่ทราบส่วนประกอบและค่าความหนืดจะถูกควบคุมด้วยอัตราเนื้อคงที่ และบันทึกค่าการเสียรูปร่างของอนุภาค โดยเลือกจุดบนกราฟ 3 ตำแหน่งที่ความเข้มข้นต่างกันบน Tie line ผลการวิจัยพบว่า สารผสมระหว่างเด็กซ์แทรนและเจลาตินเกิดการแยกเฟสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเด็กซ์แทรนหรือเจลาติน ในระบบนี้ค่าแรงตึงผิวจะขึ้นกับค่าความเข้มข้นของไบโอพอลิเมอร์ซึ่งคำนวณจากสมการของ Flory-Huggins

Spagnuolo et al. (2005) ศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างเคซีนและสารผสมโพลีแซคคาไรด์ ในระบบประกอบด้วย แคลป้า-การวิจัยเน้นและ โลกัสบีนกัม พบว่าแคลป้า-การวิจัยเน้นในรูป Helix ที่ระดับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.015-0.02 สามารถป้องกันการเกิด Coalescence ลดการแยกออกของเฟสที่มีปริมาณ โปรตีนสูง (Protein-rich phase) และช่วยให้ระบบที่สามารถสังเกตได้ด้วยตา (Visual stability) มีความเสถียรมากขึ้น



**รูปที่ 2.7** ผลของไบโอพอลิเมอร์ต่อระบบที่มีอนุภาคแขวนลอย (a) Bridging flocculation ที่ระดับความเข้มข้นไบโอพอลิเมอร์ต่ำ (b) Steric stabilization ของอนุภาคที่มีสายพอลิเมอร์ล้อมรอบ (c) Immobilization ของสายพอลิเมอร์ที่สามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายของเจล

แหล่งที่มา: Dickinson (1998)



**รูปที่ 2.8** กลไกการยับยั้งการแยกเฟสของแคปไซ-คาร์ราจีแนนในสารผสมระหว่างเคซีนไมเซลล์และโพลีแซคคาไรด์ (A) ที่อุณหภูมิสูงหรือระหว่างกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน โดยโครงสร้างของแคปไซ-คาร์ราจีแนนจะอยู่ในรูป Coil (B) เมื่ออัตราส่วนระหว่างเคซีนไมเซลล์กับแคปไซ-คาร์ราจีแนนในรูป Coil ไม่สมดุลหรือเกิด Depletion flocculation และ/หรือเกิด Segregative interaction (C) เมื่อแคปไซ-คาร์ราจีแนนถูกทำให้เย็นลง โครงสร้างจะเปลี่ยนจาก Coil เป็น Double helix (D) เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคปไซ-คาร์ราจีแนนที่มีโครงสร้างแบบ Double helix กับเคซีนไมเซลล์บริเวณจุดเชื่อมภายในและบริเวณรอบนอก

แหล่งที่มา: Spagnuolo, Goff, Dalgleish and Morris (2005)

## 2.7 วิทยากระแสของไหล (Rheology)

### 2.7.1 วิทยากระแสของไหล (Rheology)

วิทยากระแส เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Flow) และการเสียรูป (Deformation) ของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง (Steffe, 1996) วัสดุแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) โดยของแข็งเป็นวัสดุที่มีการเสียรูปร่างแปรผันตามแรงกระทำ (Force) วัสดุประเภทนี้จะมีค่าความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด เมื่อไม่มีแรงกระทำ วัสดุสามารถคืนรูปร่างกลับมาสู่ร่างเดิมได้ ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ได้แก่ สปริง เป็นต้น วัสดุประเภทของเหลว เมื่อให้แรงกระทำวัสดุจะเกิดการไหลและเมื่อหยุดให้แรงกระทำวัสดุไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ เช่น การให้แรงกระทำกับน้ำเพื่อให้เกิดการไหล เมื่อหยุดให้แรงน้ำจะไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ ส่วนวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก นั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของแข็ง และของเหลว เมื่อให้แรงกระทำแก่วัสดุประเภทนี้ วัสดุจะเสียรูป เช่นเดียวกับของเหลวแต่เมื่อยกเลิกแรงกระทำจะเกิดการคืนรูป เช่นเดียวกับของแข็ง แต่การคืนรูปไม่สามารถกลับคืนเหมือนเดิม โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเสียรูปของวัสดุทั้ง 3 ประเภทแสดงดังรูปที่ 2.9

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทางวิทยากระแสคือ Rheometer มีทั้งแบบที่ควบคุมความเค้น (Stress controlled) และควบคุมความเครียด (Strain controlled) โดยมีหัววัด (probe) ที่ทำหน้าที่ถ่ายทอด



แรงกระทำต่อตัวอย่างซึ่งมีหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยแต่ละชนิดเหมาะกับตัวอย่างในแต่ละประเภท เช่น Concentric cylinder, Cone and Plate, Parallel Plate และ Rectangular Torsion เป็นต้น (อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์, 2553)

การทดสอบคุณลักษณะทางวิทยาการศาสตร์ สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภท คือ

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

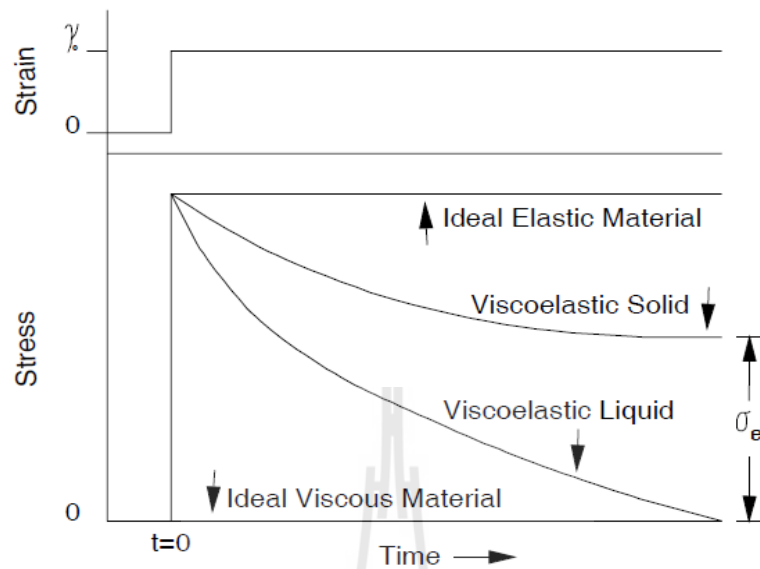
ข) การทดสอบประเภท Dynamic tests เช่น การทดสอบแบบสั่น (Oscillatory test) ค่าตัวแปรของสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) (Tabilo-Munizaga and Barbosa-Canovas, 2005) ในการทดสอบแบบ Dynamic test จะมีการทดสอบความเหมาะสมของช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลอง โดยให้ค่าความเค้น หรือค่าความเครียดแก่ตัวอย่าง ซึ่งจะเรียกว่า Stress sweep หรือ Strain sweep ถ้าพบว่าค่าโมดูลัสสะสม และค่าโมดูลัสสูญเสียแปรผันตามความถี่ จะเรียกช่วงความถี่นี้ว่า Linear viscoelastic range หรือช่วง LVR ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อให้แรงกระทำต่อของแข็งในรูปแบบกราฟรูปไซน์ (Sine curve) การสูญเสียรูปร่างก็จะเกิดขึ้นในรูปแบบกราฟรูปไซน์ที่เหมือนกับความเค้น ดังนั้น กราฟรูปไซน์ที่ได้จะทำมุมต่างกัน 0 องศา หรือซ้อนทับกันพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเค้นและความเครียด เกิดการ In phase กัน แต่เมื่อให้แรงกระทำสูงสุดแก่ของเหลว จะไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้ เนื่องจากวัตถุเกิดการไหล ในกรณีนี้กราฟรูปไซน์ของความเค้นและความเครียดจึงเหลื่อมกัน 90 องศา ส่วนวัสดุที่มีสมบัติ วิสโคอีลาสติก จะมีการเหลื่อมของความเค้นและความเครียดต่างกัน อยู่ระหว่าง 0-90 องศา ค่าองศานี้เรียกว่า ค่าความต่างของมุมระหว่างเฟส (Phase angle,  $\delta$ ) ซึ่งเป็นอีกดัชนีที่บ่งชี้คุณสมบัติของวัสดุ โดยค่าความต่างของมุมระหว่างเฟสนี้มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสีย ดังสมการที่ 2-1

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

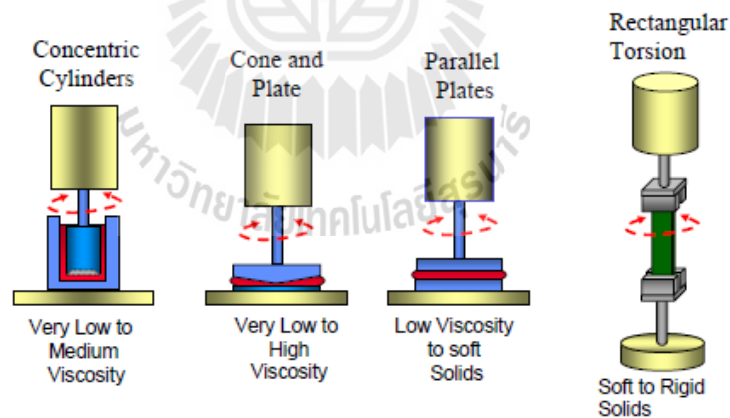
## 2.7.2 รูปแบบพฤติกรรมการไหล

ลักษณะการไหลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.7.2.1 Newtonian Fluids เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือ ความเร็วในการกวน ไม่ว่าจะกวนเร็วหรือกวนช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงการตอบสนองต่อการให้แรงกระทำต่อวัสดุ 3 ประเภท  
แหล่งที่มา: Steffe (1996)



รูปที่ 2.10 หัววัดสำหรับเครื่องวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแส  
แหล่งที่มา: อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ (2553)

2.7.2.2 Non-newtonian Fluids เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามกฎการ  
สันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลมีค่าความหนืดไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ  
อัตราเฉือน (Shear rate) ลักษณะการไหลแบบนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 จำพวก ได้แก่

ก) พวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent non-newtonian fluids) ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนที่ได้รับ แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือนแต่อย่างใด นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนซึ่งจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ ได้แก่ แสดงในรูปที่ 2.12

ก.1) Pseudoplastic type เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนหรือยิ่งกววนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear thinning” ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

ก.2) Bingham type ของไหลประเภทนี้ที่ค่าแรงเฉือนมีค่าต่ำ ๆ จะไม่มีการเคลื่อนที่แต่อย่างใด จนกระทั่งค่าแรงเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่า  $\tau_0$  ซึ่งเรียกจุดที่แรงเค้นมีผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่นี้ว่า Yield value หรือในบางตำราเรียกว่า Yield stress ในของไหลบิงแฮม (Bingham fluids) เมื่อออกแรงเค้นจนถึงจุด Yield stress หลังจากนั้นของไหลจะพฤติกรรมเหมือน Newtonian fluids ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น ส่วนของไหลพลาสติกนั้นเมื่อออกแรงจนถึงจุด Yield stress ของไหลก็จะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล Pseudoplastic

ก.3) Dilatant type ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะของการไหลประเภทนี้พบเห็นได้ยากกว่าประเภท Pseudoplastic ของไหล Dilatant type จะพบเห็นได้ในของไหลหรืออาหารลักษณะมีตะกอนของแข็งนอนกัน เช่น น้ำแป้งข้าวโพด ลักษณะของการไหลประเภทนี้เรียกอีกอย่างได้ว่าเป็นลักษณะการไหลแบบ Shear-thickening

ข) พวกที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent non-newtonian fluids)

ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือนอีกด้วย ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ ได้แก่

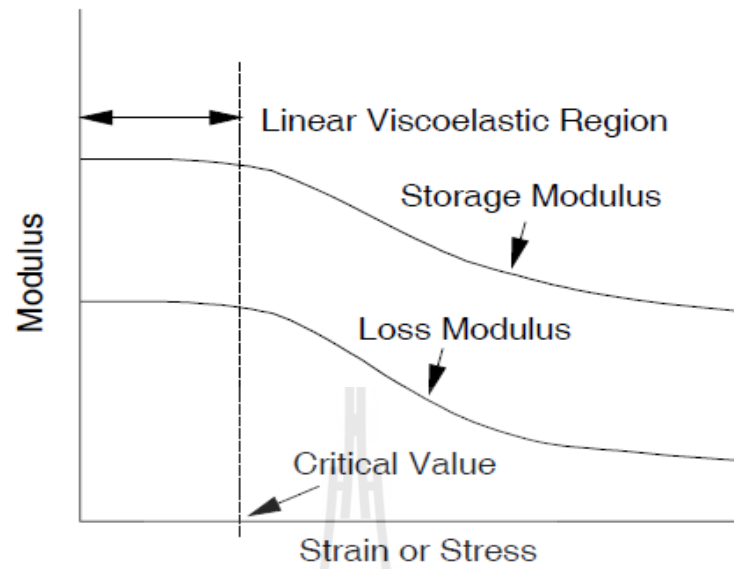
ข.1) ของไหลทิกโซโทรปิก (Thixotropic fluids) ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลา เมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ของไหลที่มีลักษณะการไหลประเภทนี้ได้แก่ วัสดุประเภท grease สีทาบ้าน และน้ำหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่ เป็นต้น

ข.2) ของไหลรีโอเพคซิก (Rheopeccic fluids) ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่

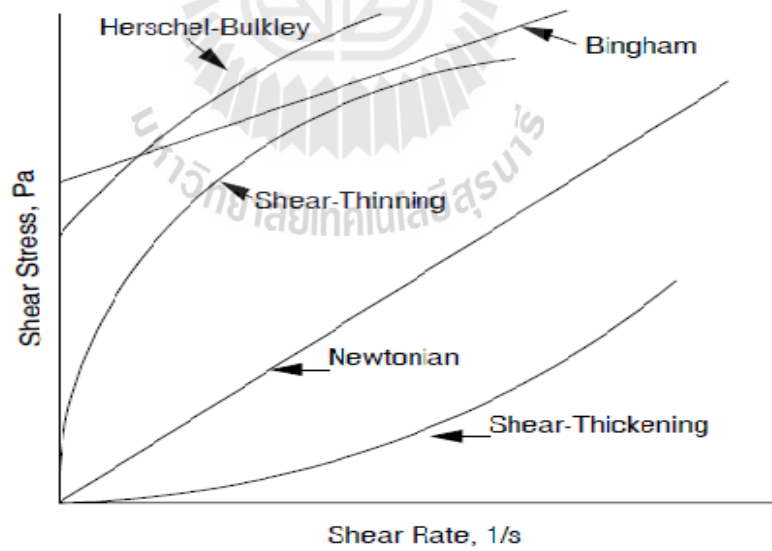
การหาข้อมูลพื้นฐานในเรื่องของสมบัติวิทยากระแสของไหล (Rheological properties) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เพื่อใช้ในการกำหนดอัตราการผลิตของส่วนผสมดังกล่าวในท่อส่งส่วนผสมลงในเครื่องผลิตไอศกรีมในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) หรือเพื่อใช้กำหนดค่าแรงเฉือน (Shear force) ของใบมีดในเครื่องผลิตไอศกรีมแบบต่อเนื่องหรือแบบกะ (Batch process) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตไอศกรีม

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมนั้นพบในงานวิจัยต่าง ๆ โดย Flores and Goff (1999) ศึกษาผลของสารให้ความคงตัวต่อสมบัติทางวิทยา

กระแสนของไหลในระบบต้นแบบและส่วนพร้อมทำไอศกรีม พบว่าสารให้ความคงตัวทุกชนิดล้วนมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยส่งผลให้มีพฤติกรรมการไหลแบบ Non-newtonian Bolliger, Wildmoser, Goff and Tharp (2000) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity) ของสารให้ความคงตัวในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อการโตของผลึกน้ำแข็ง โดยแปรระดับความเข้มข้นของกัวร์กัม (Guar gum) จากร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 0.25 พบว่าอัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งที่มีกัวร์กัมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.14 มีค่าต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของกัวร์กัม พบว่าอัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกัวร์กัม Vega et al. (2005) ศึกษาผลของแคปไซซินต่อระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซอฟท์เสิร์ฟ (Soft serve) ที่ใช้โซเดียมแอลจิเนตร่วมกับโลคัสทีนกัม เปรียบเทียบกับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้นมผงขาดมันเนย (Skim milk powder, SMP) ร่วมกับโลคัสทีนกัม โดยถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดคอนโฟคัล (Confocal scanning laser microscopy, CSLM) จากรูปที่ได้แสดงให้เห็นว่าโซเดียมแอลจิเนตและโลคัสทีนกัมไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Incompatibility) ส่งผลให้เกิด Microscopic phase separation แคปไซซินไม่มีผลในการยับยั้งการสร้างชั้นครีม (Cream layer) บนผิวหน้าของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซอฟท์เสิร์ฟที่มีโซเดียมแอลจิเนตร่วมกับโลคัสทีนกัม โดยแคปไซซินจะเกิด Self-association มากกว่าที่จะเกิดปฏิสัมพันธ์กับเคซีน ซึ่งไม่พบลักษณะดังกล่าวในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี SMP เมื่อเติมแคปไซซินลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้โซเดียมแอลจิเนตร่วมกับโลคัสทีนกัม เมื่อวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแสนของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่แปรระดับความเข้มข้นของแคปไซซินจากร้อยละ 0 ถึง 0.025 พบว่า ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) ที่ระดับความถี่ในการศึกษาต่ำ แต่เมื่อเพิ่มค่าความถี่จะเกิด Cross over ยกเว้นในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีแคปไซซินเข้มข้นร้อยละ 0.015 ซึ่งจะเกิด Cross over ตั้งแต่เริ่มให้ความถี่กับตัวอย่าง Soukoulis, Chandrinos and Tzia (2008) ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสน (Rheological property) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและคุณภาพของไอศกรีมวานิลลาในระหว่างการเก็บ โดยศึกษา ลักษณะทางกายภาพ (Physical property) เช่น ค่าการขึ้นโพมของไอศกรีม (Overrun) ค่าความแข็งของไอศกรีม (Hardness) เป็นต้น และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (Sensory characteristic) โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กัวร์กัม โซเดียมแอลจิเนตและแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ผสมกับ แคปไซซิน ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ทุกชนิดเป็นแบบ Shear thinning ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมโซเดียมแอลจิเนตหรือแซนแทนกัมกับแคปไซซินจะมีโครงสร้างตาข่ายของเจล (Gel network) ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคปไซซินและเคซีน นอกจากนี้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับ พบว่าไอศกรีมที่เติมโซเดียมแอลจิเนตหลังเก็บไว้เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์เป็นไอศกรีมที่ผู้บริโภคยอมรับมากที่สุด



รูปที่ 2.11 แสดงช่วง Linear viscoelastic range (LVR) ของตัวอย่าง  
แหล่งที่มา: Steffe (1996)



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงรูปแบบพฤติกรรมการไหลของพวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา  
แหล่งที่มา: Steffe (1996)

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างมีดังนี้

- 3.1.1 ห้องแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส (PTV 19T/43, Montecchio, Italy)
- 3.1.2 ห้องแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส (NT30T/404/43, Montecchio, Italy)
- 3.1.3 ตู้แช่แข็งที่ -35 องศาเซลเซียส (ULT2540-5V36, Kendo Laboratory products, Asheville, USA)
- 3.1.4 เครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันระบบสองความดัน (Homogenizer รุ่น 15 MR-8TA, APV Gaulin, Inc., Lawrence, USA)
- 3.1.5 เครื่องปั่นไอศกรีม (Model 103, Taylor Company, Illinois, USA)
- 3.1.6 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-TX2, Stable Microsystems, Kent, England)
- 3.1.7 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, IKA<sup>®</sup> WORKS, Wilmington, USA)
- 3.1.8 กล้องจุลทรรศน์ (ZEISS Scope.A1, ZEISS, Jena ,Germany)
- 3.1.9 เลนส์วัตถุ (ZEISS LDA-Plan 20X, ZEISS, Jena ,Germany)
- 3.1.10 เลนส์ขยายภาพขนาด 2.5 เท่า (Octowa, ZEISS, Jena ,Germany)
- 3.1.11 กล้องดิจิทัลสำหรับถ่ายภาพ (Qimaging Micro Publisher รุ่น 5.0RTVQIMAGING, BC, Canada)
- 3.1.12 Heating and Cooling stage (LINKAM TMS92, LINKAM, Surrey, UK)
- 3.1.13 โปรแกรมถ่ายภาพและวัดขนาดผลึกน้ำแข็ง *i*-Solution (*i*MTechnology, BC, Canada)
- 3.1.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง)
- 3.1.15 เครื่องแก้วพื้นฐานสำหรับงานวิเคราะห์ทางเคมี
- 3.1.16 เครื่องวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแส (AR-G2 Rheometer, New Castle, USA)

#### 3.2 วัตถุดิบ

- 3.2.1 นมผงพร่องมันเนย (Skim milk powder, SMP) ปริมาณ โปรตีนร้อยละ 26.14 (ประกอบด้วยเคซีนร้อยละ 56 และ โปรตีนเวย์ร้อยละ 44.14) จากบริษัท Eligo a.s. สาธารณรัฐเชค
- 3.2.2 น้ำตาลทรายขาว (Sucrose) จากบริษัท รวมเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด ประเทศไทย

- 3.2.3 แคปลา-คาราจีแนน (K-carrageenan) จากบริษัท FMC Technologies Co., Ltd รัฐเทกซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.4 โลกัสทีนกันัม (Locust bean gum, LBG) จากบริษัท FMC Technologies Co., Ltd ประเทศสเปน
- 3.2.5 แป้งมันสำปะหลังดัดแปรไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl starch, HPS) จากบริษัท เยนเนอรัลสตาร์ช จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.6 แป้งมันสำปะหลังดัดแปรไฮดรอกซีโพรพิลไดสตาร์ชฟอสเฟต (Hydroxypropyl, distarch phosphate, HPDS) จากบริษัท เยนเนอรัลสตาร์ช จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.7 ไขมันเนย (Butter fat) ปริมาณไขมันร้อยละ 99.9 จากบริษัท วิกกี เอนเตอร์ไพรซ์ จำกัด ประเทศไทย

### 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ดัดแปลงจากวิธีของ Singh et al. (2006)

การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยนำสารให้ความคงตัวทางการค้าหรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 2.5 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง เติมน้ำร้อยละ 70 ของตัวอย่าง บรรจุตัวอย่างแบบปิดสนิท ในภาชนะอะลูมิเนียมขนาด 40 ไมโครลิตร บ่มนาน 2 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่อง DSC ที่ทำการ Calibrate ด้วย Indium และใช้ภาชนะเป็นตัวอย่างอ้างอิง โดยอัตราความร้อนที่ให้กับตัวอย่างเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เริ่มจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 100 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะบ่งบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตินเซชัน (Onset gelatinization temperature,  $T_0$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลิตินเซชัน (Peak gelatinization temperature,  $T_p$ ) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลิตินเซชัน (Conclusion gelatinization temperature,  $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชัน ( $T_c - T_0$ ) ด้วยโปรแกรม Pyris management (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

### 3.4 สูตรส่วนผสม

#### 3.4.1 สูตรส่วนผสมของระบบสารละลายซูโครส ดัดแปลงจากวิธีของ Soukoulis et al. (2008)

ส่วนผสมของระบบสารละลายซูโครสประกอบด้วยน้ำตาลทราย สารให้ความคงตัว และน้ำกลั่น (Distilled water) โดยทำการแปรระดับความเข้มข้นของน้ำตาลทราย เท่ากับร้อยละ 12 และ 16 โดยน้ำหนัก ส่วนสารให้ความคงตัวทำการแปรชนิดและปริมาณของสารให้ความคงตัวทางการค้า คือ โลกัสทีนกันัม และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 2 ชนิด ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิล และแป้งไฮดรอกซีโพรพิลไดสตาร์ชฟอสเฟต แปรระดับความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0, 0.255, 0.2775 และ 0.3 โดยน้ำหนัก แคปลา-คาราจีแนนแปรระดับความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0, 0.0225 และ 0.045 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นน้ำกลั่น

### 3.4.2 สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมดัดแปลงจากไอศกรีมสูตรทางการค้า (Marshall et al., 2003) ประกอบด้วย 1) ไขมันเนย ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก 2) น้ำตาลทรายขาว แปรระดับความเข้มข้นร้อยละ 12 และร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก 3) สารให้ความคงตัว แปรระดับความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0, 0.255, 0.2775 และ 0.3) โดยน้ำหนัก 4) อิมัลซิไฟเออร์ (Tween 80) ร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักและ 5) ส่วนของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนย (Milk Solid Not Fat, MSNF) ร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก ได้จากนมผงพร่องมันเนย (ตารางที่ 3.2)

## 3.5 การเตรียมตัวอย่าง

### 3.5.1 การเตรียมส่วนผสมของระบบสารละลายซูโครส

ละลายน้ำตาลทรายในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เติมสารให้ความคงตัว ที่เตรียมอยู่ในรูปสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโดยปริมาตร ปริมาณที่ใส่ได้จากการคำนวณเทียบจากปริมาตรของระบบสารละลายซูโครส ซึ่งปริมาณของสารให้ความคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, IKA<sup>®</sup> WORKS, Wilmington, USA) ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไปลดขนาดด้วยเครื่องลดขนาดเม็ดไขมันระบบสองความดัน (15 MR-8TA, APV Gaulin, Inc., Lawrence, USA) โดยระดับความดันที่หนึ่งเท่ากับ 2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระดับความดันที่สองเท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นทำให้เย็นโดยเร็วในอ่างน้ำแข็ง แล้วนำไปบ่มในห้องแช่เย็น (PTV 19T/43, Montecchio, Italy) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

