รหัสโครงการ SUT3-305-45-12-43

รายงานการวิจัย

สมบัติวิทยากระแสของไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ

(Rheological Properties and Microstructure of Coconut Ice Cream Mix)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. ศุกฤตย์ ไทยอุดม

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2545

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2548

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2545 ซึ่งเป็นผลให้เกิดโครงงานวิจัย "สมบัติวิทยากระแสของไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ" นี้ขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณกรวรรณ รัตนไชยที่ช่วยเตรียมตัวอย่างในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องอิเลคตรอนแบบส่องผ่าน ในการวิจัยดังกล่าวนี้ และขอขอบพระคุณคุณภาสกร วุนวิริยะกิจ product manager ของบริษัท Metrohm Siam Ltd. ที่อนุเคราะห์การใช้เครื่อง Rheometer สำหรับหาสมบัติวิทยากระแสของไหลของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม มา ณ ที่นี้ด้วย

ศุกฤตย์ ไทยอุดม

บทคัดย่อ

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ กับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม และส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (SWI และ FT-999) สามารถทำได้โดยการวัดค่าความหนืดปรากฏ (ที่ shear rate เท่ากับ 50 1/s อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส) ลักษณะรูปแบบพฤติกรรมการไหล (ที่ shear rate 0-400 1/s) และ oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิด พร้อมกับศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดังกล่าว ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีค่าน้อยกว่าค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติม SWI และ FT-999 มีค่าน้อยกว่าค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับรูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีลักษณะเป็น thixotropic และมี oscillatory spectrum ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของสารละลายเข้มข้นและของเจลชนิดอ่อน ตามลำดับ ส่วนรูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI หรือ FT-999 มีลักษณะเป็น time dependent shear thinning ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการไหลแบบ Newtonian และมี oscillatory spectrum แสดงถึงลักษณะของของไหลแบบสารละลายเจือจาง ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคที่วัดด้วยกล้องอิเลคตรอนแบบส่องผ่านของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิดมีความสัมพันธ์และสามารถใช้เป็นข้อมูลเสริมเพื่อการแปลผลสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ สมบัติวิทยากระแสของไหล โครงสร้างระดับจุลภาค

Abstract

Comparison study of 4 different ice cream mixes, which were coconut ice cream mix, milk ice cream mix, and ice cream mixes with modified starches (SWI or FT-999), was carried out in terms of rheological properties and their microstructures. Rheological properties which were: 1) apparent viscosity at shear rate 50 1/s, 5°C, 2) flow behavior at shear rate 0-400 1/s, and 3) oscillatory spectrum were determined. The apparent viscosity of coconut ice cream mix was significantly lower than the one of milk ice cream mix ($p \leq 0.05$). The apparent viscosities of ice cream mix with SWI or FT-999 were significantly lower than the apparent viscosity of coconut ice cream mix ($p \leq 0.05$). Coconut ice cream mix and milk ice cream mix showed thixotropic flow behavior while ice cream mix with SWI or FT-999 presented a time dependent shear thinning, which looked like Newtonian flow behavior. Oscillatory spectrum of coconut ice cream mix was indicated as a concentrated solution while a spectrum of milk ice cream mix was found to be a weak gel-like spectrum. Both of ice cream mixes with SWI and FT-999 showed a diluted solution spectrum. Microstructures, using transmission electron microscopy (TEM), of all ice cream mixes have a consistent correlation with their rheological properties.

Keywords : Coconut ice cream mix, Rheological property, Microstructure

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ	4
วัตถุดิบ	4
การผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ	4
การผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม	5
การผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ	5
การวิเคราะห์สมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	6
การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	6
บทที่ 3 ผลการวิจัย	
สมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	8
โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	18
บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	21
ข้อเสนอแนะ	22
บรรณานุกรม	23
ประวัติผู้วิจัย	26

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนประกอบของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม..... 5

ตารางที่ 2 ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ shear rate 50 1/s และที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส..... 8

ตารางที่ 3 ค่า viscosity consistency (K) และ ค่า flow behaviour index (n) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม..... 13

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ..... 11

รูปที่ 2 รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม..... 11

รูปที่ 3 รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่เติม SWI..... 12

รูปที่ 4 รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่เติม FT-999..... 12

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า storage moduli กับความถี่ของ
ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม..... 15

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า loss moduli กับความถี่ของส่วนผสม
พร้อมทำไอศครีม..... 15

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan delta กับความถี่ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม.... 16

รูปที่ 8 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติม SWI..... 16

รูปที่ 9 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติม FT-999..... 17

รูปที่ 10 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ..... 17

รูปที่ 11 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม..... 18

รูปที่ 12 โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม..... 19

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ไอศครีมถือเป็นผลิตภัณฑ์ของหวานที่ได้รับความนิยมทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในเขตภูมิภาคอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย ทั้งนี้เนื่องจากความเย็นและความหอมหวานของไอศครีมช่วยในการดับกระหายและเพิ่มความสดชื่นให้แก่ผู้บริโภคได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามไอศครีมที่นิยมและมีการผลิตกันมากในประเทศไทยได้แก่ ไอศครีมนมรสผลไม้ต่างๆ หรือไอศครีมประเภทไอศครีมหวานเย็น เป็นต้น

ไอศครีมกะทิเป็นของหวานอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีการผลิตในประเทศไทยมาเป็นระยะเวลานาน โดยมีการใช้วัตถุดิบต่างๆ ที่มีอยู่ในประเทศ โดยเฉพาะกะทิในส่วนที่เป็นครีมหรือที่เรียกว่าหัวกะทิซึ่งถือเป็นวัตถุดิบหลักที่ได้จากการคั้นเนื้อมะพร้าวที่ใช้ในการผลิตไอศครีมชนิดนี้ ถึงแม้การผลิตไอศครีมกะทิได้กระทำกันมาเป็นระยะเวลานานแต่ความนิยมในการบริโภคไอศครีมชนิดนี้ยังคงอยู่และคาดว่าจะเพิ่มปริมาณการบริโภคขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากในปัจจุบันวิทยาการทางด้านเทคโนโลยีการขนส่งมีมากขึ้น ดังนั้นการกระจายผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ไปยังท้องถิ่นต่างๆ ตลอดจนถึงการจัดจำหน่ายไปยังต่างประเทศจึงมีความเป็นไปได้สูง อย่างไรก็ตามคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ไอศครีมกะทิเหล่านี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั้งในระดับประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศครีมยังคงมีเนื้อไม่เรียบเนียน มีเกล็ดน้ำแข็งขนาดใหญ่ และมีกลิ่นรสของกะทิเพียงเล็กน้อย โดยลักษณะดังกล่าวถือเป็นตำหนิของผลิตภัณฑ์ไอศครีม (Goff, Caldwell, Stanley and Maurice, 1993) ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศครีมกะทิไม่สามารถครองส่วนแบ่งทางการตลาดได้เท่าที่ควร

ลักษณะของเกล็ดน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นถือเป็นตำหนิของไอศครีมที่เกิดจากกระบวนการเกิดผลึกน้ำแข็ง (ice crystal nucleation) และการโตของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal growth) ในระหว่างกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากการหลอมและการตกผลึกของผลึกน้ำแข็ง (recrystallization) ในระหว่างการเก็บรักษาหรือการขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของไอศครีมขึ้นลงตลอดเวลา (Goff, 1999) การเกิดลักษณะที่ก่อให้เกิดตำหนิต่างๆ เหล่านี้มีสาเหตุเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆ ด้านในระหว่างการผลิต เช่น ความหนืดหรือลักษณะการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมไม่เหมาะต่อการเอื้ออำนวยในการเกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดสม่ำเสมอในระหว่างกระบวนการตีปั่นเอาอากาศเข้า (aeration or whipping process) พร้อมกับการแช่แข็ง (freezing) หรืออาจเกิดจากการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ในสภาวะอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลา การแก้ปัญหาดังกล่าวนอกจากจำเป็นต้องควบคุมสภาวะอุณหภูมิในการเก็บและการขนส่งให้คงที่ตลอดเวลาแล้ว การหาข้อมูลพื้นฐานในเรื่องของสมบัติวิทยากระแสของไหล (rheological properties) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมเพื่อใช้ในการกำหนดอัตราการไหลของส่วนผสมดังกล่าวในท่อส่งส่วนผสมลงในเครื่องผลิตไอศครีมในการผลิต

แบบต่อเนื่อง (continuous ice cream making process) หรือเพื่อใช้กำหนดค่าแรงเฉือน (shear force) ของใบมีดในเครื่องผลิตไอศครีมแบบต่อเนื่องหรือแบบกะ (batch process) ถือเป็นเรื่องที่ไม่อาจมองข้ามไปได้

ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมและไอศครีมนั้นพบในงานวิจัยต่างๆ โดย Goff, Kinsella and Jordan (1989) ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติการไหลในรูปของค่าความหนืด (viscosity) ของสวนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มี sodium หรือ calcium caseinate หรือเวย์โปรตีนเป็นส่วนประกอบ ส่วน Goff, Freslon, Sahagian, Hauber, Stone and Stanley (1995) ศึกษาถึงการพัฒนาโครงสร้างในไอศครีมโดยดูค่าสมบัติการไหลในรูปของค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ซึ่งคำนวณได้จากการกำหนดค่าคงที่ K (viscosity consistency) และ ค่า n (flow behaviour index) นอกจากนี้ Goff และคณะ (1995) ยังได้ศึกษาค่าสมบัติวิทยากระแสของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละสูตรของไอศครีมที่แปรระดับน้ำในส่วนประกอบที่แตกต่างกันในรูปของ storage (G') และ loss (G'') moduli ซึ่งถือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะที่เหมือนของแข็ง (solid-like characteristic) และลักษณะที่เหมือนของเหลว (liquid-like characteristic) ตามลำดับ Smith, Goff and Kakuda (2000) ศึกษาถึงสมบัติวิทยากระแสของไหลของระบบคอลลอยด์ที่มีการตีอากาศเข้าไปในระบบ โดยดูถึงผลของกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อและชนิดของสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) ที่มีต่อค่า G', G'' และ tan delta สำหรับ Thaiudom and Goff (2003) ได้ศึกษาสมบัติวิทยากระแสของไหลของระบบเลียนแบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีโปรตีนนมเป็นส่วนประกอบโดยศึกษาถึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเพิ่มความคงตัวชนิดต่างๆ เช่น LBG, guar และ xanthan กับ K-carrageenan ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปของค่า G', G'' และ tan delta ส่วน Vega, Dalgleish and Goff (2005) ศึกษาผลของ K-carrageenan ที่มีต่อค่าทางสมบัติวิทยากระแสของไหลในระบบเลียนแบบไอศครีมชนิด soft serve ในขณะที่ Granger, Leger, Barey, Langendorff and Cansell (2005) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในระบบไอศครีมที่มีน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (refined coconut oil) น้ำมันมะพร้าวที่ไม่บริสุทธิ์ (unrefined coconut oil) หรือน้ำมันปาล์ม และผลของสารช่วยในการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำมันและน้ำ (emulsifier) ที่มีต่อค่า G', G'' และ tan delta อย่างไรก็ตามงานวิจัยต่างๆ เหล่านี้มีสูตรการผลิตที่แตกต่างออกไปจากไอศครีมกะทิค่อนข้างมาก และงานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ อันได้แก่ รูปแบบเชิงกล (mechanical spectra) และสมการการไหล (flow equation) พบว่ายังไม่มีการศึกษา หรือบันทึกเป็นข้อมูล ตลอดจนเผยแพร่ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศมาก่อน

งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาเพื่อหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการไหลและสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ อันจะเป็นประโยชน์ทั้งในส่วนของการใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในฐานข้อมูลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและไอศครีมกะทิ และในส่วนของการนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทไอศครีมกะทิต่อไป โดยการวิจัยนี้จะเปรียบเทียบสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิกับสมบัติวิทยากระแสของไหลส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมและไอศครีมที่มีการใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้โครงสร้าง

ระดับจุลภาค (microstructure) ซึ่งมักนิยมทำการศึกษาร่วมกับการหาค่าวิทยากระแสของไหลเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมทางสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้งไอศครีมกะทิ ไอศครีมนม และไอศครีมที่มีการใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบก็มีการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ ทางสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ
2. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิกับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมของไอศครีมนม
3. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิกับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกับโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาถึงสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบกับสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม และไอศครีมที่มีการใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ พร้อมทั้งศึกษาถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดังกล่าวด้วย

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและไอศครีมชนิดต่างๆ ที่มีการใช้ส่วนประกอบในการผลิตเหมือนหรือใกล้เคียงกัน ข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องงกับการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ซึ่งน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการส่งลำเลียงส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมไปตามท่อในกระบวนการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมอันส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศครีมที่ผลิตได้

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

ครีมกะทิที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้จากกการกดอัดเนื้อมะพร้าวขูดฝอยพันธุ์ทับสะแกที่ซื้อจากตลาดเทศบาล 3 จังหวัดนครราชสีมาด้วยเครื่องคั้นน้ำผลไม้ BM Juice Extractor แบบ Screw Press (Better Machinery Co., Ltd. Thailand) และวิเคราะห์ปริมาณไขมันทั้งหมดด้วยวิธี Gerber method (AOAC, 2002) โดยครีมกะทิที่ได้มีปริมาณไขมันทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 17 ส่วนนมผงขาดมันเนยได้จาก ADPI Extra Grade (C201 Donone Bene Sov, Czech Republic) anhydrous butterfat ซื้อจากบริษัท วิคกี้ คอนโซลิเดท จำกัด (ประเทศไทย) น้ำตาลซูโครสซื้อจากบริษัทมิตรผล จำกัด (ประเทศไทย) กลูโคสซีรัป DE 32 ได้จากบริษัท ไทยกลูโคส จำกัด (ประเทศไทย) Locus bean gum (LBG) ได้จาก BSC Specialties (ประเทศไทย) ส่วน K-carrageenan ซื้อจากบริษัท SKW Biosystems (France) สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าที่ใช้คือ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 ได้จากบริษัทสงวนวงษ์ นครราชสีมา (ประเทศไทย) และบริษัท Food Tech and Supply Co., Ltd. (ประเทศไทย) ตามลำดับ ปริมาณส่วนประกอบที่ใช้ในแต่ละสูตรของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ไอศครีมนม และไอศครีมที่ใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ แสดงดังตารางที่ 1 สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคซื้อจากบริษัทเบคไทย กรุงเทพ อุปกรณ์เคมีภัณฑ์ (ประเทศไทย) และบริษัทอัลติมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

2.2 การผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

2.2.1 ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ

การเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ทำได้โดยผสมส่วนประกอบที่เป็นของแห้ง ได้แก่ น้ำตาลซูโครส LBG และ K-carrageenan เข้าด้วยกันก่อนนำไปผสมกับส่วนผสมของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนยซึ่งได้แก่ นมผงขาดมันเนยที่ละลายอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ระหว่างการผสมให้คนส่วนผสมตลอดเวลาจนส่วนประกอบต่างๆ ทั้งหมดละลายอย่างสมบูรณ์จึงใส่ครีมกะทิทำการฆ่าเชื้อส่วนผสมที่ได้ที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยคนผสมตลอดเวลาในระหว่างการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิดังกล่าว ก่อนนำส่วนผสมที่ได้ไปผ่านกระบวนการลดขนาดเม็ดไขมันด้วยเครื่อง homogenizer แบบ 2 stage (Gaulin15 MR-8TA, APV, USA) โดยกำหนดให้ความดันที่ stage แรกเท่ากับ 17.2 MPa และที่ stage ที่สองเท่ากับ 3.4 MPa จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ได้มาลดอุณหภูมิลงในอ่างน้ำแข็งก่อนนำไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในตู้แช่เย็น (Servitech engineering Co., Ltd. Italy) ก่อนนำมาตรวจวิเคราะห์สมบัติวิทยากระแสของไหลและโครงสร้างระดับจุลภาคต่อไป

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนประกอบของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

ปริมาณส่วนประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ชนิดของไอศครีม			
	กะทิ	นม	SWI	FT-999
ครีมกะทิ	58.24	-	-	-
นมผงขาดมันเนย	10.50	10.50	10.50	10.5
anhydrous butterfat	-	10.00	10.00	10.00
น้ำตาลซูโครส	12.00	12.00	12.00	12.00
กลูโคสซีรัป	6.00	6.00	6.00	6.00
LBG	0.20	0.20	-	-
K-carrageenan	0.015	0.015	-	-
SWI	-	-	0.215	-
FT-999	-	-	-	0.215
น้ำ	12.995	61.235	61.235	61.235

2.2.2 ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม

การเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ทำได้โดยผสมส่วนประกอบที่เป็นของแห้ง ได้แก่ น้ำตาลซูโครส LBG และ K-carrageenan เข้าด้วยกันก่อนนำไปผสมกับส่วนผสมของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนยซึ่งได้แก่ นมผงขาดมันเนยที่ละลายอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ระหว่างการผสมให้คนส่วนผสมตลอดเวลาจนนมผงขาดมันเนย และส่วนประกอบที่เป็นของแข็งทั้งหมดละลายอย่างสมบูรณ์ จึงใส่ไขมันเนย เมื่อไขมันเนยละลายหมดแล้วจึงทำการฆ่าเชื้อส่วนผสมที่ได้ที่อุณหภูมิ 69 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปลดขนาดเม็ดไขมันตามข้อที่ 2.2.1 ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดังกล่าวจะถูกนำมาลดอุณหภูมิและบ่มเช่นเดียวกับการเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิในข้อ 2.2.1

2.2.3 ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ

การเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ ทำได้โดยผสมส่วนประกอบที่เป็นของแห้ง ได้แก่ น้ำตาลซูโครสและสารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเข้าด้วยกันก่อนนำไปผสมกับส่วนผสมของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันเนยซึ่งได้แก่ นมผงขาดมันเนยที่ละลายอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ระหว่างการผสมให้คนส่วนผสมตลอดเวลาจนนมผงขาดมันเนยและส่วนประกอบที่เป็นของแข็งทั้งหมดละลายอย่างสมบูรณ์จึงใส่ไขมันเนย สำหรับการฆ่าเชื้อส่วนผสม ขั้นตอนการลดขนาดเม็ดไขมัน และการลดอุณหภูมิและการบ่มทำตามวิธีการในข้อที่ 2.2.1 ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมในส่วนนี้จะใช้เปรียบเทียบค่าความหนืดกับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัวด้วย โดยการเตรียมส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัวจะมี

วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ใช้สารเพิ่มความคงตัวทางการค้าเป็นส่วนประกอบ แต่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัว

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

การวิเคราะห์ค่าสมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิด ทำได้โดยนำตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ใส่ลงในชุดตรวจสอบสมบัติทางวิทยากระแสของไหลแบบ concentric cylindrical standard bob กำหนดให้อุณหภูมิของ bob เท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ทำการวัดค่าความหนืดปรากฏ และรูปแบบพฤติกรรมการไหล (flow behaviour curves) ในช่วง shear rate ($\gamma^{\bullet}$) ตั้งแต่ 0 ถึง 400 1/s (สำหรับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัวจะวัดเฉพาะค่าความหนืดปรากฏเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยเบื้องต้นพบว่ารูปแบบพฤติกรรมของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดังกล่าวมีลักษณะเป็น time independent shear thinning ที่ใกล้เคียงของไหลแบบ Newtoniam มาก) ด้วยเครื่อง Rheometer (MCR 300, Physica, Stuttgart, Germany) การวิเคราะห์ flow behaviour curves ใช้การเข้าสมการ Power law ดูค่าความน่าเชื่อถือ least square (R^2) ที่ได้ โดยสมการ Power law แสดงในสมการที่ 1 ดังนี้

$$\sigma = K\gamma^{\bullet n} \qquad (1)$$

โดย σ หมายถึง shear stress หน่วย Pa, K หมายถึง viscosity consistency, $\gamma^{\bullet}$ หมายถึง shear rate หน่วย 1/s และ n หมายถึง flow behaviour index ทั้งนี้ค่า viscosity consistency และ flow behaviour index ได้จากสมการที่ 1 เมื่อแทนค่า shear stress และ shear rate ลงในสมการ โดยพิจารณาจากค่า R^2 ของสมการที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.90 การเปรียบเทียบค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมในแต่ละตัวอย่างทำที่ shear rate เท่ากับ 50 1/s (Goff et. al., 1995) ส่วนสมบัติทางวิทยากระแสของไหลที่เป็น dynamic rheological property ซึ่งวัดอยู่ในรูปของค่า viscoelastic parameters ได้แก่ storage modulus (G'), loss modulus (G'') และ tan delta ($\tan\delta$) ทำได้โดยกำหนดค่าความถี่เพื่อหา frequency sweep ในช่วง 0.01 ถึง 2 Hz โดยช่วงความถี่ดังกล่าวถือว่าอยู่ในช่วงของ Linear Viscoelastic Region (LVR) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีการเสื่อมเสียสภาพโครงสร้างของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมเมื่อมีแรงกระทำต่อตัวอย่าง การวิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนี้ทำการทดลอง 3 ซ้ำต่อการผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม 1 ครั้ง

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดัดแปลงจากวิธีของ Thaiudom and Goff (2003) โดยตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมจะถูกดูดเข้าหลอดขนาดเล็กที่ทำด้วยวุ้น ตัวอย่างในหลอดวุ้นถูกตรึงด้วย glutaraldehyde ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจาก

นั้นจึงนำหลอดวุ้นนี้ไปจุ่มลงใน phosphate buffer จำนวน 3 ครั้งๆ ละ 10 นาที แล้วจึงนำไปจุ่มใน สารละลาย osmium textroxide ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างหลอดวุ้นนี้ใน phosphate buffer จำนวน 3 ครั้งๆ ละ 10 นาที ก่อนนำไปเก็บไว้ใน phosphate buffer อีกครั้งที่อุณหภูมิห้อง นาน 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างในหลอดวุ้นออกจาก phosphate buffer แล้วทำการแช่ในสารละลายชุดของ เอทานอลตามลำดับความเข้มข้นของเอทานอล ดังนี้ ความเข้มข้นร้อยละ 50, 60, 70, 70, 80, 90, 95 และ 100 โดยน้ำหนัก การแช่ในแต่ละความเข้มข้นของเอทานอลใช้ระยะเวลานาน 10 นาที แล้วไล่น้ำที่ยัง หลงเหลืออออกอีกครั้งโดยการแช่ในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 นาน 15 นาที จำนวน 2 ครั้ง ก่อน นำไปแช่ใน propylene oxide ความเข้มข้นร้อยละ 100 นาน 15 นาที จำนวน 2 ครั้งแล้วนำตัวอย่างไปแช่ใน สารผสมระหว่าง propylene oxide และ Spurr's embedding medium (ประกอบด้วย Vinyl cyclohexane dioxide Resin ร้อยละ 23.60, Diglycidyl ether of polypropyleneglycol: DER 736 ร้อยละ 14.20, Nonenyl succinic anhdride methyl anhydride ร้อยละ 61.30 และ Dimethylaminoethanol ร้อยละ 0.90) ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ในการแช่ครั้งที่ 1, 1 ต่อ 1 ในการแช่ครั้งที่ 2 และ 1 ต่อ 3 ในการแช่ครั้งที่ 3 โดยระยะเวลาในการแช่ แต่ละครั้งนานประมาณ 2 ชั่วโมง กำหนดสภาวะการแช่ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ใน Spurr's embedding medium อีก 2 ครั้ง ระยะเวลานาน 2 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ก่อนนำไปแช่ใน Spurr's embedding medium อีกครั้ง นาน 2 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างใส่ในพิมพ์พลาสติกและเท Spurr's embedding medium ลงในพิมพ์เพื่อให้ได้ block ของตัวอย่าง นำ block ที่ได้ไปบ่มในตู้อบลมร้อนที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง ตัวอย่างในหลอดวุ้นจะถูกหุ้มด้วย resin block ซึ่งมีลักษณะแข็ง เหมือนแท่งพลาสติก จากนั้นนำ block ไปตัดให้มีขนาดความบางเท่ากับ 90 นาโนเมตรด้วยเครื่อง LKB ultramicrotome (Leica Reichert Ultracut S., Vienna, Austria) แล้วนำไปวางบนแผ่น gold grids ก่อน นำไปย้อมด้วยสารผสมระหว่าง uranyl acetate และ lead citrate เพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) (JEM 2010, JEOL, Japan) ที่แรงดันไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ รูปโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม จะถูกบันทึกโดยกล้องและโปรแกรมที่มากับกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องผ่าน การถ่ายรูปจะทำไม่ น้อยกว่า 20 รูป ในแต่ละ block ของตัวอย่างต่อการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมในแต่ละครั้ง

2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมจะถูก วิเคราะห์ทางสถิติตามแผนการทดลองแบบ complete randomized design (CRD) โดย ANOVA และความ แตกต่างค่าเฉลี่ยโดย Duncan's new multiple rank test ด้วยโปรแกรม SPSS (SPSS for window version 12, USA) ข้อมูลที่ได้ได้จากการผลิตส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม 2 ซ้ำ

บทที่ 3
ผลการวิจัย

3.1 สมบัติทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

สมบัติทางวิทยากระแสของไหลในส่วนของค่าความหนืดปรากฏและรูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด SWI และส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด FT-999 แสดงดังตารางที่ 2 และดังรูปที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ shear rate 50 1/s และที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	ค่าความหนืดปรากฏ (Pa.s)
กะทิ	90.63 ± 2.73^{A}
นม	241.33 ± 20.10^{B}
SWI	17.77 ± 1.29^{C}
FT-999	20.93 ± 1.59^{C}
ที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัว	17.00 ± 2.58^{C}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ในแนวดิ่งที่มีอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าความหนืดปรากฏที่ shear rate 50 1/s ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ส่วนค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้ง 2 ชนิดมีค่าค่อนข้างน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างตัวอย่างทั้งสอง ($p > 0.05$)

ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีค่ามากกว่าค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 เนื่องจากในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมและกะทิมีการเติมสารช่วยเพิ่มความคงตัว ได้แก่ LBG และ K-carrageenan ที่ทำให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมในทั้งสองตัวอย่างมีความหนืดเพิ่มขึ้น สารเพิ่มความคงตัวโดยเฉพาะ K-carrageenan สามารถสร้างพันธะประเภท electrostatic bonding กับส่วนของ casein micelles ที่เป็นส่วนประกอบหลักในการทำไอศครีมทั้งสองชนิด พันธะดังกล่าวทำให้เกิดโครงร่าง

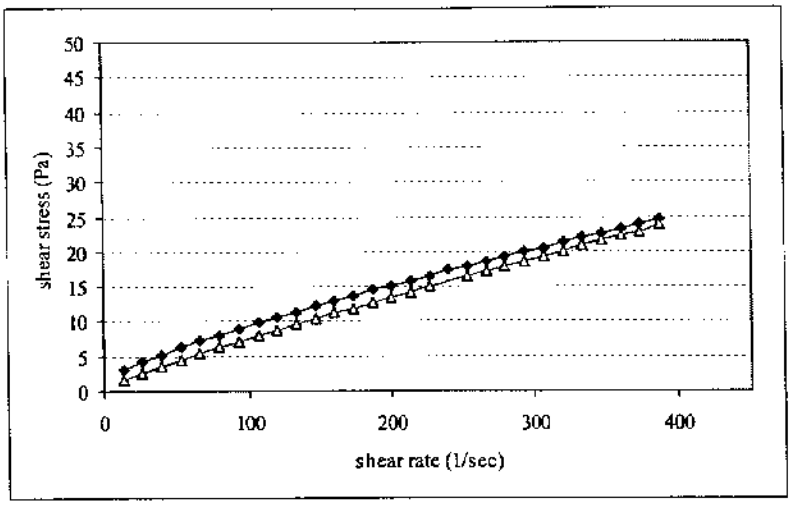
เจลที่มีลักษณะเป็นเส้น (filaments) พันกันเป็นเครือข่ายสามมิติคล้ายตาข่าย โครงสร้างดังกล่าวนี้สามารถป้องกันการตกตะกอนของ casein ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมได้ (Snoeren, Payens, Jeunink, and Both, 1975; Snoeren, Both, and Schmidt, 1976) ซึ่งส่งผลต่อการป้องกันการเกิดการแยกชั้น หรือ phase separation ของระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมในระดับโครงสร้างมหภาค (macrostructure) (Thaiudom and Goff, 2003; Vega, Andrew and Goff, 2004; Vega et. al., 2005) นอกจากนี้ความหนืดที่เกิดขึ้นในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและนมอาจเกิดจากผลของปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่าง LBG และκ-carrageenan ด้วย (Viebke, 1995; Gonçalves, Gomes, Langdon, Viebke, and Williams, 1997) Williams and Langdon (1996) อธิบายว่า ที่ระดับความเข้มข้นของ κ-carrageenan ต่ำเช่นเดียวกับที่พบในการทดลองนี้ LBG จะช่วยทำให้สายของ κ-carrageenan ชนิด helic สองสายขึ้นไปจับกันกลายเป็นโครงร่างตาข่าย ทำให้เกิดลักษณะของเจลชนิดอ่อน (weak gel) ได้ สำหรับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความคงตัวในระบบทั้งสองชนิด พบว่าค่าความหนืดปรากฏมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองไม่ได้ทำให้ค่าความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นหรือไม่ได้มีส่วนช่วยทำให้เกิดการต้านทานการไหลในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมดังกล่าว ซึ่งค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัว

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีค่ามากกว่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของไขมันที่แตกต่างกันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้งสองชนิด โดยไขมันเนยที่เป็นส่วนประกอบของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีค่า solid fat index น้อยกว่า ไขมันมะพร้าวหรือครีมกะทิที่อุณหภูมิเดียวกัน (O'Brien, 2004) ทำให้อนุภาคเม็ดไขมันที่มีการแข็งตัวในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีน้อยกว่าในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ อนุภาคของเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมจึงสามารถเคลื่อนตัวเข้าใกล้ชิดกันและรวมตัวกันทำให้เกิด fat destabilization และเกิด fat partial coalescence ในระบบได้ง่ายกว่าอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ทำให้ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันเนยในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเม็ดไขมันของครีมกะทิในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ อนุภาคขนาดใหญ่นี้จะครอบคลุมพื้นที่ทำให้เกิดปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่าง (free volume fraction) มากกว่าอนุภาคของเม็ดไขมันจากครีมกะทิ ซึ่งเมื่อให้แรงกระทำจากภายนอกแก่ระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมจึงพบว่ามีการต้านทานแรงที่เกิดจากอนุภาคเม็ดไขมันที่มีปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่างในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมได้มากกว่าในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ

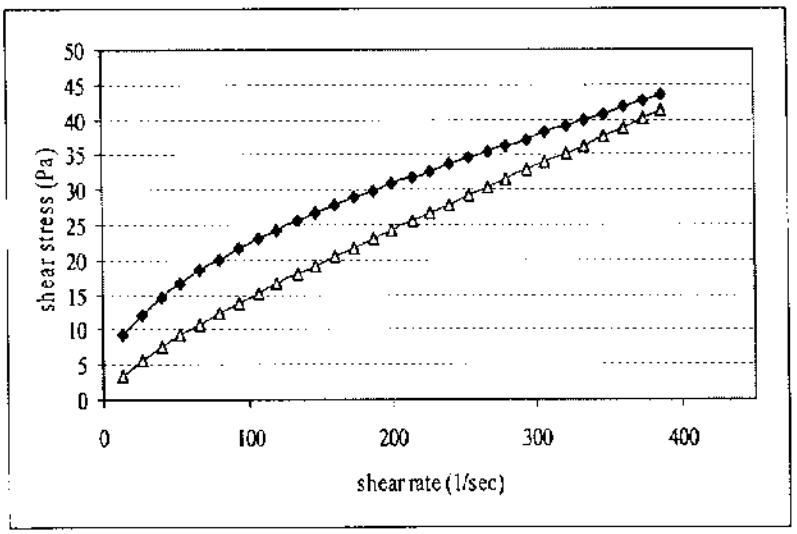
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิด พบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีลักษณะการไหลแบบ Non-Newtonian ซึ่งเป็นแบบประเภท time dependent shear thinning (รูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ลักษณะการไหลดังกล่าวสามารถพบได้ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมสารเพิ่มความคงตัวจำพวก carrageenan (Steffe, 1996) หรือ κ-carrageenan ร่วมกับสารเพิ่มความคงตัวประเภทอื่น (Goff, Davidson and Cappi, 1994; Thaiudom and Goff, 2003; Vega and Goff, 2005) อย่างไรก็ตามลักษณะการไหลแบบ time dependent shear thinning จะพบในพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมชัดเจนกว่าในส่วนของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ หรือส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีรูปแบบลักษณะการไหลใกล้เคียงกับการไหลเข้าใกล้ของไหลแบบ Newtonian มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม แสดงว่าเมื่อมีการเพิ่มค่าแรงเฉือนต่อส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิจะมีการเสียรูปทรงได้ง่ายกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม หรือส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิจะมีค่าความหนืดลดลงมากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ทั้งนี้น่าจะเกิดจากการต้านทานต่อแรงภายนอกในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีค่าน้อยกว่าการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อระบบในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ซึ่งน่าจะเกิดจากขนาดอนุภาคเม็ดไขมันในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีสัดส่วนปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่างน้อยกว่าในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Scott, Duncan, Sumner and Waterman (2003) ที่พบว่าขนาดของอนุภาคเม็ดไขมันเมื่อเกิด fat destabilization ส่งผลให้มี free volume fraction มากขึ้น อันอาจส่งผลต่อค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมให้มีค่ามากขึ้นเช่นกัน

สำหรับรูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด SWI และ FT-999 (รูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ) มีลักษณะรูปแบบการไหลใกล้เคียงกับลักษณะการไหลแบบ Newtonian มากที่สุด โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงตัดผ่านจุดตัดของแกน x และ แกน y เมื่อพิจารณาค่าความชันของเส้นกราฟจะพบว่าความชันมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการเพิ่มหรือลดค่า shear rate แสดงให้เห็นว่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด SWI และ FT-999 มีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ถือเป็นลักษณะจำเพาะของของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลคล้ายการไหลแบบ Newtonian อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องนำค่า flow behavior index (n) มาพิจารณาด้วย

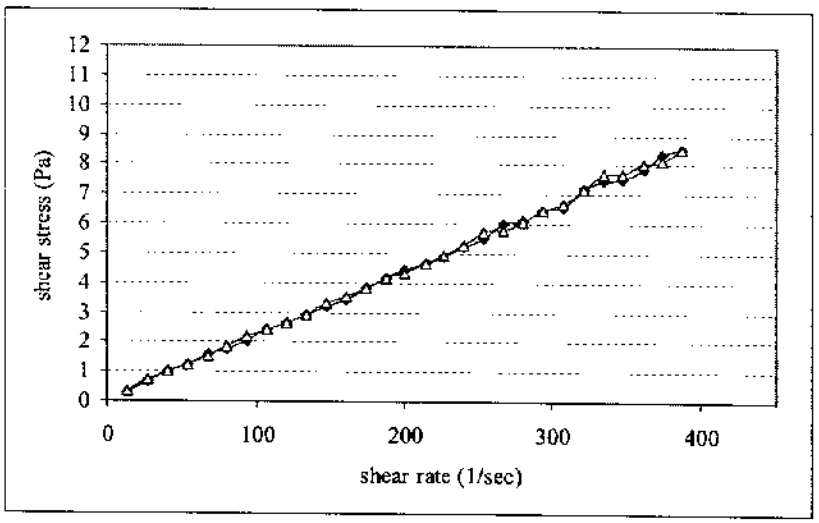
เมื่อพิจารณาค่า K ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิดในตารางที่ 3 พบว่า ค่า K ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีค่ามากที่สุดและแตกต่างจากค่า K ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่เหลือทั้ง 3 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า n ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 มีค่าใกล้เคียง 1 แต่ไม่เท่ากับ 1 และมากกว่าค่า n ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 มีพฤติกรรม



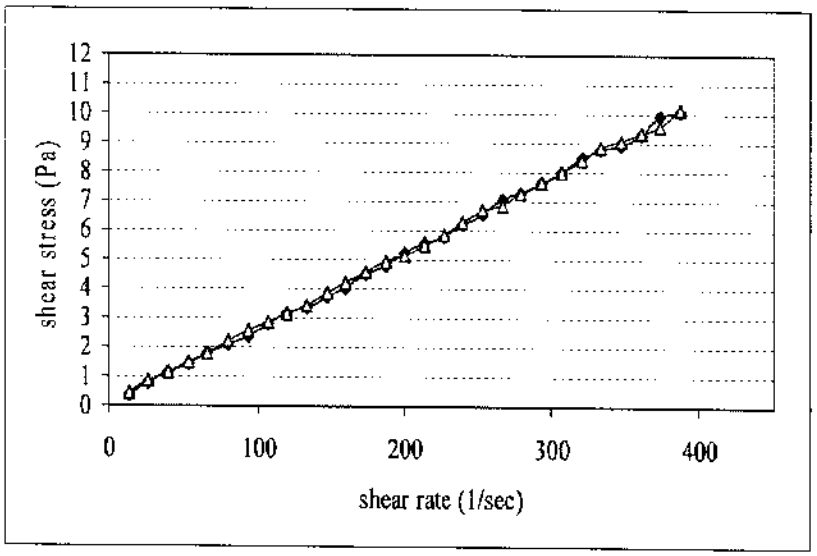
<u>รูปที่ 1</u> รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ โดย ◆ และ Δ หมายถึง up curve และ down curve เมื่อมีการเพิ่มและลด shear rate ตามลำดับ