### 3.5.2 การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและตัวอย่างไอศกรีม ดัดแปลงจากวิธีการของ Marshall and Arbuckle (1996) และ Goff, Verespej and Smith (1999)

นำนมผงพร่องมันเนยละลายในน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เติมน้ำตาลทราย และสารละลายสารให้ความคงตัว โดยระหว่างการผสมให้คนส่วนผสมตลอดเวลาเมื่อส่วนผสมละลายดีแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิของส่วนผสมเป็น 65 องศาเซลเซียส ใส่ไขมันเนยจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 75 องศาเซลเซียส แล้วใส่อิมัลซิไฟเออร์และทำการพาสเจอร์ไรซ์ที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที นำส่วนผสมดังกล่าวไปลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดไขมันระบบสองความดัน (15 MR-8TA, APV Gaulin, Inc., Lawrence, USA) โดยระดับความดันที่หนึ่งเท่ากับ 2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและระดับความดันที่สองเท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เย็นโดยเร็วในอ่างน้ำแข็ง แล้วนำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไปบ่มในห้องแช่เย็น (PTV 19T/43, Montecchio, Italy) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



### 3.5.3 การปั่นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Freezing)

นำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม 1500 กรัม ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เข้าเครื่องปั่นไอศกรีม ขนาดบรรจุ 4 ลิตร (Model 103, Taylor Company, Illinois, USA) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงบรรจุ ไอศกรีมที่ได้ลงในภาชนะปริมาตร 150 มิลลิลิตรและเก็บในตู้แช่แข็งที่ -35 องศาเซลเซียส (ULT2540-5V36, Kendo Laboratory products, Asheville, USA) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและย้ายไปเก็บที่ห้องแช่เย็น (PTV 19T/43, Montecchio, Italy) อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนผสมของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสสำหรับการเตรียมตัวอย่าง 100 กรัม

NO.	Stabilizers	Concentration of ingredients (%w/w)		
		Sucrose	Modified starch or LBG	K-carrageenan
1.	No stabilizer	12	-	-
2.	LBG	12	0.3000	-
3.		12	0.2775	0.0225
4.		12	0.2550	0.0450
5.	HPS	12	0.3000	-
6.		12	0.2775	0.0225
7.		12	0.2550	0.0450
8.	HPDS	12	0.3000	-
9.		12	0.2775	0.0225
10.		12	0.2550	0.0450
11.	No stabilizer	16	-	-
12.	LBG	16	0.3000	-
13.		16	0.2775	0.0225
14.		16	0.2550	0.0450
15.	HPS	16	0.3000	-
16.		16	0.2775	0.0225
17.		16	0.2550	0.0450
18.	HPDS	16	0.3000	-
19.		16	0.2775	0.0225
20.		16	0.2550	0.0450

ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสำหรับการเตรียมตัวอย่าง 100 กรัม

NO.	Stabilizers	Concentration of ingredients (%w/w)					
		SMP	Fat	Emulsifiers	Sucrose	Modified starch or LBG	K-carrageenan
1.	No stabilizer	10.5	10	0.08	12	-	-
2.	LBG	10.5	10	0.08	12	0.3000	-
3.		10.5	10	0.08	12	0.2775	0.0225
4.		10.5	10	0.08	12	0.2550	0.0450
5.	HPS	10.5	10	0.08	12	0.3000	-
6.		10.5	10	0.08	12	0.2775	0.0225
7.		10.5	10	0.08	12	0.2550	0.0450
8.	HPDS	10.5	10	0.08	12	0.3000	-
9.		10.5	10	0.08	12	0.2775	0.0225
10.		10.5	10	0.08	12	0.2550	0.0450
11.	No stabilizer	10.5	10	0.08	16	-	-
12.	LBG	10.5	10	0.08	16	0.3000	-
13.		10.5	10	0.08	16	0.2775	0.0225
14.		10.5	10	0.08	16	0.2550	0.0450
15.	HPS	10.5	10	0.08	16	0.3000	-
16.		10.5	10	0.08	16	0.2775	0.0225
17.		10.5	10	0.08	16	0.2550	0.0450
18.	HPDS	10.5	10	0.08	16	0.3000	-
19.		10.5	10	0.08	16	0.2775	0.0225
20.		10.5	10	0.08	16	0.2550	0.0450

### 3.6 การศึกษาและการทดสอบคุณลักษณะของสารละลายน้ำตาลซูโครส

การศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบสารละลายซูโครส ดัดแปลงจากวิธีของ Soukoulis et al., 2008 วิเคราะห์ค่าสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของระบบสารละลายซูโครสด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแส AR-G2 Rheometers (TA Instruments, New Castle, USA) แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภทคือ

3.6.1 การทดสอบประเภท Stationary tests ทำได้โดยการนำสารละลายซูโครสที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ใส่ลงในชุดตรวจสอบสมบัติทางวิทยากระแสของไหลแบบ Concentric cylindrical standard bob กำหนดให้อุณหภูมิของ Standard bob เท่ากับ 4 องศาเซลเซียส กำหนดให้ช่องว่างระหว่าง Standard bob และ Concentric cylindrical probe เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ติดตามพฤติกรรมกรไหล (Flow behavior) ของตัวอย่างในช่วงอัตราเฉือน (Shear rate,  $\dot{\gamma}$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 200 รอบต่อวินาที วิเคราะห์รูปแบบพฤติกรรมกรไหล (Flow behavior) โดยนำข้อมูลไปเทียบกับ Power law's model และทำการเปรียบเทียบความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ของสารละลายซูโครสที่อัตราเฉือนเท่ากับ 50 รอบต่อวินาที (Akhtar et al., 2006; Stanley and Taylor, 1993)

3.6.2 การทดสอบประเภท Dynamic tests ซึ่งจะวัดค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) ค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) ทำการหาช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีการเสื่อมสภาพโครงสร้างของตัวอย่างเมื่อมีแรงกระทำต่อตัวอย่าง ทำการทดลองแบบ Strain sweep โดยแปรระดับ % Strain จาก 0.1%-100% โดยพบว่าช่วง LVR คือ 0.24%-1.67% Strain จากนั้นจึงทำการทดลองแบบ Frequency sweep กำหนดช่วงความถี่ 0.01-10 Hz ที่ %Strain เท่ากับ 0.5% Strain การวิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของสารละลายแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.7 การทดสอบคุณลักษณะของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

3.7.1 การศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ดัดแปลงจากวิธีของ Soukoulis et al. (2008)

การศึกษาคูณสมบัติทางวิทยากระแสด้วยเครื่องวัดสมบัติทางวิทยากระแส AR-G2 Rheometers (TA Instruments, New Castle, USA) โดยใช้หัววัดแบบ Pararell plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร และควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบด้วย Peltier Plate กำหนดอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส กำหนดให้ระยะห่างระหว่าง Pararell plate กับ Peltier Plate เท่ากับ 1000 ไมโครเมตร แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภทคือ

3.7.1.1 การทดสอบประเภท Stationary tests ทำได้โดยตัดส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง วางบน Peltier Plate 2.38 มิลลิเมตร ติดตามพฤติกรรมกรไหลของตัวอย่างในช่วงอัตราเฉือนตั้งแต่ 0 ถึง 200 รอบต่อวินาที วิเคราะห์รูปแบบพฤติกรรมกรไหล โดยนำข้อมูลไปเทียบกับ Power law's model เปรียบเทียบความหนืดปรากฏของสารละลายในแต่ละตัวอย่างทำที่อัตราการเฉือนเท่ากับ 50 รอบต่อวินาที (Akhtar et al., 2006; Stanley and Taylor, 1993)

3.7.1.2 การทดสอบประเภท Dynamic tests ซึ่งจะวัดค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสีย ทำการหาช่วง

LVR ด้วยการทดสอบแบบ Strain sweep แปรระดับ %Strain จาก 0.1% ถึง 100% พบว่าช่วง LVR คือ 0.24% ถึง 1.67 %Strain จากนั้นจึงทดสอบแบบ Frequency sweep กำหนดช่วงความถี่ 0.01 ถึง 10 Hz ที่ %Strain เท่ากับ 0.5%Strain การวิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของสารละลายแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.7.2 ขนาดผลึกน้ำแข็งของไอศกรีมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical light microscopy) ดัดแปลงจากวิธีของ Bolliger et al. (2000) และ Regand and Goff (2003)

ปีเปิดส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม 5 ไมโครลิตร วางลงบนสไลด์จากนั้นปิดกระจก (Cover slip) แล้วนำไปประกอบเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (LINKAM TMS92, Surrey, UK) ซึ่งประกอบเข้ากับถังไนโตรเจนเหลวและปั๊มที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลเข้าของไนโตรเจนเหลว นำส่วนควบคุมอุณหภูมิ Heating and cooling stage (LINKAM TMS92, LINKAM, Surrey, UK) วางไว้บน Stage ของกล้องจุลทรรศน์ (ZEISS Scope A1, Jena, Germany) แสดงในรูปที่ 3.1 ที่ต่อกับกล้องดิจิทัลสำหรับถ่ายภาพ (Qimaging Micro Publisher 5.0RTV, QIMAGING, BC, Canada) (รูปที่ 3.2) จากนั้นทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วไปที่ -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที รอประมาณ 5 นาที เพื่อให้ตัวอย่างเกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสมบูรณ์ แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น -10 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเริ่มการทำ Temperature sweep โดยลดอุณหภูมิเป็น -18 องศาเซลเซียส อัตราการลดอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น -10 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำ 4 รอบต่อตัวอย่าง 1 ซ้ำ พร้อมทั้งเก็บภาพตัวอย่างในทุกขั้นตอนทั้งก่อนและหลังที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ คำนวณค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็ง โดยค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกน้ำแข็งเมื่อเทียบกับขนาดผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นซึ่งหมายถึงความสามารถในการชะลอการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการทำ Temperature sweep ซึ่งค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมสามารถคำนวณได้จากสมการ

ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม

$$= \frac{(\text{ขนาดผลึกน้ำแข็งเฉลี่ยหลังทำ Cycling} - \text{ขนาดผลึกน้ำแข็งเฉลี่ยก่อนทำ Cycling}) \times 100}{\text{ขนาดผลึกน้ำแข็งเฉลี่ยก่อนทำ Cycling}} \quad (3-1)$$

### 3.7.3 อัตราการละลายของไอศกรีม ดัดแปลงจากวิธีของ Bolliger et al. (2000)

ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างไอศกรีมทันที หลังจากนำออกจากภาชนะที่บรรจุด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง โดยตัวอย่างไอศกรีมที่ใช้ทดสอบเป็นไอศกรีมหลังปั่นและผ่านการบ่มในตู้แช่แข็งที่ -35 องศาเซลเซียส (ULT2540-5V36, Kendo Laboratory products, Asheville, USA) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มที่ห้องแช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส (NT30T/404/43, Montecchio, Italy) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไอศกรีมออกจากห้องแช่แข็ง เมื่ออุณหภูมิของไอศกรีมเท่ากับ -15 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างไอศกรีมวางบน

ตะแกรงลวดขนาด 15 x 15 เซนติเมตร ที่มีขนาดรูตะแกรงเท่ากับ 2 x 2 มิลลิเมตร ซึ่งวางอยู่บนปีกเกอร์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส เริ่มจับเวลาเมื่อนำตัวอย่างวางบนตะแกรง ชั่งน้ำหนักทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 90 นาที แต่ละตัวอย่างทำการทดลอง 2 ซ้ำ ทั้งนี้ อัตราการละลายของไอศกรีม คำนวณได้จากสมการ

$$\text{อัตราการละลายของไอศกรีม} = \frac{\text{น้ำหนักไอศกรีมในส่วนที่ละลาย} \times 100}{\text{น้ำหนักไอศกรีมเริ่มต้น}} \quad (3-2)$$

### 3.7.4 ความแข็งของไอศกรีม ดัดแปลงจากวิธีของ Soukoulis et al. (2008) และ Herald, Aramouni and Abu-Ghoush (2008)

นำตัวอย่างไอศกรีมออกจากตู้แช่แข็ง -35 องศาเซลเซียส มาเก็บในห้องแช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนทำการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA-XT2, Stable, Microsystems, Kent, England) โดยใช้หัววัดแอสตันเลสแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร (P/6) กดบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างไอศกรีม โดยให้ระยะการกด (Penetration depth) เป็น 10 มิลลิเมตร ค่าแรงในการกดเท่ากับ 20 กรัม การกำหนดค่าความเร็วของหัววัดก่อนและหลังการแทงเท่ากันเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความเร็วในระหว่างการแทงตัวอย่างเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

### 3.7.5 การขึ้นโฟมของไอศกรีม (Overrun) ตามวิธีของ Segall and Goff (2002)

นำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังการบ่มที่ห้องแช่เย็น (PTV 19T/43, Montecchio, Italy) อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส บรรจุในภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วชั่งน้ำหนักของส่วนผสมดังกล่าว จากนั้นนำส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไปปั่นด้วยเครื่องปั่นไอศกรีม (Freezer Model 103, Taylor Company, USA) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นตักไอศกรีมที่ได้บรรจุในภาชนะเดิมแล้วชั่งน้ำหนักของไอศกรีมที่ได้ แต่ละตัวอย่างทำการวัด 2 ซ้ำ และคำนวณค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมดังสมการ

$$\begin{aligned} & \text{ค่าร้อยละการขึ้นโฟม} \\ & = \frac{(\text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของ mix} - \text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของไอศกรีม}) \times 100}{\text{น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของไอศกรีม}} \quad (3-3) \end{aligned}$$

## 3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ One-way analysis of variance (ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean difference) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS

ค่าเฉลี่ย (Mean difference) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 12.0 (SPSS Inc., Illinois, USA)

### 3.9 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการแปรรูปอาหาร ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอาหาร ณ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ห้องอุปกรณ์และเครื่องมือ ณ บริษัท รัชมอร์ จำกัด และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)



รูปที่ 3.1 ส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Heating and cooling stage)



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิต่อกับกล้องจุลทรรศน์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปหรือ โลคัสบีนกับกับแคปไซ-การาจีแนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมนม โดยจะต้องเตรียมสารละลายแป้งและสารให้ความคงตัว ก่อนใส่ในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสหรือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายแป้งและสารให้ความคงตัว การศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนของแป้งและสารให้ความคงตัวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ผลของคุณสมบัติเชิงความร้อนจะแสดงในหัวข้อ 4.1

#### 4.1 คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) ของสารให้ความคงตัว

การศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารให้ความคงตัวทางการค้าและแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปได้แก่ แป้งไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (Hydroxypropyl starch, HPS) แป้งไฮดรอกซีโพรพิลไดสตาร์ชฟอสเฟต (Hydroxypropyl distarch phosphate, HPDS) โลคัสบีนกัม (Locust bean gum, LBG) ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.1

จากการศึกษาพบว่าแป้ง HPS จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 55.46 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่แป้งดูดความร้อนสูงสุดขณะเกิดเจลาติไนเซชัน 62.79 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่แป้งเกิดเจลาติไนเซชันเท่ากับ 72.86 องศาเซลเซียส แป้ง HPDS จะมีช่วงการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c - T_u$ ) แคบขึ้นเมื่อเทียบกับแป้ง HPS โดยแป้ง HPDS ที่ใช้ในการทดลองเป็นแป้งที่ผ่านการเชื่อมข้าม การศึกษาพบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง HPDS จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าแป้ง HPS เล็กน้อยทำให้สามารถยืนยันได้ว่าหมู่ฟอสเฟตที่เข้าไปในโมเลกุลของแป้งที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะส่งผลให้แป้งเกิดการจับตัวกันแน่นมากขึ้น (Chatakanonda, Varavinit and Chinachoti, 2000)

ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแคปไซ-การาจีแนมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 33.86 75.84 และ 92.43 ตามลำดับ โลคัสบีนกัมมีค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ 55.00 75.00 และ 85.00 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) เมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแคปไซ-การาจีแนในระหว่างการศึกษาพบว่าแคปไซ-การาจีแนจะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกว้างมากกว่าสารให้ความคงตัวชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าแคปไซ-การาจีแนต้องใช้ความร้อนในการทำลายโครงสร้างหรือใช้พลังงานในการเปลี่ยนโครงสร้างมากกว่าแป้ง HPS และแป้ง HPDS เนื่องจากโครงสร้างของแคปไซ-การาจีแน เป็นโครงสร้าง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของสารให้ความคงตัวที่ใช้ในการทดลองจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Stabilizer	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)
HPS	55.46±1.03 <sup>a,A</sup>	62.79±0.29 <sup>a,B</sup>	72.86±0.75 <sup>a,C</sup>
HPDS	57.99±0.75 <sup>d,A</sup>	64.16±0.62 <sup>b,B</sup>	77.50±0.98 <sup>b,C</sup>
K-carrageenan	38.86±2.17 <sup>a,A</sup>	75.84±3.41 <sup>c,B</sup>	92.43±1.65 <sup>d,C</sup>
LBG	55.00±0.00 <sup>b,A</sup>	75.00±0.00 <sup>c,B</sup>	85.00±0.00 <sup>c,C</sup>

หมายเหตุ: อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Onset gelatinization temperature,  $T_0$ )  
 อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Peak gelatinization temperature,  $T_p$ )  
 อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Conclusion gelatinization temperature,  $T_c$ ) โดย a, b, c, d เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )  
 A, B, C เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนหมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

โพลีเมอร์แบบเชิงเส้นที่มีสายกิ่งก้าน (Linear with side chains) รองลงมาคือ โลกัสปีนัม เนื่องจากโครงสร้างของโลกัสปีนัมเป็นโพลีเมอร์สายยาวของน้ำตาลแมนโนส (Mannose) ที่ต่อกันด้วยพันธะ 1, 4 และมีกิ่งแขนงของน้ำตาลกาแลคโทส (Galactose) ต่อกันด้วยพันธะ 1, 6 อัตราส่วนของน้ำตาลแมนโนสต่อน้ำตาลกาแลคโทสเป็น 4:1 โดยลักษณะโครงสร้างนี้ทำให้โมเลกุลมีส่วนที่เป็นสายหลักของน้ำตาลแมนโนสที่เรียกว่า Smooth สลับกับส่วนที่เป็นกิ่งแขนง (Marshall, Goff and Hartel, 2003)

จากการพิจารณาค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารให้ความคงตัวที่ได้ สามารถกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายแป้งและสารให้ความคงตัว โดยในการเตรียมสารละลายแป้งหรือสารให้ความคงตัวจะใช้อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าแป้งหรือสารให้ความคงตัวที่จะนำมาใช้ในการศึกษาละลายอย่างสมบูรณ์ (Complete Solubility)

## 4.2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปหรือโลกัสปีนัมกับแคลป้า-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัว ได้แก่ แป้ง HPS แป้ง HPDS หรือโลกัสปีนัมกับแคลป้า-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส โดยทำการศึกษาในสารละลายน้ำตาลซูโครสและส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม หลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมงโดยแปรระดับความ



เข้มข้นซูโครสสองระดับคือ ร้อยละ 12 และร้อยละ 16 และกำหนดให้ตัวอย่างสารละลายน้ำตาลซูโครส หรือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวเป็นตัวอย่างควบคุมซึ่งศึกษาถึงพฤติกรรมการไหล (Flow behavior) ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index,  $n$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (Consistency index,  $K$ ) และค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity,  $\eta$ )

#### 4.2.1 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือโลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสนในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครส

จากการศึกษาผลของสารให้ความคงตัวและปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสารให้ความคงตัวในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อพฤติกรรมการไหล พบว่าพฤติกรรมการไหลของทุกตัวอย่างเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระบบซูโครสเป็นระบบที่ประกอบด้วย น้ำ ซูโครส และสารให้ความคงตัว ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ประกอบกับความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวที่ใช้ เป็นระดับความเข้มข้นที่ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสและเมื่อเปรียบเทียบผลของระดับความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อพฤติกรรมการไหล พบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของตัวอย่าง โดยทุกตัวอย่างจะมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนทั้งที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16

สารให้ความคงตัวแต่ละชนิดจะส่งผลต่อค่าความหนืดปรากฏของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ใส่สารให้ความคงตัวจะมีค่าความหนืดปรากฏมากกว่าตัวอย่างควบคุมเมื่อพิจารณาผลของสารให้ความคงตัวที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันต่อความหนืดปรากฏพบว่า ตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกับจะมีค่าความหนืดปรากฏมากกว่าตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS เนื่องจากโลคัสบีนกับสามารถให้ความหนืดแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) ด้วยโครงสร้างเชิงเส้นแบบที่มีสายกิ่งก้านและมีน้ำตาลแมนโนสอิสระที่สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน พบว่าตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกับร้อยละ 0.255 กับแคปไซ-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 จะมีค่าความหนืดปรากฏมากที่สุดทั้งที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนน โดยโลคัสบีนกับและแคปไซ-คาราจีแนน เป็นสารให้ความคงตัวที่ช่วยเพิ่มความหนืดแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร ด้วยโครงสร้างของสารให้ความคงตัวทั้งสองชนิดเป็นโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งก้าน มี Radius of gyration สูง จึงต้านทานการไหลได้มากเมื่อมีแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่าง (Thaiudom and Goff, 2003; Spagnuolo et al., 2005) นอกจากนี้ โลคัสบีนกับและแคปไซ-คาราจีแนนยังส่งผลเสริมกัน (Synergistic) ดังแสดงในรายงานการวิจัยของ Fernandes, Goncalves and Doublier (1991) พบว่าสารละลายซูโครสที่มีส่วนผสมระหว่างแคปไซ-คาราจีแนนและโลคัสบีนกับที่อัตราส่วน 4:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม (Optimum) ซึ่งส่งผลให้ค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มีแคปไซ-คาราจีแนนเพียงชนิดเดียวและสอดคล้องกับค่าโมดูลัสสะสมที่ได้จากการทดลองนี้ (รูปที่ 4.2) โดยตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมโลคัสบีนกับกับแคปไซ-คาราจีแนนจะมีค่าโมดูลัสสะสมมากกว่าตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับ

แคลปลา-คาราจีแนน แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีโลคัสบีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนนสามารถต้านทานการเสียด  
โครงสร้างได้มากกว่าตัวอย่างที่เติมแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับ แคลปลา-คาราจีแนน

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนนต่อ  
ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวพบว่า ตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกัมจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวมากกว่าตัวอย่างที่  
มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS นอกจากนี้ เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคลปลา-คาราจีแนน ส่งผลให้ค่า  
สัมประสิทธิ์ความคงตัวมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวเมื่อเปรียบเทียบผลของ  
ซูโครสต่อค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวพบว่าระดับความเข้มข้นของซูโครสส่งผลต่อตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกัม  
กับแคลปลา-คาราจีแนนและตัวอย่างที่มีแป้ง HPS โดยตัวอย่างที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 โลคัส-  
บีนกัมร้อยละ 0.255 กับแคลปลา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 และตัวอย่างที่มีแป้ง HPS ร้อยละ 0.3 มีค่า  
สัมประสิทธิ์ความคงตัวแตกต่างจากตัวอย่างที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ  
( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.3)

ผลของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อพฤติกรรมการไหล พบว่าตัวอย่างสารละลายน้ำตาลซูโครส  
ทั้งสองระดับคือ ร้อยละ 12 และร้อยละ 16 มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน นอกจากนี้ผลของระดับ  
ความเข้มข้นซูโครสยังส่งผลต่อค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างสารละลายน้ำตาลซูโครสพบว่า ค่า  
ดัชนีพฤติกรรมการไหลมีค่าใกล้เคียง 1 โดยค่าที่ได้สอดคล้องกับ Steffe (1996) ที่รายงานว่าค่าดัชนี  
พฤติกรรมการไหลของตัวอย่างที่มีค่าใกล้เคียง 1 จะมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (ตารางที่ 4.3)

ผลของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อค่าความหนืดปรากฏ พบว่าค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่าง  
ที่ไม่มีสารให้ความคงตัวทั้งสองระดับความเข้มข้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่เมื่อเปรียบเทียบผล  
ของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อตัวอย่างที่มีสารให้ความคงตัวพบว่าที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ  
16 ตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกัมร้อยละ 0.3 มีความหนืดปรากฏมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ  
12 แต่ที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 นี้ตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือ แป้ง HPDS ร้อยละ 0.3 มีค่าความหนืด  
ปรากฏไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.2)

ผลของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว  
จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏของสารละลายน้ำตาลซูโครสกล่าวคือ เมื่อเพิ่มความ  
เข้มข้นของสารให้ความคงตัวจะส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏและค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น  
เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคลปลา-คาราจีแนนพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของแคลปลา-คาราจีแนน  
เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระดับความเข้มข้นซูโครสจะส่งผล  
ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมลดลง และส่งผลให้ตัวอย่างด้านการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรง  
เฉือน