<u>รูปที่ 2</u> รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม โดย◆ และ Δ หมายถึง up curve และ down curve เมื่อมีการเพิ่มและลด shear rate ตามลำดับ



<u>รูปที่ 3</u> รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่เติม SWI โดย ♦ และ Δ หมายถึง up curve และ down curve เมื่อมีการเพิ่มและลด shear rate ตามลำดับ



<u>รูปที่ 4</u> รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่เติม FT-999 โดย ♦ และ Δ หมายถึง up curve และ down curve เมื่อมีการเพิ่มและลด shear rate ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่า viscosity consistency (K) และ ค่า flow behaviour index (n) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

ส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม	ค่า K	ค่า n	ค่า R^2
กะทิ	0.501 ± 0.016^{A}	0.645 ± 0.012^{A}	0.99
นม	2.676 ± 0.975^{B}	0.470 ± 0.060^{B}	1.00
SWI	0.025 ± 0.002^{C}	0.980 ± 0.013^{C}	1.00
FT-999	0.029 ± 0.004^{C}	0.982 ± 0.015^{C}	1.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย (± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ในแนวดิ่งที่มีอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

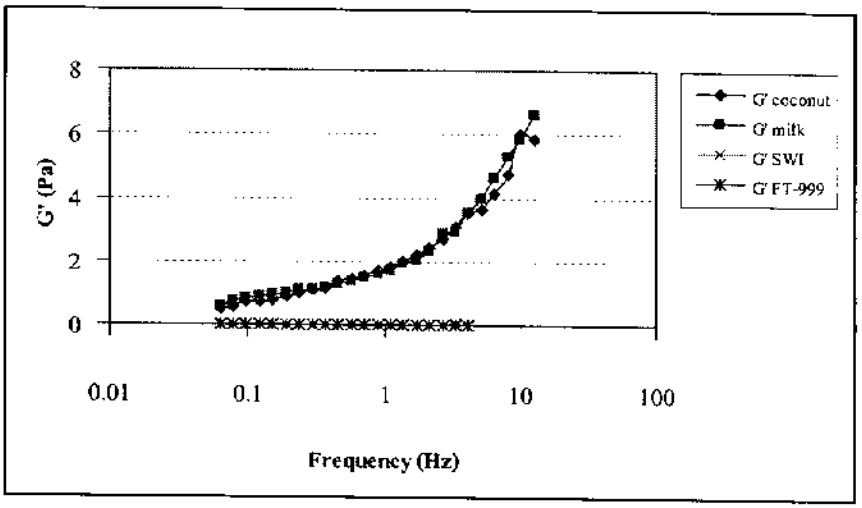
การไหลแบบ shear thinning (Steffe, 1996) ที่มีลักษณะการไหลคล้ายของไหลแบบ Newtonian มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้งสองไม่มีผลของสารเพิ่มความคงตัว หรือไม่มีผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง K-carrageenan กับ casein micelles ในขณะที่รูปแบบพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีลักษณะการไหลแบบ time dependent shear thinning มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ เพราะค่า n ของส่วนผสมไอศครีมกะทิมีค่ามากกว่าค่า n ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่างของ fat destabilization ในส่วนของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีค่าน้อยกว่าผลของปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่างจาก fat destabilization ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม อย่างไรก็ตามลักษณะรูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม (รูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) พบว่า กราฟรูปแบบการไหลมี hysteresis loop หรือมีลักษณะเป็น thixotopy อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งบอกถึงลักษณะของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบ (internal interaction) (Goycoolea, Morris and Gidley, 1995; Steffe, 1996; Bourriot, Garneir and Doublier, 1999) ภายในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ซึ่งน่าจะเป็นผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง K-carrageenan กับ casein micelles (Snoeren et. al., 1975; Snoeren et. al., 1976; Drohan, Tziboula, McNulty and Horne, 1997) หรือระหว่าง LBG และ K-carrageenan (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) ส่วนผลของปริมาตรที่สามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ว่างจาก fat destabilization ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมที่มีมากกว่าในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิน่าจะส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง K-carrageenan กับ casein micelles หรือระหว่าง LBG และ K-carrageenan มีมากขึ้นจนทำให้เกิด hysteresis loop ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมากกว่าในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ แต่ลักษณะดังกล่าวจะไม่พบในส่วนผสมพร้อมทำ

ไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองชนิดแสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้งสองไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบซึ่งถือว่าเป็นของไหลประเภท time independent shear thinning

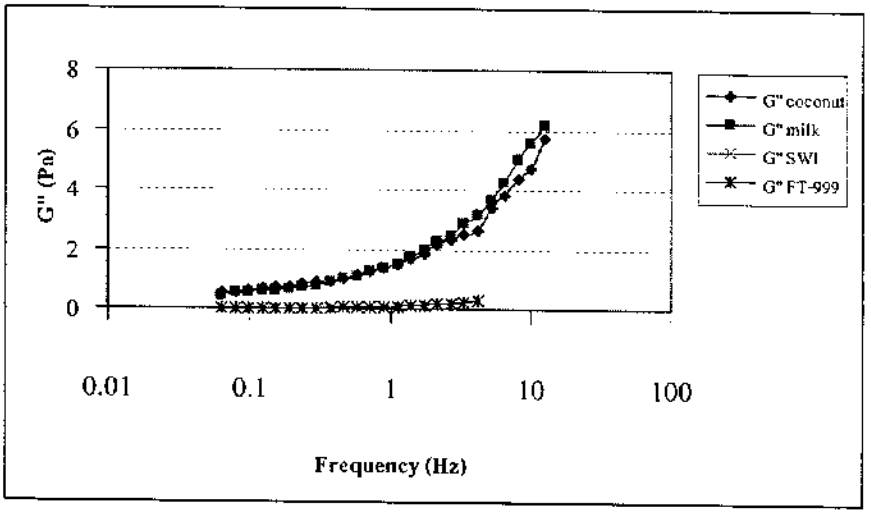
สำหรับสมบัติวิทยากระแสของไหลในส่วนของ dynamic rheological property ซึ่งวัดอยู่ในรูปของค่า viscoelastic parameters ได้แก่ storage modulus (G'), loss modulus (G'') และ tan delta (tan δ) พบว่า ค่า G' (รูปที่ 5) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ (frequency sweep) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับค่า G'' (รูปที่ 6) ส่วนค่า G' และค่า G'' (รูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI หรือ FT-999 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามค่า G' และค่า G'' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีค่ามากกว่าค่า G' และ ค่า G'' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI หรือ FT-999 เมื่อมีการเพิ่มค่าความถี่ในการศึกษา

เมื่อพิจารณาค่า tan δ ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและไอศครีมนมพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า tan δ ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 (รูปที่ 7) แสดงว่าในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและไอศครีมนมมีลักษณะเป็น viscoelastic มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 อย่างไรก็ตามค่า tan δ ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI มีค่าน้อยกว่าค่า tan δ ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร FT-999 เมื่อค่าความถี่มากขึ้น แสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI มีลักษณะเป็น viscoelastic มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร FT-999 เมื่อค่าความถี่เพิ่มมากขึ้น

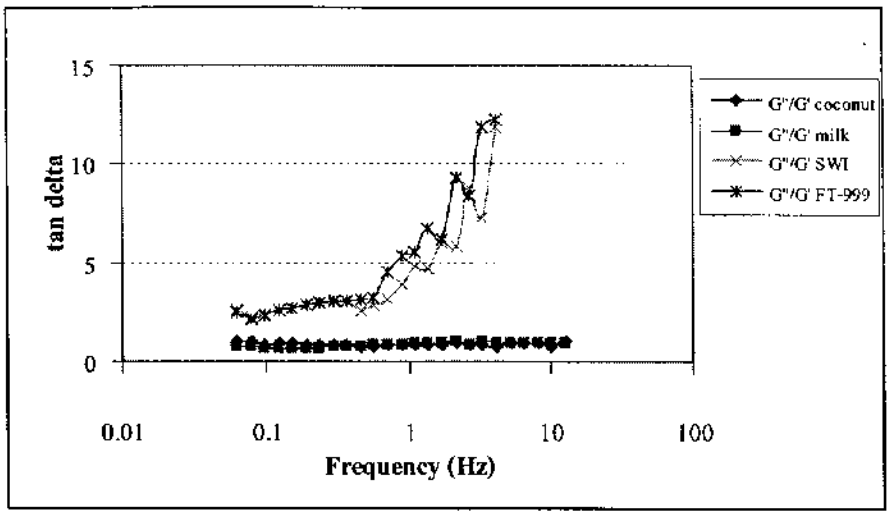
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา oscillatory spectra ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI หรือ FT-999 (รูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ) พบว่า spectrum ทั้งสองเป็นรูปแบบของสารละลายเจือจาง (dilute solution) (Steffe, 1996) ซึ่งมีลักษณะคล้ายของเหลว (liquid like) มากกว่าของแข็ง (solid like) เนื่องจากค่า G'' มีค่ามากกว่าค่า G' ตลอดการเพิ่มค่าความถี่ในการศึกษา ในขณะที่ oscillatory spectra ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ (รูปที่ 10) เป็นลักษณะของสารละลายเข้มข้น (concentrated solution) เนื่องจากค่า G' มีค่าน้อยกว่า G'' ที่ความถี่ในการศึกษาต่ำและค่า G' มีค่ามากกว่า G'' ที่ความถี่ในการศึกษาสูงขึ้น (Vega et. al., 2005) ส่วนส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมพบว่ามีลักษณะของ oscillatory spectra เป็นของเจลชนิดอ่อน (Turquois, et. al., 1992; Williams and Langdon, 1996; Rodd, Davis, Dunstan, Forrest and Boger, 2000) เนื่องจาก ค่า G' มีค่ามากกว่าค่า G'' ตลอดค่าความถี่ ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเนื่องมาจากผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง κ-carrageenan กับ casein micelles และระหว่าง κ-carrageenan กับ LBG ตามที่กล่าวข้างต้น