การศึกษาผลของสารให้ความคงตัวต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสดจากการตอบสนองแบบ  
สั้น (Dynamic rheological property) ในตัวอย่างที่มีสารละลายน้ำตาลซูโครสโดยการวิเคราะห์ Oscillatory  
spectra ของค่าตัวแปรของคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ซึ่งได้แก่ ค่าโมดูลัส-  
สะสม (Storage modulus,  $G'$ ) และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) พบว่า Oscillatory spectra ของ

สารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 12 และร้อยละ 16 ทั้งที่เติมสารให้ความคงตัวและไม่มีเติมสารให้ความคงตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 จะมี Oscillatory spectra เป็นแบบสารละลายเข้มข้น เนื่องจากค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสสูญเสีย ในช่วงค่าความถี่ 0.1 ถึง 1 Hz แต่เมื่อเพิ่มความถี่มากกว่า 1 Hz จะส่งผลให้ลักษณะ Oscillatory spectra เปลี่ยนไปโดยค่าโมดูลัสสูญเสียมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสสะสม เมื่อใช้แคปไซ-คาราจีแนนร่วมกับ โลคัสบีนกัมแป็ง HPS หรือแป็ง HPDS จะพบว่า Oscillatory spectra ของตัวอย่างเป็นแบบเจลชนิดอ่อน (Turquois, et. al., 1992; Williams and Langdon, 1996; Rodd, Davis, Dunstan, Forrest and Boger, 2000) เนื่องจากค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสสูญเสียตลอดช่วงของความถี่ที่ใช้ศึกษาที่เป็นเช่นนี้อาจจะเนื่องมาจากผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัว ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของสารให้ความคงตัวที่มีประจุต่างชนิดกันและสามารถสร้างพันธะระหว่างโครงสร้างได้ (Dickinson, 1998) เช่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโกลด์บีนกัมกับแคปไซ-คาราจีแนน (Spagnuolo et al., 2005) อาจเนื่องมาจากโกลด์บีนกัมมีโครงสร้างสองส่วน คือ Backbone และ Hairy region ซึ่งสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับแคปไซ-คาราจีแนน โดยปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจะมีความชัดเจนมากกว่าปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแป็งคัดแปรกับแคปไซ-คาราจีแนน แป็ง HPS เป็นแป็งที่มีการแทนที่ตรงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ด้วยหมู่ไฮดรอกซีโพรพิล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติในการจับกับน้ำและสามารถขัดขวางการจับกันของโมเลกุลสตาร์ชที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โครงสร้างอ่อนแอลง และหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลที่เข้าแทนที่ในโครงสร้างอาจจะสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับแป็ง HPS และในกรณีที่ใช้สารให้ความคงตัวกับแคปไซ-คาราจีแนนอาจเกิดปฏิสัมพันธ์กับหมู่ซัลเฟตบนโครงสร้างของแคปไซ-คาราจีแนน ส่วนแป็ง HPDS เป็นไดสตาร์ชฟอสเฟต (Di-starch phosphate) (Wu and Seib, 1990) เมื่อผ่านการเชื่อมข้ามจะเกิดพันธะโควาเลนต์ ซึ่งจะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนมีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของแป็ง HPDS มีความแข็งแรง และสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ได้น้อยกว่าแป็ง HPS

เมื่อเปรียบเทียบผลของสารให้ความคงตัวต่อค่าโมดูลัสสะสม ที่ระดับความถี่ 0.1 Hz พบว่าระบบที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวทั้งที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16 จะมีค่าโมดูลัสสะสมน้อยกว่าตัวอย่างที่เติมสารให้ความคงตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารให้ความคงตัวที่เติมลงในระบบสารละลายน้ำตาลซูโครสส่งผลต่อค่าคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก กล่าวคือ เมื่อผสมสารให้ความคงตัวร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนนพบว่า ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสารให้ความคงตัวส่งผลต่อลักษณะความเป็นของแข็งของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างมีความสามารถในการรักษาโครงสร้างไม่ให้สูญเสียไปเมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ โดยลักษณะ Oscillatory spectra จะมีแนวโน้มสูงขึ้น (Goff, Roger and Roos, 2006) จากการศึกษาพบว่า โกลด์บีนกัมร้อยละ 0.2775 กับแคปไซ-คาราจีแนนร้อยละ 0.0225 มีค่าโมดูลัสสะสมมากกว่าตัวอย่างที่มีแป็ง HPS และแป็ง HPDS นั้นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ใช้โกลด์บีนกัมกับแคปไซ-คาราจีแนนมีความสามารถในการป้องกันการเสียโครงสร้างได้มากกว่าตัวอย่างที่เติมแป็ง HPS หรือแป็ง HPDS กับแคปไซ-คาราจีแนน

เมื่อเปรียบเทียบผลของระดับความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสีย ซึ่งได้จากการพิจารณาลักษณะ Oscillatory spectra ที่ระดับความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวชนิดเดียวกันและค่าความถี่ที่เท่ากัน พบว่า ค่าโมดูลัสสะสมของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16 มีค่ามากกว่าที่ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มีในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 มีปริมาณน้อยกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ตัวอย่างจะแสดงลักษณะความเป็นของแข็งที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดปรากฏของระบบสารละลายซูโครสที่อัตราเดือน 50 รอบต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Stabilizer	Concentration (%)		12% Sucrose	16% Sucrose
	Primary	K-carrageenan	Apparent viscosity (Pa*s)	Apparent viscosity (Pa*s)
No Stabilizer	-	-	0.034±0.005 <sup>ab, A</sup>	0.035±0.000 <sup>a, A</sup>
LBG	0.3	-	0.040±0.000 <sup>bc, A</sup>	0.068±0.000 <sup>d, B</sup>
	0.2775	0.0225	0.080±0.009 <sup>ef, A</sup>	0.082±0.000 <sup>ef, A</sup>
	0.255	0.045	0.086±0.011 <sup>f, A</sup>	0.088±0.010 <sup>de, A</sup>
HPS	0.3	-	0.038±0.004 <sup>abc, A</sup>	0.038±0.000 <sup>ab, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.040±0.000 <sup>bc, A</sup>	0.040±0.000 <sup>bc, A</sup>
	0.255	0.045	0.038±0.000 <sup>abc, A</sup>	0.040±0.000 <sup>bc, B</sup>
HPDS	0.3	-	0.034±0.005 <sup>ab, A</sup>	0.036±0.000 <sup>ab, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.038±0.004 <sup>abc, A</sup>	0.038±0.000 <sup>abc, A</sup>
	0.255	0.045	0.046±0.008 <sup>c, A</sup>	0.048±0.000 <sup>bc, A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

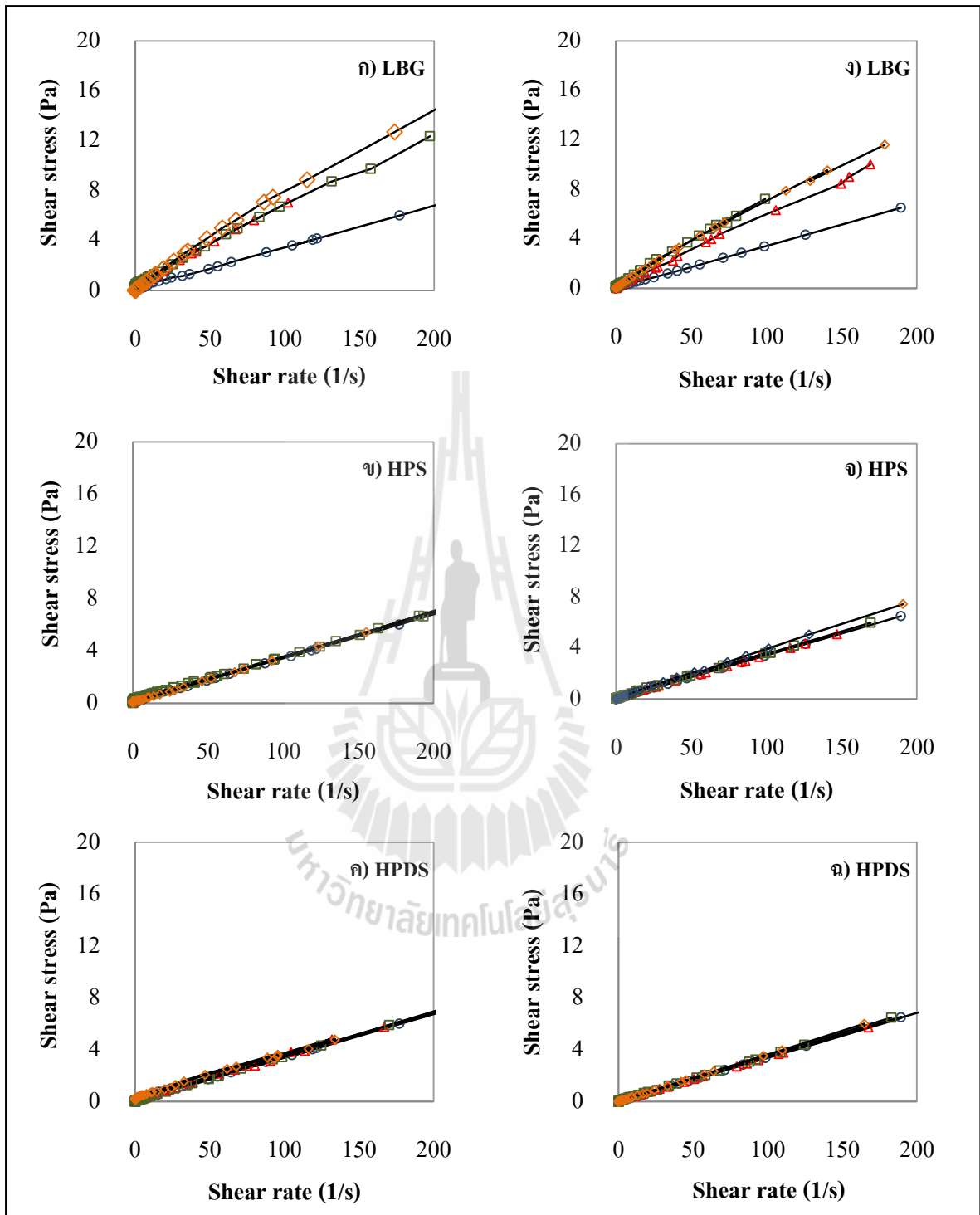
- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดและค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ได้จากการเข้าสมการ Power's law model

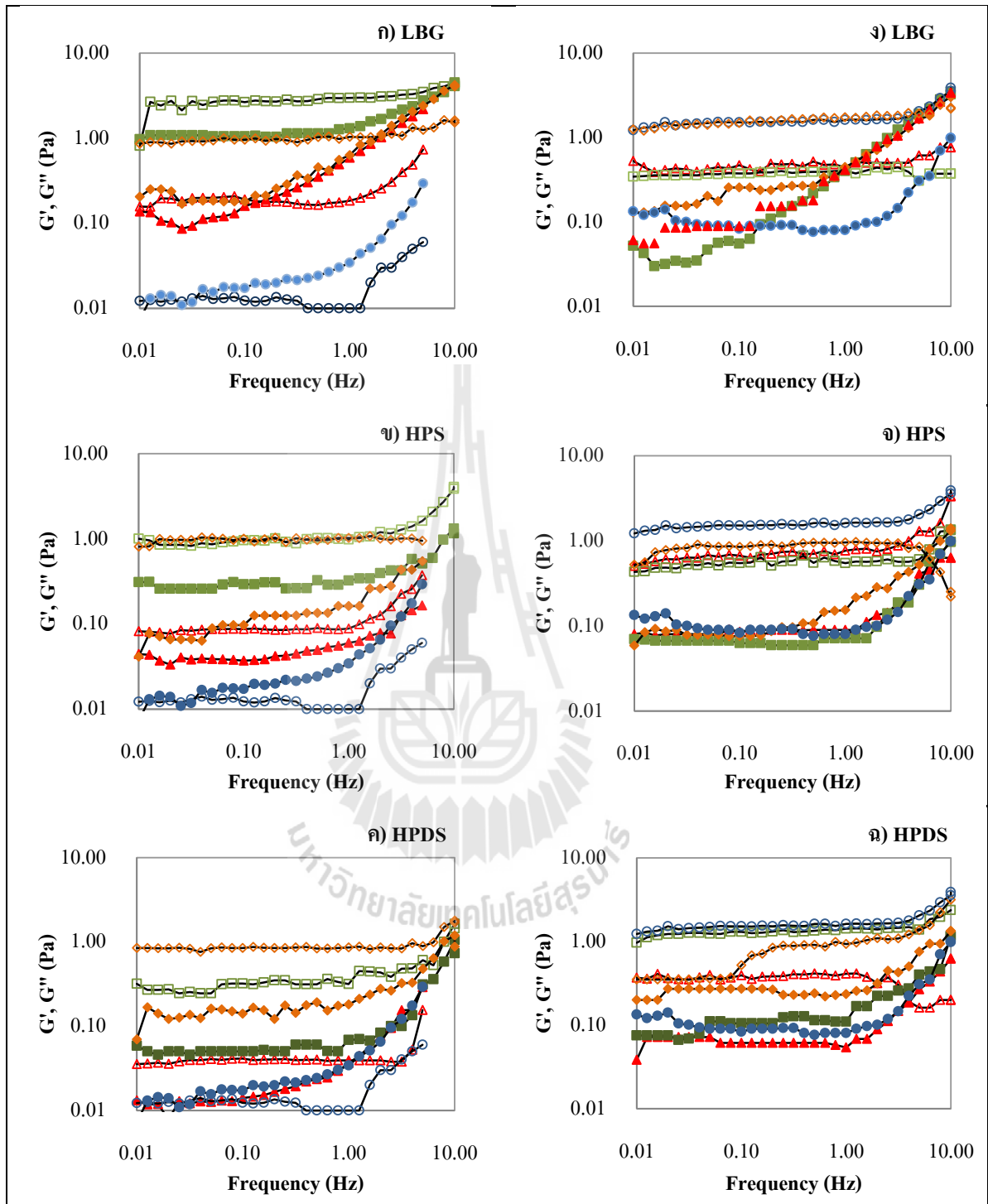
Stabilizer	Concentration (%)		Consistency index (K)		Flow behavior index (n)	
	Primary	K-carrageenan	12% Sucrose	16% Sucrose	12% Sucrose	16% Sucrose
No Stabilizer	-	-	0.0714±0.041 <sup>a, A</sup>	0.0753±0.039 <sup>a, A</sup>	0.8064±0.073 <sup>a, A</sup>	0.8115±0.021 <sup>a, A</sup>
LBG	0.3	-	0.2155±0.154 <sup>ab, A</sup>	0.2370±0.023 <sup>a, A</sup>	0.8269±0.067 <sup>a, A</sup>	0.8349±0.110 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.4164±0.036 <sup>b, A</sup>	0.4582±0.106 <sup>a, A</sup>	0.6186±0.298 <sup>a, A</sup>	0.7880±0.198 <sup>a, A</sup>
	0.255	0.045	0.4301±0.034 <sup>a, A</sup>	0.5160±0.054 <sup>b, B</sup>	0.8788±0.023 <sup>a, A</sup>	0.8993±0.040 <sup>a, A</sup>
HPS	0.3	-	0.0579±0.026 <sup>ab, A</sup>	0.1036±0.189 <sup>a, B</sup>	0.6516±0.039 <sup>a, A</sup>	0.6918±0.033 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.0835±0.056 <sup>a, A</sup>	0.1189±0.157 <sup>a, A</sup>	0.8284±0.198 <sup>a, A</sup>	0.881±0.112 <sup>a, A</sup>
	0.255	0.045	0.0706±0.062 <sup>a, A</sup>	0.1454±0.013 <sup>a, A</sup>	0.8216±0.237 <sup>a, A</sup>	0.9515±0.055 <sup>a, A</sup>
HPDS	0.3	-	0.0483±0.035 <sup>a, A</sup>	0.0405±0.009 <sup>a, A</sup>	0.7814±0.191 <sup>a, A</sup>	0.9364±0.091 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.0632±0.055 <sup>a, A</sup>	0.0637±0.014 <sup>a, A</sup>	0.8858±0.212 <sup>a, A</sup>	0.9047±0.122 <sup>a, A</sup>
	0.255	0.045	0.1449±0.118 <sup>a, A</sup>	0.1445±0.015 <sup>a, A</sup>	0.7425±0.244 <sup>a, A</sup>	0.8668±0.145 <sup>a, A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนภายในผลการวิเคราะห์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 4.1 ผลของ LBG แป้ง HPS และแป้ง HPDS ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพฤติกรรมการไหลของระบบ สารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 12 (ก ข ค) และร้อยละ 16 (ง จ ฉ) O = control  $\Delta$  = 0.3%  $\square$  = 0.2775% with K-carrageenan  $\diamond$  = 0.255% with K-carrageenan



รูปที่ 4.2 ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) (สัญลักษณ์โปร่ง) และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) (สัญลักษณ์ทึบ) ของระบบสารละลายน้ำตาลชูโครสร้อยละ 12 (ก ข ค) และร้อยละ 16 (ง จ ฉ) O = control  $\Delta$  = 0.3%  $\square$  = 0.2775% with K-carrageenan  $\diamond$  = 0.255% with K-carrageenan

#### 4.2.2 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือโลคัสบีนกับกับแคปลา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัวได้แก่ แป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัสบีนกับกับแคปลา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแส โดยศึกษาพฤติกรรมการไหล ค่าดัชนีพฤติกรรม การไหล ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว และค่าความหนืดปรากฏในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม แปรรูป ความเข้มข้นซูโครส 2 ระดับ คือ ร้อยละ 12 และร้อยละ 16 ซึ่งกำหนดให้ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวเป็นตัวอย่างควบคุม

เมื่อมีการให้แรงเฉือนกับระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม จะส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่มีสารให้ความคงตัวมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน เมื่อพิจารณา พฤติกรรมการไหลของตัวอย่างที่ไม่มีสารให้ความคงตัวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นกับค่า อัตราเฉือนพบว่าลักษณะกราฟจะเป็นเส้นตรงตัดผ่านจุดตัดของแกน X และแกน Y และค่าความชันของ เส้นกราฟจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการเพิ่มหรือลดค่าอัตราเฉือน แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดปรากฏของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมแป้ง HPS และแป้ง HPDS มีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ถือเป็น ลักษณะจำเพาะของของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน นอกจากนี้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่มีพฤติกรรมการไหลดังกล่าวจะมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 ในขณะที่ส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสบีนกับจะมีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนประเภท Time dependent shear thinning แสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS จะมีการเสีย โครงสร้างได้มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสบีนกับ

เมื่อใช้สารให้ความคงตัวที่ศึกษาร่วมกับกับแคปลา-คาราจีแนนจะพบว่า พฤติกรรมการไหลของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้โลคัสบีนกับกับกับแคปลา-คาราจีแนนที่มีลักษณะการไหลแบบนอน- นิวโตเนียนประเภท Time dependent shear thinning สามารถพบได้ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีการ เติมสารให้ความคงตัวจำพวกคาราจีแนน (Steffe, 1996) หรือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แคปลา- คาราจีแนนร่วมกับสารให้ความคงตัวประเภทอื่น (Goff, Davidson and Cappi, 1994; Thaiudom and Goff, 2003; Vega and Goff, 2005)

เมื่อเปรียบเทียบผลของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อพฤติกรรมการไหลที่ชนิดและระดับความ เข้มข้นของสารให้ความคงตัวเดียวกันพบว่า ระดับความเข้มข้นของซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนพฤติกรรม การไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ทั้งในตัวอย่างควบคุมและในตัวอย่างที่ใส่สารให้ความคงตัว

ผลของสารให้ความคงตัวต่อค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวและค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล พบว่า เมื่อ เติมสารให้ความคงตัวลงในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่เติมโลคัสบีนกับจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวมาก ที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS นอกจากนี้เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับ แคปลา-คาราจีแนนจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของ



ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสปีนัมร้อยละ 0.2775 กับแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.0225 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.2775 กับแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.0225 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6)

เมื่อพิจารณาผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสปีนัมเท่านั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายซูโครสจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสปีนัมมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 แตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.5)

ผลของสารให้ความคงตัวต่อค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลพบว่า ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมแป้ง HPS แป้ง HPDS หรือโลคัสปีนัมที่ร้อยละ 0.3 มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งถ้าค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 แสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนั้นจะมีลักษณะการไหลแบบนิวโตเนียน (Steffe, 1996) โดยพบว่าเมื่อเติมสารให้ความคงตัวร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน จะส่งผลให้ลักษณะพฤติกรรมการไหลเปลี่ยนจากนิวโตเนียนไปเป็นนอน-นิวโตเนียนประเภท Shear thinning behavior และพบว่าในตัวอย่างที่มีโลคัสปีนัมหรือแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคปปา-คาราจีแนนจะมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลต่ำกว่าตัวอย่างที่มีโลคัสปีนัมแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้สารให้ความคงตัวยังส่งผลต่อค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.4) พบว่าค่าความหนืดปรากฏในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS มีค่าต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมโลคัสปีนัม เนื่องจากระดับความเข้มข้นของแป้งตัดแปรทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดลองไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่างหรือไม่ได้มีส่วนช่วยทำให้เกิดการต้านทานการไหลในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เมื่อทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติพบว่าค่าความหนืดปรากฏไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังนั้น ความหนืดปรากฏที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของแคปปา-คาราจีแนนอาจจะเป็นผลมาจากแคปปา-คาราจีแนนเท่านั้น

เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคปปา-คาราจีแนนพบว่า ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 ที่มีโลคัสปีนัมร้อยละ 0.255 กับแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 ที่มีโลคัสปีนัมร้อยละ 0.255 กับแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 เมื่อใช้สารให้ความคงตัวกับแคปปา-คาราจีแนนมีผลทำให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคปปา-คาราจีแนนสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้า (Electrostatic bonding) กับ ส่วน ของ เคซีน ไมเซลล์ (Casein micelles) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้จากนมผงพร้อมมันเนยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดเจลที่มีลักษณะเป็นเส้น (Filaments) พันกันเป็นเครือข่ายสามมิติคล้าย

โครงสร้างตาข่ายของเจล ซึ่งสามารถป้องกันการตกตะกอนของเคซีน (Casein) ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Snoeren, Payens, Jeunink and Both, 1975; Snoeren, Both and Schmidt, 1976) และป้องกันการเกิดการแยกชั้น (Phase separation) ของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมในระดับโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ได้ (Thaiudom and Goff, 2003) นอกจากนี้ความหนืดปรากฏอาจมีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างโกลด์สทินกัมกับแคปลา-คาราจีแนน ระดับความเข้มข้นของแคปลา-คาราจีแนนที่ใช้ในการศึกษามีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ Spagnuolo et al. (2005) ที่ศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างเคซีนและโพลีแซคคาไรด์โดยโพลีแซคคาไรด์ที่ใช้คือโกลด์สทินกัมและแคปลา-คาราจีแนน พบว่าแคปลา-คาราจีแนนสามารถป้องกันการแยกเฟสระหว่างโกลด์สทินกัมกับเคซีนได้ เมื่อใช้แคปลา-คาราจีแนนที่ระดับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 0.015-0.02 โดยป้องกันการเกิด Coalescence ลดการแยกออกของเฟสที่มีปริมาณโปรตีนสูง (Protein-rich phase) และช่วยให้ระบบที่สามารถสังเกตด้วยตา (Visual stability) มีความเสถียรมากขึ้น

ผลของความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่า ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสของทั้งสองระดับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

เมื่อพิจารณาค่า Thixotropy พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบ Thixotropic shear thinning behavior ยกเว้นตัวอย่างที่ไม่เติมสารให้ความคงตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้โกลด์สทินกัมกับแคปลา-คาราจีแนน จะมีลักษณะ Hysteresis loop หรือลักษณะที่เป็น Thixotropy อย่างชัดเจน (รูปที่ 4.3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Torres et al. (2010) ในตัวอย่างคัสตาร์ดที่มีแป้ง HPDS และอินนูลิน (Inulin) จะมีค่า Thixotropy มากกว่าตัวอย่างคัสตาร์ดที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัว

จากผลการเปรียบเทียบค่า Thixotropy ของสารให้ความคงตัวทั้ง 3 ชนิด พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโกลด์สทินกัมมีค่า Thixotropy มากที่สุด รองลงมาคือ แป้ง HPS และแป้ง HPDS ทั้งนี้เมื่อใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคปลา-คาราจีแนนพบว่า โกลด์สทินกัมร้อยละ 0.255 กับแคปลา-คาราจีแนน ร้อยละ 0.045 จะมีค่า Thixotropy มากที่สุด รองลงมาคือแป้ง HPS และแป้ง HPDS ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกับโกลด์สทินกัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.3) ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคปลา-คาราจีแนนในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมส่งผลให้ Thixotropy มีค่าเพิ่มขึ้นจากการศึกษาพบว่าค่า Thixotropy จะแปรผันตรงกับค่าความหนืดปรากฏและแปรผกผันกับค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล โดยค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่างขึ้นกับค่าแรงเฉือนและเวลาโดยจะพบว่า เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าของแรงเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่ที่ระดับแรงเฉือนสูง และเมื่อลดแรงเฉือนลงจะพบว่าค่าแรงเค้นที่ระดับแรงเฉือนเท่ากันมีค่าต่ำกว่าค่าแรงเค้นที่ได้ในช่วงที่เพิ่มแรงเฉือนให้แก่ตัวอย่างในขั้นตอนแรก การเพิ่มแรงเฉือนให้กับตัวอย่างแรงเฉือนจะทำลายโครงสร้างหรือทำลายอนุภาคเม็ดไขมันที่เกาะกลุ่มอยู่ให้แยกออกจากกัน จึงส่งผลให้ความหนืดลดลง นอกจากนี้ลักษณะ Thixotropy ดังกล่าวยังบ่งบอกถึงลักษณะของการมี