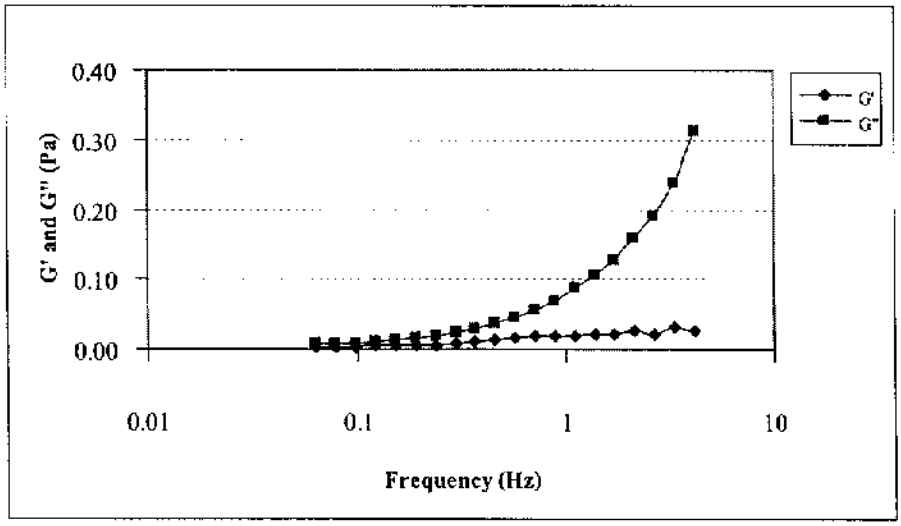
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า storage moduli กับความถี่ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม



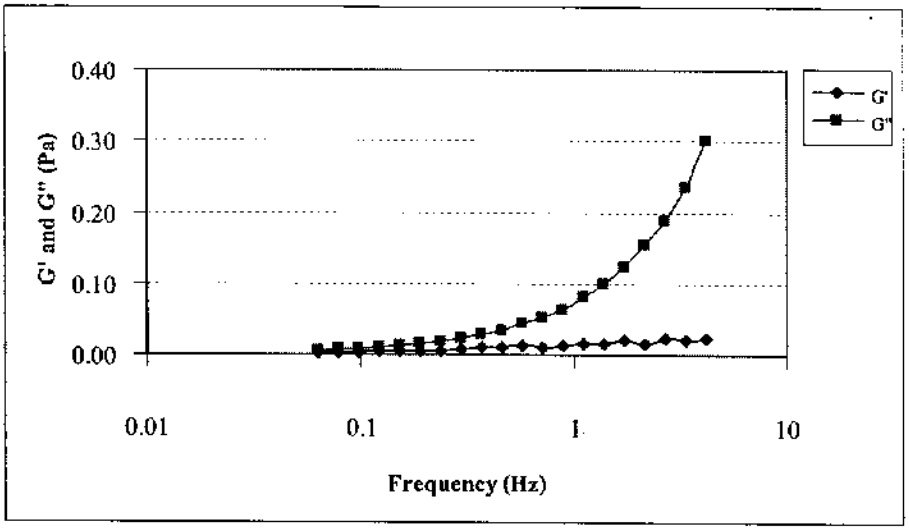
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า loss moduli กับความถี่ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม



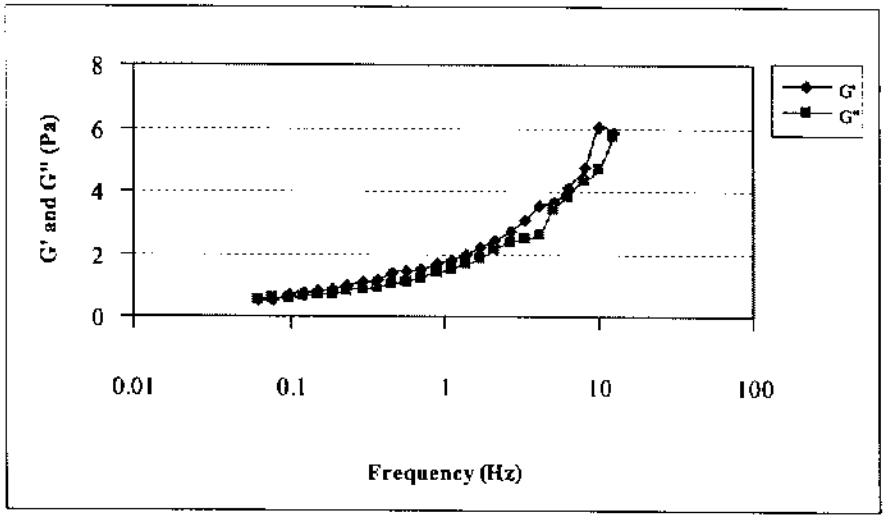
<u>รูปที่ 7</u> ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan delta กับความถี่ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม



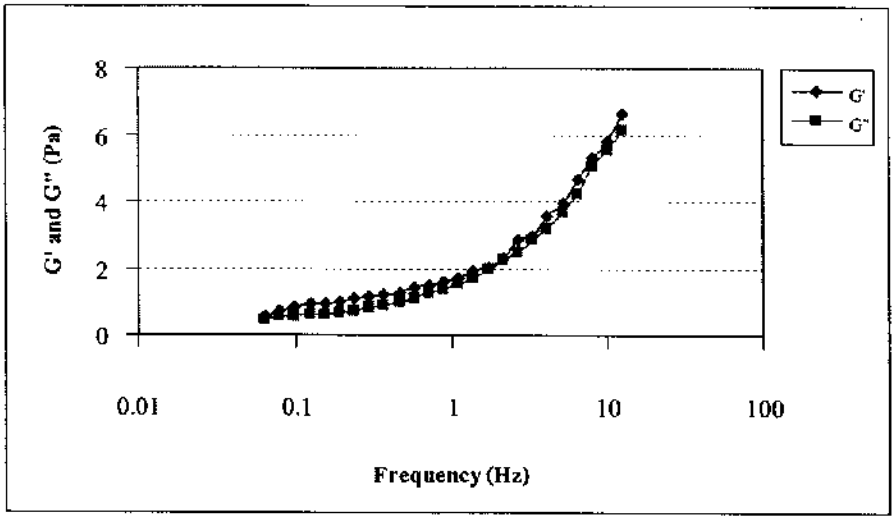
<u>รูปที่ 8</u> Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติม SWI



รูปที่ 9 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติม FT-999



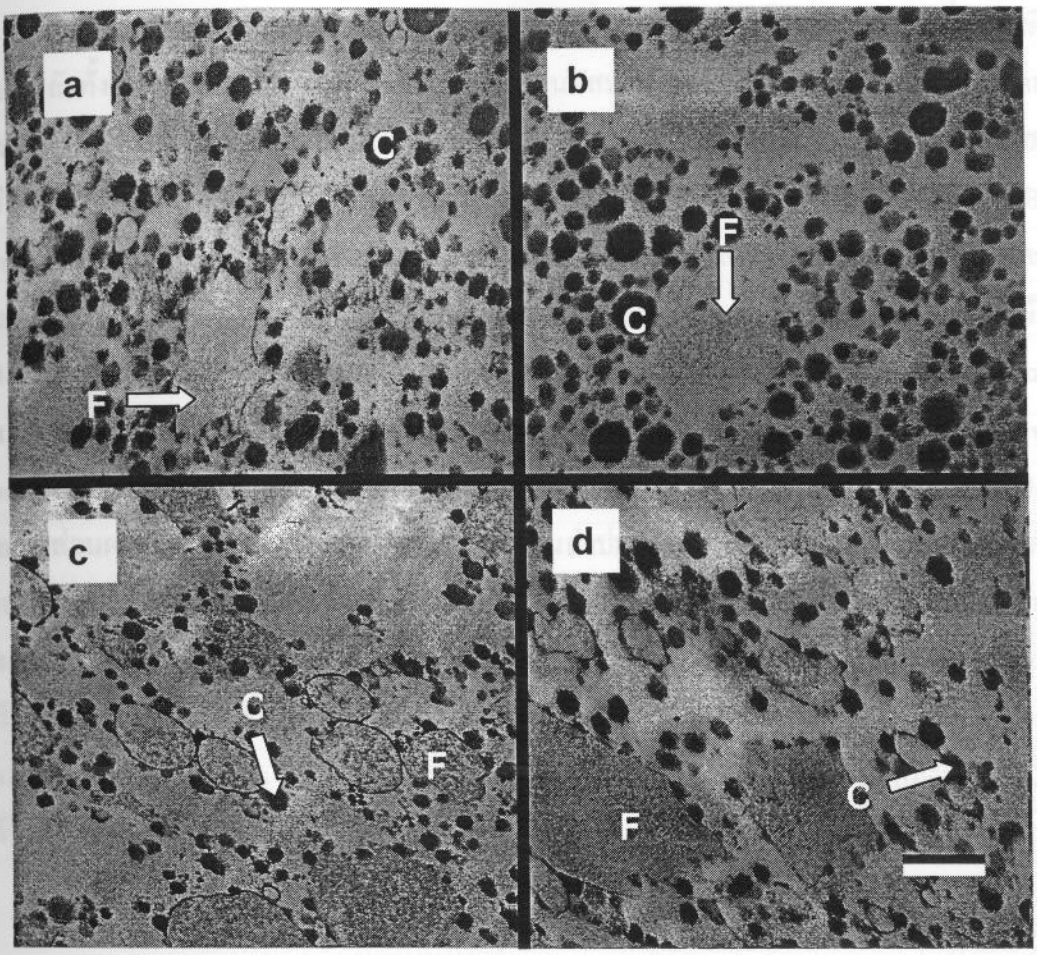
รูปที่ 10 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ



รูปที่ 11 Oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม

3.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมจากรูปที่ 12 พบว่า การกระจายตัวของ casein micelles ในตัวอย่างที่มีการใช้ครีมกะทิ (รูปที่ 12a) และไขมันเนย (รูปที่ 12b) มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยการกระจายตัวของ casein micelles ของสองตัวอย่างมีการกระจายตัวรอบๆ อนุภาคเม็ดไขมันอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถือเป็นลักษณะการกระจายตัวที่พบได้ทั่วไปในระบบของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม (Goff, Liboff, Jordan and Kinsella, 1987; Goff, 1997a, b; Goff, Verespej and Smith, 1999; Goff, 2002; Thaiudom and Goff, 2003) อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของ casein micelles ในตัวอย่างที่มีการใช้ครีมกะทิมีลักษณะของการรวมกลุ่มน้อยกว่า หรือมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบมากกว่าในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม เมื่อพิจารณาอนุภาคเม็ดไขมันในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิเทียบกับอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม พบว่า ลักษณะของอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีลักษณะกลมและมีขนาดใหญ่กว่าของอนุภาคเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมน่าจะมีความสามารถในการเกิด fat destabilization ได้มากกว่าเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิ โดยส่วนประกอบของกรดไขมันในไขมันเนยพบว่ามีความไม่อิ่มตัวมากกว่าส่วนประกอบของกรดไขมันในเม็ดไขมันจากครีมกะทิ (O'Brien, 2004) การเชื่อมต่อของอนุภาคเม็ดไขมันจึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ทำให้เกิด fat destabilization ได้มากกว่า ผลของลักษณะความอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของกรดไขมันในไขมันที่ใช่เป็นส่วนประกอบของไอศครีมต่อการเกิด fat destabilization พบในการทดลองของ Granger, Barey, Combe, Veschambre and Cansell (2003) และ Granger และคณะ (2005) โดยนักวิจัยกลุ่มนี้อธิบายว่าประเภทและ



รูปที่ 12 โครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม a) กะทิ b) นม c) SWI และ d) FT-999 โดย F และ C แสดงส่วนของอนุภาคเม็ดไขมันและ casein micelles ตามลำดับ โดยขนาด bar ที่ปรากฏในรูปมีค่าเท่ากับ 0.50 ไมครอน

ชนิดของไขมันที่เป็นส่วนประกอบของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมมีผลต่อการเกิด fat destabilization โดยไขมันจำพวกที่มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบสูง และเป็นกรดไขมันที่มีความยาวของสายกรดไขมันมากจะเหนี่ยวนำให้เกิด fat destabilization ในระบบของไอศครีมได้ง่ายกว่าระบบที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันที่อิ่มตัวหรือมีความยาวของกรดไขมันสายสั้นๆ การเกิด fat destabilization นี้จึงทำให้ขนาดอนุภาคเม็ดไขมันที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมเพิ่มขึ้น (Scott et. al., 2003) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้

ผลของขนาดเม็ดไขมันที่ใหญ่ขึ้นจากการเกิด fat destabilization นี้พบในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI และ FT-999 ด้วยเช่นกัน เนื่องจากรูปของขนาดเม็ดไขมันในรูปที่ 12c และ 12d มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเม็ดไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิอย่างเห็น

ได้ชัด แต่ผลดังกล่าวกลับไม่ได้ทำให้ค่าความหนืดในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังทั้งสองชนิดมีค่าสูงเช่นเดียวกับตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม จากผลการทดลองในจุดนี้จึงสรุปได้ว่าค่าความหนืดและลักษณะของการเกิดเจลชนิดอ่อนที่เกิดขึ้นในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมน่าจะมีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของสารเพิ่มความคงตัวทั้งสองชนิดในระบบ ซึ่งได้แก่ LBG กับ K-carrageenan และผลของการเกิดพันธะระหว่าง K-carrageenan และ casein micelles ร่วมกับผลของการเกิด fat destabilization แต่ค่าความหนืดและลักษณะของ oscillatory spectrum แบบสารละลายเข้มข้นที่พบในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทินั้นเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของสารเพิ่มความคงตัว K-carrageenan กับ LBG และผลของการเกิดพันธะระหว่าง K-carrageenan และ casein micelles ส่วนผลของ free volume fraction ที่เกิดจาก fat destabilization มีอิทธิพลต่อระบบน้อยมาก สำหรับผลของการมีลักษณะ elasticity ในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI มากกว่าในตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร FT-999 นั้นยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้ แต่อาจเนื่องมาจากผลของการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและ casein micelles ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI มีลักษณะหนาแน่นมากกว่าการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดไขมันและ casein micelles ในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร FT-999 ดังรูปที่ 12c และ 12d ตามลำดับ

บทที่ 4
บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

ค่าความหนืดปรากฏของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิที่ shear rate เท่ากับ 50 1/s อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม โดย oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิมีลักษณะเป็น spectrum ของสารละลายเข้มข้น แต่ oscillatory spectrum ของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมมีลักษณะเป็น spectrum ของเจลชนิดอ่อน ค่าความหนืดและลักษณะของการเกิดเจลชนิดอ่อนในระบบส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนมอาจมีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ของสารเพิ่มความคงตัว LBG กับ K-carrageenan และผลของการเกิดพันธะระหว่าง K-carrageenan และ casein micelles ร่วมกับผลของการเกิด fat destabilization ของไขมันเนยในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม ส่วนค่าความหนืดและลักษณะของ oscillatory spectrum แบบสารละลายเข้มข้นที่พบในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทินั้น ผลที่สำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวน่าจะมาจากปฏิสัมพันธ์ของสารเพิ่มความคงตัว K-carrageenan กับ LBG และผลของการเกิดพันธะระหว่าง K-carrageenan และ casein micelles แต่ผลของ fat destabilization ไม่ได้เสริมให้ระบบมีค่าความหนืดหรือมีลักษณะของ oscillatory spectrum แบบเจลอ่อนดังที่พบในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมนม อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้งสองมีพฤติกรรมการไหลแบบ time dependent shear thinning หรือ thixotropic ที่มีลักษณะของการเกิดพันธะภายในทำให้เกิดลักษณะของ hysteresis loop ส่วนรูปแบบการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI หรือ FT-999 มีลักษณะเป็น time independent shear thinning ที่มีลักษณะคล้ายการไหลแบบ Newtonian มากและไม่มีลักษณะของ hysteresis loop แต่พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร SWI มีลักษณะ elasticity มากกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร FT-999 ส่วนลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมทั้ง 4 ชนิดสามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อการแปลผลสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลทางวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ปัจจัย เช่น ประเภทหรือชนิดของไขมันที่ใช้เป็นส่วนประกอบ ประเภทหรือชนิดของสารเพิ่มความคงตัว ประเภทหรือชนิดของสารช่วยในการทำให้เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมัน และโปรตีนที่พบในนมหรือโปรตีนทดแทนจากแหล่งอื่นๆ แม้การศึกษาในส่วนของปัจจัยเหล่านี้มีอยู่ค่อนข้างมากในปัจจุบัน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบและส่วนประกอบที่แตกต่างออกไปจากผลิตภัณฑ์ไอศครีมที่มีการผลิตในประเทศไทยอยู่ค่อนข้างมาก การทดลองนี้เน้นการใช้วัตถุดิบและส่วนประกอบต่างๆ ที่มีในประเทศและให้มีความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ไอศครีมกะทิที่มีจำหน่ายในประเทศไทย อย่างไรก็ตามผลของสารเพิ่มความคงตัวที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพื่อทดแทนไขมันหรือใช้เติมลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมเพื่อทำให้เกิดลักษณะเนื้อ (body) ของไอศครีมยังคงต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ทั้งในส่วนของความแตกต่างในเชิงหน้าที่ของสารดังกล่าว หรือลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันออกไปว่ามีส่วนประกอบหรือมีส่วนใดในโมเลกุลของสารดังกล่าวที่จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการแสดงลักษณะ elasticity ที่ได้ หรือมีผลต่อสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีม นอกจากนี้การศึกษาในส่วนของสมบัติวิทยากระแสของไหลของไอศครีมกะทิก็ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำข้อมูลมาใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการผลิตไอศครีมดังกล่าว เช่นเดียวกับการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคซึ่งอาจใช้เทคนิค confocal laser scanning microscopy เพื่อดูความสัมพันธ์ของส่วนประกอบต่างๆ ในเชิงปริมาณเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามในการผลิตไอศครีมนั้นถือเป็นกระบวนการไดนามิกที่มีปัจจัยหลายอย่างในการผลิตมาเกี่ยวข้องด้วยมากมาย การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกับการเกิดผลึกน้ำแข็งในระหว่างการปั่นส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมเพื่อผลิตเป็นไอศครีมก็เป็นอีกข้อมูลหนึ่งที่น่าศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งจะทำให้ข้อมูลสมบัติวิทยากระแสของไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศครีมกะทิและของไอศครีมกะทิเป็นประโยชน์ต่อการจัดการระบบการลำเลียงและการแช่แข็งเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ไอศครีมกะทิในระดับอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้นต่อไป

บรรณานุกรม

AOAC (2002). The Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL,17th Edition.