ปฏิสัมพันธ์ภายใน (Internal interaction) ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Goycoolea, Morris and Gidley, 1995; Steffe, 1996; Bourriot, Garneir and Doublier, 1999) ซึ่งน่าจะเป็นผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง แคลปลา-คาราจีแนนกับเคซีนไมเซลล์ (Snoeren et al., 1975; Snoeren et al., 1976; Drohan, Tziboula, McNulty and Horne, 1997) หรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลคัสบีนกับกับแคลปลา-คาราจีแนน (Turquois, Rochas and Taravel, 1992; Chen, Liao, Boger and Dunstan, 2001; Dunstan, Chen, Liao, Salvatore, Boger and Prica, 2001; Camacho, Martinez-Navarre and Chiralt, 2005; Vega and Goff, 2005) ซึ่งใน ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปลา-คาราจีแนนมีค่า Thixotropy มากกว่าตัวอย่างควบคุม นั้นแสดงว่าอาจจะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปลา-คาราจีแนน โดยปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวได้อธิบายแล้วใน 4.2.2

การศึกษาผลของสารให้ความคงตัวต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสจากการตอบสนองแบบสั้นในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยวัดค่าตัวแปรของคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสม และค่าโมดูลัสสูญเสีย ที่ได้จากการทดลองแบบ Frequency sweep ซึ่งกำหนดช่วงความถี่ 0.01 Hz ถึง 10 Hz ที่ค่าร้อยละของ Strain เท่ากับ 0.5 พบว่า Oscillatory spectra ของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ทุกตัวอย่างจะมีลักษณะของ Oscillatory spectra เป็นของเจลชนิดอ่อน (Turquois, et. al., 1992; Williams and Langdon, 1996; Rodd, Davis, Dunstan, Forrest and Boger, 2000) เนื่องจากค่าโมดูลัสสะสมมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสสูญเสียตลอดการเพิ่มความถี่ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วในระบบสารละลายน้ำตาลชูโครส

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนมที่อัตราเฉือน (Shear rate,  $\dot{\gamma}$ ) 50 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Stabilizer	Concentration (%)		Apparent viscosity (Pa*s), 12% Sucrose		Apparent viscosity (Pa*s), 16% Sucrose	
	Primary	K-carrageenan	Up curve	Down curve	Up curve	Down curve
No Stabilizer	-	-	0.040±0.003 <sup>a, A</sup>	0.036±0.003 <sup>a, A</sup>	0.045±0.008 <sup>a, A</sup>	0.044±0.003 <sup>bc, A</sup>
LBG	0.3	-	0.577±0.068 <sup>c, B</sup>	0.288±0.068 <sup>d, A</sup>	0.539±0.005 <sup>e, A</sup>	0.499±0.005 <sup>f, B</sup>
	0.2775	0.0225	0.805±0.103 <sup>f, A</sup>	0.369±0.012 <sup>c, A</sup>	0.917±0.015 <sup>g, B</sup>	0.424±0.004 <sup>e, A</sup>
	0.255	0.045	1.080±0.097 <sup>h, A</sup>	0.771±0.183 <sup>h, B</sup>	1.223±0.090 <sup>i, A</sup>	0.613±0.047 <sup>g, A</sup>
HPS	0.3	-	0.052±0.013 <sup>cd, B</sup>	0.048±0.008 <sup>a, A</sup>	0.048±0.001 <sup>a, A</sup>	0.047±0.002 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.160±0.002 <sup>b, A</sup>	0.086±0.011 <sup>ab, A</sup>	0.154±0.002 <sup>b, A</sup>	0.089±0.010 <sup>ab, A</sup>
	0.255	0.045	0.306±0.003 <sup>cd, A</sup>	0.165±0.011 <sup>bc, A</sup>	0.295±0.034 <sup>cd, A</sup>	0.158±0.012 <sup>bc, A</sup>
HPDS	0.3	-	0.037±0.003 <sup>a, A</sup>	0.035±0.002 <sup>a, A</sup>	0.056±0.003 <sup>a, A</sup>	0.053±0.002 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.140±0.013 <sup>b, A</sup>	0.082±0.007 <sup>ab, A</sup>	0.163±0.004 <sup>b, A</sup>	0.094±0.001 <sup>ab, A</sup>
	0.255	0.045	0.286±0.006 <sup>c, A</sup>	0.148±0.007 <sup>bc, A</sup>	0.367±0.004 <sup>d, A</sup>	0.185±0.002 <sup>c, A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนภายในผลการวิเคราะห์เดียวกัน หมายถึงมี

ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน

หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้จากการเข้าสมการ Power law's model

Stabilizer	Concentration (%)		Consistency index (K), 12% Sucrose		Consistency index (K), 16% Sucrose	
	Primary	K-carrageenan	Up curve	Down curve	Up curve	Down curve
No Stabilizer	-	-	0.439±0.022 <sup>a,A</sup>	0.290±0.042 <sup>a,A</sup>	0.262±0.158 <sup>a,A</sup>	0.510 ±0.102 <sup>a,A</sup>
LBG	0.3	-	1.483±0.407 <sup>a,A</sup>	0.576±0.492 <sup>b,B</sup>	2.430±0.067 <sup>ab,B</sup>	2.067±0.115 <sup>cd,A</sup>
	0.2775	0.0225	15.391±5.017 <sup>e,A</sup>	2.282±0.084 <sup>c,A</sup>	16.183±1.174 <sup>e,B</sup>	2.350±0.141 <sup>c,A</sup>
	0.255	0.045	10.038±5.621 <sup>d,A</sup>	4.187±0.955 <sup>c,A</sup>	14.703±1.274 <sup>e,B</sup>	2.910±0.468 <sup>d,A</sup>
HPS	0.3	-	0.485±0.016 <sup>a,A</sup>	0.241±0.026 <sup>a,A</sup>	0.530±0.078 <sup>a,B</sup>	0.217±0.006 <sup>a,A</sup>
	0.2775	0.0225	2.880±0.515 <sup>ab,A</sup>	0.823±0.282 <sup>a,A</sup>	1.865±0.230 <sup>a,A</sup>	0.680±0.265 <sup>a,A</sup>
	0.255	0.045	6.866±0.166 <sup>c,A</sup>	2.352±0.273 <sup>c,A</sup>	5.697±0.170 <sup>a,B</sup>	1.910 ±0.030 <sup>bc,A</sup>
HPDS	0.3	-	0.479±0.018 <sup>a,B</sup>	0.274±0.040 <sup>a,A</sup>	0.630±0.067 <sup>a,A</sup>	0.360±0.038 <sup>a,A</sup>
	0.2775	0.0225	2.155 ±0.051 <sup>a,B</sup>	0.887±0.092 <sup>a,A</sup>	2.452±0.325 <sup>a,A</sup>	0.880±0.038 <sup>a,A</sup>
	0.255	0.045	6.746 ±0.894 <sup>c,A</sup>	1.860±0.291 <sup>bc,A</sup>	8.670±0.521 <sup>cd,A</sup>	2.303±0.165 <sup>c,A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนภายในผลการวิเคราะห์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน

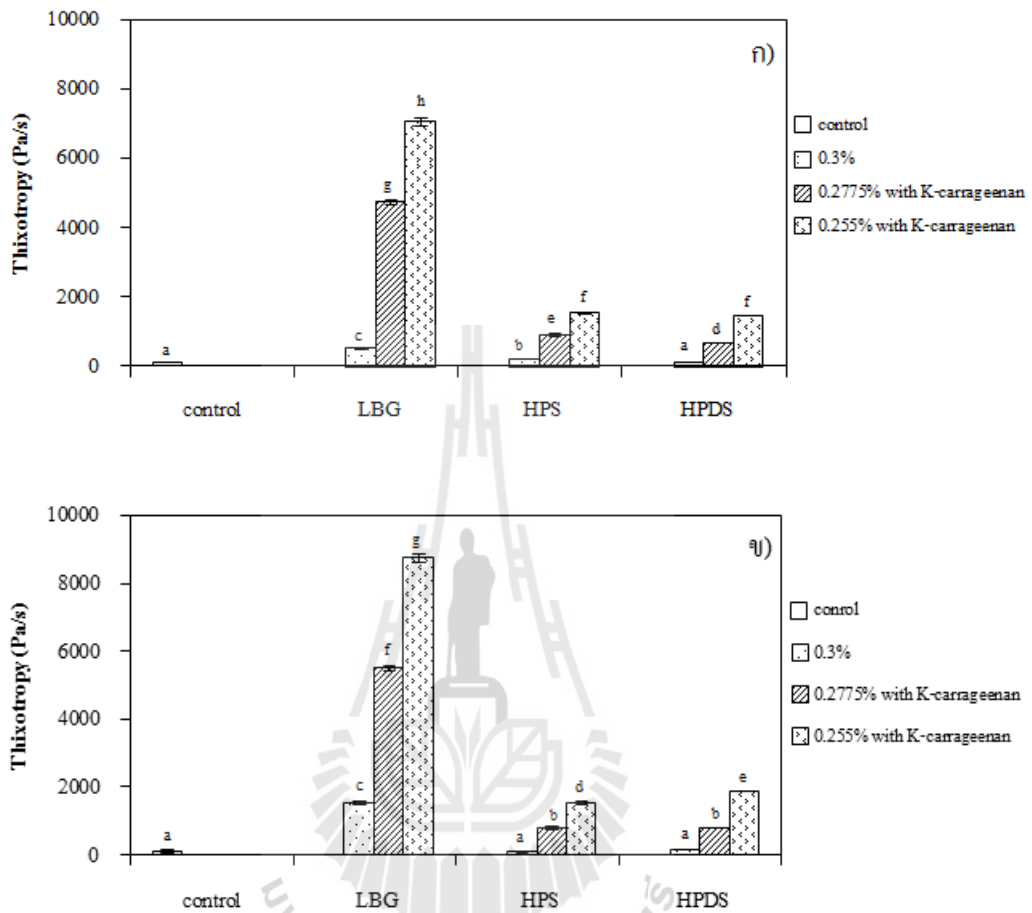
หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีพฤติกรรมกรไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนมที่ได้จากการเข้าสมการ Power law's model

Stabilizer	Concentration (%)		Flow behavior index (n), 12% Sucrose		Flow behavior index (n), 16% Sucrose	
	Primary	K-carrageenan	Up curve	Down curve	Up curve	Down curve
No Stabilizer			0.402±0.007 <sup>dc, A</sup>	0.497±0.017 <sup>abcd, A</sup>	0.420±0.126 <sup>defg, B</sup>	0.562±0.027 <sup>abcde, A</sup>
LBG	0.3	-	0.999±0.009 <sup>efg, B</sup>	0.999±0.016 <sup>gh, B</sup>	0.586±0.003 <sup>efg, A</sup>	0.599±0.007 <sup>h, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.238±0.060 <sup>a, A</sup>	0.544±0.010 <sup>gh, A</sup>	0.251±0.013 <sup>ab, B</sup>	0.568±0.013 <sup>gh, A</sup>
	0.255	0.045	0.459±0.127 <sup>cd, B</sup>	0.570±0.008 <sup>gh, B</sup>	0.359±0.010 <sup>bc, A</sup>	0.610±0.023 <sup>h, A</sup>
HPS	0.3	-	0.663±0.008 <sup>g, A</sup>	0.478±0.014 <sup>ef, A</sup>	0.431±0.007 <sup>fg, A</sup>	0.621±0.003 <sup>bcde, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.255±0.042 <sup>ab, A</sup>	0.459±0.073 <sup>def, A</sup>	0.358±0.027 <sup>bc, A</sup>	0.519±0.072 <sup>fg, A</sup>
	0.255	0.045	0.199±0.005 <sup>a, A</sup>	0.356±0.018 <sup>a, A</sup>	0.241±0.053 <sup>a, A</sup>	0.398±0.026 <sup>abcd, A</sup>
HPDS	0.3	-	0.374 ±0.031 <sup>de, A</sup>	0.492±0.017 <sup>bc, A</sup>	0.411±0.022 <sup>def, A</sup>	0.532±0.045 <sup>abcde, A</sup>
	0.2775	0.0225	0.294±0.021 <sup>ab, A</sup>	0.423±0.003 <sup>abcde, A</sup>	0.298±0.028 <sup>ab, A</sup>	0.457±0.010 <sup>cdef, A</sup>
	0.255	0.045	0.189±0.026 <sup>a, A</sup>	0.389±0.025 <sup>abc, A</sup>	0.184±0.011 <sup>a, A</sup>	0.389±0.015 <sup>abc, A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



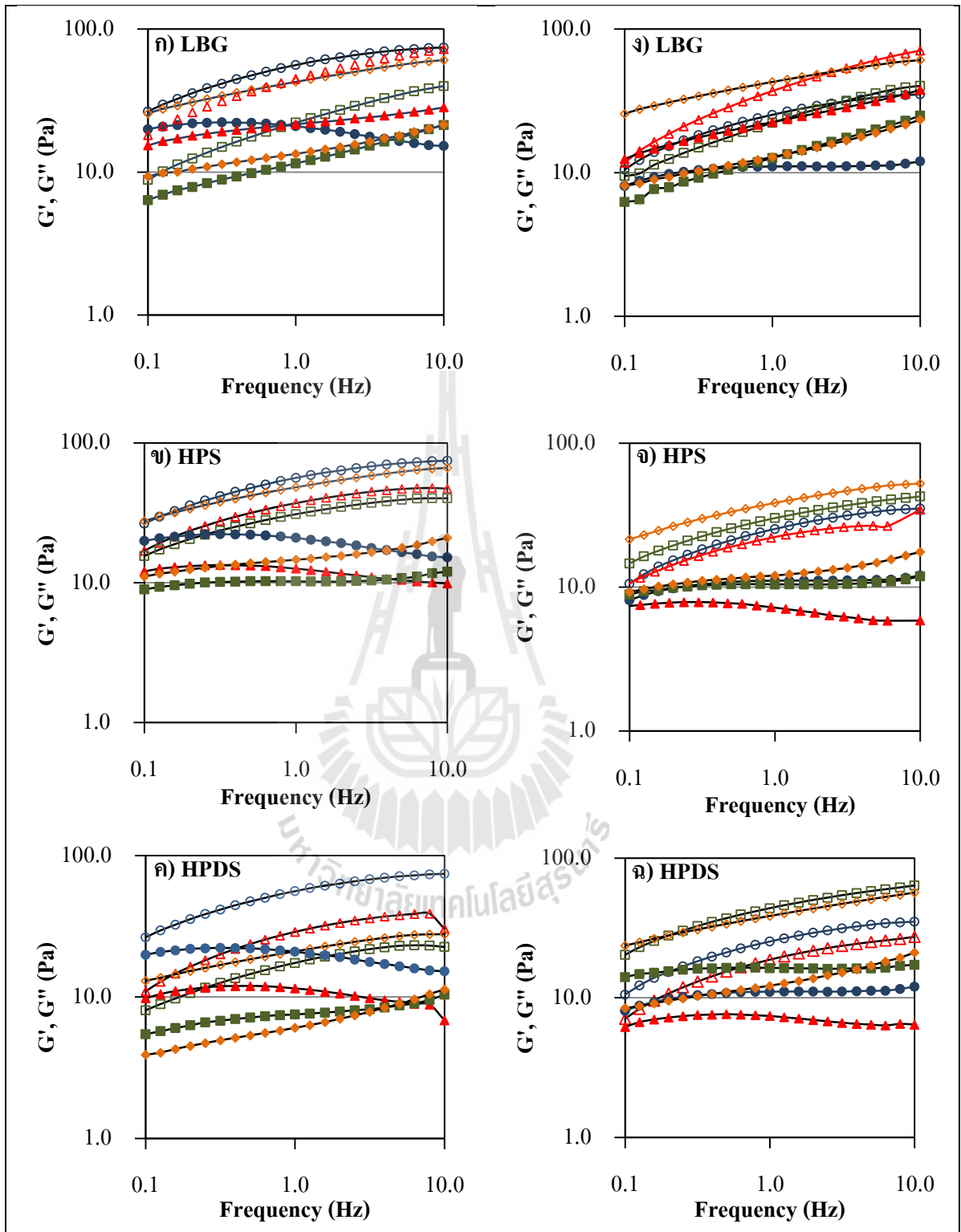
รูปที่ 4.3 ค่า Thixotropy ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ได้จากการเข้าสมการ Power law's model ที่ความเข้มข้นของซูโครสร้อยละ 12 (ก) และร้อยละ 16 (ข)

เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสะสมที่ความถี่ 1 Hz พบว่า ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสบีนกัมจะมีค่าโมดูลัสสะสมมากกว่าตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีโลคัสบีนกัมจะมีความสามารถในการป้องกันการเสียโครงสร้างเนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำต่อตัวอย่างได้มากกว่าตัวอย่างที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่ใช้แคปไซซินกับสารให้ความคงตัวจะพบว่า ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความคงตัวเพิ่มขึ้นนั้นแสดงถึง ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีส่วนช่วยให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความคงตัวมากขึ้นและสามารถป้องกันการเสียโครงสร้างจากแรงเฉือน เมื่อพิจารณาผลของสารละลายน้ำตาลซูโครส พบว่า ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 ไม่แตกต่างจากสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ร้อยละ 16 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

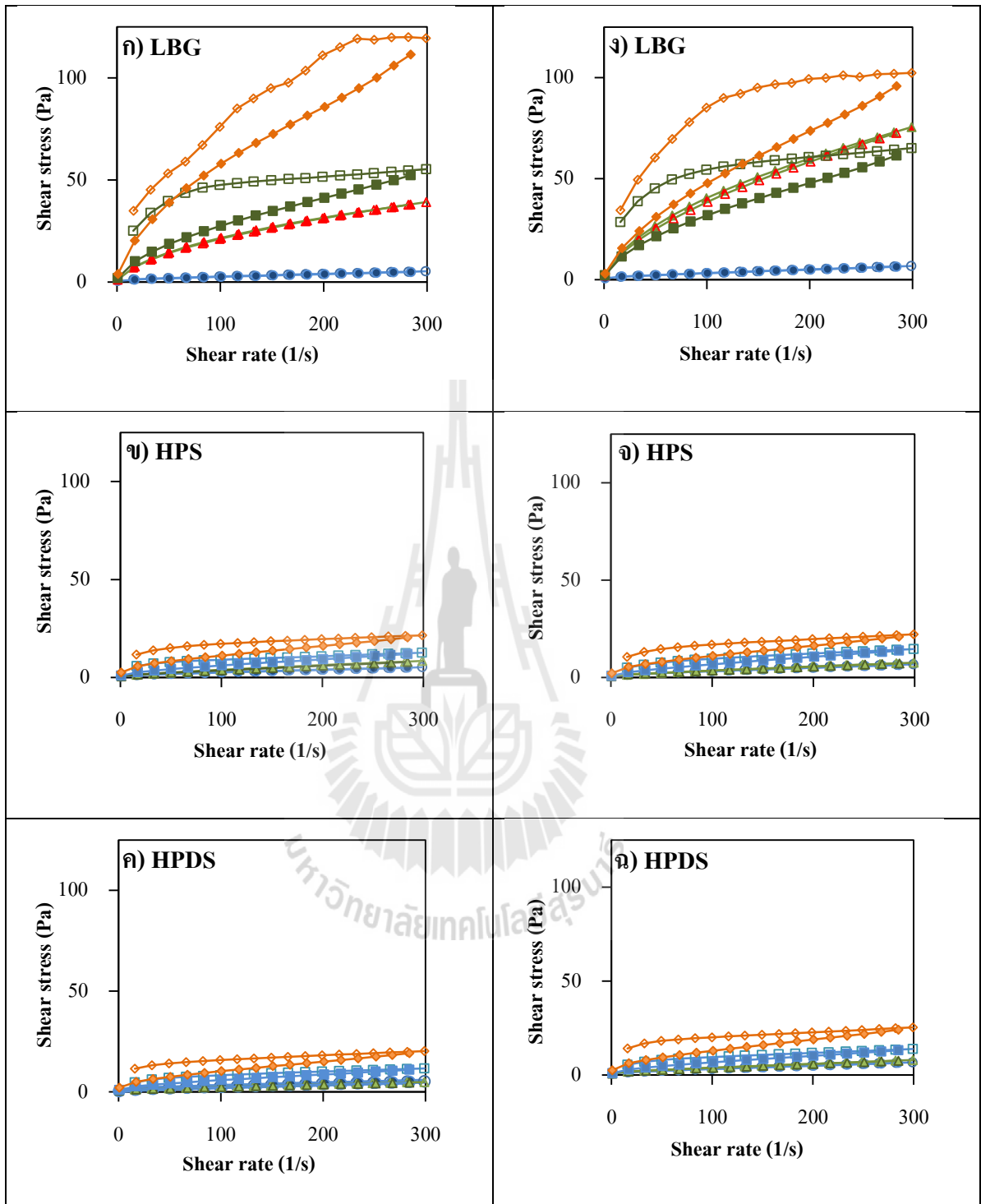
เมื่อพิจารณา Oscillatory spectra ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและ Oscillatory spectra ของสารละลายน้ำตาลซูโครส พบว่า Oscillatory spectra ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะแตกต่างจาก

Oscillatory spectra ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เนื่องจากผลของสารให้ความคงตัวในสารละลายซูโครส จะเป็นผลของสารให้ความคงตัวแต่ละชนิด หรือปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสารให้ความคงตัวเท่านั้น เมื่อศึกษาผลของสารให้ความคงตัวต่อ Oscillatory spectra ที่ระดับความเข้มข้นสารให้ความคงตัวเท่ากัน พบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะมีค่าโมดูลัสสะสมมากกว่าสารละลายน้ำตาลซูโครส เนื่องจากด้วย ส่วนประกอบในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะมีเคซีนไมเซลล์ ซึ่งแตกต่างจากสารละลายซูโครส โดยส่วน ที่มีประจุบวกของเคซีนไมเซลล์หรือ K-casein (บริเวณตำแหน่ง 97-112) จะสามารถสร้างปฏิสัมพันธ์กับ ประจุลบจากหมู่ซัลเฟตของแคปป์ตา-คาร์ราจีแนนส่งผลให้สามารถดูดซับ (Absorb) บนผิวของเคซีนไมเซลล์ (Dalglish and Morris, 1988; Snoeren, Both and Schmidt, 1976; Snoeren, Payens, Jeunink and Both, 1975; Spagnuolo, Dalglish, Goff and Morris, 2005) เมื่อแคปป์ตา-คาร์ราจีแนนดูดซับบริเวณผิวของเคซีนไมเซลล์จะทำให้ผิวของเคซีนไมเซลล์มีประจุลบซึ่งสามารถถูกทำให้เสถียรหรือสามารถแขวนลอยอยู่ได้ด้วยส่วนของไกลโคมาโครเปปไทด์ (Glycomacropeptide portion) และ เรียกส่วนนี้ว่า Hairy layer (Holt and Horne, 1996) ซึ่งมีส่วนช่วยในการป้องกันการแยกเฟสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนอกจากนี้ ความสามารถเป็นเจลอ่อน (Weak gel) ของแคปป์ตา-คาร์ราจีแนนยังมีส่วนช่วยชะลอการเคลื่อนตัวของ เคซีนไมเซลล์ (Bourriot, Garnier and Doublier, 1999b; Spagnuolo, Dalglish, Goff and Morris, 2005) และความสามารถของเจลอ่อนในการชะลอการเคลื่อนตัวของเคซีนไมเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นวิกฤตของเจลที่เกิดขึ้น (Critical gelling concentration) ด้วย





รูปที่ 4.4 ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) (สัญลักษณ์โปร่ง) และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) (สัญลักษณ์ทึบ) ของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีซูโครสเข้มข้นร้อยละ 12 (ก ข ค) และร้อยละ 16 (ง จ ฉ) O = control  $\Delta$  = 0.3%  $\square$  = 0.2775% with K-carrageenan  $\diamond$  = 0.255% with K-carrageenan



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีซูโครสร้อยละ 12 (ภาพ ก ข ค) ร้อยละ 16 (ภาพ ง จ ฉ) สัญลักษณ์โปร่ง แทนเส้นกราฟขาขึ้น และสัญลักษณ์ทึบแทน เส้นกราฟขาลง  
 O = control  $\Delta$  = 0.3%  $\square$  = 0.2775% with K-carrageenan  $\diamond$  = 0.255% with K-carrageenan

### 4.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือโลคัสบีนกัมกับแคลปา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีม

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปา-คาราจีแนนต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมที่ผ่านการปั่น (Freezing) และบ่ม (Hardening) ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงโดยใช้ค่าการขึ้นโฟม อัตราการละลาย ค่าความแข็งของไอศกรีมเป็นค่าทดสอบ พบว่า

#### 4.3.1 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือโลคัสบีนกัมกับแคลปา-คาราจีแนนต่อค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม

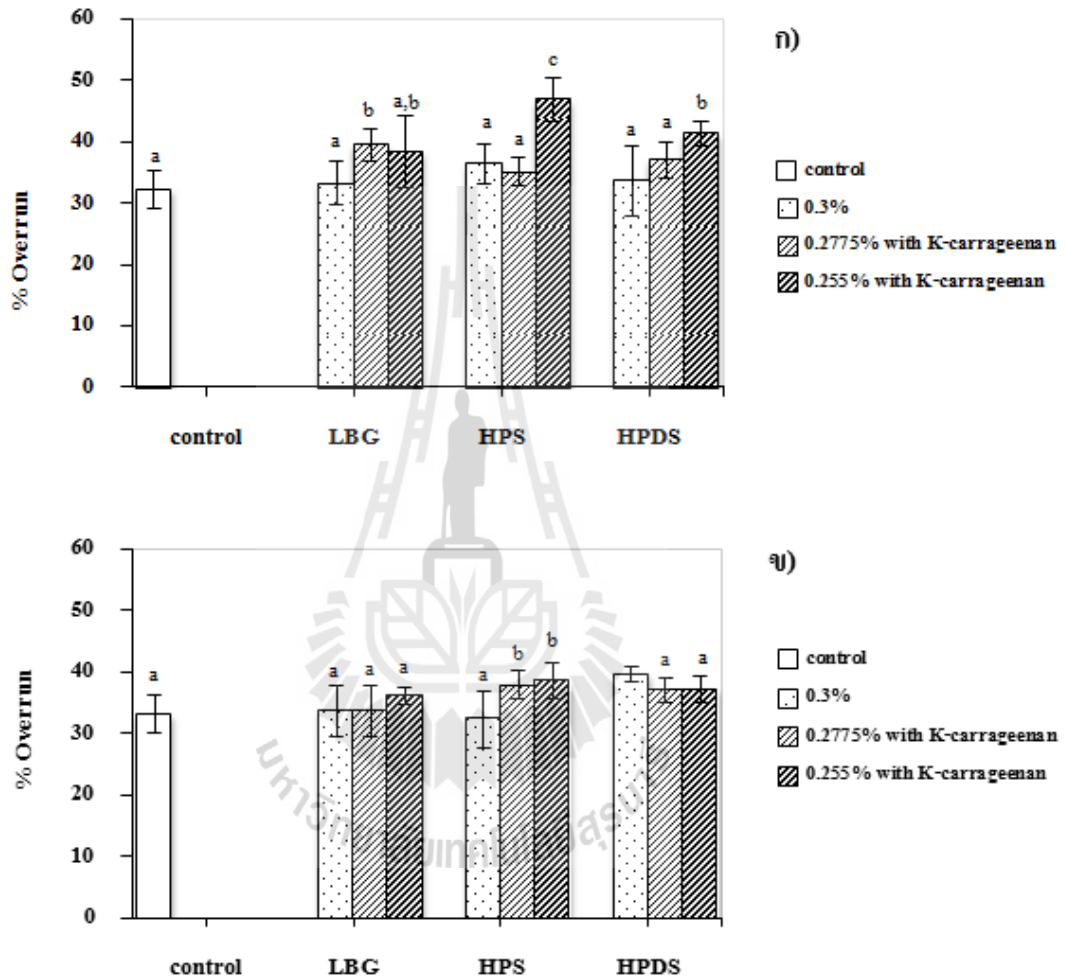
ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมที่มีแป้ง HPS ร้อยละ 0.255 กับแคลปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 47) แต่ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการศึกษามีค่าต่ำกว่าในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม ซึ่งปกติค่าการขึ้นโฟมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 (Goff, Verespej and Smith, 1999) เนื่องด้วยเครื่องปั่นไอศกรีมที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครื่องขนาดเล็ก ประกอบกับไม่มีเครื่องช่วยอัดอากาศจึงทำให้ค่าการขึ้นโฟมของตัวอย่างไอศกรีมอาจมีค่าต่ำกว่าในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีมทั่วไป Flores and Goff (1999a) พบว่าค่าการขึ้นโฟมร้อยละ 70 จะมีปริมาณฟองอากาศเพียงพอต่อการป้องกันการกระทบกันระหว่างผลึกน้ำแข็งหรือสามารถกระจายส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่แข็งตัว (Serum phase) ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ผลึกน้ำแข็งออกไปได้ ทำให้ลดอัตราการละลายของผลึกน้ำแข็งระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขั้นตอนการเก็บรักษาหรือขนส่ง (Thaiudom, Singchan and Saeli, 2005)

Abd El Rahman, Madkor, Ibrahim and Kilara (1997) และ Prindiville, Marshall, and Heymann (1999) พบว่าค่าการขึ้นโฟมต่ำส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานี้ที่พบว่า ตัวอย่างไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นโฟมต่ำจะมีค่าความแข็งของไอศกรีมต่ำ (ตารางที่ 4.6) แต่ผลที่ได้จากการศึกษานี้ขัดแย้งกับ Wilbey, Cooke and Dimos (1997) ที่รายงานว่าเมื่อค่าการขึ้นโฟมสูงจะมีค่าความแข็งของไอศกรีมต่ำ โดยอธิบายว่าตัวอย่างที่มีค่าการขึ้นโฟมสูงจะมีปริมาณฟองอากาศที่ไอศกรีมสามารถกักเก็บไว้ในโครงสร้างระหว่างการบ่มได้ปริมาณมาก เมื่อวัดค่าความแข็งตัวอย่างจะมีการต้านแรงกดน้อย นอกจากนี้ยังอธิบายว่าค่าความแข็งของไอศกรีมอาจมีผลเนื่องจากขนาดและปริมาณของผลึกน้ำแข็ง กล่าวคือ ตัวอย่างไอศกรีมที่มีขนาดผลึกน้ำแข็งใหญ่และมีปริมาณผลึกน้ำแข็งมากจะมีค่าความความแข็งของไอศกรีมสูงตามไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบการใช้โลคัสบีนกัมกับสารให้ความคงตัวจากแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS ต่อค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีม พบว่าโลคัสบีนกัมมีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าการขึ้นโฟมสูงกว่าแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS แต่เมื่อใช้แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS ร่วมกับแคลปา-คาราจีแนนพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลปา-คาราจีแนนจะทำให้ค่าการขึ้นโฟมเพิ่มขึ้นและเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติกับตัวอย่างไอศกรีมที่ใช้โลคัสบีนกัมพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) แสดงว่าปฏิสัมพันธ์ของแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปา-คาราจีแนนช่วยให้ค่าการขึ้นโฟมเพิ่มขึ้น หรือส่งผลให้ไอศกรีม

สามารถกักเก็บอากาศไว้ในโครงสร้างได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นซูโครส พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ความเข้มข้นซูโครส ร้อยละ 12 และ 16 มีค่าการขึ้นโฟมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )



ภาพที่ 4.6 ค่าการขึ้นโฟมของไอศกรีมนมที่มีส่วนผสมของสารให้ความคงตัวต่างชนิดกันที่ระดับความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส ก) ร้อยละ 12 ข) ร้อยละ 16 โดย a, b, c เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกัน

#### 4.3.2 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแปรงมันสำปะหลังตัดแปรรหรือโลคัสบีนกับกับแคปปา-คาราจีแนนต่ออัตราการละลายของไอศกรีม

อัตราการละลายของไอศกรีมสามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการละลายกับเวลาในการละลาย จากการศึกษาพบว่าอัตราการละลายของไอศกรีมจะสัมพันธ์กับการขึ้นโพลี การใส่สารให้ความคงตัวในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะลดอัตราการละลายและเพิ่มค่าการขึ้นโพลีของไอศกรีม (รูปที่ 4.6) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pelan, Watts, Campbell and Lips (1997) ที่พบว่าปริมาณฟองอากาศที่มีในไอศกรีมสูงจะส่งผลให้อัตราการละลายของไอศกรีมต่ำ เนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมากจะส่งผลให้มีคุณสมบัติป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในเนื้อไอศกรีม

จากการทดลองนี้พบว่าตัวอย่างที่ใส่โลคัสบีนกับเข้มข้นร้อยละ 0.255 กับแคปปา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 มีอัตราการละลายช้าที่สุด โดยสังเกตจากค่าความชันของกราฟที่ลดลง (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง โลคัสบีนกับและแคปปา-คาราจีแนนในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจะส่งผลให้ค่าความหนืดในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพิ่มขึ้น (Snoeren, Payens, Jeunink, and Both, 1975; Snoeren, Both and Schmidt, 1976) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen phase) ในไอศกรีมมีความหนืดสูงขึ้นนอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง โลคัสบีนกับและแคปปา-คาราจีแนนยังเพิ่มความสามารถในการกักเก็บอากาศไว้ในโครงสร้างไอศกรีม ซึ่งเมื่อปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การละลายมีค่าต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบการใช้แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS หรือ โลคัสบีนกับ พบว่า ไอศกรีมที่มีการใช้แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS เพียงอย่างเดียวจะมีอัตราการละลายสูงกว่าโลคัสบีนกับแต่ในทางกลับกันมีการขึ้นโพลีสูงกว่าโลคัสบีนกับนั้นแสดงให้เห็นว่าแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS มีส่วนช่วยให้ไอศกรีมสามารถกักเก็บฟองอากาศไว้ในโครงสร้างเพิ่มขึ้นแต่มีประสิทธิภาพในการรักษาโครงสร้างฟองอากาศให้อยู่ในโครงสร้างไอศกรีมต่ำกว่าการใช้แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS ร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณแคปปา-คาราจีแนนจะส่งผลให้อัตราการละลายของไอศกรีมต่ำลงแสดงว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคปปา-คาราจีแนนส่งผลให้ไอศกรีมสามารถกักเก็บฟองอากาศไว้ในโครงสร้างเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพในการรักษาฟองอากาศให้คงอยู่ในโครงสร้างไอศกรีมได้สูงจึงส่งผลให้อัตราการละลายของไอศกรีมลดลง

เมื่อพิจารณาผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่ออัตราการละลายของไอศกรีมพบว่า อัตราการละลายของไอศกรีมที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสทั้งสองระดับไม่มีผลต่อความสามารถในการกักเก็บอากาศและอัตราการส่งผ่านความร้อนของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

ตารางที่ 4.7 ค่าความชันของกราฟระหว่างร้อยละการละลายกับเวลา

Stabilizer	Concentration (%)		Slope	
	Primary	K-carrageenan	12% Sucrose	16% Sucrose
No Stabilizer	-	-	0.009900 <sup>i</sup>	0.009980 <sup>i</sup>
LBG	0.3	-	0.005800 <sup>bcd</sup>	0.005770 <sup>bcd</sup>
	0.2775	0.0225	0.008270 <sup>gh</sup>	0.009910 <sup>i</sup>
	0.255	0.045	0.008057 <sup>fgh</sup>	0.008737 <sup>hi</sup>
HPS	0.3	-	0.004830 <sup>ab</sup>	0.005829 <sup>bcd</sup>
	0.2775	0.0225	0.007110 <sup>defg</sup>	0.005830 <sup>bcd</sup>
	0.255	0.045	0.007770 <sup>efgh</sup>	0.00572 <sup>bcd</sup>
HPDS	0.3	-	0.003740 <sup>a</sup>	0.00557 <sup>bc</sup>
	0.2775	0.0225	0.006920 <sup>cdef</sup>	0.00639 <sup>cd</sup>
	0.255	0.045	0.008330 <sup>gh</sup>	0.00670 <sup>cde</sup>

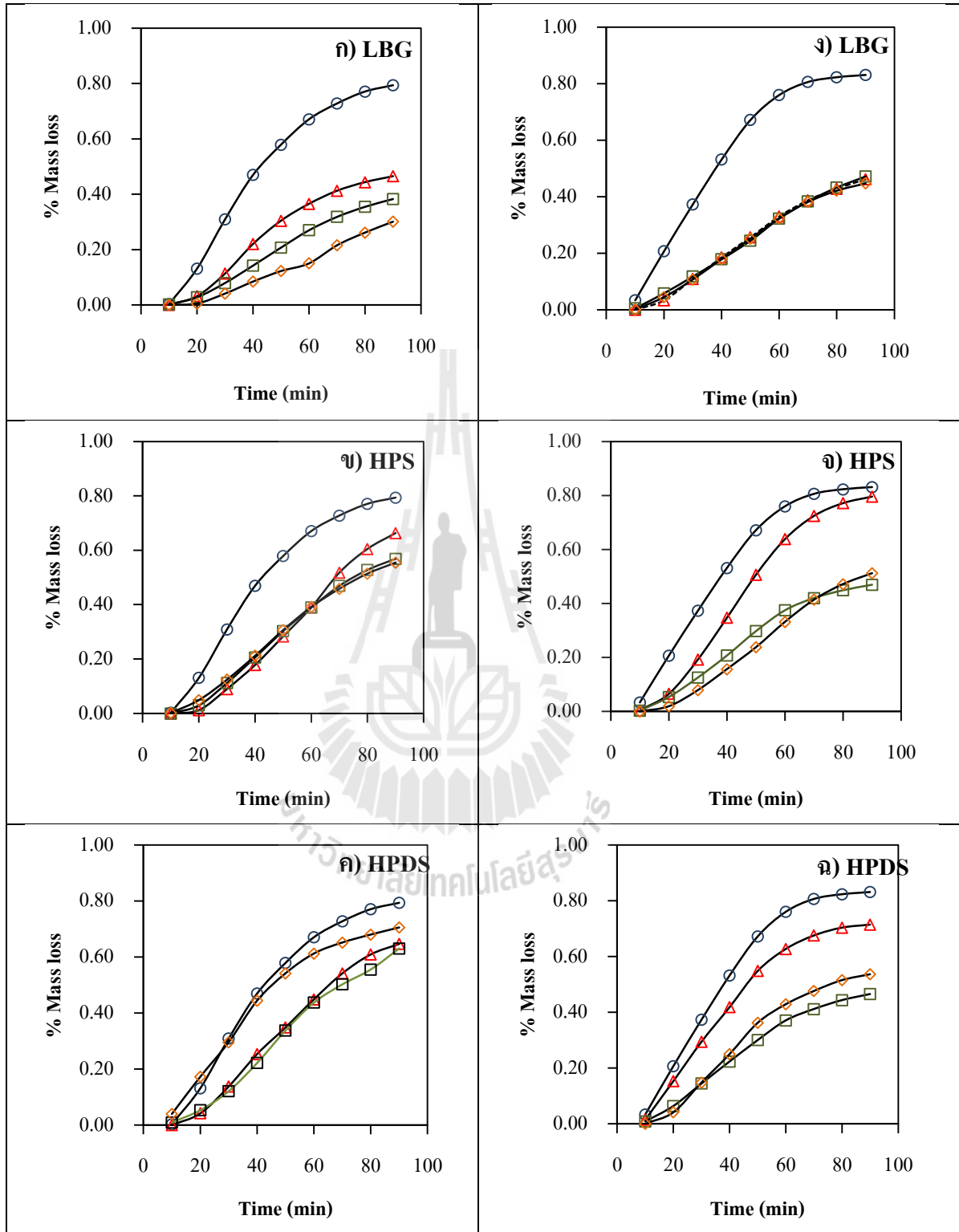
หมายเหตุ: - a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่วัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer

Stabilizer	Concentration (%)		Hardness(kg)	
	primary	K-carrageenan	12% Sucrose	16% Sucrose
No Stabilizer	-	-	1.49±1.30 <sup>fgh, A</sup>	1.98±2.11 <sup>ijk, B</sup>
LBG	0.3	-	2.38±1.13 <sup>k, A</sup>	2.08±1.76 <sup>jk, A</sup>
	0.2775	0.0225	1.65±1.05 <sup>ghij, B</sup>	0.67±0.37 <sup>abc, A</sup>
	0.255	0.045	1.65±0.85 <sup>ghij, B</sup>	0.82±0.54 <sup>abcd, A</sup>
HPS	0.3	-	1.15±0.97 <sup>cdefg, B</sup>	0.57±0.37 <sup>ab, A</sup>
	0.2775	0.0225	2.04±1.82 <sup>ijk, A</sup>	2.02±2.52 <sup>ijk, A</sup>
	0.255	0.045	1.55±0.88 <sup>fghi, B</sup>	0.91±0.79 <sup>abcde, A</sup>
HPDS	0.3	-	1.06±0.56 <sup>bcdef, A</sup>	1.21±1.40 <sup>defg, B</sup>
	0.2775	0.0225	1.06±0.37 <sup>bcdef, A</sup>	1.41±1.27 <sup>efg, A</sup>
	0.255	0.045	1.17±0.50 <sup>cdefg, B</sup>	0.49±0.53 <sup>a, A</sup>

หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 4.7 อัตราการละลายของไอศกรีมนมที่มีสารให้ความคงตัวต่างชนิดกัน ความเข้มข้นชูโครสร้อยละ 12 (ภาพ ก ข ค) ร้อยละ 16 (ภาพ ง จ ฉ) สัญลักษณ์ O = control  $\Delta$  = 0.3%  $\square$  = 0.2775% with K-carrageenan  $\diamond$  = 0.255% with K-carrageenan



### 4.3.3 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือโลคัสบีนกัมกับแคลปลา-การาจีเนนต่อค่าความแข็งของไอศกรีม

การวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) ของไอศกรีมด้วยเครื่อง Texture Analyzer เป็นการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารโดยออกแบบเครื่องมือให้มีหลักการคล้ายการเคี้ยวของมนุษย์ ค่า Hardness คือแรงที่ใช้ทำให้ตัวอย่างเสียรูปหรือแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างฟันกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่างซึ่งเป็นแรงสูงสุดที่ใช้ในการกัดครั้งแรก (Civille and Szczesniak, 1973; รัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, 2550) Soukoulis et al.(2008) อธิบายว่าการวัดค่าความแข็งของไอศกรีมอาจใช้ในการติดตามการโตของผลึกน้ำแข็ง โดยวัดขนาดของผลึกน้ำแข็งระหว่างการเก็บรักษา ถ้าค่าความแข็งของไอศกรีมเพิ่มขึ้นนั้นแสดงว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งน่าจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ค่าความแข็งยังสามารถบอกผลของส่วนประกอบในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เช่น ไขมัน สารให้ความหวาน โปรตีน และสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ เป็นต้น และผลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Guinard et al., 1997; Muse and Hartel, 2004; Soukoulis et al., 2008)

จากตารางที่ 4.8 พบว่า การใช้แป้งมันสำปะหลังตัดแปรในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมควรใช้ร่วมกับแคลปลา-การาจีเนน เนื่องจากจะทำให้ค่าความแข็งของไอศกรีมลดลงจากที่ใช้แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ค่าความแข็งของไอศกรีมที่ใช้แป้ง HPDS เข้มข้นร้อยละ 0.255 กับแคลปลา-การาจีเนนร้อยละ 0.045 มีค่าความแข็งน้อยที่สุดแสดงว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปลา-การาจีเนนมีส่วนช่วยชะลอการโตของขนาดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งของไอศกรีมมีค่าน้อยที่สุด และสอดคล้องกับค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งโดยพบว่า แป้ง HPDS กับแคลปลา-การาจีเนน มีค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าความแข็งของไอศกรีมพบว่า ตัวอย่างไอศกรีมที่ประกอบด้วยความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 มีค่าความแข็งของไอศกรีมสูงกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 จะมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่า ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งในขั้นตอนการปั่น ถ้ามีปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูงจะส่งผลให้เครื่องปั่นต้องใช้เวลาในการดึงความร้อนแฝงออกจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ส่งผลให้ได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16 โดย Wilbey, Cooke and Dimos (1997) รายงานว่าตัวอย่างไอศกรีมที่มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะมีค่าความแข็งของไอศกรีมสูงกว่าตัวอย่างที่มีผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่าค่าความแข็งสอดคล้องกับค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็ง (Percent of ice crystal growth) โดยพบว่า ตัวอย่างไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 12 มีค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งสูงกว่าที่สารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16 (ตารางที่ 4.9)

#### 4.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปา-การาจีเนนต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมนม

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปา-การาจีเนนต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเมื่อเริ่มต้น ลักษณะของผลึกน้ำแข็ง ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งเพื่อใช้อ้างอิงถึงค่าการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง (Ice recrystallization) ศึกษาในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ประกอบด้วย แป้ง HPS แป้ง HPDS หรือ โลคัสบีนกัมกับแคลปา-การาจีเนน และแปรระดับความเข้มข้นซูโครส 2 ระดับ คือร้อยละ 12 และร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก

กระบวนการตกผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมจะเริ่มจากการสร้างผลึกน้ำแข็ง ที่เลียนแบบจากการลดอุณหภูมิส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอย่างรวดเร็วภายในผิวด้านในของเครื่องปั่นไอศกรีมแบบใบมีดชุดผิว ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.6.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำ Temperature sweep จำลองจากอุณหภูมิที่ใช้เก็บตัวอย่างไอศกรีม (-18 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิที่แช่ตัวอย่างไอศกรีมในระหว่างการพักขาย (-10 องศาเซลเซียส) ซึ่งถือว่าเป็นช่วงอุณหภูมิวิกฤติที่มีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมมากที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมและขนาดของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Regand and Goff, 2003) (รูปที่ 4.8)

เมื่อพิจารณาผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อลักษณะทางกายภาพและขนาดของผลึกน้ำแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 จะมีขนาดใหญ่และมีระยะห่างระหว่างผลึกน้ำแข็งมากกว่า แต่มีจำนวนผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าผลึกน้ำแข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16

จากการศึกษาผลของสารให้ความคงตัวที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้น พบว่าสารให้ความคงตัวทางการค้าและสารให้ความคงตัวจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรทั้งสองชนิดส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้น ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Flores and Goff (1999) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือ โลคัสบีนกัมร่วมกับอิมัลซิไฟเออร์ต่อขนาดของน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมหลังจากการแช่แข็ง (Hardening) พบว่าสารให้ความคงตัวทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการทดลองของ Regand and Goff (2002) ที่พบว่าผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ โลคัสบีนกัมในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมันนม (MSNF) ไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าสารให้ความคงตัวไม่มีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้น (Miller-Livney and Hartel, 1997; Sutton and Wilcox, 1998a)

เมื่อส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกตัวอย่างผ่านกระบวนการ Temperature sweep แล้วพบว่าขนาดผลึกน้ำแข็งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อพิจารณาสารให้ความคงตัวที่สามารถชะลอการโตของผลึกน้ำแข็งในระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 ได้มากที่สุดคือ โลคัสบีนกัม ร้อยละ 0.3 รองลงมาคือแป้ง HPS ร้อยละ 0.255 กับแคลปา-การาจีเนนร้อยละ 0.045 และ แป้ง HPDS ร้อยละ 0.2775 กับ

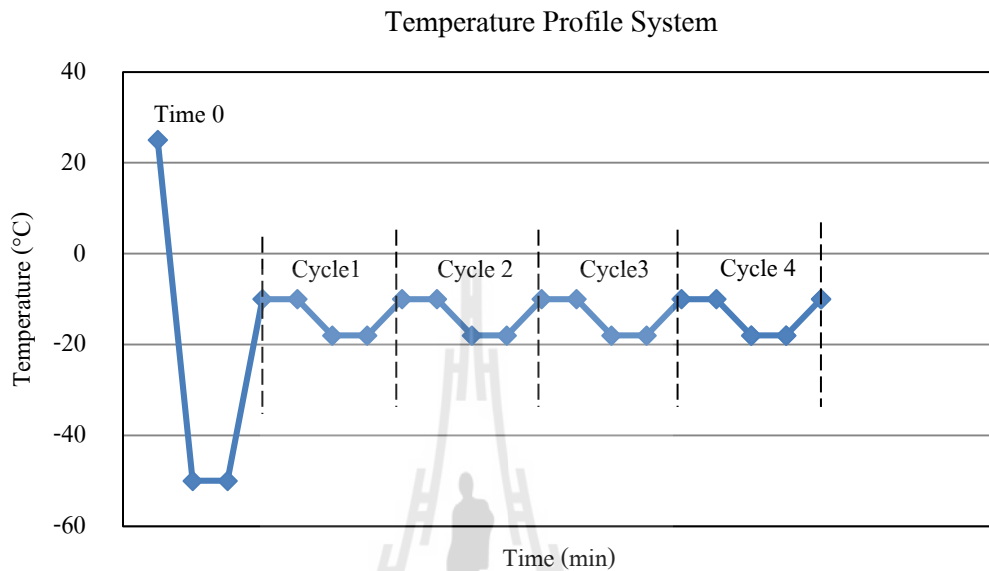
แคลปลา-คาราจีแนนร้อยละ 0.0225 ส่วนตัวอย่างที่มีความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 16 คือ โลคัสปินกัม ร้อยละ 0.3 รองลงมาคือ แป้ง HPDS ร้อยละ 0.3 และแป้ง HPS ร้อยละ 0.255 กับแคลปลา-คาราจีแนนร้อยละ 0.045 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ประเภทของการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเมื่อผ่านกระบวนการ Temperature sweep เป็นแบบ Melt-refreeze นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลึกน้ำแข็งจะละลายส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กลง แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงน้ำบริเวณใกล้ ๆ กับผลึกน้ำแข็งจะแข็งตัวรวมกับผลึกน้ำแข็ง จึงส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532; Goff and Hartel, 2006)

ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกน้ำแข็งเมื่อเทียบกับขนาดผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นซึ่งหมายถึงความสามารถในการชะลอการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการทำ Temperature sweep ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของจำนวนผลึกน้ำแข็งกับจำนวนรอบ (Cycle) หลังผ่านการทำ Temperature sweep จะพบว่าเมื่อจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้น ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมนมทุกตัวอย่าง จะมีการกระจายตัวของจำนวนผลึกน้ำแข็งลดลงและมีการกระจายตัวของขนาดผลึกน้ำแข็งมากขึ้น (ภาคผนวก รูปที่ ข.1 ข.2 และ ข.3)

สำหรับตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี โลคัสปินกัมเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งมีค่าต่ำที่สุด ทั้งที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16 โดยมีค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งเท่ากับ 72.57 และ 53.63 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งที่สูงที่สุด คือร้อยละ 154.48 (ตารางที่ 4.9) จากผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง โลคัสปินกัมกับแคลปลา-คาราจีแนน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคลปลา-คาราจีแนนจะส่งผลให้ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 และร้อยละ 16 และในทางกลับกันพบว่าเมื่อใช้สารให้ความคงตัวจากแป้ง HPS และแป้ง HPDS ที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 จะให้ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งมีค่าลดลง

การใช้โกลด์สปีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนนส่งผลให้ขนาดผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีขนาดใหญ่กว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ซึ่งขัดแย้งกับผลของค่าความหนืดปรากฏโดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีการใช้โกลด์สปีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนนจะมีค่าความหนืดปรากฏสูงที่สุดแต่มีขนาดของผลึกน้ำแข็งใหญ่ที่สุด เนื่องจากโกลด์สปีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนนเป็นสารให้ความคงตัวที่เพิ่มความหนืดให้แก่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ด้วยโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำและมี radius of gyration สูง ซึ่งในขั้นตอนการทำ Temperature sweep อาจส่งผลให้เกิด Thermodynamic incompatibility ระหว่างโกลด์สปีนกัมกับแคลปลา-คาราจีแนน และเกิดการแยกเฟสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมในระหว่างการทำ Temperature sweep ทำให้โปรตีนเคลื่อนที่มายู่บริเวณผิวหน้าของผลึกน้ำแข็งโปรตีนดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ (Regand and Goff, 2002) หรืออาจเกิดจากความสามารถของโกลด์สปีนกัมและแคลปลา-คาราจีแนนที่สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำเมื่อโกลด์สปีนกัมและแคลปลา-คาราจีแนนดังกล่าวมาอยู่ร่วมกันอาจเกิดพันธะกับโมเลกุลน้ำที่อยู่ใกล้ ๆ เมื่ออุณหภูมิในการทำ

Temperature sweep ลดลงน้ำอิสระที่อยู่ใกล้กับผลึกน้ำแข็งก็จะแข็งตัว ส่งผลให้ขนาดของผลึกน้ำแข็ง เมื่อผ่านการทำ Temperature sweep จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น (รูปที่ 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ Temperature sweep

เมื่อเปรียบเทียบผลของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นที่ระดับความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวเดียวกันพบว่า สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 16 จะมิผลทำให้ขนาดของผลึกน้ำแข็งมีค่าเล็กกว่าที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 12 นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ต่างกันส่งผลถึงค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็ง โดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 16 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 ส่งผลให้ค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งที่มีค่าต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ระดับความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 12 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่ามากขึ้น ปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่จะแข็งตัวเป็นผลึกน้ำแข็งลดลง จึงทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง (Donhowe et al., 1991; Hartel, 1996; Trgo, Koxholt and Kessler, 1999) ในทางกลับกันถ้าปริมาณน้ำในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีปริมาณมาก ต้องใช้เวลานานในการดึงความร้อนแฝงออกจากส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมากกว่า ทำให้อัตราการเกิดผลึกช้า ขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่และมีจำนวนผลึกน้ำแข็งน้อยกว่า (Goff and Hartel, 2006)

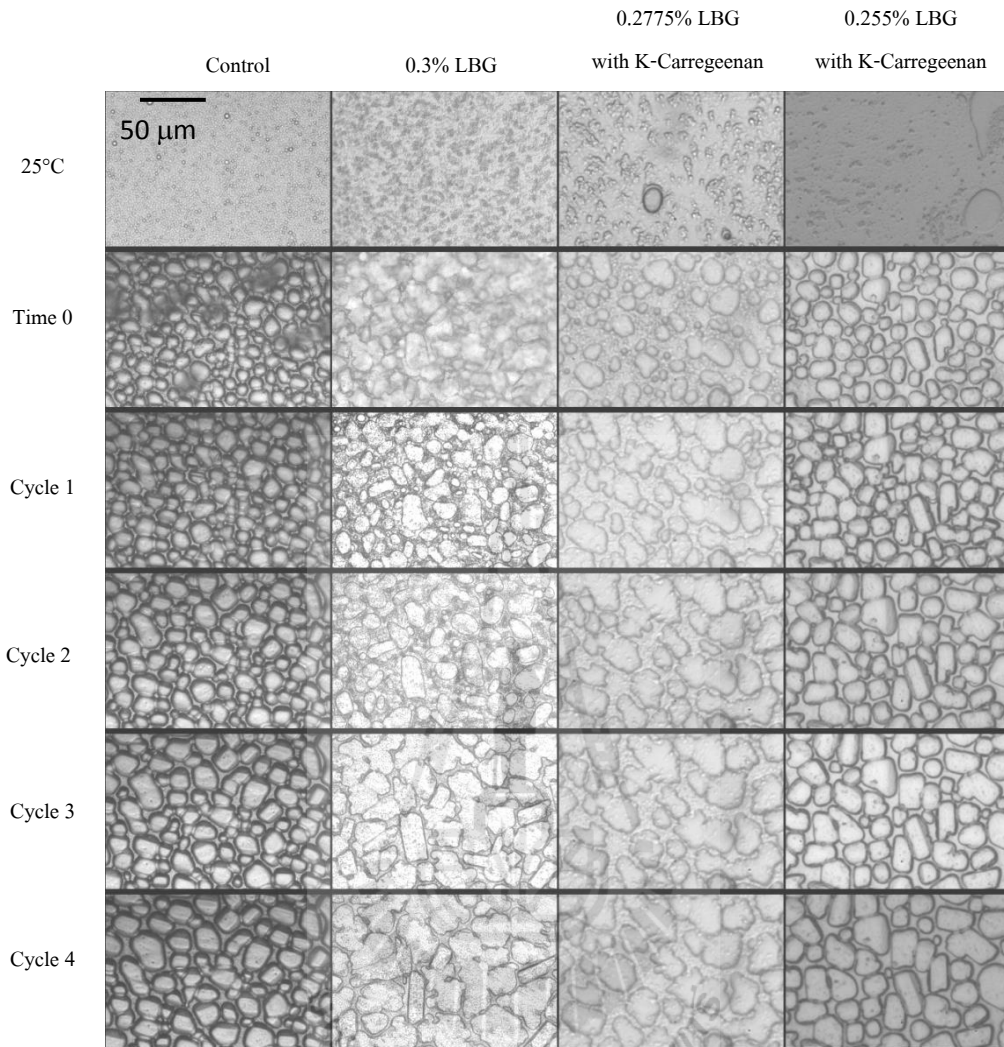
ตารางที่ 4.8 ขนาดของผลึกน้ำแข็งก่อนและหลังการทำ Temperature sweep และค่าร้อยละการโตของผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

Stabilizer	Concentration (%)		12%Sucrose		16%Sucrose		12%Sucrose	16%Sucrose
			Ice crystal size ( $\mu\text{m}$ )		Ice crystal size ( $\mu\text{m}$ )		Ice crystal growth (%)	Ice crystal growth (%)
	Primary	K-carrageenan	Before cycling	After cycling	Before cycling	After cycling		
No Stabilizer	-	-	10.87 <sup>a, A</sup>	88.47 <sup>ab, B</sup>	66.50 <sup>ab, A</sup>	23.18 <sup>a, B</sup>	88.47 <sup>ab, B</sup>	66.50 <sup>ab, A</sup>
LBG	0.3	-	14.53 <sup>a, A</sup>	72.57 <sup>ab, B</sup>	61.21 <sup>a, A</sup>	31.75 <sup>ab, B</sup>	72.57 <sup>ab, B</sup>	61.21 <sup>a, A</sup>
	0.2775	0.0225	15.57 <sup>a, A</sup>	145.26 <sup>d, B</sup>	109.00 <sup>c, A</sup>	32.70 <sup>bc, B</sup>	145.26 <sup>d, B</sup>	109.00 <sup>c, A</sup>
	0.255	0.045	15.90 <sup>a, A</sup>	115.95 <sup>c, B</sup>	78.02 <sup>ab, A</sup>	55.63 <sup>d, C</sup>	115.95 <sup>c, B</sup>	78.02 <sup>ab, A</sup>
	0.255	0.045	15.90 <sup>a, A</sup>	115.95 <sup>c, B</sup>	78.02 <sup>ab, A</sup>	55.63 <sup>d, C</sup>	115.95 <sup>c, B</sup>	78.02 <sup>ab, A</sup>
HPS	0.3	-	23.88 <sup>b, B</sup>	100.84 <sup>b, A</sup>	100.51 <sup>b, B</sup>	25.47 <sup>ab, B</sup>	100.84 <sup>b, A</sup>	100.51 <sup>b, B</sup>
	0.2775	0.0225	18.33 <sup>a, A</sup>	122.34 <sup>c, B</sup>	72.34 <sup>ab, A</sup>	30.14 <sup>bc, AB</sup>	122.34 <sup>c, B</sup>	72.34 <sup>ab, A</sup>
	0.255	0.045	17.57 <sup>b, A</sup>	77.38 <sup>b, A</sup>	76.51 <sup>ab, A</sup>	27.76 <sup>ab, B</sup>	77.38 <sup>b, A</sup>	76.51 <sup>ab, A</sup>
HPDS	0.3	-	17.11 <sup>b, A</sup>	154.48 <sup>ab, B</sup>	69.46 <sup>ab, A</sup>	23.76 <sup>a, B</sup>	154.48 <sup>ab, B</sup>	69.46 <sup>ab, A</sup>
	0.2775	0.0225	19.56 <sup>b, A</sup>	92.19 <sup>b, B</sup>	90.29 <sup>b, A</sup>	28.86 <sup>ab, B</sup>	92.19 <sup>b, B</sup>	90.29 <sup>b, A</sup>
	0.255	0.045	10.99 <sup>a, A</sup>	119.76 <sup>c, B</sup>	82.01 <sup>b, A</sup>	21.64 <sup>a, B</sup>	119.76 <sup>c, B</sup>	82.01 <sup>b, A</sup>

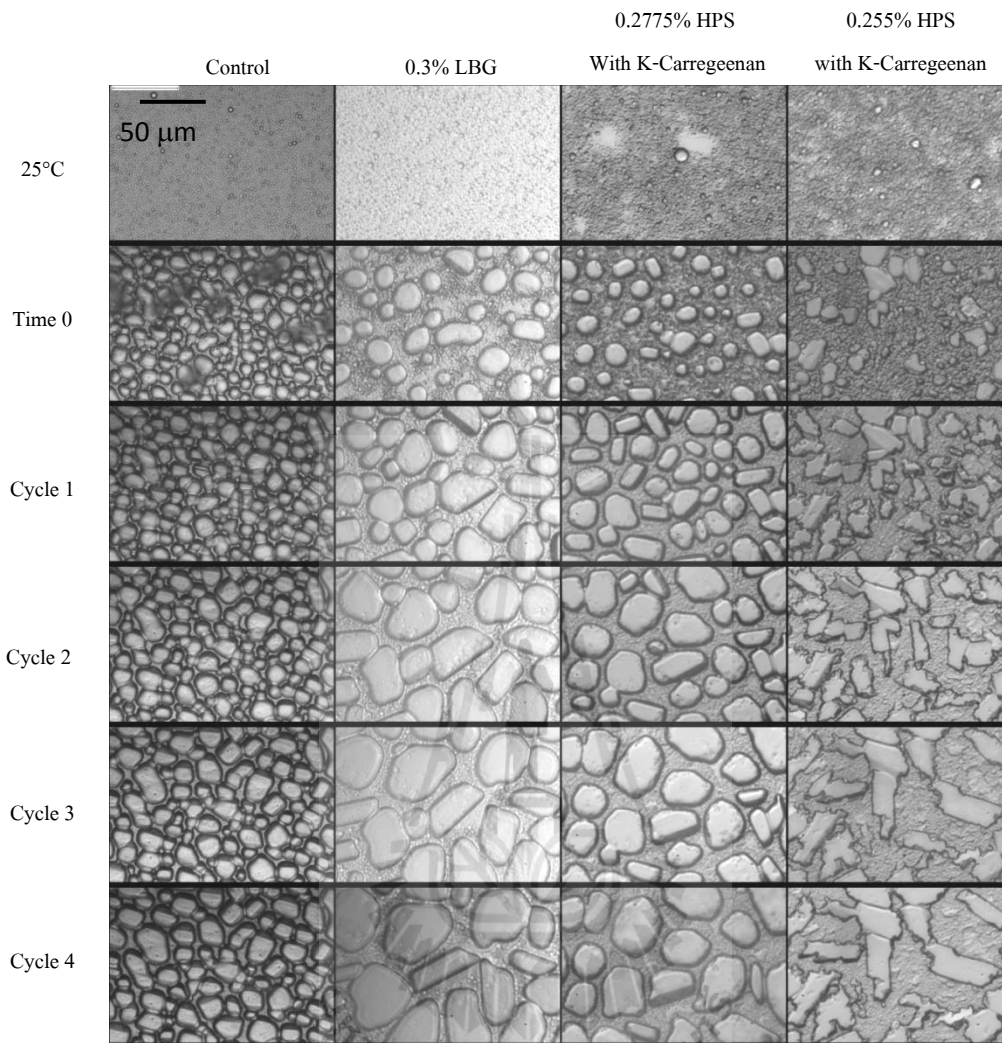
หมายเหตุ: - A, B เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวอนภายในผลการวิเคราะห์เดียวกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

- a, b เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งภายในระดับความเข้มข้นซูโครสเดียวกัน

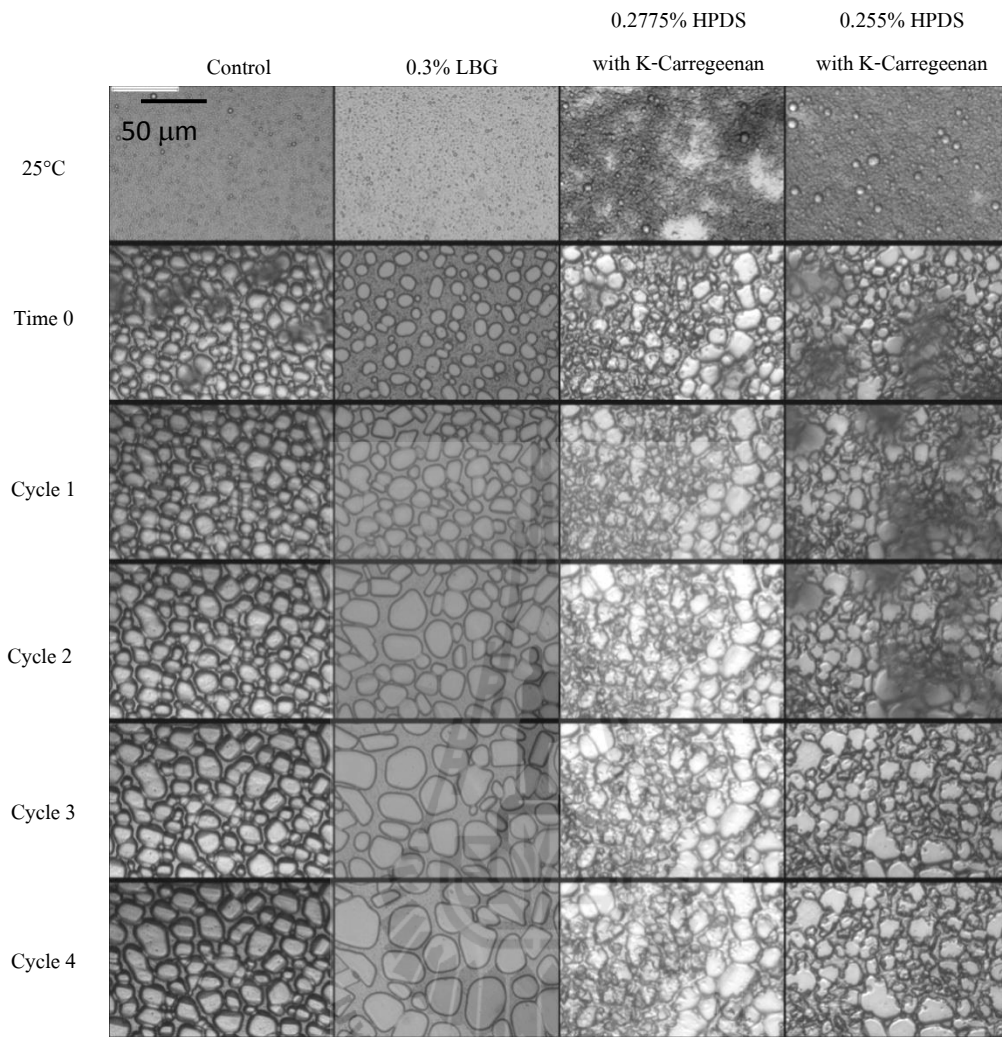
หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



**รูปที่ 4.9** ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี LBG และ ซูโครสร้อยละ 12 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ

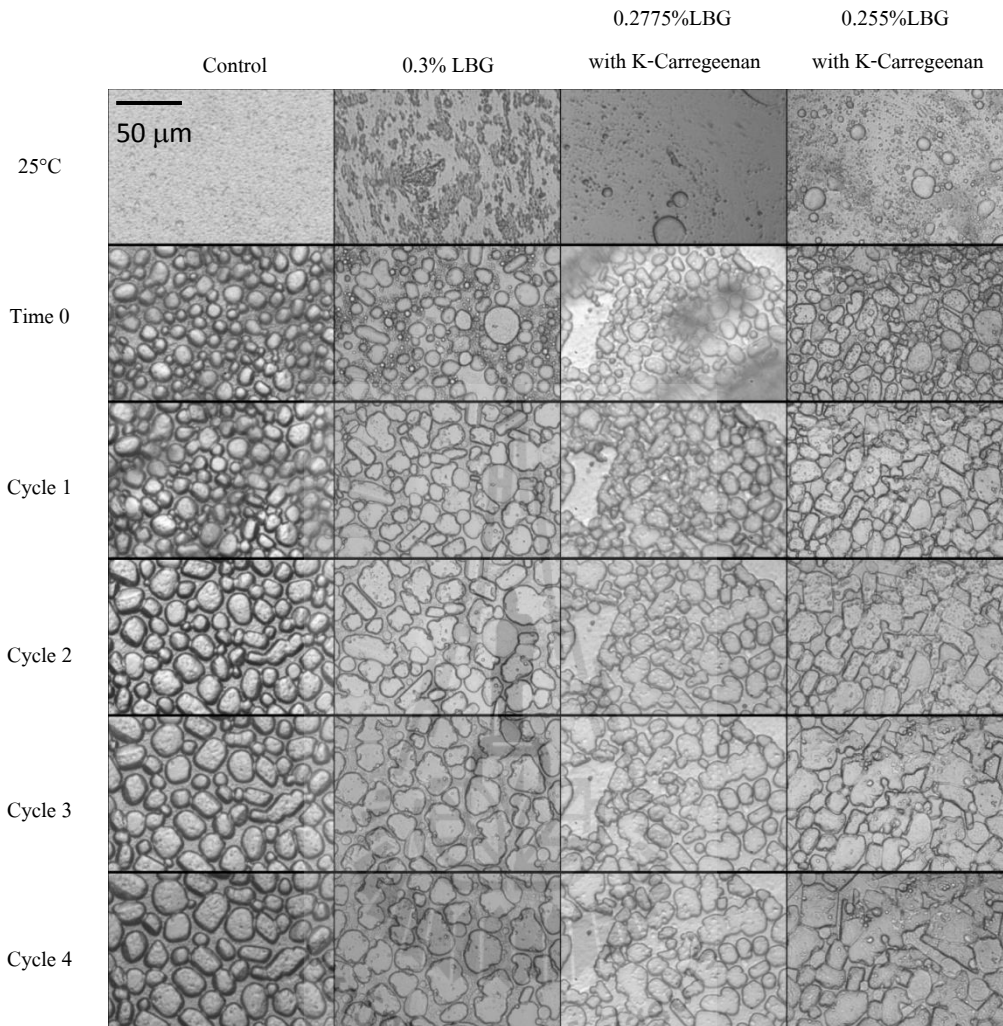


**รูปที่ 4.10** ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี HPDS และ ซูโครสร้อยละ 12 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ

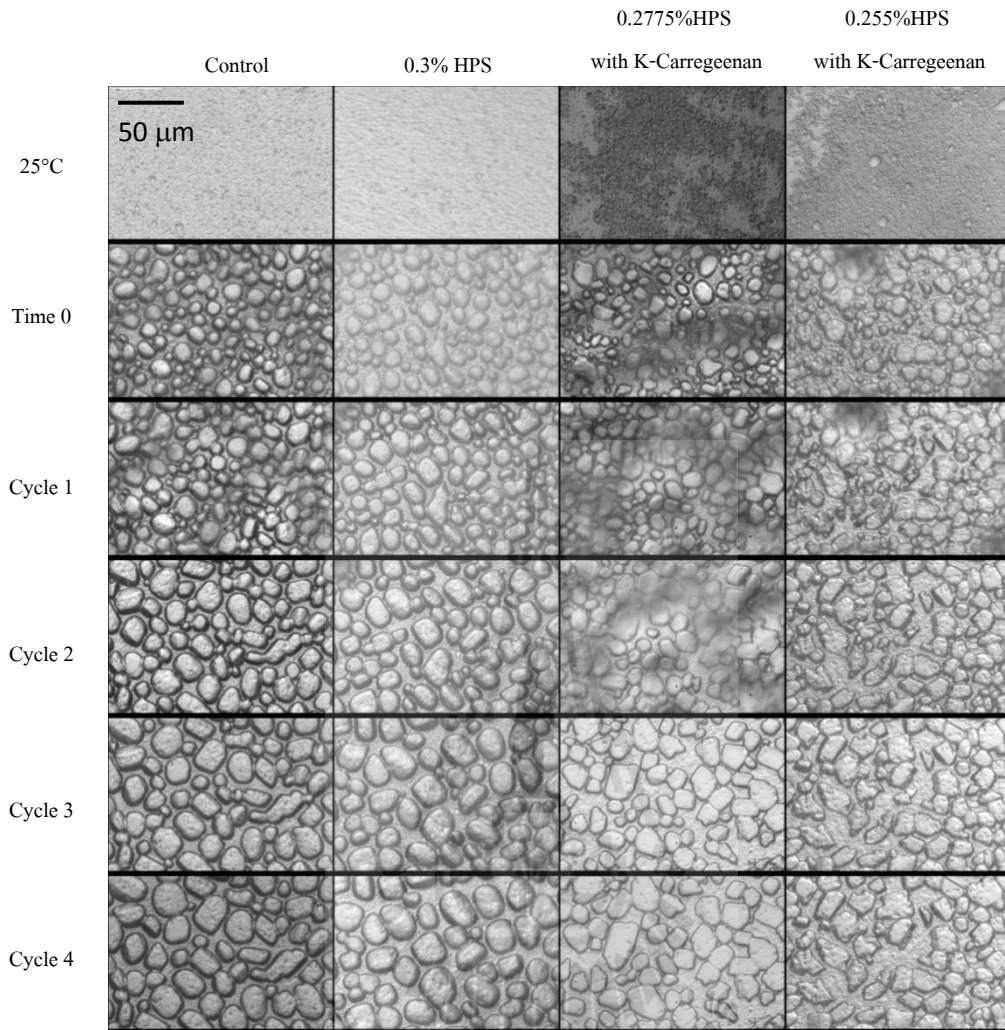


**รูปที่ 4.11** ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี HPDS และ ชูโครส ร้อยละ 12 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ

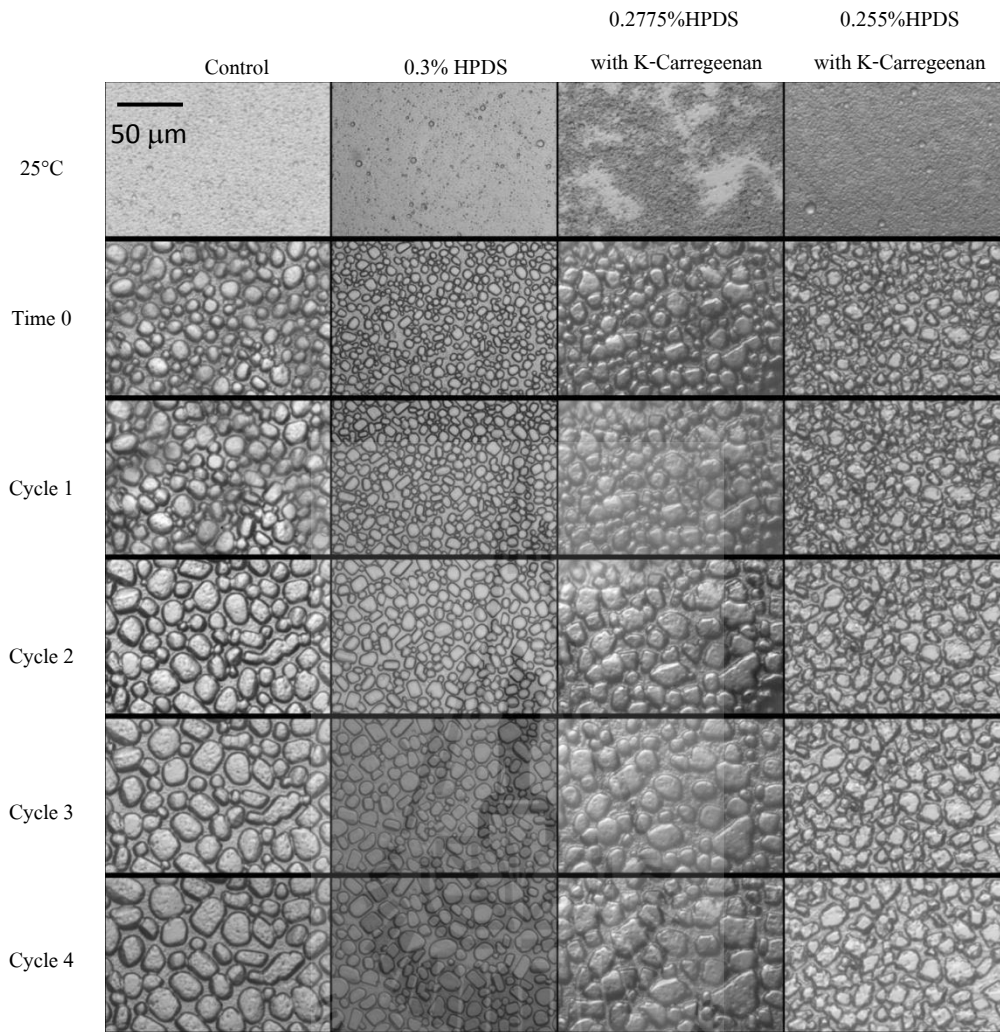




**รูปที่ 4.12** ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี LBG และ ซูโครสร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ



รูปที่ 4.13 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี HPS และ ซูโครสร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ



รูปที่ 4.14 ผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทำ Temperature sweep ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มี HPDS และ ชูโครสร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือภาพส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมก่อนทำการทดลอง โดย Time 0 = ภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ -10 องศาเซลเซียส  
 Cycle 1 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 1 รอบ  
 Cycle 2 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 2 รอบ  
 Cycle 3 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 3 รอบ  
 Cycle 4 = ภาพผลึกน้ำแข็งหลังจากผ่านการทำ Temperature cycling 4 รอบ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของแป้ง HPDS ซึ่งเป็นแป้งที่ผ่านการเชื่อมข้ามจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีในเซชันเพิ่มสูงขึ้น และแป้ง HPDS มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีในเซชัน ( $T_c-T_g$ ) แคบกว่าเมื่อเทียบกับแป้ง HPS ซึ่งเป็นแป้งที่ไม่ผ่านการเชื่อมข้าม

5.1.2 ในระบบซูโครส สารละลายซูโครสที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวหรือสารละลายซูโครสที่เติมสารให้ความคงตัว (โกลด์สปีนกัม แป้ง HPS หรือแป้ง HPDS) มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ตัวอย่างที่เติมสารให้ความคงตัวมีค่าความหนืดปรากฏมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวค่าความหนืดปรากฏจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แป้ง HPS แป้ง HPDS หรือโกลด์สปีนกัมร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน นอกจากนี้ ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครส (ร้อยละ 12 และร้อยละ 16) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของระบบสารละลายน้ำตาลซูโครส

5.1.3 ในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่มีสารให้ความคงตัวส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่เติมแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ในทางกลับกันส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวร่วมกับแคปปา-คาราจีแนนจะมีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนประเภท Time dependent shear thinning เมื่อเปรียบเทียบผลของระดับความเข้มข้นซูโครสต่อพฤติกรรมการไหลที่ชนิดและระดับความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวเดียวกันพบว่าระดับความเข้มข้นของซูโครสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ทั้งในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัวและในตัวอย่างที่ใส่สารให้ความคงตัว นอกจากนี้ ตัวอย่างที่เติมสารให้ความคงตัวจะมีค่าความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดค่า Thixotropy และค่าโมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ร่วมกับแคปปา-คาราจีแนนจะส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด ค่า Thixotropy และค่าโมดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลลดลง

5.1.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในระบบของสารละลายซูโครสจะแตกต่างจากปฏิสัมพันธ์ในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แคปปา-คาราจีแนนร่วมกับสารให้ความคงตัวพบว่าค่าโมดูลัสสะสมและค่าความคงตัวเพิ่มขึ้นนั้นแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีส่วนช่วยให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความคงตัวมากขึ้นและสามารถป้องกันการเสียโครงสร้างจากแรงเฉือน

5.1.5 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคปปา-คาราจีแนนส่งผลให้ค่าการขึ้นโพนมีค่าสูงขึ้น ระดับความเข้มข้นสารละลายซูโครสร้อยละ 12 หรือร้อยละ 16 ไม่มีผลต่อการขึ้น

โพลีเมอร์ของไอศกรีม นั้นแสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปปา-คาราจีแนน ส่งผลให้ไอศกรีมมีความสามารถในการกักเก็บอากาศเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าความแข็งสูงขึ้น และมีอัตราการละลายสูงกว่าตัวอย่างไอศกรีมที่ใช้โลคัสทีนกับกับแคลปปา-คาราจีแนน ซึ่งค่าความแข็งที่สูงขึ้นสอดคล้องกับค่าการไหลของผลึกน้ำแข็ง โดยค่าการไหลของผลึกน้ำแข็งที่ผ่านการทำ Temperature sweep ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปปา-คาราจีแนน จะมีค่าสูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสทีนกับกับแคลปปา-คาราจีแนน

5.1.6 ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ผ่านการทำ Temperature sweep จะมีการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งแบบ Melt-refreeze และพบว่า ผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 12 จะมีขนาดผลึกน้ำแข็งใหญ่และมีค่าร้อยละการไหลของผลึกน้ำแข็งสูงกว่าตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 16 เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 16 จะมีปริมาณน้อยกว่า ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการ เปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นผลึกน้ำแข็งในระหว่างการปั่นน้อยกว่าส่วนพร้อมทำไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 12 นอกจากนี้ ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นใน ไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 16 มีขนาดเล็กและมีปริมาณผลึกน้ำแข็งมากกว่าไอศกรีมที่มีสารละลายซูโครสร้อยละ 12

5.1.7 ค่าร้อยละการไหลของผลึกน้ำแข็งของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสทีนกับ มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมที่มีแป้ง HPS กับแคลปปา-คาราจีแนนและ ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีโลคัสทีนกับกับแคลปปา-คาราจีแนน

5.1.8 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปปา-คาราจีแนน ต่อ ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางวิทยากระแสกับค่าร้อยละการไหลของผลึกน้ำแข็ง พบว่า ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นส่งผลให้ค่าคุณสมบัติทางวิทยากระแส อาทิเช่น ค่าความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดค่า Thixotropy และค่าโมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปปา-คาราจีแนนส่งผลให้ค่าร้อยละการไหลของผลึกน้ำแข็งสูงกว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลคัสทีนกับกับแคลปปา-คาราจีแนน แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างแป้ง HPS หรือแป้ง HPDS กับแคลปปา-คาราจีแนน จะลดการไหลของผลึกน้ำแข็งได้ต่ำกว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลคัสทีนกับกับแคลปปา-คาราจีแนน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยต่อไปควรมีการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมในด้านการยอมรับของผู้บริโภคและการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการปริมาณแคลอรีต่อหน่วยบริโภค เพื่อกลุ่มบริโภคที่มีเป้าหมายในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่มุ่งเน้นประโยชน์ต่อสุขภาพ

## รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กองบรรณาธิการ TRN. (2550). **เริ่มต้นธุรกิจไอศกรีมโฮมเมด**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อาร์เอ็นบีค.
- นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). **เคมีอาหาร**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- มนัส แซ่ด่าน. (2538). **รีโอโลยีเบื้องต้น**. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วรรณาท้องเจริญชัย และ วินุชย์ศักดิ์ กาวิละ. (2531). **นมและผลิตภัณฑ์นม**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียน-สโตร์.
- วิไล รังสาตทอง. (2547). **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: บริษัท เท็กซ์ แอน เจอร์-นัล พับลิเคชั่น จำกัด.
- ศุกฤตย์ ไทยอุดม. (2548). รายงานการวิจัยเรื่อง สมบัติวิทยากระแสของไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมกะทิ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. (2545). **การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง**. [ออนไลน์]. ได้จาก <https://sites.google.com/site/l2techcom/-9>
- อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. (2553). **Rheology and Polymer Characterization**. [ออนไลน์]. ได้จาก <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~sanongn1/course.html>.
- ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. (2532). **กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- Akhtar, M., Murray, B. S. and Dickinson, E. (2006). Perception of creaminess of model oil in water dairy emulsion: influence of the shear thinning nature of a viscosity controlling hydrocolloid. **Food Hydrocolloids**. 20: 839-847.
- Andreasen, T. G., and Nielsen, H. (1998). Ice cream and aerated desserts In: R. Early, (ed.). **The technology of dairy products (2nd ed)**. London: Blackie academic & professional. 301-324.
- Akesowan, A. (2008). Effect of combined stabilizers containing konjac flour and K-carrageenan on ice-cream. **Au J. T.** 12 (2): 81-85.
- Berger, K. G. (1990). 'Ice cream'. In Lasson, K. and Friberg, S.E. (eds). **Food Emulsions**. New York: Marcel Dekker. 367-429.
- Blond, G. (1988). Velocity of linear crystallization of ice crystallization of ice in macromolecular systems. **Cryobiology**. 25: 61-66.

- Bolliger, S., Wildmoser, H., Goff, H. D. and Tharp, B. W. (2000). Relationships between ice cream mixviscoelasticity and ice crystal growth in ice cream. **Int. Dairy J.** 10: 791-797.
- Budiaman, E. R. and Fennema, O. (1987a). Linear rate of water crystallization as influenced by temperature of hydrocolloid suspensions. **J. Dairy Sci.** 70: 534-546.
- Budiaman, E. R. and Fennema, O. (1987b). Linear rate of water crystallization as influenced by viscosity of hydrocolloid suspensions. **J. Dairy Sci.** 70: 547-554.
- Caldwell, K. B., Goff, H. D. and Stanley, D. W. (1992). A low temperature scanning electron microscopy study of ice cream. I. Technique and general microstructure. **Food Struct.** 11: 1-23.
- Clarke, C. (2004). **The science of ice cream.** UK: Cambridge: The royal society of chemistry. 187p.
- Choi, S. G. and Kerr, W. L. (2003). Effects of chemical modification of wheat starch on molecular mobility as studied by pulsed <sup>1</sup>H NMR. **Lebensm Wiss. Technol.** 51: 1-8.
- Cottrell, J.I., Pass, G. and Phillips, G. O. (1979). Assessment of polysaccharides as ice cream stabilizers. **J. Sci. Food Agric.** 30: 1085-1088.
- Croguennoc, P., Durand, D., Nicolai, T. and Clark, A. (2001a). Phase separation and association of globular protein aggregates in the presence of polysaccharides: 1. Mixtures of preheated beta-lactoglobulin and k-carrageenan at room temperature. **Langmuir.** 17: 4372-4379.
- Croguennoc, P., Nicolai, T., Durand, D., and Clark, A. (2001b). Phase separation and association of globular protein aggregates in the presence of polysaccharides: 2. Heated mixtures of native beta-lactoglobulin and k-carrageenan. **Langmuir.** 17: 4380-4385.
- Dagleish, D. G., and Morris, E. R. (1988). Interactions between cattageenan and casein micelles: electrophoretic and hydrodynamic properties of the particles. **Food Hydrocoll.** 2: 311-320.
- Dickinson, E. (1998). Stability and rheological implications of electrostatic milk protein polysaccharide interactions. **Trends Food Sci. Technol.** 9: 347-354.
- Ding, P., Wolf, B., Frith, W. J., Clark, A. H., Norton, I. T. and Pacek, A. W. (2002). Interfacial tension in phase-separated gelatin dextran aqueous mixtures. **J. Colloid Interface Sci.** 253: 367-76.
- Donhowe, D. P., Hartel, R. W. and Bradley, R. L. (1991). Determination of ice crystal size distribution in frozen desserts. **J. Dairy Sci.** 74: 3334-3344.
- Donhowe, D. P. and Hartel, R. W. (1996). Recrystallization of ice in ice cream during controlled accelerated storage. **Int. Dairy J.** 6: 1191-1208.
- Doublier, J. L., Garnier, C., Renard, D., and Sanchez, C. (2000). Protein polysaccharide interactions. **Curr Opin Colloid Interf Sci.** 5: 202-214.

- Flores, A. A. and Goff, H. D. (1999). Ice crystal size distribution in dynamically frozen model solution and ice cream as affected by stabilizers. **J. Dairy Sci.** 82: 1399-1407.
- Goff, H. D., Caldwell, K. B. and Stanley, D. W. (1993). The influence of polysaccharides on the glass transition in frozen sucrose solutions and ice cream. **J. Dairy Sci.** 76:1268-1277
- Goff, H. D. (1995). **Dairy science and technology**. [On line] Available: <http://www.foodsci.uoguelph.ca/dairyedu/freeztheor.html>
- Goff, H. D., Verespeg, E. and Smith, A. K. (1999). A study of fat and air structures in ice cream. **Int. Dairy J.** 9: 817-829.
- Goff, H. D., Verespej, E. and Jermann, D. (2003). Glass transitions in frozen sucrose solutions are influenced by solute inclusions within ice crystals. **Thermochimica Acta.** 399: 43-55.
- Goff, H. D. and R. W. Hartel. (2006). Ice cream and frozen desserts. In **"Handbook of Food Science, Technology and Engineering."** Y. H. Hui, ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis. Vol. 4, pp. 154-1 to 154-48.
- Guido, S., Simeone, M., Alfani, A. (2002). Interfacial tension of aqueous mixtures of Na caseinate and Na-alginate by drop deformation in shear flow. **Carbohydr. Polym.** 48: 143-152.
- Hagiwara, T. and Hartel, R. W. (1996). Effect of sweetener, stabilizer, and storage temperature on ice recrystallization in ice cream. **J. Dairy Sci.** 79 (5): 735-744.
- Hagiwara, T., Hartel, R. W. and Matsukawa, S. (2006). Relationship between recrystallization rate of ice crystals in sugar solutions and water mobility in freeze-concentrated matrix. **Food Biophysics.** 1: 74-82.
- Harper, E. K. and Shoemaker, C. F. (1983). Effect of locust bean and selected sweetening agents on ice crystallization rates. **J. Food Sci.** 48: 1801-1803, 1806.
- Hartel, R. W. (1996). Ice crystallization during the manufacture of ice cream review. **Trends Food Sci. Technol.** 7: 315-320.
- Hartel, R. W. (2001). **Crystallization in Foods.** New York: Aspen Publisher Inc.
- Herald, J. T., Aramouni, M. F. and Abu Ghoush, H. M. (2008). Comparison study of egg yolks and egg alternative in french vanilla ice cream. **J. Texture Stud.** 39: 284-295.
- Kennedy, C. (2000). **Managing of frozen foods.** Woodhead publishing Limited. p. 279.
- Marshall, R. T. and Arbuckle, W. S. (1996). **Ice Cream. 5th ed.** New York: Chapman&Hall. 71-80.
- Marshall, R. T., Goff, H. D. and Hartel, R. W. (2003). **Ice cream (6th ed).** New York : Kluwer Academic/Plenum.



- Miller-Livney, T. and Hartel, R. W. (1997). Ice recrystallization in ice Cream: interactions between sweeteners and stabilizers. **J. Dairy Sci.** 80: 447-456.
- Moser, K. B. (1986). "Hydroxyethylated starches in: **Modified Starches: properties and users**" O. B. Wurzburg (ed.). Florida: CRC Press, Boca Raton. p. 79.
- Muhr, A. H. and Blanshard, J. M. (1986). Effect of polysaccharide stabilizers on the rate of growth of ice crystal. **J. Food Technol.** 21: 683-710.
- Patmore, J. V., Goff, H. D. and Fernandes, S. (2003). Cryogelation of galactomannans in ice cream model systems. **Food Hydrocolloids.** 17: 161-169.
- Regand, A. and Goff, H. D. (2002). Effect of biopolymers on structure and ice recrystallization in dynamically frozen ice cream model system. **J. Dairy Sci.** 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.
- Rutenberg, W. M. and Solarek, D. (1984). Starch derivatives: Production and uses. In: Whistler, R.L., BeMiller, J. N. and Paschall, E. F. (eds) (1984). **Starch: Chemistry and technology (2nd eds.)**. New York and London: Academic Press Inc. 344-349.
- Ruger, P. R., Baer, R. J. and Kasperson, K. M. (2002). Effect of double homogenization and whey protein concentrate on the texture of ice cream. **J. Dairy Sci.** 85: 1684-1692.
- Seagall, K. I. and Goff, H. D. (2002). A modified ice cream processing routine that promotes fat destabilization in the absence of added emulsifier. **Int. Dairy J.** 12: 1013-1018.
- Seow, C. C. and Thevamalar, K. (1993). International plasticization of granular rice starch by hydroxypropylation: effects on phase transitions associated with gelatinization. **Starch /Stärke.** 45: 85-88.
- Singh, N., Kaur, L., Sadhu, S. K., Kaur, J. and Nishinari, K. (2006). Relationship between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. **Food Hydrocolloids.** 20: 532-542.
- Snoeren, T. H. M., Payens, T. A. J., Jeunink, J. and Both, P. (1975). Electrostatic interaction between **K**-carrageenan and **K**-casein. **Milchwissenschaft.** 30: 393-396.
- Soukoulis, C., Chandrinos, I. and Tzia, C. (2008). Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with **K**-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. **LWT Food Sci. Technol.** 41: 1816-1827.

- 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.
- Stanley, N. I. and Taylor, L. J. (1993). Rheological basis of oral characteristics of fluid and semi-solid foods: a review. **Acta Psychologica**. 84: 79-92.
- Steffe, J. F. (1996). **Rheological methods in food process engineering (2nd ed)**. USA: Freeman Press East Lansing, MI.
- Tabilo-Munizaga, G. and Barbosa-Canovas, G. V. (2005). Rheology for the food industry. **J. Food Eng.** 67: 147-156
- Thaiudom, S. and Goff, H. D. (2003). Effect of K-carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures. **Int. Dairy J.** 13: 763-771.
- Thaiudom, S., Singchan, K. and Saeli, T. (2008). Comparison of commercial stabilizers with modified tapioca starches on foam stability and overrun of ice cream. **As. J. Food Ag-Ind.** 1: 51-61.
- Turgeon, S. L., Beaulieu, M., Schmitt, C. and Sanchez, C. (2003). Protein polysaccharide interactions: phase-ordering kinetics, thermodynamic and structural aspects. **Curr. Opin. Colloid Interface Sci.** 8: 401-414.
- Tuschhoff, J. V. (1986). Hydroxypropylated starches. Pp. 89-96. In O. B. Wurzburg (ed) **Modified Starches Properties and Uses**. Florida: CRC press Inc., Boca Raton.
- Wang, S., van Dijk, J., Odijk, T. and Smit, J. (2001). Depletion induced demixing in aqueous protein-polysaccharide solutions. **Biomacromolecules**. 2: 1080-1088.
- Wu, Y. and Seib, P. A. (1990). Acetylated and hydroxypropylated distarch phosphates from waxy barley: paste properties and freeze-thaw stability. **Cereal Chem.** 67(2): 202-208.
- Varnam, A. H. and Sutherland, J. P. (1994). Milk and milk products: Technology, chemistry and microbiology. London: **Chapman and Hall**. 351-364.
- Vega, C., Dalgleish, D. G. and Goff, H. D. (2005). Effect of k carrageenan addition to dairy emulsions containing sodium caseinate and locust bean gum. **Food Hydrocolloids**. 19: 187-195.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
วิธีการทดลอง



## 1. วิธีการทำ Calibration และ การใส่ Marker ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ ด้วยโปรแกรม

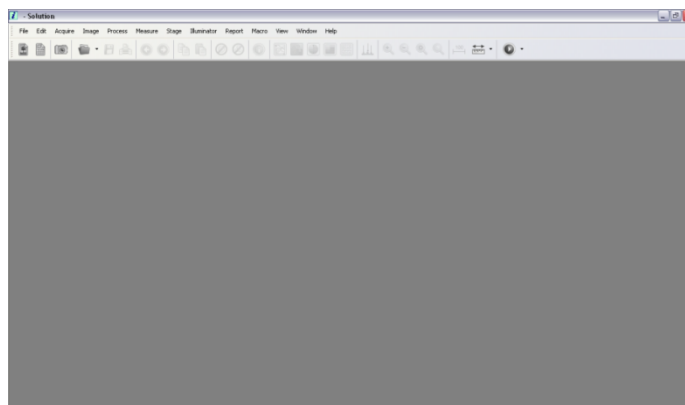
### i- Solution

1.1 การทำ Calibration ด้วย Stage micrometer เพื่อใช้เป็นสเกลมาตรฐาน ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล โดยวางแผ่นสไลด์ของสเกลมาตรฐานบน stage ของกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 500x (กำลังขยายของเลนส์ตาเท่ากับ 10x X กำลังขยายของเลนส์วัตถุเท่ากับ 20x X เลนส์ขยายภาพขนาด 2.5 เท่า) ซึ่งเป็นโฟกัสเดียวกับที่ใช้ถ่ายภาพผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ดังแสดงในรูปที่ ก.1

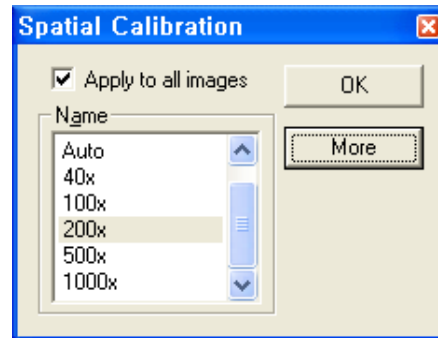


รูปที่ ก.1 ภาพสเกลที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า

1.2 เปิดโปรแกรม i- Solution (รูปที่ ก.2) เลือก Measure > Calibration บน Tool bar จะปรากฏกล่องข้อความ Spatial Calibration จากนั้นเลือกระดับกำลังขยาย คลิกเลือก Apply to all images จากนั้น คลิก OK ดังแสดงในรูปที่ ก.3

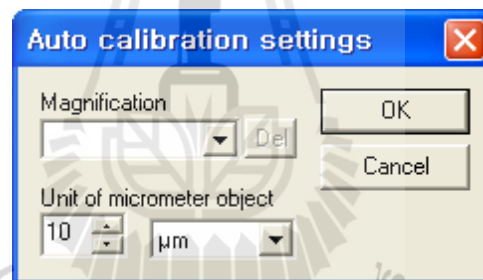


รูปที่ ก.2 โปรแกรม i-Solution




รูปที่ ก.3 กล่องข้อความ Spatial Calibration

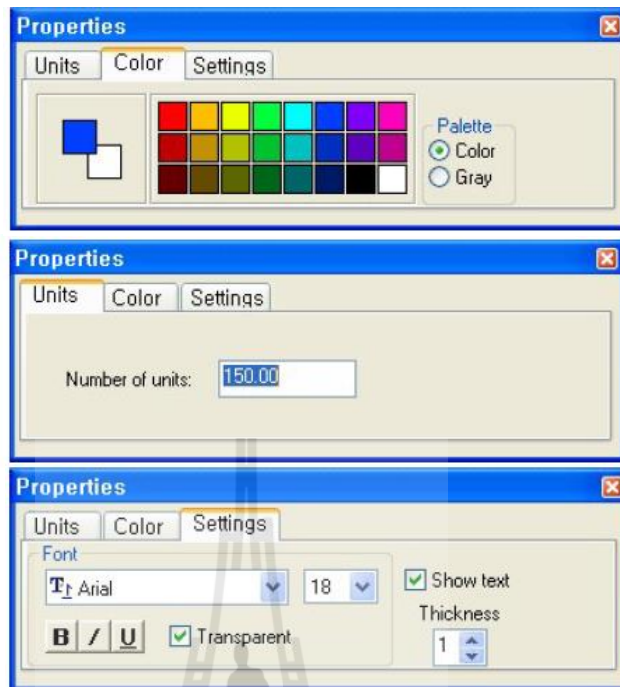
1.3 กำหนดหน่วยที่ใช้ในการวัดด้วยการเลือก Measure > Calibration > Auto จะปรากฏกล่องข้อความ Auto Calibration Settings รูปที่ ก.4 เลือกหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )



รูปที่ ก.4 เลือกหน่วยของสเกล

1.4 บันทึกการทำ Calibration โดยเลือก Measure > Calibration > Save active หรือ Measure > Calibration > Save all ในกรณีที่บันทึกภาพสเกลตัวอย่างด้วยสเกลที่แตกต่างกัน โดยมีขั้นตอนการป้อนคำสั่งคือ เลือก Measure > Calibration > Open จากนั้นเลือกไฟล์ภาพสเกล จากนั้นกด File > Open ซึ่งไฟล์ดังกล่าวจะมีนามสกุล \*.clb

1.5 การใส่ Marker ลงในภาพทำได้โดยคลิก  (Marker) บน Tool bar หรือเลือกจากคำสั่ง Measure > Calibration > Create marker จากนั้นจะปรากฏกล่องข้อความ Properties ซึ่งจะสามารถกำหนดค่าสีและความหนาของ marker ได้ดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 กล่องข้อความของการตั้งค่าแถบ Marker