Bourriot, S., Garneir, C., and Doublier, J.L. (1999). Micellar casein-κ-carrageenan mixtures I. *Phase separation and ultrastructure. Carbohydrate Polymers* 40: 145-157.

Camacho,M.M, Martinez-Navarre, N. and Chiralt, A. (2005). Rheological characterization of experimental dairy creams formulated with locust bean gum (LBG) and λ-carrageenan combinations. *International Dairy Journal.* 15: 243-248.

Chen, Y., Liao, M.L., Boger, D.V., and Dunstan, D.E. (2001). Rheological characterization of kappa-carrageenan/ locust bean gum mixtures. *Carbohydrate Polymer.* 46: 117-124.

Drohan, D.D., Tziboula, A., McNulty, D., and Horne, D.S. (1997). Milk protein-carrageenan interactions. *Food Hydrocolloids.* 11: 101-107.

Dunstan,D.E., Chen, Y., Liao, M.L., Salvatore, R., Boger, D.V., and Prica, M. (2001). Structure and rheology of the kappa-carrageenan/locust bean gum gels. *Food Hydrocolloids.* 15: 475-484.

Goff, H.D. (1997a). Colloidal aspects of ice cream-A review. International Dairy Journal 7: 363-373.

Goff, H.D. (1997b). Instability and partial coalescence in whippable dairy emulsions. *Journal of Dairy Science.* 80: 2620-2630.

Goff, H.D. (2002). Formation and stabilisation of structure in ice-cream and related products. *Current Opinion in Colooid and Interface Science.* 7: 432-437.

Goff, H.D., Caldwell, K.B., Stanley, D.W., and Maurice, T.J. (1993). The influence of polysaccharides on the glass transition in frozen sucrose solutions and ice cream. *Journal of Dairy Science.* 76: 1268-1277.

Goff, H.D., Davidson, V.J., and Cappi, E. (1994). Viscosity of ice cream mix at pasteurization temperatures. Jour*nal of Dairy Science.* 77: 2207-2213.

Goff, H.D., Freslon, B., Sahagian, M.E., Hauber, T.D., Stone, A.P., and Stanley, D.W. (1995). Structural development in ice cream-dynamic rheological measurements. *Journal of Texture Study.* 26: 517-536.

Goff, H.D., Kinsella, J.E., and Jordan, W.K. (1989). Influence of various milk protein isolates on ice cream emulsion stability. *Journal of Dairy Science.* 72: 385-397.

Goff, H.D., Liboff, M., Jordan, W.K., and Kinsella, J.E. (1987). The effects of polysorbate 80 on the emulsion in ice cream mix: evidence from transmission electron microscopy studies. *Food Microstructure.* 6: 193-198.

Goff, H.D., Verespej, E., and Smith, A.K. (1999). A study of fat and air structures in ice cream. *International Dairy Journal.* 9: 817-829.

Gonçalves, M.P., Gomes, C., Langdon, M.J., Viebke, C., and Williams, P.A. (1997). Studies on κ-carrageenan/ locust bean gum mixtures in the presence of sodium chloride and sodium iodide. *Biopolymers.* 41: 657-671.

Goycoolea, F.M., Morris, E.R., and Gidley, M.J. (1995). Screening for synergistic interactions in dilute polysaccharide solutions. *Carbohydrate Polymers.* 28: 351-358.

Granger, C., Barey, P., Combe, N., Veschambre, P., and Cansell, M. (2003). Influence of the fat characteristics on the physicochemical behavior of oil-in-water emulsions based on milk proteins-glycerol esters mixtures. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 32: 353-363.

Granger, C., Leger, A., Barey, P., Langendorff, V., and Cansell, M. (2005). Influence of formulation on the structural networks in ice cream. *International Dairy Journal.* 15: 255-262.

O'Brien, R.D. (2004). *Fat and Oils/ Formulating and Processing for Applications.* 2nd ed. (pp 41-50). CRC Press. NY. US.

Rodd, A.B. Davis, C.R., Dunstan, D.E., Forrest, B.A., and Boger, D.V. (2000) Rheological characterisation of 'weak gel' carrageenan stabilised milks. *Food Hydrocolloids.* 14: 445-454.

Scott, L.L., Duncan, S.E., Sumner, S.S., and Waterman, K.M. (2003) Physicla properties of cream reformulated with fractionared milk fat and milk derived-components. *Journal of Dairy Science.* 86: 3395-3404.

Smith, A.K., Goff, H.D., and Kakuda, Y. (2000). Microstructure and rheological properties of whipped cream as affected by heat treatment and addition of stabilizer. *International Dairy Journal.* 10: 295-301.

Snoeren, T.H.M., Both, P., and Schmidt, D.G. (1976). An electronmicroscopic study of carrageenan and its interaction with κ-casein. *Netherlands Milk Dairy Journal.* 30: 132-141.

Snoeren, T.H.M., Payens, T.A., Jeunink, J., and Both, P. (1975). Electrostatic interaction between κ-carrageenan and κ-casein. *Milchwissenschaft.* 30: 393-396.

Steffe, J.E. (1996). *Rheological Methods in Food Processing.* 2nd ed. (pp 20-29). Freeman Press. MI. US.

Thaiudom, S., and Goff, H.D. (2003). Effect of κ-carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures. *International Dairy Journal.* 13 763-771.

Turquois, T., Rochas, C., and Taravel, F.R. (1992). Rheological studies of synergistic kappa carrageenan-carob galactomannan gels. *Carbohydrate Polymers.* 17: 263-268.

Vega, C., and Goff, H.D., (2005). Phase separation in soft-serve ice cream mixes: rheology and microstructure. *International Dairy Journal.* 15: 249-254.

Vega, C., Andrew, R.A., and Goff, H.D. (2004). Serum phase separation in soft-serve ice cream mixes. *Milchwissenchaft.* 59: 284-287.

Vega, C., Dalgleish, D.G., and Goff, H.D. (2005). Effect of κ-carrageenan addition to dairy emulsions containing sodium caseinate and locust bean gum. *Food Hydrocolloids.* 19: 187-195.

Viebke, C. (1995). A light scattering study of carrageenan/ galactomannan interactions. *Carbohydrate Polymers.* 28: 101-105.

Williams, P.A., and Langdon, M.J. (1996). The influence of locust bean gum and dextran on the gelation of κ-carrageenan. *Biopolymers.* 38: 655-664.

ประวัติผู้วิจัย

นายศุกฤตย์ ไทยอุดม เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2513 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยม ในสาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปี พ.ศ. 2535 แล้วเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยทุนพัฒนาอาจารย์ของทบวงมหาวิทยาลัยในปีเดียวกัน จนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตในปี พ.ศ. 2538 จากนั้นเข้าบรรจุเป็นพนักงานสายวิชาการสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนถึงปี พ.ศ. 2541 จึงรับทุนผู้ช่วยวิจัยของรัฐบาลแคนาดาและทุนสนับสนุนของกองทุนพัฒนาศักยภาพของอาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต ณ University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada และสำเร็จการศึกษาในปลายปี พ.ศ. 2544

นายศุกฤตย์ ไทยอุดม มีผลงานทางวิชาการและงานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่ ดังนี้

1. S. Thaiudom and H.D. Goff (2003) Effect of κ-carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures. International Dairy Journal 13:763-771.
2. Poster Presentation at ProPak Thailand 95', Queen Sirikit National Convention Center, Bankok, with the 1st prize (the best poster presentation). Entitled "Process Development of *Centella asiatica* (Linn.) Urban Drink". June, 1995.
3. Poster Presentation at Canadian Food Science and Technology (CIFST) Meeting, Toronto Entitled "The Effect of Kappa-Carrageenan on Phase Separation of Primary Stabilizers and Milk Proteins in Ice Cream Mix: Phase Behaviour and Rheological Properties". June 3-6, 2001.
4. Poster Presentation at Joint Meeting of The ADSA, AMSA, ASAS, and PSA, Indianapolis, USA Entitled " Rheological Properties of Primary Stabilizer/ Milk Protein/ κ-Carrageenan/ Sucrose Systems Simulating Ice Cream Mix". July 24-28, 2001.
5. Poster Presentation at 6th International Food Colloid Conference, Guelph, Canada Entitled "Biopolymer Demixing : Applications to Ice Cream Mix". July 15-19, 2002.
5. Poster Presentation at ADSA Meeting, Quebec, Canada Entitled "Effect of Kappa-Carrageenan on Microstructure of Milk Protein : Polysaccharide Mixed System". July 21-25, 2002.
6. Oral Presentation at 10th World Congress on Clinical Nutrition, Phuket Entitled "Effect of Pineapple Peel Extract on Enhancing Antioxidant Activity and Physical

Properties of Whey Protein Edible Films". November 30- December 3, 2004.

7. รายงานการวิจัยเรื่อง "การประเมินผลทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารสุนัขและอาหารแมวด้วยวิธีการพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis: QDA)" (ปกปิด) โดยเงินสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัท Effem Foods (Thaialnd) Co., Ltd.
8. โครงการวิจัย "การพัฒนาสูตรไอศครีมโดยการทดแทนโปรตีนและไขมันนมด้วยโปรตีนและไขมันจากพืช" ทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
9. โครงการวิจัย "การพัฒนากระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์เห็ดหอมแปรรูปในระดับชุมชน" ทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.)
10. โครงการวิจัย "ผลของแป้งดัดแปรและไขมันพืชต่อความคงตัวและการขึ้นฟองของผลิตภัณฑ์ไอศครีม" ทุนสนับสนุนจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)