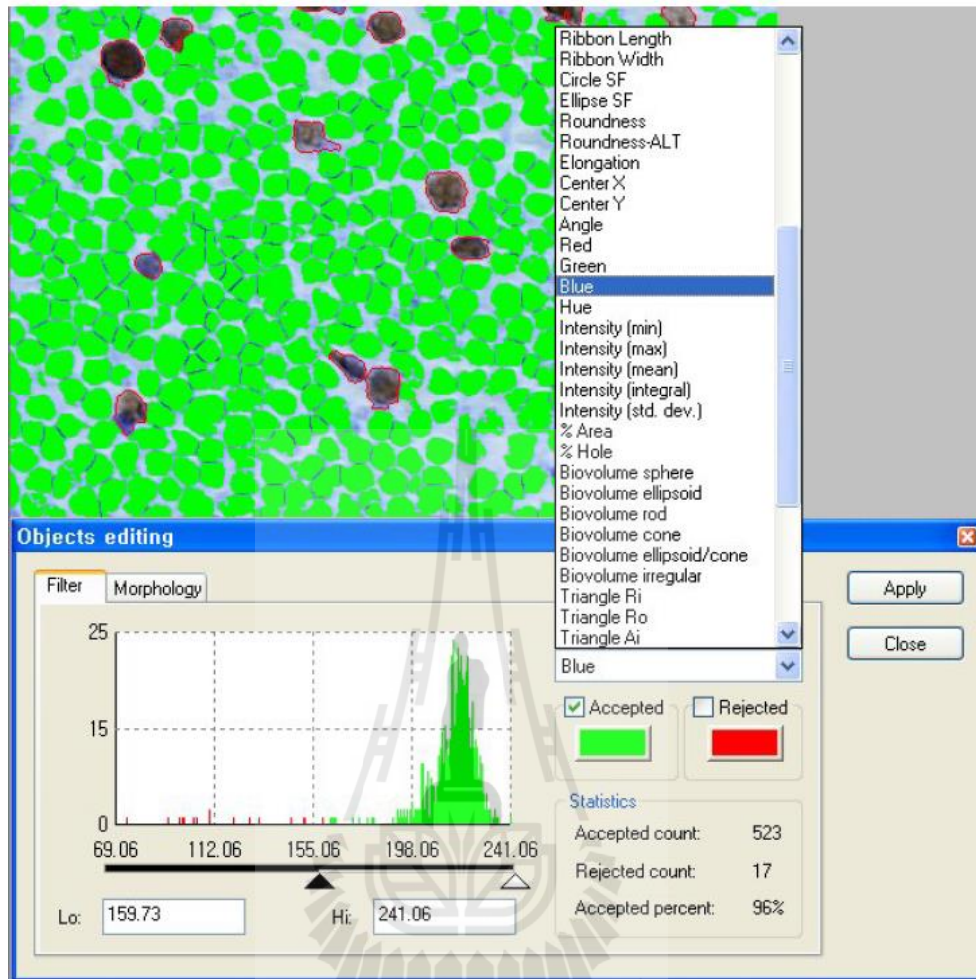
## 2. วิธีวัดขนาดและนับจำนวนผลึกน้ำแข็งด้วยโปรแกรม *i- Solution*

2.1 เลือกแถบเครื่องมือ Measure > Workflow ทำตามขั้นตอนแรก คือ Manual thresholding โปรแกรมจะใส่สีให้กับตัวอย่าง โดยสามารถลบรูปที่ไม่ต้องการออกโดยคลิกที่ภาพ กดปุ่ม delete ดังแสดงในรูปที่ ก.6

2.2 ขั้นตอนต่อไปคือ Object editing โดยสามารถคัดเอาผลึกน้ำแข็งหรือตัวอย่างที่ไม่ต้องการ (Reject) ด้วยการเลื่อนแถบสามเหลี่ยมเข้า-ออก เมื่อได้ช่วงตัวอย่างที่ต้องการแล้ว กดปุ่ม Apply ภายในภาพจะปรากฏเฉพาะสีเขียวซึ่งเป็นตัวอย่างที่เราต้อง

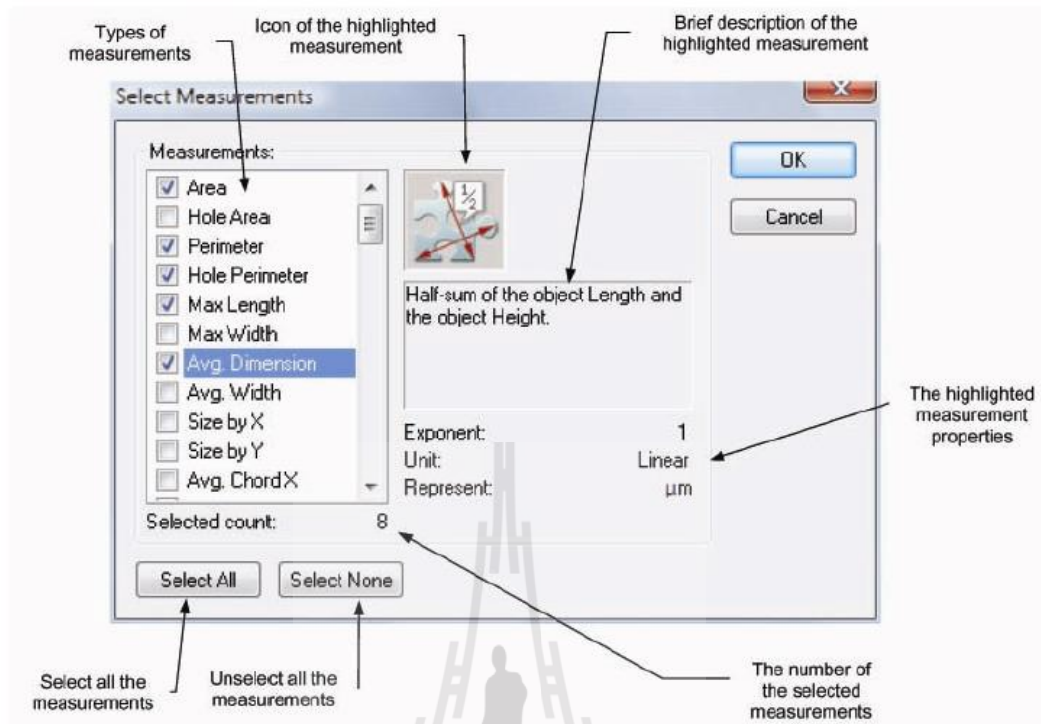
2.3 Select measurement เป็นขั้นตอนการเลือกวิธีวัดให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการจากภาพ ในการทดลองนี้ เลือก Area Perimeter ( $\mu\text{m}$ ) Max Length ( $\mu\text{m}$ ) Max Width ( $\mu\text{m}$ ) Min Feret Diameter ( $\mu\text{m}$ ) Max Feret Diameter ( $\mu\text{m}$ ) Avg. Feret Diameter ( $\mu\text{m}$ ) Equal Circle Diameter ( $\mu\text{m}$ ) Major Ellipse Diam. ( $\mu\text{m}$ ) Minor Ellipse Diam. ( $\mu\text{m}$ ) Convex hull ( $\mu\text{m}$ ) และ %Area ดังแสดงในรูปที่ ก.7

2.4 ขั้นตอนเลือกการคำนวณค่าทางสถิติของค่าที่เราวัดจะหาได้จาก Statistics จะปรากฏกล่องข้อความ Statistics (รูปที่ ก.8) ซึ่งต้องเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณในช่อง Parameter to ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ค่า Avg. Feret Diameter เนื่องจากต้องเปรียบเทียบขนาดของผลึกน้ำแข็ง เมื่อเลือกค่าคำนวณทางสถิติ เช่น Count %Count Sum เป็นต้น จากนั้นกดปุ่ม OK จากนั้นจะปรากฏตารางผลการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.6 ขั้นตอน Manual thresholding



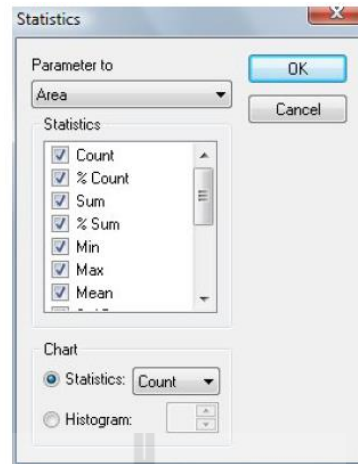


รูปที่ ก.7 ขั้นตอน Select measurement

2.5 ถ้าต้องการตารางแสดงผลการคำนวณในรูปแบบ Excel ให้เลือก File > Export to Excel

2.6 นำข้อมูลในแต่ละชั้นมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย (Mean size) และคำนวณค่าความถี่ของขนาดผลึกน้ำแข็ง โดยแบ่งข้อมูลเป็นช่วงแล้วหาค่าความถี่ของขนาดผลึกน้ำแข็งในแต่ละช่วง หาค่าร้อยละความถี่สะสม (Cumulative frequency) ค่าความถี่สัมพัทธ์ (Relative frequency) ค่าร้อยละความถี่สัมพัทธ์ต่อขนาดผลึกน้ำแข็ง (%f/μm) (ตารางที่ ก.1)

2.7 เปรียบเทียบค่าร้อยละความถี่ขนาดผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการคำนวณ (Calculated undersize percentage,  $F_{cal}$ ) และค่าร้อยละความถี่ขนาดผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการทดลอง (Experimented undersize percentage,  $F_{exp}$ ) ดังแสดงในรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.8 กล่องข้อความ Statistics

Sort order mark

Measurement parameter names

Number	Class	Area, $\mu\text{m}^2$	Hole Area, $\mu\text{m}^2$	Perimeter, $\mu\text{m}$	Hole Perimeter, $\mu\text{m}$	Max Length, $\mu\text{m}$
23	Class7	3955.444	0.000	280.495	0.000	73.625
22	Class6	2994.599	0.000	276.131	0.000	76.978
21	Class4	1693.411	0.000	152.326	0.000	46.809
20	Class6	2809.901	0.000	211.203	0.000	64.321
19	Class4	1533.616	0.000	146.709	0.000	48.202
18	Class5	2291.086	0.000	204.741	0.000	60.667
17	Class6	3320.415	0.000	234.397	0.000	79.114
16	Class3	900.662	0.000	116.005	0.000	40.973
15	Class5	2220.527	0.000	191.529	0.000	67.043
14	Class6	2372.021	0.000	204.392	0.000	69.333
13	Class7	3793.574	0.000	248.223	0.000	73.106
12	Class6	3516.618	0.000	228.839	0.000	73.185
11	Class6	2660.482	0.000	198.629	0.000	66.371
10	Class2	605.975	0.000	91.762	0.000	30.378
9	Class5	2604.450	0.000	208.816	0.000	73.607
8	Class7	4252.207	0.000	260.737	0.000	79.408

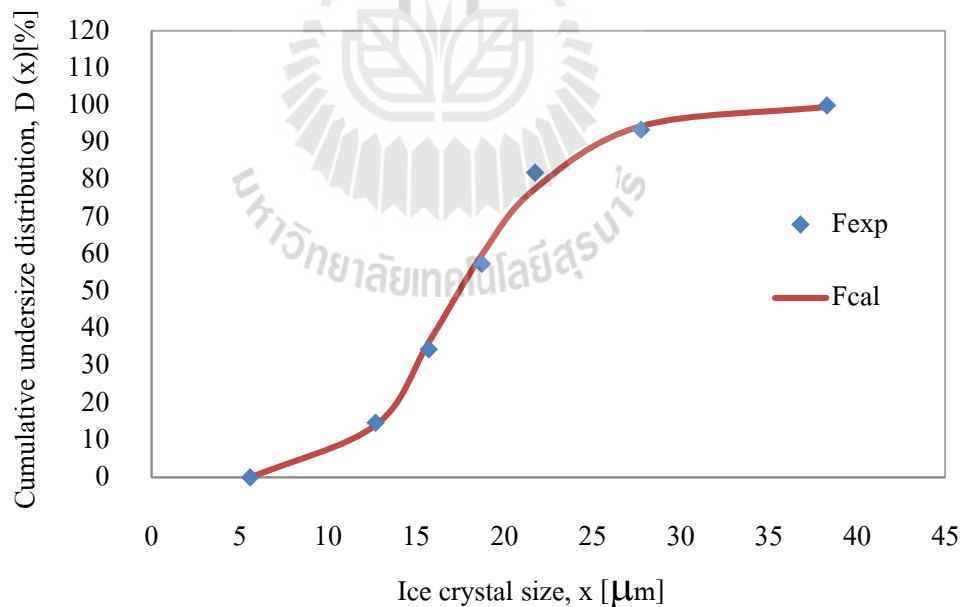
Object number

Object class

รูปที่ ก.9 ตารางแสดงผลการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการกระจายความถี่ของขนาดผลึกน้ำแข็ง

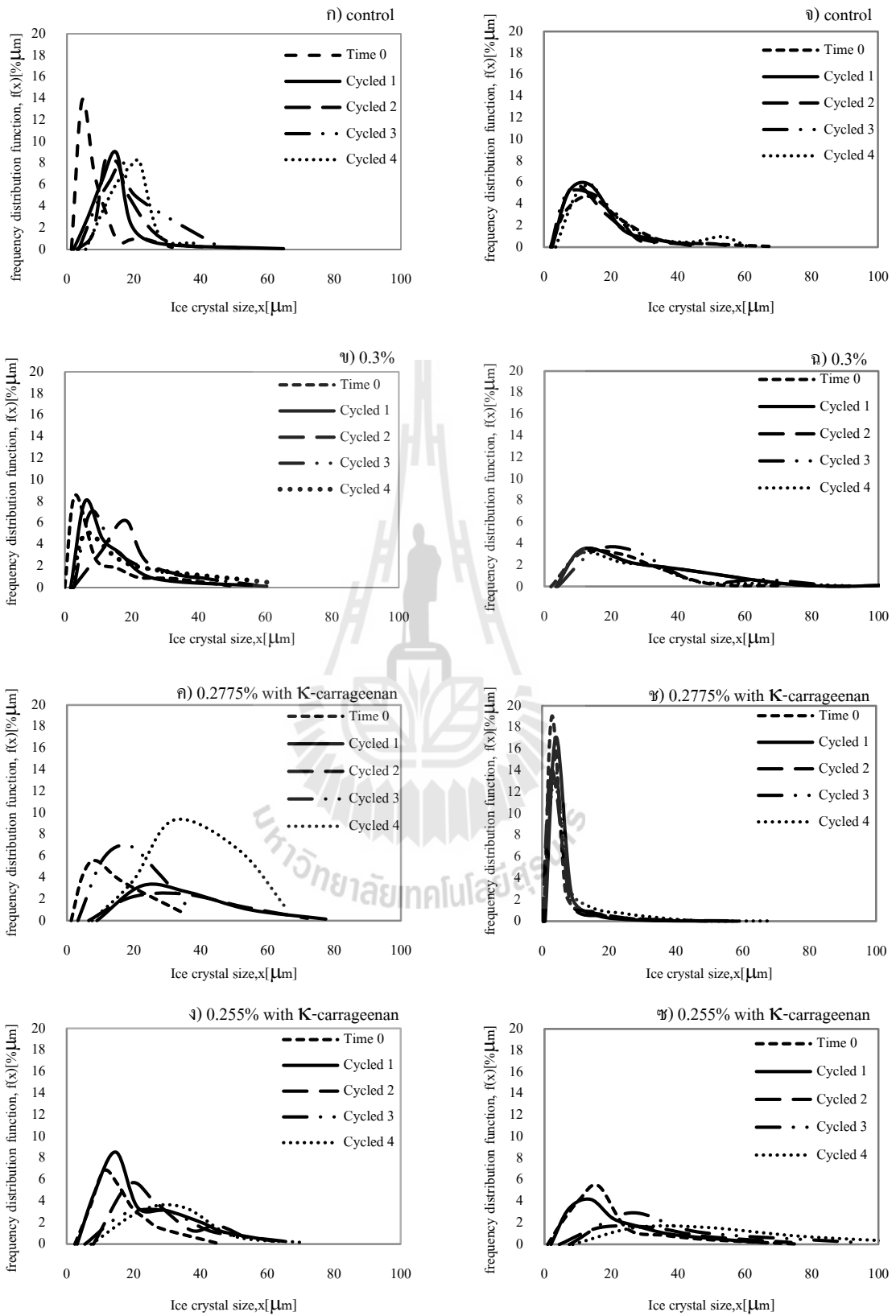
Mean size	Relative frequency (%)	Cumulative undersize (%)	%f/ $\mu\text{m}$	Fexp.	Fcal.	Calculated undersize percentage (%)
5.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.71	14.75	14.75	4.90	0.15	0.14	14.00
15.72	19.67	34.43	6.53	0.34	0.36	36.00
18.73	22.95	57.38	7.62	0.57	0.60	60.00
21.74	24.59	81.97	8.17	0.82	0.78	78.00
27.76	11.48	93.44	1.27	0.93	0.94	94.00
38.30	6.56	100.00	0.54	1.00	1.00	100.00



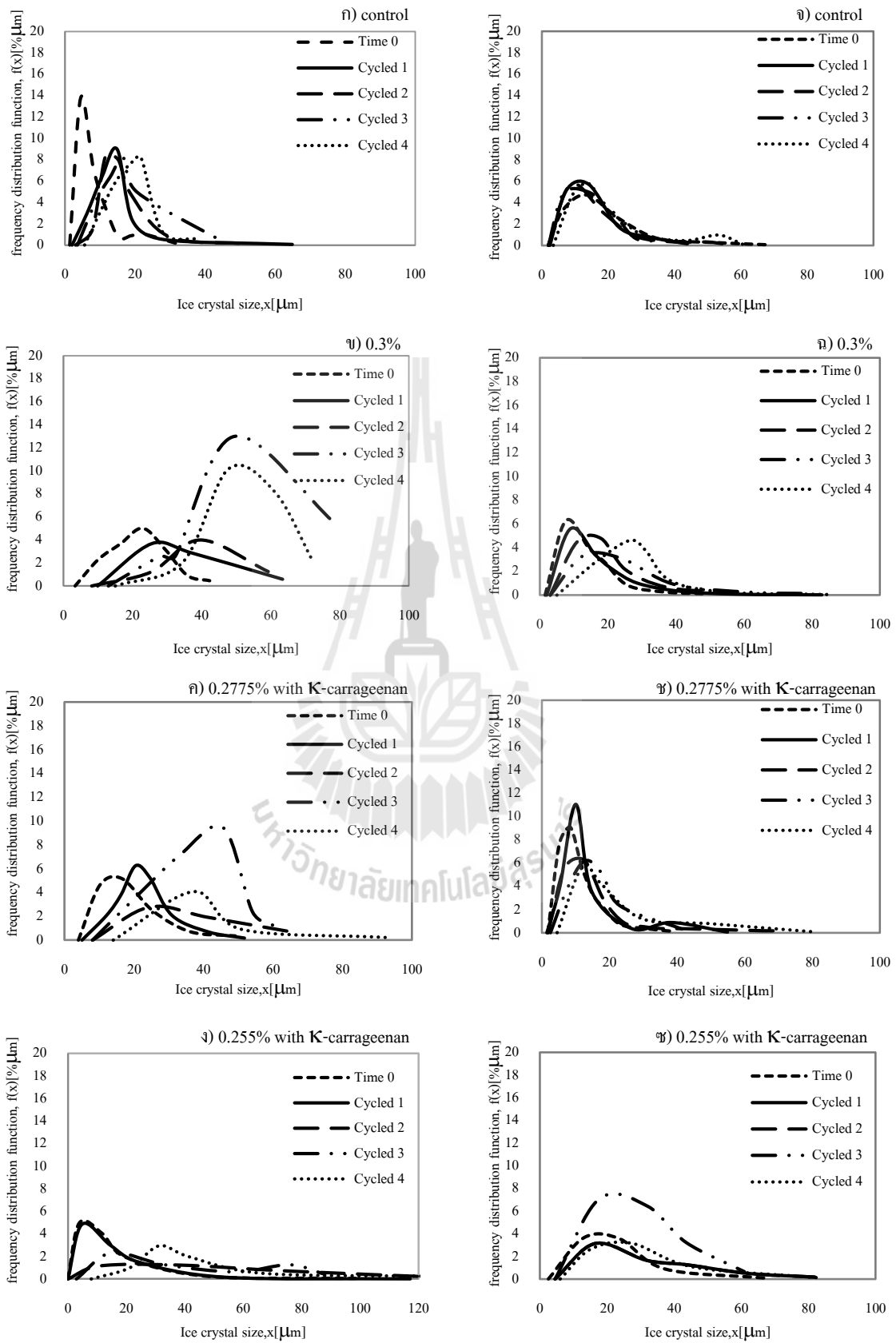
รูปที่ ก.10 ความถี่สะสมของขนาดผลึกน้ำแข็งในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีชูโครสร้อยละ 12 ที่ได้จากการทดลอง (Fexp) และขนาดผลึกน้ำแข็งที่ได้จากการคำนวณ (Fcal)



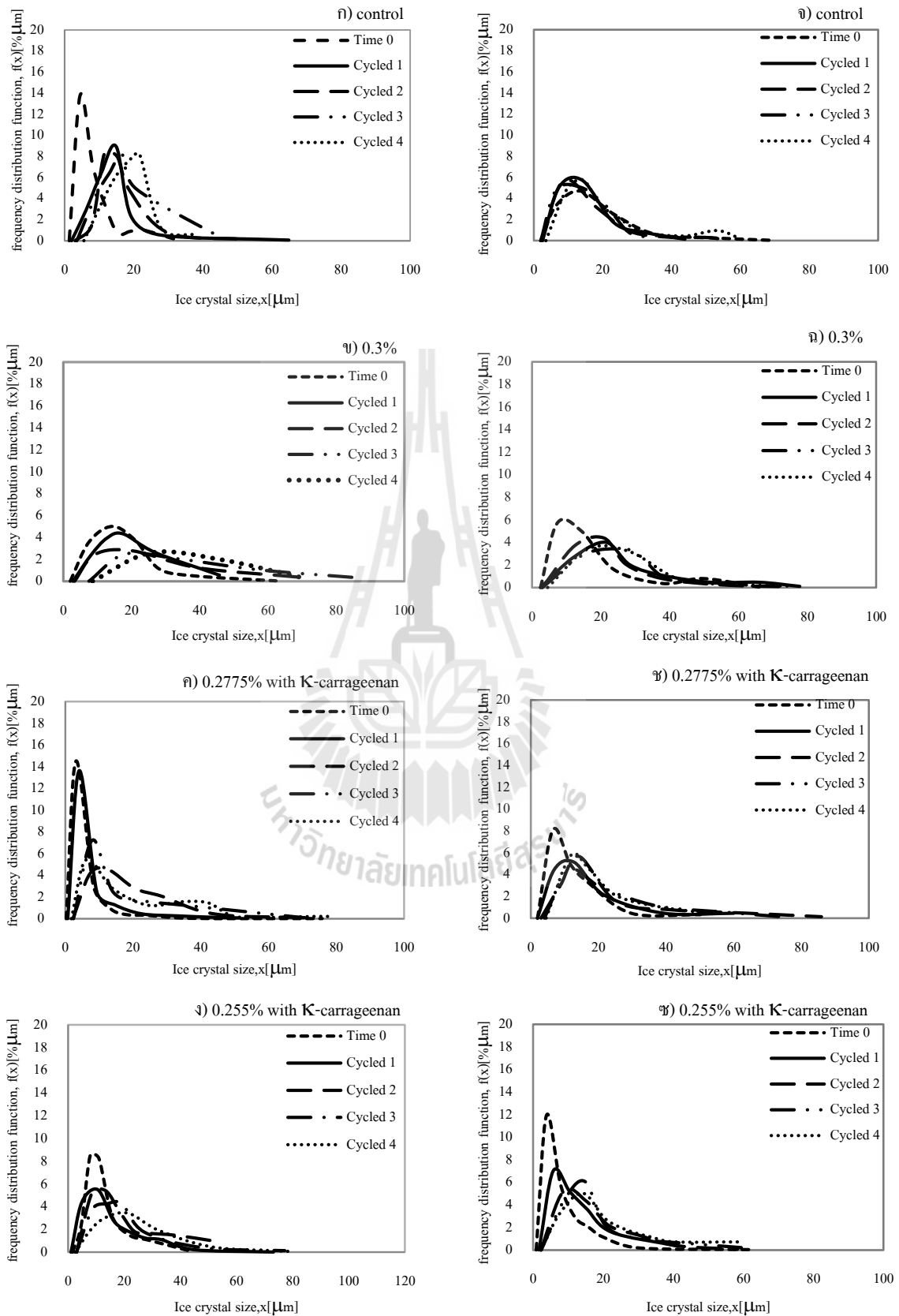
ภาคผนวก ข  
ผลการทดลอง



รูปที่ ข.1 ความถี่ขนาดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมนมที่มีโลกัสปีนกัน ที่ระดับน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 (ก ข ค และ ง) และร้อยละ 16 (จ ฉ ช และ ซ)



รูปที่ ข.2 ความถี่ขนาดผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมนมที่มีแป้ง HPS ที่ระดับน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 (ก ข ค และ ง) และร้อยละ 16 (จ ฉ ช และ ฮ)



รูปที่ ข.3 ความถี่ขนาดผลึกน้ำแข็งใน ไอศกรีมนมที่มีแป้ง HPDS ที่ระดับน้ำตาลซูโครสร้อยละ 12 (ก ข ค และ ง) และร้อยละ 16 (จ ฉ ช และ ช)

## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิววัฒน์ ไทยอุดม สำเร็จการศึกษาระดับระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ (เกียรตินิยม อันดับ 2) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ในปีการศึกษา 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 งานวิจัยร่วมกับบริษัทแคร์รี่ โฮม จำกัด เรื่อง “การเพิ่มมูลค่าโทนินธรรมชาติในนมพลาสเจอไรส์” ซึ่งเป็นงานวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่สถานประกอบการในโครงการ iTAP ของ สวทช. โครงการแรกของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี