

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โพรไบโอติก (Probiotic)

2.1.1 ความหมายของโพรไบโอติก

คำว่า “โพรไบโอติก” นั้นมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก มีความหมายว่าเพื่อชีวิต โดย “โพร” หมายถึง การเตรียม สำหรับ “ไบโอติก” หมายถึงชีวิต ในระยะแรก “โพรไบโอติก” หมายถึงปัจจัยหรือสารที่สามารถกระตุ้น ส่งเสริมการเจริญเติบโตจุลินทรีย์ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกผลิตโดยจุลินทรีย์อีกชนิดหนึ่ง (Lilly และ Stillwell, 1965)

ในเวลาต่อมา Fuller (1989) ได้ให้คำจำกัดความของโพรไบโอติกว่าเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่ใช้เสริมลงไปในการรับประทานอาหารแล้วสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยจุลินทรีย์ชนิดนี้สามารถเข้าไปยึดเกาะบริเวณที่ผิวของผนังทางเดินอาหาร แล้วเจริญเติบโตและเชื้อประโยชน์แก่ผู้บริโภคได้ เช่น ปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารและผลิตสารบางอย่างที่สามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคที่อยู่ในทางเดินอาหารได้

ต่อมาในปี 2001 องค์การอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกา (FAO United Nations) ร่วมกับองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ให้คำจำกัดความของโพรไบโอติกว่าเป็นจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่เพียงพอแล้วสามารถสร้างประโยชน์ต่อสุขภาพแก่สิ่งมีชีวิตที่มันอาศัยอยู่ได้

สำหรับประเทศไทยตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ปี 2554 เรื่องการใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกในอาหารภายใต้พระราชบัญญัติอาหารปี 2522 จุลินทรีย์โพรไบโอติก (Probiotic) หมายความว่า จุลินทรีย์ที่มีชีวิตซึ่งเมื่อร่างกายได้รับในปริมาณที่เพียงพอจะทำให้เกิดผลที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ ทั้งนี้ไม่รวมถึง จุลินทรีย์ที่ใช้เป็นสารชีวบำบัด (Biotherapeutic agents) จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ (Beneficial microorganisms) ที่ไม่ใช้ในอาหาร จุลินทรีย์ที่ได้จากการดัดแปลงพันธุกรรม (Genetically Modified Microorganism, GMM) และ จุลินทรีย์ แบคทีเรียหรือยีสต์ ตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงสาธารณสุขที่ประกาศไว้ก่อนหน้านี้นี้

เกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ในการคัดเลือกโพรไบโอติกคือ ไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดโรคต่อมนุษย์ รอดชีวิตในระบบทางเดินอาหารได้ สามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตที่ผนังลำไส้ได้ ผลิตสารต่อต้านจุลินทรีย์ก่อโรคได้ และเมื่อนำมาผลิตเป็นอาหารโพรไบโอติก (Probiotic food)

สามารถรอดชีวิตในกระบวนการผลิตและยังคงรอดชีวิตตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่เพียงพอที่ก่อให้เกิดผลดีต่อสุขภาพได้ (Salminen และคณะ, 1998 และ Gilliland และ Walker, 1990)

เชื้อจุลินทรีย์ที่จัดว่าเป็นเชื้อโพรไบโอติกนั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกจุลินทรีย์ในกลุ่ม Lactic acid bacteria (LAB) โดยสายพันธุ์ในกลุ่มของ LAB เช่น *Enterococcus*, *Streptococcus* และ *Lactococcus* แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือสายพันธุ์ *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* (Favaro-Trindade และคณะ, 2007) นอกจากนี้ยังมีสายพันธุ์ที่จัดเป็นจุลินทรีย์เชื้อโพรไบโอติกโดยไม่ได้อยู่ในกลุ่มของ Lactic acid bacteria เช่น *Saccharomyces*, *Bacillus cereus* และสายพันธุ์อื่นๆ ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่างๆ ที่ใช้เป็นโพรไบโอติก

Lactobacillus	Bifidobacterium	Other lactic acid bacteria	Non-lactic acid bacteria
<i>L. acidophilus</i>	<i>B. adolescentis</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>Bacillus cereus</i>
<i>L. amylovorus</i>	<i>B. animalis</i>	<i>Enterococcus faecium</i>	var. <i>toyoi</i>
<i>L. casei</i>	<i>B. bifidum</i>	<i>Lactococcus lactis</i>	<i>Saccharomyces</i>
<i>L. delbrueckii</i>	<i>B. breve</i>	<i>Leuconostoc mesenteroide</i>	<i>cerevisiae</i>
subsp. <i>bulgaricus</i>	<i>B. infantis</i>	<i>Pediococcus acidolactici</i>	<i>Saccharomyces</i>
<i>L. crispatus</i>	<i>B. lactis</i>	<i>Streptococcus thermophilus</i>	<i>bouardii</i>
<i>L. gallinarum</i>	<i>B. longum</i>	<i>Sporolactobacillus inulinus</i>	<i>Propionibacterium</i>
<i>L. johnsonii</i>			<i>freudenreichii</i>
<i>L. paracasei</i>			
<i>L. plantarum</i>			
<i>L. rhamnosus</i>			

ที่มา: Holzapfel และคณะ (2001)

2.1.2 ประโยชน์ของโพรไบโอติก

จุลินทรีย์โพรไบโอติกมีประโยชน์ต่อร่างกายซึ่งเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้แล้วส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภค ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนว่าโพรไบโอติกมีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ในด้านอื่นๆอีกดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ช่วยรักษาอาการท้องร่วง

Saavedra และคณะ (1994) ได้อธิบายว่าทารกที่ดื่มนมร่วมกับ การเติม *B. bifidum* และ *S. thermophilus* ลงไปจะช่วยกำจัด Rotavirus ซึ่งเป็นไวรัสที่ทำให้เกิดอาการท้องร่วงอย่างรุนแรง และลดอาการท้องร่วงในเด็กได้ นอกจากนี้ Gorbach และคณะ (1987) ทำการทดสอบผู้ป่วย 5 รายที่มีอาการติดเชื้อทางลำไส้ใหญ่ เมื่อผู้ป่วยรับประทานนมไขมันเนยที่มีการเพิ่มเชื้อ *Lactobacillus GG* ลงไปทุกวันพบว่าอาการการติดเชื้อทางลำไส้ใหญ่จะลดลง ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายว่า *Lactobacillus GG* จะสามารถกำจัดเชื้อ *Clostridium difficile* ซึ่งเป็นสาเหตุของอาการการติดเชื้อทางลำไส้ใหญ่ได้

ดังนั้นโพรไบโอติกจะช่วยรักษาอาการท้องร่วงได้โดยไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคท้องร่วง โดยเฉพาะ Traveller's diarrhea ซึ่งจะเกิดมากที่สุดจากแบคทีเรียผสมกับไวรัส และโรคท้องร่วงในเด็กโดยมีสาเหตุมาจาก Rotavirus

2.1.2.2 ช่วยรักษาอาการ Lactose intolerance

Lactose intolerance เป็นภาวะที่ร่างกายไม่สามารถย่อยสลายน้ำตาลแลคโตสได้เนื่องจากการขาดเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยคือ Beta-galactosidase ดังนั้นเมื่อรับประทานนมเข้าไปจะทำให้เกิดอาการเสียดท้อง ท้องร่วง ท้องเสีย หรือมีแก๊สในกระเพาะอาหารได้ แต่เชื้อโพรไบโอติกเหล่านี้จะมีเอนไซม์ในการย่อยน้ำตาลแลคโตส ดังนั้นการบริโภคนมที่ผ่านการย่อยโดยโพรไบโอติก จึงสามารถลดอาการเสียดท้อง ท้องร่วง หรือแก๊สในกระเพาะอาหารได้ และพบว่าการบริโภคนมหมักช่วยชะลอการเกิดกรดในกระเพาะอาหารได้ (Shah, 2001)

Kim และ Gilliland (1983) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผู้ป่วยที่รับประทานนมที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการหมัก ผู้ป่วยที่รับประทานนมหมักมีปริมาณไฮโดรเจนในลมหายใจน้อยกว่าผู้ป่วยที่รับประทานนมที่ไม่ผ่านการหมัก ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนในการหายใจนั้นเป็นตัวบ่งชี้ระบบเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียต่อน้ำตาลกลูโคสในลำไส้ใหญ่ โดยระดับไฮโดรเจนในลมหายใจต่ำแสดงว่าน้ำตาลแลคโตสถูกย่อยก่อนและถูกดูดซึมก่อนเข้าสู่ลำไส้ จึงทำให้ไม่เกิดอาการ Lactose intolerance (Anuradha และ Rajeshwari, 2005)

2.1.2.3 ช่วยเพิ่มหรือกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย

ในลำไส้เล็กเป็นระบบภูมิคุ้มกันที่ใหญ่ที่สุดในร่างกาย โพรไบโอติกจะมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน โดยโพรไบโอติกจะไปกระตุ้นการผลิตไซโตคีน (Cytokine) ในเลือดและเพิ่มการทำงานของ Macrophages เพื่อช่วยในการทำลายเซลล์แปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย (Chandan, 2006)

Morcos และคณะ (2004) ศึกษาการบริโภคนมที่ผ่านกระบวนการหมักโดยโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* DN-114001 ต่อการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันของนักเรียน พบว่านักเรียนที่บริโภคนมหมัก มีจำนวนเม็ดเลือดขาวชนิดลิมโฟไซต์สูงกว่านักเรียนที่ดื่มนมปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก

2.1.2.4 ลดระดับคอเลสเทอรอลในกระแสเลือด

เชื้อโพรไบโอติกสายพันธุ์ *Lactobacillus* สามารถผลิตไฮดรอกซี-เมทิลกลูตาเรต (Hydroxymethyl-glutarate) ซึ่งมีผลไปยับยั้งเอนไซม์ Hydroxymethylglutaryl-CoA reductase ทำให้ระดับคอเลสเทอรอลลดลง ประกอบกับโพรไบโอติกยังมีความสามารถในการย่อยสลายน้ำดี ทำให้ตับต้องผลิตน้ำดีเพิ่มขึ้นโดยการไปย่อยสลายคอเลสเทอรอลในเลือด จึงทำให้ระดับคอเลสเทอรอลในเลือดลดลงได้ (Chandan, 2006) นอกจากนี้ Klaver และ Meer (1993) พบว่าโพรไบโอติกชนิด *L. acidophilus* มีผลทำให้คอเลสเทอรอลไม่จับตัวกับน้ำดีจึงไม่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ เป็นผลทำให้ระดับคอเลสเทอรอลในเลือดลดลงได้เช่นกัน

2.1.2.5 ป้องกันโรคมะเร็ง

เชื้อโพรไบโอติก *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* สามารถลดการสร้างเอนไซม์บางชนิดจากแบคทีเรียชนิดอื่นเช่น *Beta* - glucuronidase, Azoreductase และ Nitroreductase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็ง (Procarcinogens) เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogens) ดังนั้นจึงยับยั้งกลไกการเกิดสารก่อมะเร็งและลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งได้ (Gorbach และคณะ, 1987) เช่น ในโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ แบคทีเรียในลำไส้ใหญ่บางชนิดจะมีส่วนในการทำให้เกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ โดยการสร้างสารก่อมะเร็งจำพวก Nitroso และ Heterocyclic aromatic amines ดังนั้นโพรไบโอติกจะไปช่วยในการกำจัดแบคทีเรียเหล่านี้ลง จึงทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ลงได้

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งของการผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกคือ ปริมาณเชื้อที่รอดชีวิตต้องเพียงพอที่จะสร้างประโยชน์กับร่างกาย Lee และ Salminen (1996) แนะนำว่าผลิตภัณฑ์ต้องมีปริมาณเชื้ออย่างน้อย 10^6 cfu/หน่วยบริโภค โดยการรอดชีวิตของโพรไบโอติกขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ที่ใช้และลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นำมาพัฒนา

จากประโยชน์ต่อสุขภาพในด้านต่างๆที่ได้จากโพรไบโอติกจึงมีการเลือกใช้โพรไบโอติกมาพัฒนาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะสายพันธุ์ *Lactobacillus* spp. ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์รับรองและใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพในมนุษย์มากที่สุดสายพันธุ์หนึ่ง นอกจากนี้องค์การอนามัยโลกยังให้การรับรองว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่มีความปลอดภัย (Generally Regarded as Safe หรือ GRAS) ในการนำมาใช้กับมนุษย์

2.1.3 *Lactobacillus casei*

Lactobacillus casei เป็นสายพันธุ์หนึ่งที่ยอมรับใช้อย่างกว้างขวางในอาหารเพื่อสุขภาพ *L. casei* จัดเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างเป็นแท่ง มีถิ่นอาศัยในปากและลำไส้ของมนุษย์ (Holzapfel และคณะ, 2001) เป็นแบคทีเรียที่สามารถมีชีวิตรอดได้ในที่ไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) ไม่มีเอนไซม์อะตาเลส ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนที่ มีความสามารถในการผลิตกรดแลคติกจากน้ำตาลแลคโตส มีการหมักน้ำตาลเฮกโซส (Hexose) แบบ Homofermentative (Holzapfel และคณะ, 2001) และถูกจัดเป็นโพรไบโอติกชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในผลิตภัณฑ์นมหมัก เช่น นมเปรี้ยวพร้อมดื่ม โยเกิร์ต และเนยแข็ง (Cai และคณะ, 2007)

นอกจากนี้ยังพบว่า *L. casei* มีความสามารถในการลดระดับคอเลสเตอรอลในกระแสเลือด กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ช่วยป้องกันโรคท้องร่วงในเด็ก (Mishra และ Prasad, 2005) และเพิ่มปริมาณกรดไขมันลิโนเลอิก (Linoleic acid) ในระหว่างการเก็บรักษาของโยเกิร์ต (Yadav และคณะ, 2006) นอกจากนี้ยังสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตได้อีกด้วย Sauvageot และคณะ (2006) พบว่า *Lactobacillus casei* มียีนที่สามารถปรับตัวเพื่อให้เชื้อสามารถรอดชีวิตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °C จึงมีแนวโน้มที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารที่ผลิตและเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำอย่างไอศกรีมได้

2.1.4 ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติก

เพื่อให้โพรไบโอติกสามารถสร้างประโยชน์ในการส่งเสริมสุขภาพของมนุษย์ได้จำเป็นต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่า 10⁶ cfu/หน่วยบริโภค (Lee และ Salminen, 1996) ดังนั้นการรอดชีวิตของโพรไบโอติกจึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างมาก โดยการรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติกมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1.4.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ในช่วงความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการรอดชีวิตของเชื้อแต่ละสายพันธุ์โพรไบโอติกแตกต่างกัน เพราะเชื้อแต่ละสายพันธุ์ทนความเป็นกรดแตกต่างกัน Ha และคณะ (2003) พบว่า *L. casei* KH-1 สามารถเจริญได้ดีที่สุดที่ความเป็นกรด - ด่าง 5.5 และหยุดการเจริญเติบโตที่ความเป็นกรด - ด่างต่ำกว่า 3.0 ในขณะที่ Kullen และ Klaenhammer (1999) พบว่า *L. acidophilus* สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ความเป็นกรด - ด่างต่ำกว่า 3.5 การที่โพรไบโอติกมีความสามารถในการเจริญเติบโตที่ความเป็นกรด - ด่างแตกต่างกันนั้นเนื่องมาจากชนิดของเอนไซม์ที่ใช้กระบวนการเมตาบอลิซึมแตกต่างกัน

2.1.4.2 ปริมาณออกซิเจน

โพรไบโอติกเป็นสายพันธุ์ที่ไม่สามารถใช้ออกซิเจน (Anaerobic organism) หรือเป็นสายพันธุ์ที่ทนต่อออกซิเจนได้เล็กน้อย (Facultative organism) ในการดำรงชีวิตได้ ปริมาณออกซิเจนเป็นพิษต่อเซลล์เนื่องจากออกซิเจนที่เข้าสู่เซลล์ของโพรไบโอติกจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คือซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นสารพิษต่อเซลล์ โดยโพรไบโอติกไม่สามารถกำจัดสารพิษเหล่านี้ออกจากเซลล์ได้ทำให้มีจำนวนลดลง (Champagne และคณะ, 2005) Vasiljevic และ Shah (2008) พบว่าโพรไบโอติกชนิด *Bifidobacterium* spp. มีความไวต่อปริมาณออกซิเจนสูงกว่า *Lactobacillus* spp. แสดงให้เห็นว่าโพรไบโอติกสายพันธุ์ *Lactobacillus* spp. เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยมากกว่าสายพันธุ์ *Bifidobacterium* spp.

2.1.4.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติก เพราะเชื้อแต่ละสปีชีส์จะเจริญได้ดีเมื่อมีอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยทั่วไปอุณหภูมิในช่วง 10 - 45 °C ไม่มีผลเสียต่อโพรไบโอติก เนื่องจากโพรไบโอติกส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม Mesophile ซึ่งเจริญได้ดีในอุณหภูมิช่วงนี้ โดยอุณหภูมิที่สูงเกิน 45 °C จะกระตุ้นกิจกรรมของโพรไบโอติกซึ่งอาจก่อให้เกิดการสะสมของสารที่เป็นพิษซึ่งทำให้จุลินทรีย์ตาย

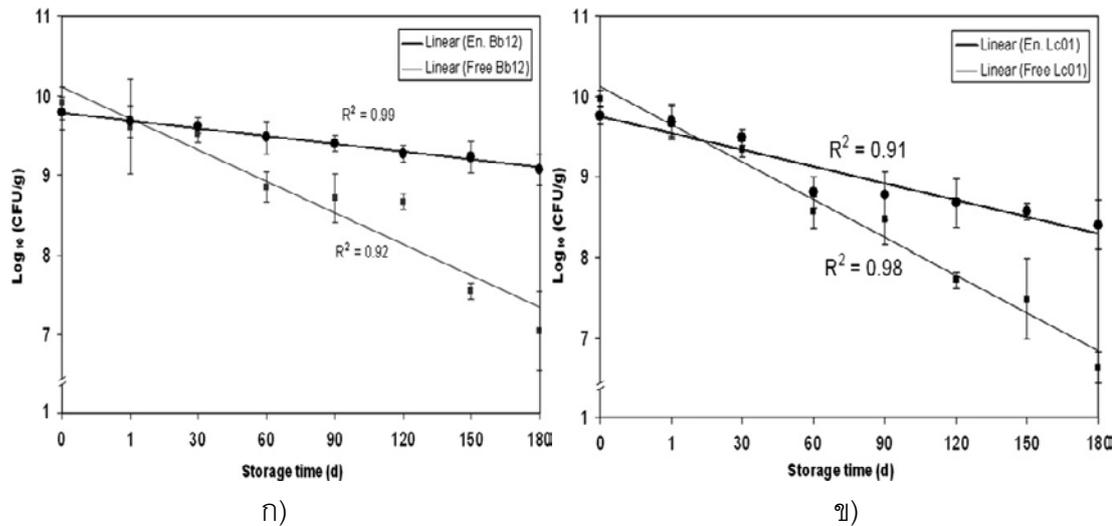
ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ น้ำที่อยู่ทั้งภายในและภายนอกเซลล์เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ทำให้ผนังเซลล์เกิดการบาดเจ็บ เยื่อหุ้มของเซลล์ฉีกขาด และหยุดกิจกรรมของเซลล์ (Gill, 2006) แต่จุลินทรีย์จะมีกลไกภายในร่างกาย ซึ่งจะสามารถดึงน้ำออกจากตัวมันเองได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ลดจำนวนผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้ (Magariños และคณะ, 2007) และยังมีการศึกษากลไกในการรอดชีวิตของโพรไบโอติกในสภาวะแช่แข็งอื่นอีก เช่น Sauvageot และคณะ (2006) ศึกษากลไกในการรอดชีวิตของ *L. casei* ใน

สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำพบว่า *L. casei* มียีน *csp - A* (Cold Shock Protein-A) ที่สามารถสร้างโปรตีนในภายเซลล์ทำให้ความเข้มข้นภายในเซลล์เพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งของน้ำจึงลดต่ำลง น้ำภายในเซลล์จึงเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้น้อย ปริมาณน้ำแข็งที่ทำให้เซลล์บาดเจ็บจึงลดลง ทำให้การรอดชีวิตของ *L. casei* สูงขึ้น นอกจากนี้ *L. casei* โปรตีนที่ถูกสร้างขึ้นมายังส่งเสริมการเกิดปฏิกริยาเคมีภายในเซลล์ ทำให้เกิดพลังงานเพื่อใช้ในการรอดชีวิตอยู่ได้ (Beaufils และคณะ, 2007)

Homayoni และคณะ (2008a) นำ *L. casei* ไปใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแล้วศึกษาการรอดชีวิตเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ *L. acidophilus*, *B. bifidum*, *B. longum* พบว่าการรอดชีวิตของ *L. casei* สูงกว่าสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเก็บรักษาไอศกรีมเป็นเวลา 3 เดือนที่อุณหภูมิการเก็บรักษา -20°C โดยมีปริมาณการรอดชีวิตมากกว่า 10^7 cfu/ml

นอกจากนี้การรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติกอาจเพิ่มขึ้นได้เมื่อผ่านการห่อหุ้มเซลล์ (Encapsulation) จากงานวิจัย Homayouni และคณะ (2008b) ศึกษาผลของการห่อหุ้มเซลล์ (Encapsulation) ด้วยแคลเซียมอัลจิเนต ต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติก 2 สายพันธุ์ คือ *L. casei* Lc-01 และ *B. lactis* Bb-12 ในไอศกรีม เป็นเวลา 180 วัน ที่อุณหภูมิ -20°C พบว่าการห่อหุ้มเซลล์ด้วยแคลเซียมอัลจิเนตสามารถเพิ่มการรอดชีวิตของเชื้อทั้ง 2 สายพันธุ์ ดังรูปที่ 2.1 แม้ว่า *L. casei* Lc-01 ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการห่อหุ้มมีจำนวนลดลงในระหว่างการเก็บรักษา แต่ยังมีปริมาณมากกว่า 10^7 cfu/ml และมีจำนวนที่รอดชีวิตสูงกว่า *B. lactis* Bb-12 แสดงให้เห็นว่าโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* Lc-01 มีความสามารถในการทนอุณหภูมิต่ำในระหว่างการเก็บ และมีการรอดชีวิตที่สูงในไอศกรีม

Sagdic และคณะ (2012) พบว่า *L. casei* Shirota สามารถปรับตัวเพื่ออาศัยอยู่ในไอศกรีมที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระอย่างกรดเกอลิก (Gallic acid) สารสกัดจากเมล็ดองุ่น (Grape seed extract) สารสกัดจากเปลือกทับทิม (Pomegranate peel extract) และน้ำมันหอมระเหยจากเปปเปอร์มินท์ (Peppermint essential oil) โดยพบว่าสารต้านอนุมูลอิสระไม่มีผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* และมีปริมาณการรอดชีวิตมากกว่า 10^7 cfu/ml เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 60 วัน



รูปที่ 2.1 การรอดชีวิตของโพรไบโอติก ก) คือ *L. casei* Lc-01 และ ข) คือ *B. lactis* Bb-12 โดยเส้นสีดำเข้มคือมีการห่อหุ้มโพรไบโอติกด้วยแคลเซียมอัลจิเนต เส้นสีดำอ่อนคือไม่มีการห่อหุ้มเซลล์

ที่มา: Hodayouni และคณะ (2008b)

2.1.5 ผลกระทบของโพรไบโอติกต่อการยอมรับของผลิตภัณฑ์

โพรไบโอติกที่ยังรอดชีวิตในอาหารมีผลในเรื่องกลิ่นรส (Flavor) ของอาหาร ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันที่มีการเติมโพรไบโอติกและไม่เติมโพรไบโอติก (Alamprese และคณะ, 2005) เนื่องจากโพรไบโอติกต้องใช้สารอาหารที่มีอยู่ในอาหาร ได้แก่ แป้งหรือน้ำตาล โปรตีนและเกลือแร่ ในการดำรงชีวิต ทำให้เกิดกลิ่นรสที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์เดิม เช่น มีกลิ่นรสเปรี้ยวรุนแรงขึ้น Tamime (2005) ยังพบว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก อาจเกิดกลิ่นรสพิเศษซึ่งขึ้นกับชนิดของโพรไบโอติก ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ได้

จากงานวิจัยของ Cadena และ Bolini (2012) ที่ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของไอศกรีมรสวานิลลาพบว่า ไอศกรีมมีลักษณะเด่นในด้าน รสหวาน รสขม และกลิ่นรสครีม แต่ในขณะที่งานวิจัยของ Soukoulis และ Tzia (2010) ที่ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับไอศกรีมโพรไบโอติกรสวานิลลา พบว่าไอศกรีมดังกล่าวมีลักษณะทางประสาทสัมผัสในด้าน Bitter, Astringent, Sour, Hard, Brittle, Watery, Greasy, Wheyoff, Foamy และ Bulky ดังนั้นการเติมเชื้อโพรไบโอติกลงในไอศกรีมส่งผลให้เกิดลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านอื่นเพิ่มขึ้นมากกว่าไอศกรีมวานิลลาทั่วไป

Turgut และ Cakmakci (2009) พบว่าไอศกรีมที่เติมเชื้อ *L. acidophilus* จะมีคะแนนความเข้มข้นในด้านสีต่ำกว่าไอศกรีมที่เติมเชื้อ *B. bifidum* แต่จะมีคะแนนความเข้มข้นในด้านความหวานสูงกว่า และการใช้เชื้อทั้งสองชนิดผสมกันแล้วเติมลงในไอศกรีมจะทำให้มีคะแนนความเข้มข้นในด้านเนื้อสัมผัสต่ำกว่าการใช้เชื้อชนิดเดียว

ส่วนงานวิจัยของ Akin และคณะ (2007) พบว่าในไอศกรีมที่มีการรอดชีวิตของเชื้อ *L. delbrueckii* spp. *bulgaricus* สูง แต่มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *S. thermophilus*, *L. acidophilus* และ *B. lactis* ต่ำ ส่งผลให้คะแนนความเข้มข้นด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และกลิ่นรส ของไอศกรีมมีคะแนนลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมที่มีการรอดชีวิตของเชื้อ *S. thermophilus*, *L. acidophilus* และ *B. lactis* ในปริมาณที่สูงและมีการรอดชีวิตของเชื้อ *L. delbrueckii* spp. *bulgaricus* ในปริมาณต่ำ

2.2 ไอศกรีม (Ice cream)

2.2.1 ความหมายและชนิดของไอศกรีม

ไอศกรีมเป็นผลิตภัณฑ์นมแปรรูปแช่แข็งที่มีส่วนผสมของฟองอากาศ ผลึกน้ำแข็ง น้ำ ไขมันนม ของแข็งอื่นที่ไม่ใช่ไขมันในนม (Nonfat milk solids หรือ NMS) สารให้ความหวาน สารให้ความคงตัว (Stabilizer) อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) และสารให้กลิ่นรส (Flavor) (Marshall และคณะ, 2003) ไอศกรีมจึงมีลักษณะเป็นโฟมแช่แข็งและอิมัลชันซึ่งยึดกันอยู่ด้วยไขมันและผลึกน้ำแข็งที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายที่มีความหนืดสูง (Dickinson, 1992) ลักษณะของไอศกรีมที่ดีนอกจากรสชาติที่ดี สีอันสวยงามน่ารับประทานแล้วจะต้องมีเนื้อสัมผัสที่เนียน มีฟองอากาศและผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ. 2544 แบ่งชนิดไอศกรีมออกเป็น 5 ชนิดคือ

- (1) ไอศกรีมนม ได้แก่ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้นมหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม
- (2) ไอศกรีมดัดแปลง ได้แก่ ไอศกรีมตาม (1) ที่ทำขึ้นโดยใช้ไขมันชนิดอื่นแทนมันเนย ทั้งหมดหรือบางส่วน หรือไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันแต่ผลิตภัณฑ์นั้นมิใช่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม
- (3) ไอศกรีมผสม ได้แก่ ไอศกรีมตาม (1) หรือ (2) แล้วแต่กรณี ซึ่งมีผลไม้หรือวัตถุดิบที่เป็นอาหารเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย
- (4) ไอศกรีมตาม (1) (2) หรือ (3) ชนิดเหลว หรือแข็ง หรือผง

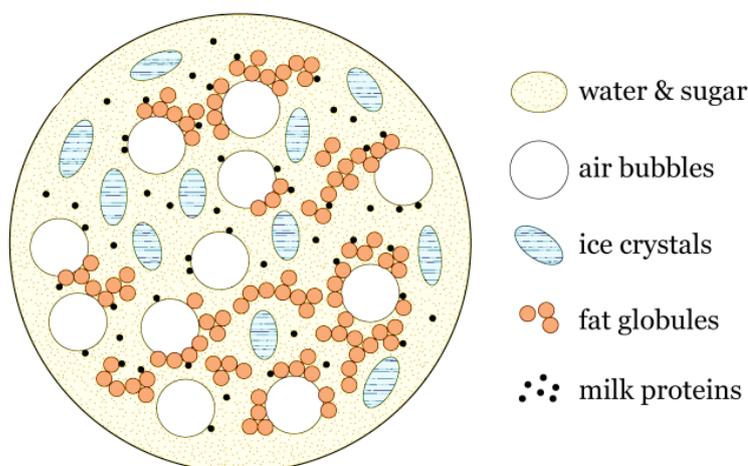
(5) ไอศกรีมหวานเย็น ได้แก่ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้ น้ำและน้ำตาล หรืออาจมีวัตถุดิบที่เป็นอาหารเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย ไอศกรีมดังกล่าวอาจใส่วัตถุดิบกลิ่น รส และสีด้วยก็ได้

2.2.3 โครงสร้างของไอศกรีม

โครงสร้างของไอศกรีมเป็นระบบเคมีกายภาพ (Physicochemical system) ที่ซับซ้อน คือไอศกรีมมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (Emulsion) แบบไขมันกระจายตัวอยู่ในน้ำ (Oil in water emulsion) โครงสร้างภายในของไอศกรีมทั่วไปประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ของแข็ง ของเหลว และอากาศ โดยที่อากาศกระจายตัวอยู่ในส่วนของของเหลวล้อมรอบผลึกน้ำแข็ง (Marshall และคณะ, 2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย ผลึกน้ำแข็ง ฟองอากาศ และเม็ดไขมันที่มีขนาดตั้งแต่ $1 \mu\text{m}$ ถึง 0.1 mm และสารละลายที่มีความหนืดสูงของสารให้ความหวาน โพลีแซ็กคาไรด์ และโปรตีนนม (Clarke, 2004) โดยโครงสร้างระหว่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมมีความแตกต่างกันเล็กน้อย

สำหรับโครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมประกอบด้วยอนุภาคเม็ดไขมันที่เป็นผลึกบางส่วน (Partially crystalline fat globules) เคซีนไมเซลล์ที่กระจายตัวอยู่ในส่วนของของเหลวหรือสารละลายของน้ำตาล โปรตีนเวย์ (Whey protein) และสารให้ความคงตัว (Stabilizer) และบนผิวของเม็ดไขมันจะมีบางส่วนของเคซีนไมเซลล์ โปรตีนเวย์ และอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ถูกดูดซับอยู่ เซลล์อากาศที่มีขนาดเล็กจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นของผลึกไขมัน ไอศกรีมโดยทั่วไปจะมีอากาศร้อยละ 50-80 ของปริมาตรไอศกรีมทั้งหมด ส่วนปริมาตรน้ำที่กลายเป็นผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมจะแตกต่างรูปกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยเฉลี่ยผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดประมาณ $40-50 \mu\text{m}$ ขนาดผลึกน้ำแข็งมีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมด้วย กล่าวคือ ไอศกรีมที่ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่า $50 \mu\text{m}$ จะทำให้ได้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน แต่ถ้าขนาดใหญ่กว่า $50 \mu\text{m}$ จะได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสหยาบ ไม่น่ารับประทาน

ไอศกรีมมีส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญคือ วัตถุดิบที่ใช้ในปริมาณมาก เช่น โปรตีนนม (Milk protein) ร้อยละ 8 - 15 น้ำตาล (Sweetener) ร้อยละ 13-20 ไขมัน (Fat) ร้อยละ 8 - 20 และน้ำ วัตถุดิบที่ใช้ในปริมาณน้อย เช่น สารให้ความคงตัว (Stabilizer) ร้อยละ 0.01 - 0.30 เปอร์เซนต์ อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ร้อยละ 0.10 - 0.30 สี (Color) สารให้กลิ่นรส (Flavor) โดยร้อยละของแข็งทั้งหมด (Total solid) เท่ากับ 36 - 43 (Arbuckle, 1986) และองค์ประกอบอื่นที่ใช้เพิ่มลงไปเนื้อไอศกรีม เช่น เวเฟอร์ ช็อกโกแลต ชิ้นผลไม้ และถั่วต่างๆ แต่ละส่วนประกอบในไอศกรีมนั้นมีบทบาทสำคัญต่อเนื้อสัมผัส กลิ่นรส และความคงตัวของไอศกรีม ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไอศกรีม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Marshall และคณะ (2003)

2.2.2 บทบาทของส่วนประกอบแต่ละชนิดในไอศกรีม

ส่วนประกอบของไอศกรีมแต่ละชนิดล้วนมีหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ไขมัน

ไขมันเป็นส่วนผสมที่สำคัญสำหรับไอศกรีมเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของไอศกรีม ไขมันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อโครงสร้างและเนื้อสัมผัสในไอศกรีม ไขมันทำให้ไอศกรีมมีรสชาติและความมัน (Richness) ที่ดี เนื่องจากไขมันสามารถกักเก็บอากาศและปลดปล่อยกลิ่นรส (Goff, 2003) นอกจากนี้ปริมาณไขมันยังเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในไอศกรีม โดยปริมาณไขมันที่มากขึ้นทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง ไอศกรีมจึงมีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน แต่เนื่องจากไขมันไม่ละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ไขมันจึงไปขัดขวางการเติมอากาศลงในไอศกรีมทำให้อัตราการขึ้นฟูของไอศกรีมลดลง การเติมไขมันในปริมาณที่มาก ทำให้ไอศกรีมที่ได้ให้พลังงานสูง และต้นทุนสูงและอาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ในประเทศสหรัฐอเมริกาไอศกรีมโดยทั่วไปมีไขมันประมาณร้อยละ 10 - 12 ถ้ามีปริมาณไขมันต่ำกว่าร้อยละ 10 กฎหมายกำหนดว่าต้องมีการระบุบนฉลากว่าเป็นผลิตภัณฑ์พร่องไขมัน ไขมันต่ำ หรือปราศจากไขมัน แหล่งของไขมันที่มีคุณภาพดีที่สุดในการผลิตไอศกรีมคือ ครีมนม หรืออาจใช้ไขมันจากแหล่งอื่นได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ครีมแช่แข็ง เนย ไขมันเนย (Marshall และ Arbuckle, 1996) ไอศกรีมบางชนิดยังใช้ไขมันจากน้ำมันพืช เช่น น้ำมันเมล็ดฝ้าย หรือน้ำมันปาล์ม ได้อีกด้วย

การเกิดโครงสร้างของไขมันในไอศกรีม เกิดจากปัจจัยที่สำคัญคือ จำนวน Crystalline fat ภายในเม็ดไขมันมีความจำเป็นต่อการเกิด Destabilized fat และ Partial coalescence ถ้าจำนวนผลึกที่เกิดขึ้นมีน้อย ความสามารถในการเก็บเซลล์อากาศจะลดลง โดยจำนวนผลึกไขมันที่เกิดขึ้นเกิดในขั้นตอนการบ่มไอศกรีม (Aging) ซึ่งถ้าบ่มไอศกรีมเป็นเวลานานขึ้นสามารถเพิ่มจำนวน Crystalline fat ภายในเม็ดไขมันได้ หลังจากบ่มไอศกรีมและนำไปผ่านกระบวนการตีอากาศและลดอุณหภูมิ (Freezing) จะทำให้เกิดการรวมกลุ่มของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นเรียกว่า Partial coalescence แล้วส่งผลทำให้เกิด Destabilized fat บางส่วนในระบบอิมัลชันของไอศกรีม ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของไอศกรีมที่ดี (Marshall และคณะ, 2003) โครงข่ายของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการละลายของไอศกรีม ทำให้โครงสร้างของไอศกรีมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกน้ำแข็งที่ละลายไม่สามารถเชื่อมติดกันได้อีก ดังนั้นโครงข่ายของเม็ดไขมันจึงมีความสำคัญต่อการคงรูปร่าง (Shape retention) ของโครงสร้างไอศกรีมหลังจากผลึกน้ำแข็งละลาย

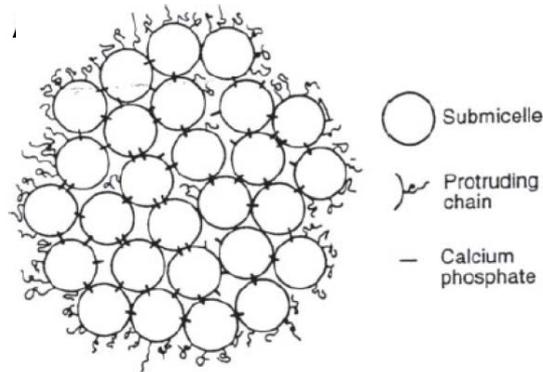
2.2.2.2 ของแข็งไม่รวมไขมันนม (Milk solid non-fat)

เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนของนมที่เอาน้ำ และไขมันออก ส่วนมากใช้ในรูปของนมผงขาดมันเนย (Skim milk powder) ของแข็งไม่รวมไขมันนมเป็นตัวให้กลิ่นรส รูปร่าง และปรับปรุงคุณสมบัติด้านการละลาย ทำให้อัตราการขึ้นฟูสูงโดยไม่ทำให้เกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง และปรับปรุงด้านเนื้อสัมผัส ส่วนประกอบของของแข็งไม่รวมไขมันนมที่สำคัญได้แก่ โปรตีนนม น้ำตาลแลคโตส เกลือแร่ วิตามินและเถ้าในนม โปรตีนนมมีความสำคัญต่อการช่วยให้เกิดโครงสร้างที่หุ้มอากาศได้ ทำให้ฟองอากาศคงตัว และทำให้ไขมันกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอโดยโปรตีนนมเป็นเสมือนเยื่อหุ้มที่ห่อหุ้มเม็ดไขมันเอาไว้ นอกจากนี้โปรตีนนมยังสามารถจับกับน้ำทำให้เพิ่มความหนืดแก่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โปรตีนในนมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เคซีน (Casein) และเวย์ (Whey) (Marshall และคณะ, 2003)

โปรตีนของนมซึ่งอยู่ในรูปของเคซีนไมเซลล์มีอยู่ประมาณร้อยละ 80 ประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟต และน้ำปริมาณมาก ซึ่งสามารถคงรูปอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน มีคุณสมบัติทนความร้อน (รูปที่ 2.3) หลังการโฮโมจีไนซ์ส่วนผสมเคซีนจะไปยึดเกาะบนผิวเม็ดไขมัน (รูปที่ 2.4)

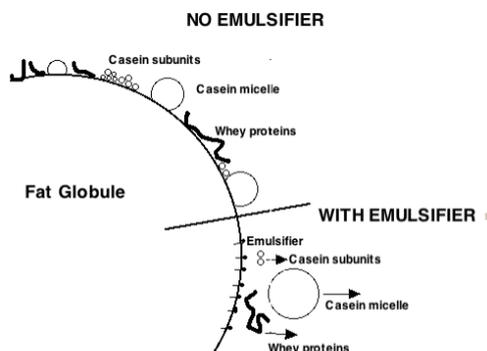
สำหรับโปรตีนเวย์ (Whey protein) มีประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้และถูกทำลายได้ด้วยความร้อนซึ่งทำให้เกิดลักษณะที่สามารถหุ้มอากาศหรือเม็ดไขมันได้ดี ในไอศกรีมที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำในนม ทำให้น้ำของเคซีนไมเซลล์ที่ใหญ่ขึ้น อุณหภูมิต่ำทำให้แคลเซียมฟอสเฟตและเคซีนไมเซลล์ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการทำหน้าที่

เป็นอิมัลชันไฟเออร์ของเคซีนไมเซลล์ในไอศกรีมจึงไม่ดีเท่ากับโปรตีนชนิดอื่นในนม (Marshall และ Arbuckle, 1996)



รูปที่ 2.3 แบบจำลองเคซีนไมเซลล์

ที่มา : Walstra และ Jonkman (1998)



รูปที่ 2.4 พื้นผิวของเม็ดไขมันที่ยึดเกาะด้วยโปรตีนหลังจากผ่านการโฮโมจีไนส์ทั้งที่มีอิมัลชันไฟเออร์และไม่มีอิมัลชันไฟเออร์

ที่มา : Marshall และ Arbuckle (1996)

พื้นผิวบนเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นหลังการโฮโมจีไนส์โปรตีนจะขัดขวางการเกิด Partial coalescence ในช่วง Freezing ของไอศกรีมซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างไอศกรีม อย่างไรก็ตามการเติมอิมัลชันไฟเออร์ในไอศกรีมเป็นผลให้อิมัลชันไฟเออร์ไปยึดบนพื้นผิวเม็ดไขมัน (รูปที่ 2.4) ซึ่งสามารถลดแรงตึงผิว (Interfacial tension) ระหว่างไขมันและน้ำได้มากกว่าโปรตีน

ทำให้เกิดลักษณะอิมัลชันที่ดีมีพลังงานต่ำส่งผลให้เกิด Destabilized fat ได้มากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของโปรตีนโดยเฉพาะเคซีนไมเซลล์มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของอิมัลซิไฟเออร์ เมื่อยืดเกาะบนผิวของเม็ดไขมันทำให้เม็ดไขมันมีขนาดใหญ่และเกิดกระบวนการ Partial coalescence ได้น้อยลง (Walstra และ Jonkman, 1998) ในช่วง Freezing ของไอศกรีมที่ไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ ระบบอิมัลชันของไอศกรีมเมื่อถูกตีอากาศ (Whipping) ที่อุณหภูมิต่ำ เซลล์อากาศจะไม่คงตัว เนื่องจากมีปริมาณของ Destabilized fat น้อย ไขมันเหลวในเม็ดไขมันไหลออกมารวมกันเกิดเป็นฟิล์มเคลือบฟองอากาศไม่ดี ส่งผลให้เกิด Partial coalescence ได้น้อยลง (Marshall และ Arbuckle, 1996)

นอกจากนี้ของแข็งไม่รวมไขมันนมน้อยกว่าน้ำตาลแลคโตส ทำให้ไอศกรีมมีรสชาติ เพิ่มรสหวาน กลิ่นแร่ทำให้เกิดรสเค็ม ลดจุดเยือกแข็งให้ต่ำลง การขึ้นฟูดีขึ้น ทำให้ไอศกรีมละลายช้า เนื้อสัมผัสหยาบ แต่การเติมของแข็งไม่รวมไขมันมากเกินไปทำให้ไอศกรีมมีรสเค็ม มีกลิ่นนมผง และเพิ่มผลึกแลคโตสในระหว่างการเก็บ ซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสหยาบคล้ายทรายไม่เรียบเนียน (Marshall และ Arbuckle, 1996)

2.2.2.3 สารให้ความหวาน (Sweeteners)

สารให้ความหวานที่นำมาใช้ในไอศกรีมมีหลายชนิด เช่น ซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส น้ำผึ้ง และไซรัป สารให้ความหวานมีหน้าที่หลายประการในไอศกรีม เพิ่มความหวานให้ไอศกรีมเสริมกลิ่นรส และเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) ในไอศกรีม มีผลทำให้จุดเยือกแข็งลดลง ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้น้อยลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะมีความนุ่มนวล และง่ายต่อการรับประทานที่อุณหภูมิเย็นจัด มีรูปร่างและลักษณะเนื้อที่ดี แต่การใช้สารให้ความหวานมีข้อจำกัดคือหากใช้มากเกินไปไอศกรีมจะมีรสหวานจัดเกินไป ลดอัตราการขึ้นฟู นอกจากนี้ทำให้ใช้เวลาในการปั่นไอศกรีมนาน และต้องใช้อุณหภูมิต่ำมากในขั้นตอน Hardening เนื่องจากสารให้ความหวานลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมให้ต่ำลงมาก ดังนั้นปริมาณและชนิดของน้ำตาลในไอศกรีมจึงมีผลต่อจุดเยือกแข็งของไอศกรีม

Marshall และ Arbuckle (1996) อธิบายถึงหน้าที่ของน้ำตาลหรือสารให้ความหวานว่า น้ำตาลมีหน้าที่หลัก 2 ประการในไอศกรีมคือ ให้รสชาติหวานและควบคุมจำนวนของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งของไอศกรีมโดยผ่านกลไกการลดจุดเยือกแข็งของไอศกรีม ไอศกรีมที่มีจุดเยือกแข็งต่ำจะมีปริมาณผลึกน้ำแข็งน้อยกว่าไอศกรีมที่มีจุดเยือกแข็งสูง ดังนั้นไอศกรีมที่มีจุดเยือกแข็งต่ำจึงแข็งน้อยกว่าไอศกรีมที่มีจุดเยือกแข็งสูง ยกตัวอย่างเช่น ไอศกรีมสูตรมาตรฐานที่อุณหภูมิ -18°C จะประกอบด้วยผลึกน้ำแข็งประมาณร้อยละ 55 แต่ถ้าเปลี่ยนชนิดและปริมาณการใช้น้ำตาล แล้วให้มีผลึกน้ำแข็งเหลือเพียงร้อยละ 45 จะได้ไอศกรีมที่มี

เนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่า ซึ่งง่ายต่อการตัดรับประทานมากขึ้น เนื่องจากชนิดและปริมาณน้ำตาลมีผลต่อความข้นหนืดของส่วนผสมไอศกรีม โดยน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะส่งผลให้ความหนืดของส่วนผสมสูงขึ้น จุดเยือกแข็งจึงลดต่ำลง (Clarke, 2004)

2.2.2.4 อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)

อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ที่ใช้ในไอศกรีมส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม เป็นกลีเซอรอลเอสเทอร์เช่น โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) หรือโมโนเอซิลกลีเซอรอล (Monoacylglycerol) กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (Glycerol Monostearate) และไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) ซึ่งอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือรวมกันทั้งสองชนิดในสัดส่วนต่างๆ (Di-mono glyceride) ปริมาณการใช้ไม่เกินร้อยละ 0.2 ต่อน้ำหนัก อิมัลซิไฟเออร์มีหน้าที่สำคัญในไอศกรีมหลายประการ เช่น ช่วยรักษาสภาพอิมัลชัน โดยการทำให้ไขมันเกิดการกระจายในส่วนของน้ำ และช่วยลดการแยกตัวของไขมันจากส่วนของน้ำในระหว่างกระบวนการแช่แข็งไอศกรีม (Freezing) เพิ่มความสามารถในการขึ้นฟู (Whipping ability) โดยเพิ่มความสามารถของส่วนผสมไอศกรีมในการจับอากาศได้ดียิ่งขึ้น ช่วยชะลอการเคลื่อนตัวของฟองอากาศในระหว่างเก็บรักษาดังนั้นจึงลดการยุบตัวของไอศกรีม นอกจากนี้ยังปรับปรุงคุณลักษณะการละลาย ทำให้ไอศกรีมละลายช้าลง แต่ข้อเสียของการใช้อิมัลซิไฟเออร์ปริมาณที่สูงมีผลทำให้ไอศกรีมมีคุณลักษณะการละลายที่ไม่ดี หรือมีกลิ่นรสผิดปกติ

2.2.2.5 น้ำ

น้ำเป็นองค์ประกอบมากที่สุดในไอศกรีม ไอศกรีมส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำอย่างน้อยร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก โดยที่อยู่ในสภาพผลึกน้ำแข็งเกือบทั้งหมด อุณหภูมิที่รับประทาน น้ำในรูปของผลึกน้ำแข็งเป็นกุญแจสำคัญ ในการทำให้ไอศกรีมสร้างความสะดวกขึ้น ซึ่งแตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคชนิดไม่แช่แข็งชนิดอื่น ความสมดุลระหว่างผลึกน้ำแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวและขนาดของผลึกน้ำแข็ง มีบทบาทที่สำคัญต่อการรับประทานไอศกรีม แต่น้ำจะมาจากส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ นํ้านม น้ำเชื่อม เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมทั้งหลายเหล่านี้จะกระจายหรือแขวนลอยอยู่ในส่วนของน้ำของไอศกรีม (Clarke, 2004)

2.2.2.6 อากาศ

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไอศกรีมซึ่งจะมีผลทั้งต่อลักษณะทางกายภาพและความคงตัวของ การเก็บรักษาซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็ง (Hardness) ของไอศกรีม โดยถ้าไอศกรีมไม่มีฟองอากาศจะได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสที่แข็ง การเพิ่มค่าการขึ้นฟู (Overrun) ให้สูงขึ้นจะทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รันต่ำกว่า (Clarke, 2004) การขึ้นฟู แสดงออกเป็นร้อยละของปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสม การที่ปริมาตร

เพิ่มขึ้นเนื่องจากขณะปั่นไอศกรีมมีการผสมอากาศเข้าไปในเนื้อไอศกรีม หากอากาศมากเกินไป ไอศกรีมจะเบา โปร่ง ไม่นำรับประทาน แต่ถ้ามีอากาศน้อยเกินไปเนื้อจะแน่นหรือหนัก การผสมอากาศจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดค่าการขึ้นฟู ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดใน กฎหมายที่กำหนดและต้นทุนในการผลิต และการยอมรับของผู้บริโภคด้วย การมีผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กและ Serum phase ที่เหนียวจะช่วยให้เซลล์อากาศมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น ในการผลิตไอศกรีมที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีการควบคุมการตีอากาศทำให้ได้ระดับของค่าการขึ้นฟูที่เหมาะสม เพราะขั้นตอนที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของไอศกรีม (Sofjan และ Hartel, 2004) นอกจากนี้ฟองอากาศมีผลต่อสีและลักษณะปรากฏของไอศกรีม เนื่องจากฟองอากาศจะสะท้อนแสงได้ ดังนั้นไอศกรีมที่มีฟองอากาศมากจะมีสีสว่างกว่าไอศกรีมที่มีฟองอากาศน้อย (Clarke, 2004)

2.2.2.7 สีและกลิ่นรส (Color and Flavor)

สีจะมีผลต่อผู้บริโภคในด้านของคุณภาพ โดยการเติมสีในผลิตภัณฑ์เพื่อให้สีของผลิตภัณฑ์มีความดึงดูดใจ และบ่งบอกถึงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ได้ สำหรับกลิ่นที่ใช้ในไอศกรีมปกติจะอยู่ในรูปสารละลายของกลิ่น ซึ่งโมเลกุลของสารให้กลิ่นบางชนิดละลายในไขมัน และบางชนิดก็ละลายในน้ำ โดยสารให้กลิ่นที่ละลายในน้ำได้จะพบในส่วนของ matrix และจะปลดปล่อยกลิ่นอย่างรวดเร็วเมื่อรับประทาน ส่วนกลิ่นที่ละลายในไขมันจะปลดปล่อยกลิ่นได้น้อยกว่าแต่นานกว่ากลิ่นที่ละลายในน้ำ กลิ่นที่ใช้ในไอศกรีมอาจมาจากธรรมชาติ เช่น สกัดจากพืช หรืออาจใช้กลิ่นที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยกลิ่นที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ได้แก่ กลิ่นวนิลา ช็อคโกแลต และสตรอเบอร์รี่

2.2.2.8 สารให้ความคงตัว (Stabilizer)

สารให้ความคงตัว แม้ว่าจะใช้ในปริมาณน้อยก็ตามแต่ส่งผลอย่างมากต่อลักษณะผลิตภัณฑ์สุดท้าย สารให้ความคงตัวเป็นสารประเภท Hydrocolloid ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ส่วนใหญ่เป็นพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) (Marshall และคณะ, 2003) สารให้ความคงตัวมีผลต่อสมบัติวิทยากระแสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยเฉพาะในด้านความเหนียวของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัส เช่น ช่วยให้โฟมเสถียร เพิ่มเสถียรภาพของโปรตีนไม่ให้เกิดการแยกชั้น ชะลอการเกิดผลึกน้ำแข็งและผลึกน้ำตาลแลคโตสของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้เนื้อสัมผัสเรียบเนียน มีผลต่อการรับรู้กลิ่นรส รสชาติ ความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของไอศกรีมมากขึ้น (Goff และ Sahagian, 1996; Marshall และคณะ, 2003; Goff และ Hartel, 2004)

2.3 หน้าทีของสารให้ความคงตัว (Stabilizer) ในไอศกรีม

2.3.1 ความหมายของสารให้ความคงตัว

สารให้ความคงตัวเป็นส่วนประกอบหนึ่งในไอศกรีมที่มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย แม้ว่าจะใช้ในปริมาณน้อยก็ตาม ในปี 1915 คำว่าสารให้ความคงตัว (Stabilizer) ถูกนิยามให้กับสารกลุ่มหนึ่งในช่วงเวลานั้นซึ่งรู้จักกันในฐานะสารคงสภาพ (Holder) คอลลอยด์ (Colloid) สารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) สารยึดเกาะ (Binder) สารเติมเต็ม (Fillers) (Marshall และคณะ, 2003) สารปรับปรุงคุณภาพ (Improver) และกัม (Gum) (Sommer, 1932) ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ ส่วนมากเป็นสารกลุ่มพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเกิดอันตรกิริยากับน้ำภายในระบบ หรือบางชนิดก็เกิดอันตรกิริยากับโปรตีนหรือไขมันในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Kilara และ Chandan, 2008) โดยปกติสารให้ความคงตัวมีโมโนเมอร์ประมาณ 10^3 หน่วย และมีมวลโมเลกุลประมาณ $10^5 - 10^6$ (Clarke, 2004)

สารให้ความคงตัวที่ดีต้องไม่เป็นพิษ ละลายน้ำได้ดี ไม่ทำให้ความหนืดมากเกินไป ไม่ขัดขวางการเกิดโฟม ไม่ติดตัวกรองขณะผลิต ทำให้ไอศกรีมละลายช้า และไม่สร้างกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ (Kilara และ Chandan, 2008) โดยปกติความเข้มข้นและชนิดของสารให้ความคงตัวที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของส่วนผสมอื่นที่ใช้ร่วมด้วย (โปรตีน ไขมัน สารให้ความหวาน อิมัลซิไฟเออร์) กระบวนการผลิต เวลาในการผลิต อุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อสถานะที่ใช้ในการเก็บรักษา และอื่นๆ ปริมาณที่นิยมใช้คือร้อยละ 0.1-0.5 โดยมวล แต่ถ้าไอศกรีมมีปริมาณของแข็งหรือไขมันในสูตรสูง หรือมีการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสูงยิ่งยวด (Ultra-high-temperature) ความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวที่ใช้อาจจะลดลง (Marshall และคณะ, 2003)

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงหน้าที่ของสารให้ความคงตัวในไอศกรีมเช่น Hartel (1996, 1998) ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกน้ำแข็งในระหว่างการผลิตไอศกรีม และศึกษาถึงกลไกและจลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีม (Recrystallization) Sybre และคณะ (1998) และ Doublier และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนนมและสารไฮโดรคอลลอยด์ในระบบจำลองที่ประกอบด้วยโปรตีนนม น้ำ น้ำตาล และสารไฮโดรคอลลอยด์ Adapa และคณะ (2000) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการเกิดผลึกน้ำแข็ง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็ง โดยเฉพาะที่เป็นผลมาจากสารให้ความคงตัว Goff (2002) ได้อธิบายถึงผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะการเกิดโครงสร้างและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

Dickinson (2003) ศึกษาความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และความสามารถในการกระจายตัวของไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด ที่อยู่ระหว่างรอยต่อของโปรตีนกับน้ำหรือไขมัน Goff (2006) ได้อธิบายถึงอิทธิพลของสารให้ความคงตัวต่อกระบวนการผลิต การเกิดโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงเคมีกายภาพของอาหารแช่แข็ง

ความหลากหลายของสารให้ความคงตัวซึ่งแสดงคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน และปริมาณการใช้ที่ไม่เท่ากัน ส่งผลถึงลักษณะสำคัญหลายประการต่อสมบัติด้านกายภาพของไอศกรีม เช่น การแยกชั้น การขึ้นฟู การเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็ง และส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคด้วย

2.3.2 ชนิดและคุณสมบัติของสารให้ความคงตัวที่ใช้ในไอศกรีม

สารให้ความคงตัวมาจากหลายแหล่ง เช่น เจลาติน (gelatin) ซึ่งมาจากอนุพันธ์ของโปรตีนในสัตว์ ถือว่าเป็นวัตถุดิบชนิดแรกที่ถูกใช้เป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีม แต่ในปัจจุบันการผลิตไอศกรีมส่วนใหญ่ก็เปลี่ยนมาใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพอลิแซ็กคาไรด์ในพืช (Goff และ Caldwell, 1991) สารให้ความคงตัวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมไอศกรีมแสดงดังตารางที่ 2.2

นอกจากสารให้ความคงตัวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายดังกล่าวข้างต้น ยังมีสารให้ความคงตัวที่ได้จากพืชเฉพาะท้องถิ่นใช้ในไอศกรีมด้วยเช่น ซาเลป (Salep) ซึ่งได้จากส่วนหัวที่อยู่ใต้ดินของกล้วยไม้ป่านิยมใช้ในการผลิตไอศกรีมท้องถิ่นของประเทศตุรกี (Kaya และ Tekin, 2001) และประเทศอิหร่าน (Amin, 2005) พบว่าซาเลปประกอบด้วย พอลิแซ็กคาไรด์ประมาณร้อยละ 11 - 44 โดยส่วนใหญ่คือกลูโคแมนแนน (Glucomanan) ซึ่งเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง โดยซาเลปที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือหัวใต้ดินที่แตกเป็นแขนง (Palmate tuber salep, PTS) อีกลักษณะคือหัวใต้ดินที่เป็นก้อนกลม (Round tuber salep, RTS) ความแตกต่างของซาเลปทั้ง 2 ชนิดคือเมื่อนำมาผลิตเป็นไอศกรีม ไอศกรีมที่ใช้ PTS แสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning หรือ Pseudoplastic และมีความคงตัวสูงกว่า RTS เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากัน BahramPavar และคณะ (2009) ศึกษาผลของการใช้ซาเลปชนิด PTS ในผลิตไอศกรีมเปรียบเทียบกับไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวทางการค้าชนิด CMC พบว่าไอศกรีมที่ใช้ PTS แสดงความเหนียวต่ำกว่า CMC แต่การขึ้นฟู การละลาย การยอมรับในด้าน ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกับ CMC แสดงให้เห็นว่า PTS สามารถใช้ในการผลิตไอศกรีมในระดับอุตสาหกรรมได้

ตารางที่ 2.2 ชนิด ที่มา และคุณสมบัติของสารให้ความคงตัวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

สารให้ความคงตัว	ที่มา และคุณสมบัติ	References
เจลาติน Gelatin (E441)	เป็นพอลิเปปไทด์ ที่ได้มาจากเนื้อเยื่อเกี่ยวพันในโปรตีนสัตว์ เป็นสารให้ความคงตัวที่มีราคาข้างค่อนข้างแพง ความเข้มข้นที่นิยมใช้คือ 0.3-0.5% ไม่ทนความร้อน และไม่เหมาะกับผู้บริโภคมังสวิรัต เหมาะสำหรับมิกซ์ ที่ใช้เวลาในการบ่มนานเพราะกระจายตัวได้ดีและไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างเจลาตินกับโปรตีนนม	Kilara และ Chandan (2008)
กัวร์กัม Guar gum (E412)	สกัดมาจากเมล็ดของต้นกัว <i>Cyamopsis tetragonoloba</i> มีมากในประเทศอินเดียและปากีสถาน เป็นพอลิเมอร์ของ Galactomannan ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดคือ น้ำตาลแมนโนส (Mannose) เป็นส่วนที่เป็นสายหลัก สลับกับน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) ที่เป็นกิ่งแขนง อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลคโตส เป็น 2:1 มีราคาไม่แพง มีประสิทธิภาพในการทนความร้อน ละลายได้ดี และไม่ให้ความหนืดมากเกินไป โดยทั่วไปความเข้มข้นที่นิยมใช้คือ 0.1-0.2%	Kilara และ Chandan (2008) Clarke (2004)
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส Caboxymethyl cellulose (CMC) (E466)	เป็นอนุพันธ์ที่ได้จากการปรับปรุงเซลลูโลสจากธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี ทำให้โครงสร้างเป็นโซ่ตรงยาว ละลายน้ำได้ดี และมีประจุลบ มีสีขาวหรือครีม ไม่มีสี กลิ่น และรสชาติ CMC มีผลต่อเนื้อ ความรู้สึกขณะเคี้ยว และสามารถเกิดโครงสร้างเจลได้แต่ไม่แข็งแรง ถ้าผสมกับคาราจีแนน โลคัสปีนัม หรือกัวร์กัม จะทำให้เจลแข็งแรงขึ้น ความเข้มข้นที่นิยมใช้คือ 0.1-0.2%	Clarke (2004), Marshall, และคณะ, 2003

หมายเหตุ : E Number คือรหัสของสารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารตามประกาศจากองค์การความปลอดภัยของอาหารแห่งยุโรป (European Food Safety Authority, EFSA)

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ชนิด ที่มา และคุณสมบัติของสารให้ความคงตัวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

สารให้ความคงตัว	ที่มา และคุณสมบัติ	References
โลคัสبینกัม Locust bean gum (LBG) (E410)	สกัดจากเมล็ดต้น <i>Ceratonia siliqua</i> ที่เจริญในแถบเมดิเตอร์เรเนียน มีโครงสร้างคล้ายกับกัวร์กัม ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดคือ น้ำตาลแมนโนส (Mannose) เป็นส่วนที่เป็นสายหลัก สลับกับ น้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) ที่เป็นกิ่งแขนง อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลคโตส เป็น 4:1 เป็นสารให้ความคงตัวที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างมาก ต้องให้ความร้อนสูงกว่า 85 °C จึงจะละลายสมบูรณ์ มีความหนืดได้ปานกลางแต่มีความสม่ำเสมอ ไม่ถูกทำลายในสภาวะที่มีการกวน สามารถจับอากาศได้ดี ไม่มีกลิ่นและไม่รบกวนกลิ่นในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม	Kilara และ Chandan (2008), Clarke (2004), Goff, และคณะ, 1999
คาราจีแนน Carrageenan (E407)	เป็นพอลิเมอร์ของกาแลคโตส (Galactose) และ 3,6 anhydrogalactose (3,6-AG) มีทั้งชนิดที่มีหมู่ซัลเฟต และไม่มีหมู่ซัลเฟตซึ่งทำให้คาราจีแนน มีสมบัติด้านต่างๆ เช่น การละลาย (Solubility) การเกิดเจล (gelation) แตกต่างกันไป สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง <i>Kappaphycus alvarezii</i> (ประกอบด้วยแคปป์ปา-คาราจีแนนมากกว่าร้อยละ 90) และ <i>Euचेuma denticulatum</i> (ประกอบด้วยไอออตา-คาราจีแนนมากกว่าร้อยละ 85) นิยมเลี้ยงกันมากในฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และแทนซาเนีย คาราจีแนนสามารถเกิดเจลได้ ป้องกันการแยกชั้นของโปรตีนในนม โดยการเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนนม ความเข้มข้นที่นิยมใช้คือร้อยละ 0.01-0.02	Kilara และ Chandan (2008)

หมายเหตุ : E Number คือรหัสของสารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารตามประกาศจากองค์การความปลอดภัยของอาหารแห่งยุโรป (European Food Safety Authority, EFSA)

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ชนิด ที่มา และคุณสมบัติของสารให้ความคงตัวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

สารให้ความคงตัว	ที่มา และคุณสมบัติ	References
แซนแทนกัม Xanthan gum (E415)	เป็นสายพอลิเมอร์ของ <i>beta</i> -D-glucose มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส (cellulose) แต่ทุกๆ 2 โมเลกุลของ กลูโคส (Glucose) เชื่อมต่อกับกิ่งของ trisaccharide ที่เกิดจากน้ำตาลแมนโนส (Mannose) 2 โมเลกุล และกรด ดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) 1 โมเลกุล ได้จากการสังเคราะห์จากแบคทีเรีย <i>Xanthomonas campestris</i> ละลายน้ำได้ดี ไม่เกิดเจลหรือเกิดเจลอ่อนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและอุณหภูมิ แต่เมื่อนำมาผสมกับกัวร์กัมหรือ โลคัสปีนกัมจะเกิดเจลได้จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาความคงตัวในไอศกรีมอย่างมาก	Clarke (2004)
แอลจีเนต Alginates (E401)	เป็นสารประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่เป็น Hetero-polysaccharide ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ อนุพันธ์ของน้ำตาล ได้แก่ กรดแมนนูโรนิก (D-Mannuronic acid) กรดกลูคูโรนิก มีประจุเป็นลบที่พบในสาหร่ายสี น้ำตาล ในรูปของสารประกอบเกลือผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมโซเดียม และโปแตสเซียม ละลายน้ำเย็นได้ เกิดเจลได้ในระบบที่มีแคลเซียมหรือโปแตสเซียม มีประสิทธิภาพในการป้องกันเสื่อมเสียจากความเย็น (Cryoprotectant) ได้ดี	Glicksman (1983)

หมายเหตุ : E Number คือรหัสของสารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารตามประกาศจากองค์การความปลอดภัยของอาหารแห่งยุโรป (European Food Safety Authority, EFSA)

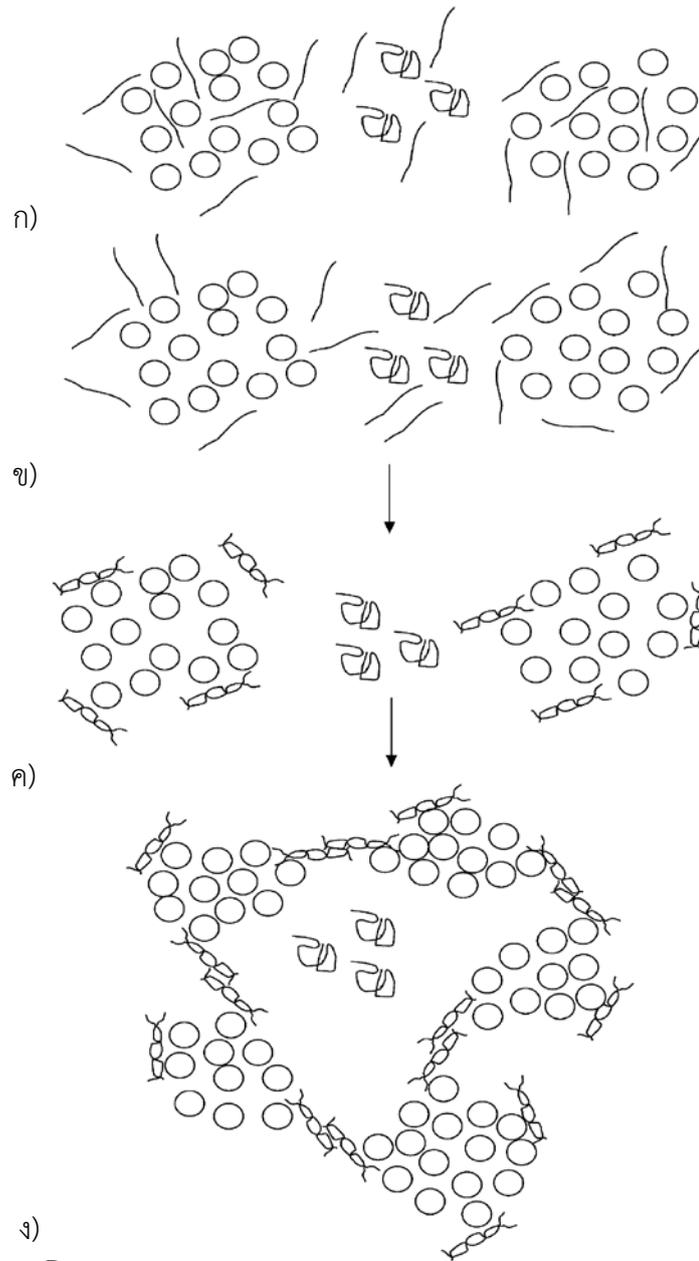
จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสารให้ความคงตัวแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อให้สารให้ความคงตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงอาจต้องใช้สารให้ความคงตัวหลายชนิดผสมกัน ทำหน้าที่ส่งเสริมฤทธิ์ซึ่งกันและกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะดี และมีคุณภาพมากขึ้น

2.3.3 ผลของสารให้ความคงตัวต่อการแยกเฟส

ปัญหาการแยกเฟสเกิดจากพอลิแซคคาไรด์ ที่ใช้เป็นสารให้ความคงตัวส่วนใหญ่จะไม่เข้ากับโปรตีนนม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงหน้าที่ทั้งของโปรตีนนมและพอลิแซคคาไรด์ ทำให้เกิดการแยกเฟสออกจากกัน ซึ่งเห็นได้จากสารละลายส่วนใสที่ไม่มีทั้งโมเลกุลโปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ในระหว่างการเก็บรักษา การแยกเฟสนี้เป็นผลมาจากกลไก Depletion flocculation ซึ่งเกิดจากการที่อิมัลชันมีอนุภาคคอลลอยด์ (พอลิแซคคาไรด์) ที่ไม่ถูกดูดซับ กระจายตัวอย่างอิสระอยู่ในเฟสต่อเนื่อง (Serum phase) แต่อนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปเกาะที่โมเลกุลของโปรตีนได้ ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ในบริเวณทั้งสอง จึงเกิดแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ทำให้เกิดความไม่เสถียรขึ้นในระบบ จากนั้นทำให้โปรตีนเคลื่อนเข้าหากันเพื่อขจัดแรงดันออสโมติกออก เมื่อโปรตีนเข้าใกล้กันมากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักดันคอลลอยด์ออกจากโปรตีน จากนั้นคอลลอยด์และโปรตีนต่างเคลื่อนที่รวมกลุ่มกันมากขึ้น จนเกิดการแยกเฟสขึ้น ดังนั้นการใช้สารให้ความคงตัวที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อสมบัติการเกาะกลุ่มซึ่งมีผลต่อการแยกเฟส Thaiudom และ Goff (2003) พบว่าการแยกเฟสระหว่างโปรตีนและไฮโดรคอลลอยด์สูงขึ้น เมื่อใช้แซนแทนกัม กัวร์กัม และโลคัสปีนัมตามลำดับ

การเติมแคปป์า-คาราจีแนนที่มีความเข้มข้นที่น้อยกว่าร้อยละ 0.05 ลงในไอศกรีมในฐานะเป็นสารให้ความคงตัวที่ช่วย (Secondary stabilizer) กับสารให้ความคงตัวชนิดอื่น สามารถยับยั้งการแยกเฟสได้โดยผ่านกลไกดังรูปที่ 2.5 ขั้นตอนแรก (ก) คือที่อุณหภูมิสูงในระหว่างการฆ่าเชื้อ แคปป์า-คาราจีแนนจะอยู่ในรูปร่างแบบ Coil conformation และกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่อง และมีบางส่วนแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของเคซีน ต่อมาเมื่อสัดส่วนระหว่างเคซีนและแคปป์า-คาราจีแนน เกิดการเปลี่ยนแปลงจากปรากฏการณ์ Depletion flocculation (ข) ทำให้แคปป์า-คาราจีแนนถูกผลักออกมาอยู่ภายนอกโปรตีนเคซีน จนเมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดรูปร่างแบบเกลียวของแคปป์า-คาราจีแนน (Helix conformation) (ค) และเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลรูปร่างเกลียวของแคปป์า-คาราจีแนนกับโมเลกุลเคซีนที่อยู่รอบนอกของเคซีนไมเซลล์ และเกิดอันตรกิริยาระหว่างแคปป์า-คาราจีแนนรูปร่างเกลียวด้วยตัวเอง (ง) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากพอที่จะต้านแรง

ผลึกหรือแรงดูดที่จะทำให้เกิดการแยกเฟสได้ (Dalgles และ Morris 1988; Spagnuolo และคณะ, 2005) แสดงให้เห็นว่าการแยกเฟสในระดับจุลภาค อาจยับยั้งการแยกเฟสในระดับมหภาคได้ ดังนั้นในไอศกรีมจึงนิยมใช้แคปไซ-คาราจีแนนในการเป็นสารให้ความคงตัวร่วมกับสารให้ความคงตัวชนิดอื่น เพื่อยับยั้งการแยกเฟสระหว่างพอลิแซคคาไรด์ กับโปรตีนนม



รูปที่ 2.5 กลไกการทำงานของแคปไซ-คาราจีแนนในการยับยั้งการแยกเฟส
ที่มา : Spagnuolo และคณะ (2005)

2.3.4 ผลของสารให้ความคงตัวต่อการขึ้นฟู (Overrun) และการเปลี่ยนแปลงของอากาศในระหว่างการเก็บรักษา

ไอศกรีมเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมอากาศเข้าไปในโครงสร้างทำให้มีลักษณะเป็นโฟมแช่แข็ง (Apada และคณะ, 2000) การเพิ่มปริมาตรของไอศกรีมก็เป็นหน้าที่อย่างหนึ่งของสารให้ความคงตัวซึ่งเกี่ยวข้องกับการเพิ่มความหนืดและการรักษาอากาศไว้ในโครงสร้าง ปริมาณอากาศที่ถูกหุ้มไว้ในโครงสร้างมีสำคัญต่อคุณภาพและลักษณะของไอศกรีมและยังเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของกฎหมายด้วย นอกจากนี้ปริมาณอากาศยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่ออัตราการละลาย การคงรูปร่างขณะละลาย และสมบัติวิทยากระแสของไอศกรีมในระหว่างการละลาย และเกี่ยวข้องกับการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านความเป็นครีม (Creaminess) ของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยไอศกรีมที่มีฟองอากาศขนาดเล็กและกระจายตัวดีมีแนวโน้มที่จะเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคสูงกว่าไอศกรีมที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่ (Eisner และคณะ, 2005) Chang และ Hartel (2002a) พบว่าการเติมสารให้ความคงตัวมีผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กมากกว่าไอศกรีมที่ไม่มีการเติมสารให้ความคงตัว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองอากาศนี้ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยากระแสของไอศกรีมในระหว่างการแช่แข็งของไอศกรีมด้วย การใช้สารให้ความคงตัวทำให้ค่าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้น อาจทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงเพราะขัดขวางการรวมตัวกันของฟองอากาศ และขัดขวางการหลุดออกของฟองอากาศจากโครงสร้าง ทำให้เก็บรักษาฟองอากาศไว้ในโครงสร้างได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมขนาดและปริมาณของฟองอากาศในไอศกรีมเป็นหน้าที่หลักของอิมัลซิไฟเออร์ เพราะอิมัลซิไฟเออร์ทำหน้าที่ในการเคลื่อนที่ไปอยู่รอยต่อระหว่างฟองอากาศและเฟสน้ำ เป็นการเพิ่มความหนาของฟิล์ม และขัดขวางการรวมตัวกันของฟองอากาศ

การเปลี่ยนแปลงของฟองอากาศในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีมเกิดจากกลไก 3 อย่างคือ การรวมกันของฟองอากาศโดยการเคลื่อนของฟองอากาศขนาดเล็กไปรวมกับฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดัน (Disproportionation) การชนกันและรวมตัวกันของฟองอากาศ (Coalescence) และการเคลื่อนที่ลอยขึ้นของฟองอากาศผ่านเฟสต่อเนื่องของน้ำ (Drainage) จนหลุดออกจากโครงสร้างของไอศกรีม

โดยการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเล็กไปรวมกับฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดจากความแตกต่างของความดัน (Disproportionation) ฟองอากาศขนาดเล็กมีความดันภายในสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ จึงเกิดแรงดันทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กเคลื่อนที่เข้าไปรวมกับฟองอากาศขนาดใหญ่ การควบคุมกลไกนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสต่อเนื่องและการทำให้ฟิล์มที่ผิวของฟองอากาศหนาขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของสารให้

ความคงตัวและอิมัลชันไฟเออร์ การลอยขึ้นของฟองอากาศและการเคลื่อนที่ลงของเฟสต่อเนื่องตามแรงโน้มถ่วงของโลก (Drainage) ทำให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้าง ยิ่งฟองอากาศขนาดใหญ่ยิ่งมีการลอยตัวขึ้นเร็ว การลอยขึ้นของฟองอากาศไม่เกี่ยวกับการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ แต่เกี่ยวกับความหนาของฟิล์มที่หุ้มอากาศ ดังนั้นการป้องกันการลอยของฟองอากาศทำได้โดยการใช้สารให้ความคงตัว ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงต้านทานทำให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ได้ช้าลง และการลดอุณหภูมิในการเก็บรักษาช่วยลดแรงเคลื่อนที่ (Driving force) ของฟองอากาศลง (Sofjan และ Hartel, 2004)

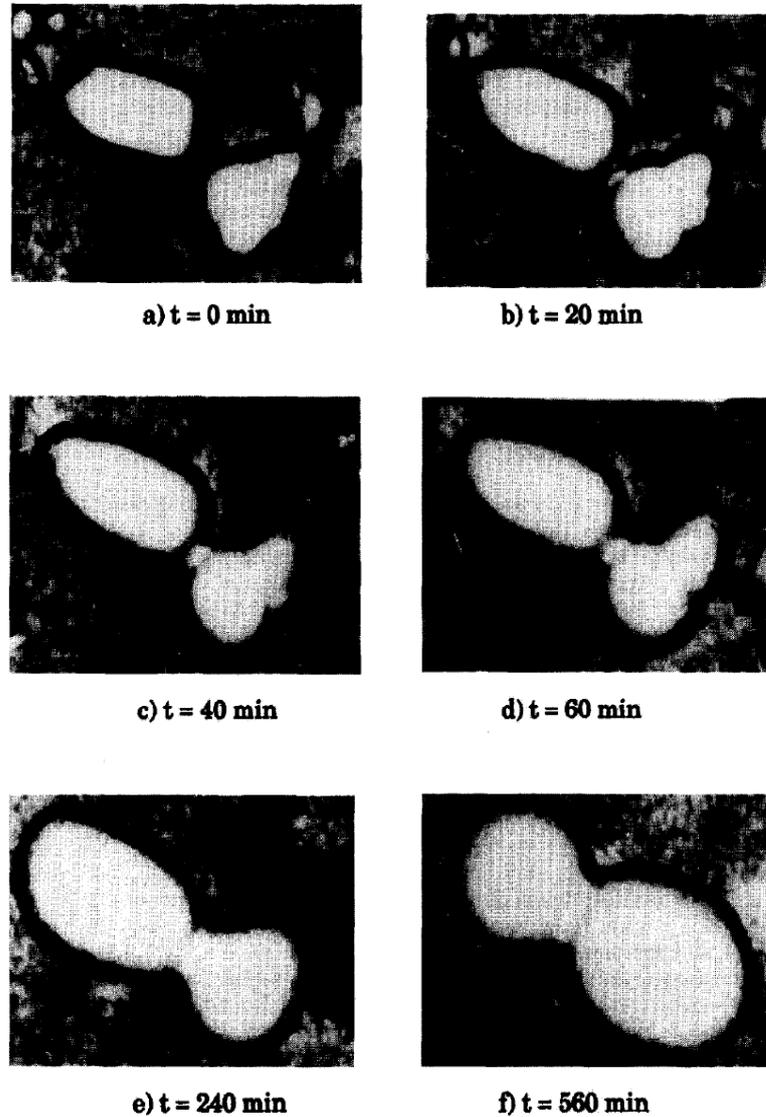
ปัจจัยทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต (อุณหภูมิการเก็บรักษา) และสูตรของไอศกรีม (สารให้ความคงตัว โปรตีน อิมัลชันไฟเออร์) ซึ่งสามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของฟองอากาศได้โดยการลดอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากพลังงานในระบบลดลงส่งผลให้อัตราการเคลื่อนที่การลอยขึ้นของฟองอากาศลดลง การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเข้ามารวมตัวกันลดลงและการชนกันของฟองอากาศลดลง นอกจากนี้การเติมสารให้ความคงตัวซึ่งเป็นการเพิ่มความหนืดของระบบจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในระบบ ก็สามารถทำให้การเปลี่ยนแปลงฟองอากาศลดลงได้ (Chang และ Hartel, 2002b) ดังนั้นการเก็บรักษาฟองอากาศไว้ในโครงสร้างของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษา เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการสารให้ความคงตัวและอิมัลชันไฟเออร์ โดยสารให้ความคงตัวซึ่งเกี่ยวข้องกับการเพิ่มความหนืดและชะลอการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในโครงสร้าง อิมัลชันไฟเออร์ทำให้ฟิล์มที่หุ้มฟองอากาศหนาขึ้นจึงป้องกันการชนหรือการรวมตัวกันของฟองอากาศในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีมได้

2.3.5 ผลของสารให้ความคงตัวต่อบทบาทในการป้องกันการเสื่อมคุณภาพจากการแช่แข็ง (Cryoprotective) ในระหว่างการเก็บรักษา

การเสื่อมคุณภาพจากการแช่แข็งเป็นผลมาจากกระบวนการ Recrystallization ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงของจำนวน ขนาด และ รูปร่างของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บแช่แข็ง (Flores และ Goff, 1999b) การเกิด Recrystallization เป็นการเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิการเก็บของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ หรือ ผลิตภัณฑ์มีการเก็บเป็นระยะเวลาสั้น โดยผลึกน้ำแข็งที่เกิดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนผลึกลดลง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านเนื้อสัมผัส อาจส่งผลให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์ กลไกการเกิด Recrystallization อาจแบ่งเป็น 3 กลไก คือ Accretion, Melt refreeze และ Isomass rounding

การเกิด Accretion เป็นกลไกการเกิด Recrystallization ที่สำคัญที่สุดในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เนื่องจากพบมากที่สุด ลักษณะการเกิดแบบ Accretion เกิดโดยผลึกน้ำแข็งสองผลึกที่อยู่ใกล้กันมากเกิดการหลอมละลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นโมเลกุลน้ำจะวิ่งเข้า

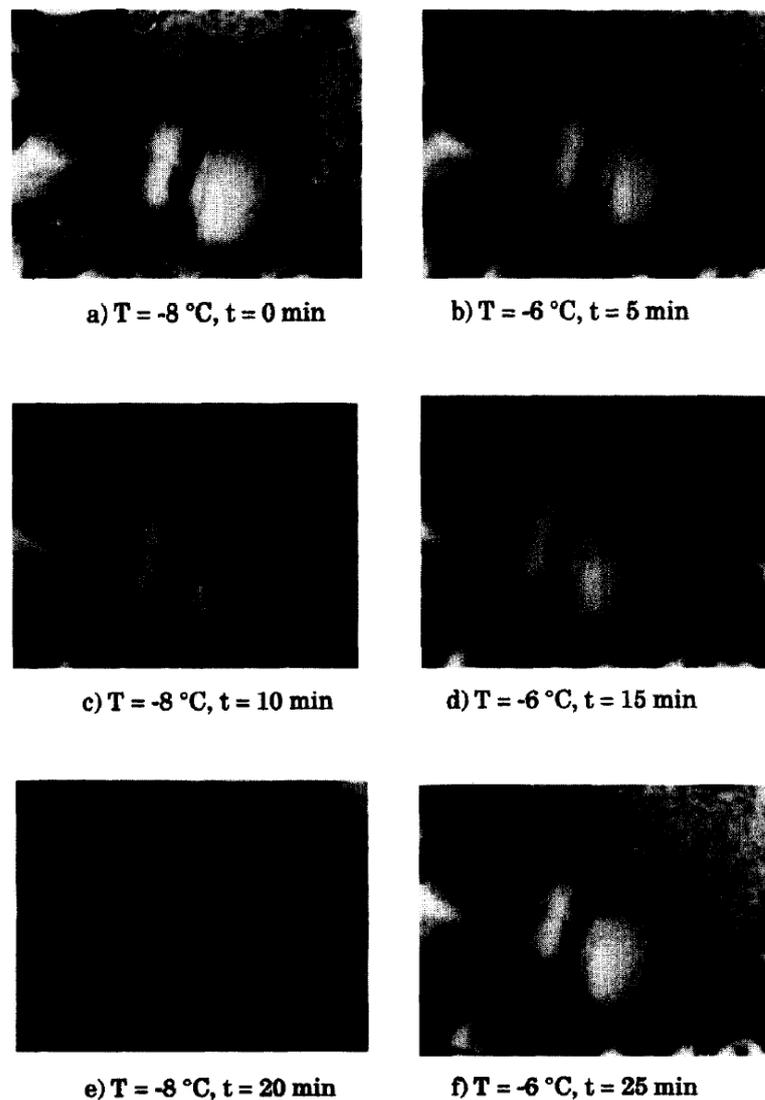
หากันเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจะเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งสองผลึกที่เชื่อมติดกัน เกิดเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนเห็นเป็นผลึกน้ำแข็งก้อนใหญ่ก้อนเดียว ดังรูปที่ 2.6 (Donhowe และ Hartel, 1996)



รูปที่ 2.6 การเกิด Recrystallization แบบ Accretion ของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม
ที่มา : Donhowe และ Hartel (1996)

สำหรับการ Melt refreeze เป็นกลไกการเกิดที่ผลึกน้ำแข็งสองผลึกมีขนาดต่างกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกน้ำแข็งทั้งสองจะเกิดการหลอมละลายโดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะมีอิทธิพลต่อผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กมากกว่าผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วโมเลกุลน้ำจากผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจะวิ่งไปล้อมรอบผลึกน้ำแข็งที่ยังหลอมละลายไม่หมดจาก

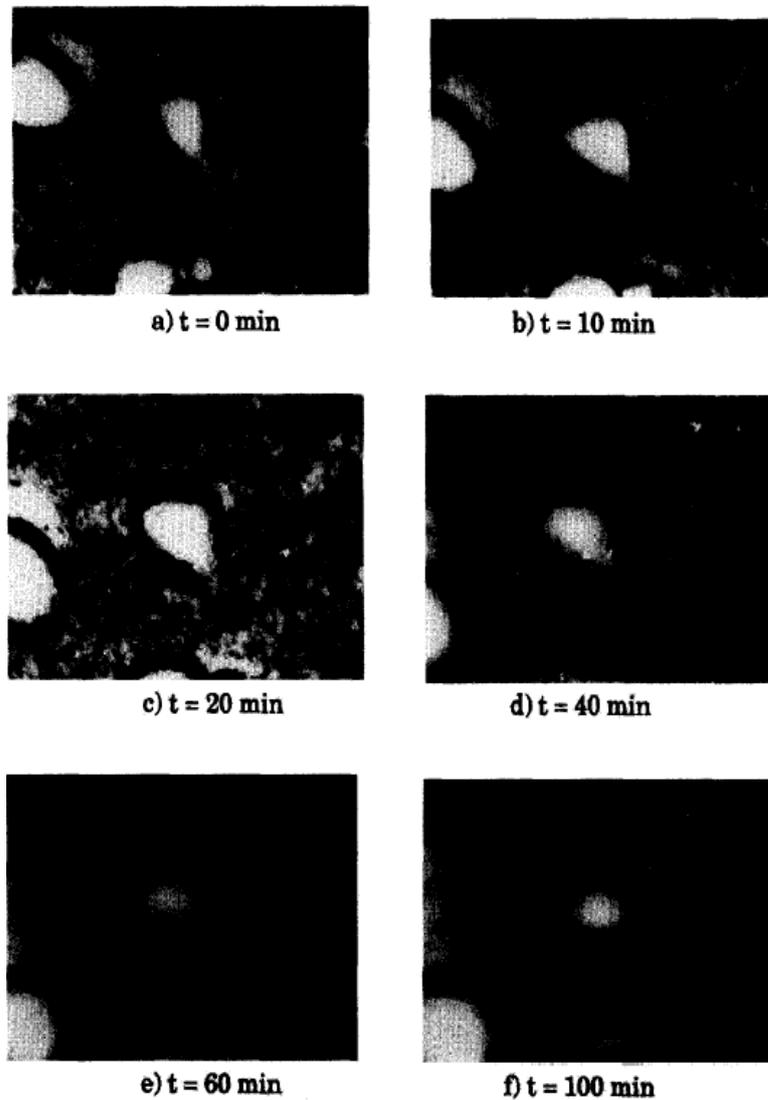
ผลึกขนาดใหญ่ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจึงเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งก้อนใหญ่ก้อนเดียว จะเห็นได้ว่ากลไกการเกิดแบบ Melt refreeze ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กจะหายไป แล้วเหลือแต่ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.7 (Donhowe และ Hartel, 1996)



รูปที่ 2.7 การเกิด Recrystallization แบบ Melt-Refreeze ของผลึกน้ำแข็งในโพลีเอทิลีน
ที่มา : Donhowe และ Hartel, (1996)

การเกิด Isomass rounding เป็นการเกิดที่ผลึกน้ำแข็งที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมพยายามที่เปลี่ยนเป็นรูปร่างกลม เนื่องจากในระหว่างที่ผลึกน้ำแข็งเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของเหลวอีกครั้ง จะมีแรงตึงผิว (Surface tension) ของโมเลกุลของน้ำพยายามดึงดูดโมเลกุลของ

น้ำด้วยตัวเองเป็นทรงกลม เพื่อเพิ่มความเสถียรของโมเลกุลให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.8 (Donhowe และ Hartel, 1996)



รูปที่ 2.8 การเกิด Recrystallization แบบ Isomass rounding ของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม
ที่มา : Donhowe และ Hartel (1996)

จากผลของทั้ง 3 กลไก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลง ผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากขึ้น และมีจำนวนของผลึกน้อยลง ทำให้มีการกระจายตัวของขนาดผลึกน้ำแข็งมากขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์

มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามอธิบายกลไกของสารให้ความคงตัวในการยับยั้งการเกิดผลึกและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดผลึกน้ำแข็ง (Recrystallization) ในระหว่างการเก็บรักษา แต่ก็ยังไม่สามารถเข้าใจได้ทั้งหมด (Caldwell และคณะ, 1992a; Faydi และคณะ, 2001) Flores และ Goff (1999b) พบว่าสารให้ความคงตัวไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแช่แข็ง (Freezing) และกระบวนการทำให้แข็งตัว (Hardening) ของการผลิตไอศกรีม แต่มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บรักษา (Recrystallization) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kouassi และคณะ (2002) และ Caldwell และคณะ (1992b)

การป้องกันการเสื่อมคุณภาพจากการแช่แข็ง (Cryoprotective) ของสารไฮโดรคอลลอยด์ในไอศกรีมสามารถอธิบายได้ผ่านกลไกที่สำคัญ 3 กลไกได้แก่ กลไกที่ 1 การเพิ่มความหนืดและลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในระบบที่มีความสัมพันธ์กับการโตของผลึกน้ำแข็ง (Budiaman และ Fernema, 1987; Miller-Livney และ Hartel, 1997) การเปลี่ยนความหนืดมหภาค (Macroviscosity) ที่เกิดจากการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์มีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มความหนืดในระดับจุลภาค (Microviscosity) ด้วย ดังนั้นสารให้ความคงตัวจึงสามารถป้องกันหรือลดการแพร่ของน้ำที่อยู่ในส่วนที่ยังไม่กลายเป็นน้ำแข็ง (Unfrozen phase) มาที่ผลึกน้ำแข็งแล้วทำให้ผลึกน้ำแข็งขยายขนาดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ยิ่งไปกว่านั้น Bolliger และคณะ (2000) พบว่าสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ส่งผลต่อสมบัติวิทยาการระสของไอศกรีม ในระหว่างการแช่แข็งและระหว่างการเก็บรักษา อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมการแพร่ของน้ำไปที่ผิวของน้ำแข็งด้วย Herrera และคณะ (2007) รายงานว่าไฮโดรคอลลอยด์มีความสามารถในการลดหรือชะลอการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบที่มีน้ำตาลซูโครส และน้ำตาลฟรักโตสได้ โดยเฉพาะการเติมแซนแทนกัมที่ผสมกับไลคัสปีนกัม สามารถลดการเคลื่อนที่ของน้ำได้ดี

กลไกที่ 2 คือความสามารถในการเกิดเจล (Cryo-gel) ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บรักษาในสภาวะที่อุณหภูมิไม่คงที่ (Muhr และ Blanshard, 1986; Patmore และคณะ, 2003) โดยทั่วไปความเกะกะของโมเลกุล (Steric hindrance) ของพอลิเมอร์ที่เกิดเจลได้ สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำเพื่อไปที่ผิวของน้ำแข็ง อาจทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก Goff และคณะ (1999) แสดงให้เห็นว่าไลคัสปีนกัมซึ่งสามารถเกิดเจลในระบบที่มีน้ำตาลซูโครสและโปรตีนได้มีความสามารถในการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากัวร์กัม ซึ่งกัวร์กัมไม่สามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็งได้ เนื่องจากไม่สามารถเกิดเจลได้ นอกจากนี้ความแน่นเนื้อของเจลก็อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการขยายขนาดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง (Muhr และ Blanshard, 1986)

เนื่องจากเจลที่มีความแน่นเนื้อหรือความแข็งสูง มักเปราะแตกหักได้ง่าย อาจถูกทำลายได้โดยผลึกน้ำแข็ง ขณะที่เจลที่มีความยืดหยุ่นจะสามารถทนต่อแรงกดจากผลึกน้ำแข็งได้มากกว่าเจลที่แข็ง จึงสามารถรักษาโครงสร้างเจลได้ จึงทำให้สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำได้นานกว่าเจลที่แข็ง แต่อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่เผยให้เห็นว่าสารให้ความคงตัวที่ไม่เกิดเจลก็มีความสามารถในการยับยั้งการขยายขนาดของผลึกได้เช่นกัน Regand และ Goff (2003) แสดงให้เห็นว่าสารให้ความคงตัวที่ไม่เกิดเจล (แอลจินेट แซนแทนกัม และ CMC) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกได้ดีกว่าสารให้ความคงตัวชนิดที่เกิดเจลได้ (เจลาติน คาราจีแนน และโลคัสปีนกัน) แสดงให้เห็นว่าความเกะกะของโมเลกุล (Steric hindrance) ของสารพอลิเมอร์ที่เกิดเจลได้ซึ่งทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำไปที่ผิวของน้ำแข็งไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็ง

สำหรับกลไกที่ 3 คือความเข้ากันได้ของสารไฮโดรคอลลอยด์กับสารอื่นในระบบ พบว่าเมื่อใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลโปรตีน สามารถกระตุ้นการแยกเฟสในระดับจุลภาคของระบบ ซึ่งมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึก (Regand และ Goff, 2003) Goff และคณะ (1993) พบว่าการเกิดโครงสร้างเจลของโลคัสปีนกันกระตุ้นทำให้เกิดการแยกเฟสของโปรตีนเคซีน เมื่อการแยกเฟสสูงขึ้นกลับแสดงการยับยั้งการโตของผลึกได้ดีขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการแยกเฟสที่กล่าวถึงเป็นการแยกเฟสในระดับจุลภาคเท่านั้น

Hagiwara และ Hartel (1996), Miller-Livney และ Hartel (1997) และ Marchell และคณะ (2003) เสนอว่าสารให้ความคงตัวที่นิยมใช้เพื่อยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมได้แก่ โลคัสปีนกัน ซีเอ็มซี แอลจินेट คาราจีแนน และแซนแทนกัม Adapa และคณะ (2000) ได้เสนอผลการวิจัยว่าสารให้คงตัวที่มีกาแลคโตแมนแนน (Galactomannan) เป็นองค์ประกอบอย่างกัวร์กัมหรือโลคัสปีนกันก็มีประสิทธิภาพในชะลอการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็งได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยับยั้งการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งระหว่างกัวร์กัมและโลคัสปีนกันพบว่าโลคัสปีนกันมีประสิทธิภาพสูงกว่ากัวร์กัม (Buyong และ Fennema, 1988; Fernandez และคณะ, 2007) อาจเนื่องจากความแตกต่างด้านโครงสร้าง โลคัสปีนกันมีไซกีนน้อยกว่ากัวร์กัม ทำให้โลคัสปีนกันละลายน้ำได้น้อยกว่ากัวร์กัม ส่งผลให้ในระหว่างกระบวนการแช่แข็งใช้พลังงานน้อยลง จึงทำให้น้ำส่วนที่ยังไม่แข็งตัว (Unfrozen phase) น้อยกว่ากัวร์กัม ทำให้มีปริมาณน้ำที่จะเคลื่อนที่ไปที่ผิวผลึกน้ำแข็งลดลง การขยายของผลึกจึงเกิดได้ไม่ดี ดังนั้นเห็นได้ชัดว่าการใช้สารให้ความคงตัวที่แตกต่างกันก็จะให้ผลการป้องกันการเสื่อมคุณภาพจากการแช่แข็งที่แตกต่างกันตามไปด้วย

2.3.6 ผลของสารให้ความคงตัวต่ออัตราการละลาย

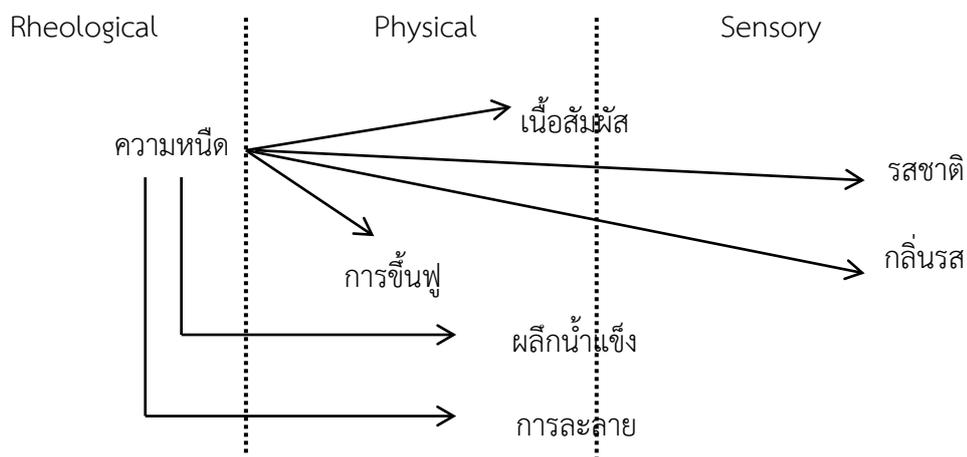
ไอศกรีมมักถูกตัดกัให้อยู่ในรูปโคนหรือแท่งเพื่อการบริโภค เพื่อให้ผู้บริโภคเกิดความพึงพอใจต่อไอศกรีม การควบคุมอัตราการละลายจึงถือเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญมาก ไอศกรีมที่ละลายช้า ของเหลวไหลออกมาน้อย คงรูปร่างขณะละลาย ไม่เกิดการยุบตัว ล้วนเป็นลักษณะสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพของไอศกรีม การละลายของไอศกรีมเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ความร้อนจากภายนอกจะถูกถ่ายเทให้กับไอศกรีม ทำให้เกิดการหลอมละลายของผลึกน้ำแข็งบริเวณที่ผิวของไอศกรีม น้ำที่เกิดจากการหลอมเหลวของผลึกน้ำแข็งจะเกิดการออสโมซิสไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงและยังแข็งอยู่ในระบบ จากนั้นก็เกิดการถ่ายมวลและการถ่ายความร้อนของส่วนผสมต่างๆ ทำให้ได้สารละลายเจือจาง แล้วน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างที่เป็นโฟมของไอศกรีมแล้วก็หยดลงมา โดยทั่วไปปัจจัยที่ส่งผลต่อการละลายของไอศกรีมได้แก่ ปริมาณไขมัน ขนาดของผลึกน้ำแข็ง ค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Muse และ Hartel, 2004) การใช้สารให้ความคงตัวทำให้โครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสามารถอุ้มน้ำได้ขึ้นและเพิ่มความหนืดของระบบได้ จึงทำให้การละลายของไอศกรีมเกิดได้ช้าลง (Marshall และคณะ, 2003)

2.3.7 ผลของสารให้ความคงตัวต่อการรับรู้ทางประสาทสัมผัส

สารให้ความคงตัวที่ใช้ในไอศกรีมยังมีผลต่อการรับรู้ทางประสาทสัมผัสด้วย โดยเฉพาะในด้านเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ (Donhowe และคณะ, 1991; Aktar และคณะ, 2000) ความหนืดของไอศกรีมก็ส่งผลต่อการรับรู้ในปาก (Mouthfeel) เช่น การรับรู้ถึงเนื้อสัมผัส ความมัน ความข้นหนืด ความรู้สึกเย็น เป็นต้น โดยเฉพาะไอศกรีมที่ใช้กัว์กัม เจลาติน และแอลจีเนต ความหนืดจะมีผลอย่างมากต่อเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของไอศกรีม (Minhas และคณะ, 2002) Soukoulis และคณะ (2008) พบว่าชนิดของไฮโดรคอลลอยด์มีผลต่อการรู้กลิ่นรสวนิลาในไอศกรีม ไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมและโซเดียมแอลจีเนต ซึ่งมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning สูง (ค่า Flow behavior index ต่ำ) ซึ่งพฤติกรรมนี้ส่งเสริมให้การปลดปล่อยกลิ่นรสดีขึ้น ทำให้คะแนนความเข้มข้นในการรับรู้กลิ่นรสวนิลาสูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณสารให้ความคงตัวสามารถปรับปรุงลักษณะด้านความเป็นครีม (Creamy) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเนียนและความสม่ำเสมอของเนื้อสัมผัส Oya และคณะ (2009) พบว่าสารให้ความคงตัวมีผลต่อเนื้อสัมผัสและการรับรู้รสชาติในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เช่น Xanthan gum, Guar gum, Carboxymethyl cellulose (CMC) และ Hydroxypro – pylmethylcellulose (HPMC) สามารถลดค่าความแข็ง (Hard) ความหยาบ (Coarse) ลักษณะเหลว (Watery) พร้อมกันกับเพิ่มลักษณะเหนียวคล้ายหมากฝรั่ง (Gummy) และความรู้สึกมันค้ำในปาก (Greasy) ของไอศกรีมได้

2.3.8 ผลของสารให้ความคงตัวต่อสมบัติวิทยากระแส (Rheology) ของไอศกรีม

วิทยากระแสเป็นแขนงหนึ่งของวิชาฟิสิกส์ที่ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบและโครงสร้างในขณะเกิดการไหล การเสียรูปร่างหรือการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ (Marshall และคณะ, 2003) และเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์สุดท้ายในด้านเนื้อสัมผัส ความเรียบเนียนและการรับรู้ความรู้สึกเย็นของไอศกรีม (Dogan และ Kayacier, 2007) โดยสารให้ความคงตัวมีหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น การขึ้นฟู การละลาย และเนื้อสัมผัสของไอศกรีม โดยความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวิทยากระแสกับสมบัติทางกายภาพและการยอมรับแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวิทยากระแสกับสมบัติทางกายภาพและการยอมรับ

การเข้าถึงข้อมูลสมบัติวิทยากระแสจึงมีประโยชน์อย่างมากต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม การควบคุมคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ เพราะความหนืดเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวล (Mass transfer) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ทำให้ความหนืดของอาหารเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้เพื่อการออกแบบกรรมวิธีการผลิต กำหนดชนิด และขนาดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการผลิตไอศกรีม เช่น กำหนดขนาดของมอเตอร์และชนิดของใบพัดที่ใช้เพื่อการผสม (Mixing) การโฮโมจีไนซ์ (Homogenization) การเลือกชนิดและขนาดของปั๊ม กำหนดชนิดและขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) รวมทั้งกำหนดเวลาที่ใช้เพื่อกระบวนการแปรรูปอย่างการฆ่าเชื้อ (Pasteurization) หรือการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) (Kus และคณะ, 2005)

2.4 วิทยาการกระแส (Rheology)

2.4.1 ความหมายของวิทยาการกระแส (Rheology)

วิทยาการกระแสเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองต่อแรง (Force) ที่กระทำต่อการเปลี่ยนรูป (Deformation) และการไหล (Flow) ของวัสดุ การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นอาจเป็นลักษณะที่ไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เช่น การไหลของของเหลว (Flow) ซึ่งไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ และลักษณะที่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ เช่น ความยืดหยุ่นของของแข็ง (Elasticity) การศึกษาสมบัติทางวิทยาการกระแสนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายถึงสมบัติความหนืดของวัสดุ (Viscoelastic properties) ซึ่งผลระหว่างสมบัติความเป็นของแข็งและสมบัติความเป็นของเหลว ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรสำคัญ 3 ตัวแปร คือ แรง การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และเวลา

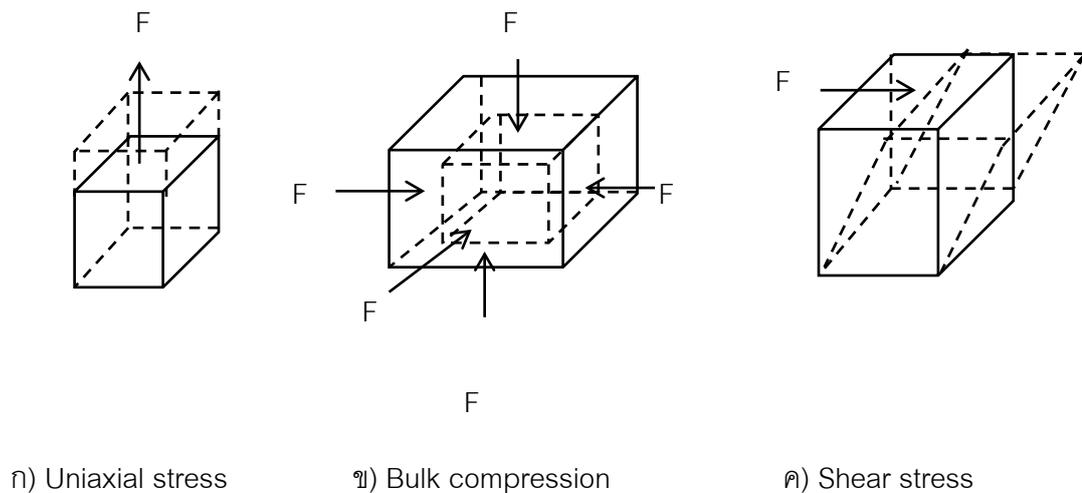
2.4.2 ประโยชน์ของการศึกษาวิทยาการกระแส

เพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างภายในของวัสดุ การทดสอบทางวิทยาการกระแสมักใช้อยู่เสมอในโรงงานอุตสาหกรรม ประโยชน์ของการศึกษาวิทยาการกระแส ใช้ในด้านการแปรรูปวัตถุดิบ และการควบคุมการผลิต การออกแบบเครื่องจักรกล ใช้แก้ปัญหาการยอมรับของผู้บริโภค การเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์ในการกระบวนการผลิต รวมถึงการเก็บรักษาและช่วยเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมกับการเติมลงในอาหารชนิดต่างๆ รวมทั้งยังช่วยคำนวณพลังงาน และต้นทุนที่ใช้ในการผลิตได้ด้วย

2.4.3 พฤติกรรมการไหล

ในการศึกษาสมบัติวิทยาการกระแสของวัสดุจะแบ่งเป็นการศึกษาของแข็ง (Solid) และของเหลว (Fluid) โดยการอธิบายของแข็งจะอธิบายตามกฎความยืดหยุ่นของฮุก (Hook's law) ที่ระบุว่าความเค้น (Stress) ของของแข็ง เป็นสัดส่วนกับความเครียด (Strain) หรือกล่าวได้ว่าแรงเป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของแข็งโดยสัดส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดเรียกว่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) สำหรับการศึกษาของเหลวจะอธิบายตามกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's law) โดยความเค้นเฉือน (Shear stress) เป็นสัดส่วนกับอัตรา การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Strain rate) หรืออัตราเฉือน (Shear rate) โดยสัดส่วนระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนเรียกว่าความหนืด (Viscosity) กฎทั้งสองใช้ในการอธิบายพฤติกรรมทางการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหลวและของแข็งได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุบางประเภทที่มีสมบัติกึ่งเหลวกึ่งแข็งอย่างอาหารได้ ดังนั้นในการอธิบายพฤติกรรมกรรมการไหลของอาหารจำเป็นต้องใช้กฎทั้งสองควบคู่กันไป เพื่อให้เข้าใจสมบัติวิทยาการกระแสจึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับแรง และพฤติกรรมของวัสดุที่ตอบสนองต่อแรงที่กระทำดังนี้

ความเค้น (Stress) หมายถึงแรงที่กระทำต่อพื้นที่วัสดุ คือลักษณะอย่างหนึ่งของวัสดุขณะอยู่ ใต้ความดันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิววัสดุเพียงด้านเดียว หรือความเค้นดึง (Uniaxial stress) แรงที่กระทำกับวัสดุในทุกทิศทางหรือความเค้นอัด (Bulk compression) แรงที่กระทำขนานกับพื้นที่ของวัสดุหรือความเค้นเฉือน (Shear stress) แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ชนิดของความเค้นที่กระทำต่อวัสดุ

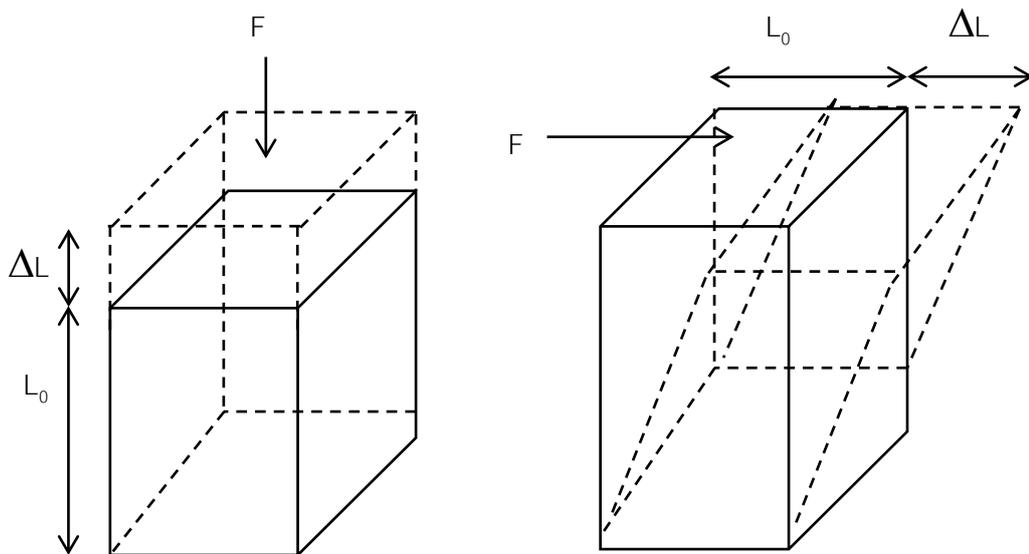
ที่มา: Figura และ Teixeira (2007)

ความเค้นเฉือน หมายถึงแรงที่กระทำขนานกับพื้นที่ของวัสดุ การเปลี่ยนรูปจะเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของจุดในตำแหน่งต่างๆ ในวัสดุ ซึ่งจะขึ้นกับขนาดและการกระจายของแรงที่กระทำ เมื่อสมมติว่าโครงสร้างของวัสดุประกอบด้วยชั้นบางมากๆ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ จึงเกิด จากการเคลื่อนที่แบบลามินาร์ (Laminar flow) ที่เป็นระเบียบของชั้นวัสดุ การเคลื่อนตัวออกจากกัน ระหว่างชั้นที่ติดกันต้องอาศัยแรงที่มากกว่าแรงเสียดทานระหว่างผิวแรงที่กระทำนี้เรียกว่าแรงเฉือน (Shear force) ความเค้นเฉือนหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\sigma = F/A \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้น มีหน่วยเป็น Pa หรือ N/m^2
	F	คือ แรง มีหน่วยเป็น N
	A	คือ พื้นที่ มีหน่วยเป็น m^2

ความเครียด (Strain) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากกระทำ คือถ้ามีแรงมากกระทำกับวัสดุและเกิดความเค้นขึ้น วัสดุนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เช่น การยืดหรือการอัด ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุ

ที่มา: Figura และ Teixeira (2007)

ความเครียดเฉือน (Shear strain) (γ) หมายถึง การเปลี่ยนรูปที่เกิดจากแรงที่กระทำขนานกับพื้นที่ของวัสดุ ทำให้วัสดุเคลื่อนที่แบบลามินาร์ เมื่อสมมุติให้เป็นการเคลื่อนที่ในเนื้อวัสดุ หรือการเปลี่ยนรูปของวัสดุยืดหยุ่นของของไหล นิวโตเนียน (Newtonian fluid) ที่เกิดจากการกระทำของแรงเค้นเฉือนน้อยๆ และมีการเคลื่อนที่แบบลามินาร์อย่างง่าย ทำให้ความเค้นเฉือนจะขึ้นกับเวลาเท่านั้น และถือว่าความเครียดเฉือนที่ทุกตำแหน่งมีค่าเท่ากันทั้งหมด ความเครียดหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\gamma = \Delta L / L_0 \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

เมื่อ γ คือ ความเครียด
 ΔL คือ การเปลี่ยนรูป มีหน่วยเป็น m
 L_0 คือ ความยาวเริ่มต้น มีหน่วยเป็น m

ค่า Young's Modulus (E) เมื่อมีแรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิววัสดุเพียงด้านเดียวได้แก่ ความเค้นยืด (Tensile stress) และความเค้นอัด (Compressive stress) เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ความยาว โดยปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง ของแข็งที่แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Ideal elastic behavior) สามารถอธิบายโดยกฎของฮุก (Hook's Law) ดังนี้

$$\epsilon = \sigma / \gamma \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

อัตราเฉือน หมายถึง อัตราความเครียดเฉือนในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Rosenthal, 1999)

$$\dot{\gamma} = \gamma / t \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

เมื่อ $\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}

γ คือ ความเครียดเฉือน

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น s

ความหนืด (Viscosity, η) ความหนืด หมายถึง แรงต้านการไหลของของไหลที่สามารถอธิบายโดยกฎของนิวตัน (Newton's Law) ดังนี้

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}

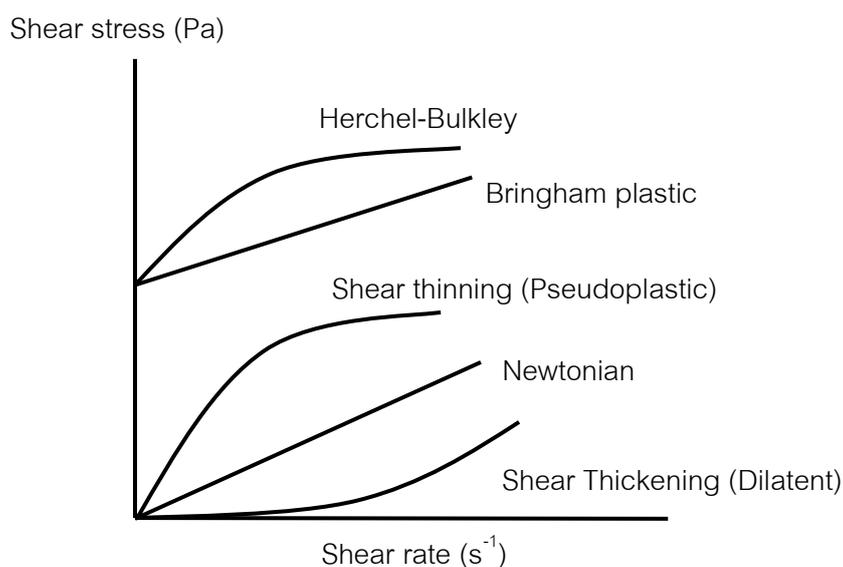
η คือ ความหนืด มีหน่วยเป็น Pa.s

เมื่อความต้านทานต่อการไหลสูงก็จะมีค่าความหนืดสูงขึ้น ความหนืดของอาหารเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกลืนในมนุษย์ หากความหนืดของอาหารสูงมากก็จะทำให้กลืนยาก แต่ถ้าความหนืดของอาหารน้อยมากอาจเกิดการสำลักถ้ากลืนเร็วเกินไป (Bourne, 2002) เพราะฉะนั้นความหนืดของอาหารต้องเหมาะสมกับความสามารถในการกลืนของแต่ละคน

พฤติกรรมการไหลต่างๆ สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และของไหลแบบไมใช่ นิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid) ดังรูปที่ 2.12 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.3.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

ของไหลแบบ Newtonian เป็นสารที่มีพฤติกรรมการไหลขึ้นกับ Shear stress (σ) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกันดังสมการที่ 2.5 ซึ่งพบว่าค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress (σ) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) นั้นจะบ่งบอกถึงค่าความหนืด (η) ของวัสดุ จะเป็นค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตาม Shear rate ($\dot{\gamma}$)



รูปที่ 2.12 พฤติกรรมการไหลรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Steffe (1996)

2.4.3.2 ของไหลแบบไม่ใช่นิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid)

ของไหลแบบ Non-Newtonian เป็นสารที่มีพฤติกรรมการไหลที่ Shear stress เปลี่ยนแปลงขึ้นกับ Shear rate โดยสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

Shear thinning fluid หรือที่เรียกว่า Pseudo plastic fluid ของไหลประเภทนี้ จะมีความหนืดลดลงเมื่อ Shear rate สูงขึ้น โดยพฤติกรรมลักษณะนี้เกิดจากแรงเฉือนกระทำต่อวัตถุสูงขึ้นไป (Shear rate สูงขึ้น) จะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลภายในโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวตามกระแสการไหลมากขึ้น ทำให้เกิดการไหลได้ง่ายขึ้น ค่าความหนืดจึงมีค่าลดลง (η ลดลง) และเมื่อหยุดการเฉือนลงสายโซ่จะกลับเข้าสู่สภาพเดิม ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะใช้เวลาในการกลับสู่สภาพเดิมที่แตกต่างกัน โดยมีสมการในการอธิบายได้ดังสมการที่ 2.6 โดยค่าค่าดัชนีการไหล (n) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}
	K	คือ ค่าดัชนีความคงตัว มีหน่วยเป็น $Pa \cdot s^n$
	n	คือ ค่าดัชนีการไหล

Shear thickening หรือ Dilatant ของไหลประเภทนี้ จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อ Shear rate สูงขึ้นโดยเชื่อกันว่ามีสาเหตุมาจากการที่โมเลกุลของของไหลจับตัวเข้าด้วยกันหรือโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันหนาแน่น ขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยพฤติกรรมในลักษณะนี้ จะพบในสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ เช่น แป้งข้าวโพด (จิรารัตน์, 2554) สมการในการอธิบายได้ดังสมการที่ 2.6 เช่นเดียวกับพฤติกรรมแบบ Shear thinning แต่ค่า n จะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ

Bingham plastic เป็นพฤติกรรมของไหลที่ลักษณะคือเกิดการไหลได้ก็ต่อเมื่อให้ค่า Shear stress สูงจนถึงระดับหนึ่งก่อน วัสดุจึงเกิดการไหลได้ ซึ่งเรียกว่าความเค้นคราก (Yield Stress, σ_0) ก่อน จึงเกิดการไหลได้ และเมื่อของไหลเกิดความหนืดของของไหลจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม Shear rate โดยมีสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลเป็นดังนี้

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}
	η	คือ ความหนืด มีหน่วยเป็น Pa.s
	σ_0	คือ เค้นคราก มีหน่วยเป็น Pa

Herchel – Bulkey เป็นพฤติกรรมที่คล้ายกับ Bingham plastic แสดงค่า Yield Stress ก่อนวัตถุจะเกิดการไหล แต่เมื่อเกิดการไหลแล้วความหนืดจะมีค่าลดลงตาม Shear rate ที่เพิ่มขึ้น คล้ายกับพฤติกรรมแบบ Shear thinning แสดงได้ดังสมการ 2.8

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}
	K	คือ ค่าดัชนีความคงตัว

n คือ ค่าดัชนีการไหล มีหน่วยเป็น $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$

σ_0 คือ ความเค้นคราก มีหน่วยเป็น Pa

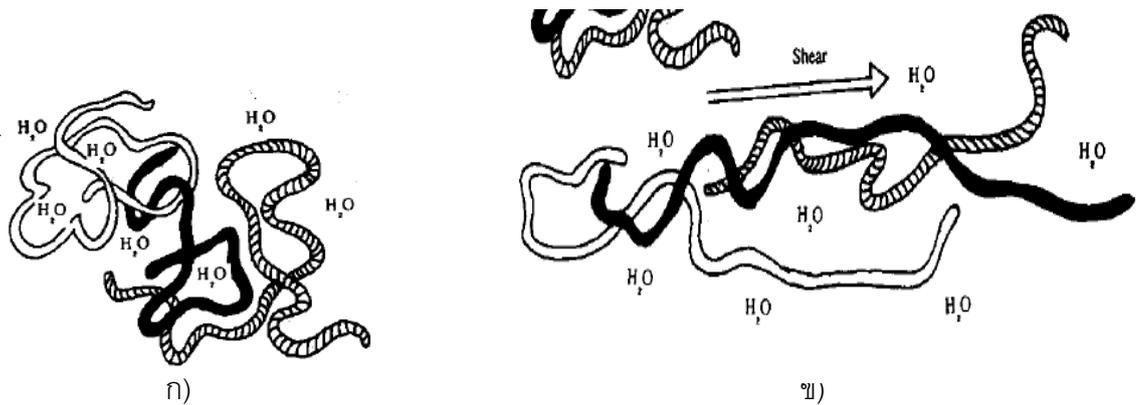
2.4.4 โมเดลการไหลของวัสดุ

การใช้โมเดลของสมบัติการไหลจะเป็นแบบ Newtonian ที่ Shear rate ต่ำ และแสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning ที่ค่า Shear rate สูงขึ้น โมเดลที่นิยมใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเฉือนและความหนืดของพอลิเมอร์เมื่อใช้ Shear rate สูงขึ้น มี 2 โมเดล ดังนี้

2.4.4.1 Power law model

Power law model เป็นโมเดลที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของไหลแบบทั้งแบบ Newtonian และแบบ Non-newtonian กันอย่างกว้างขวาง โดยแสดงดังสมการที่ 2.6

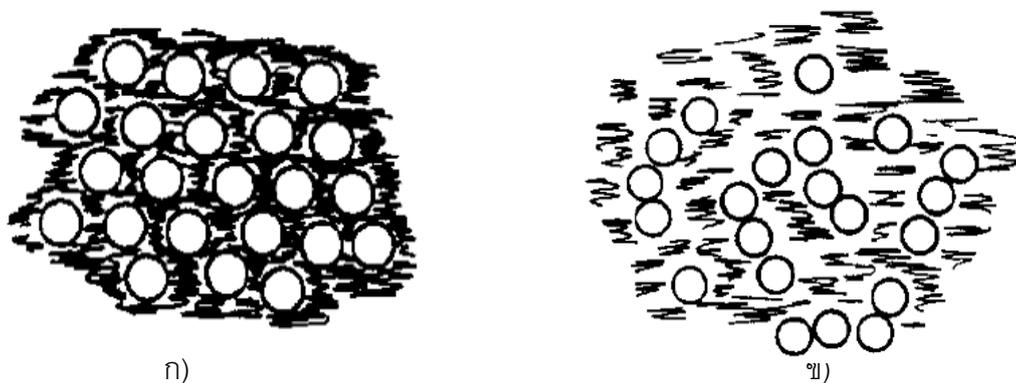
Power law model สามารถใช้บอกถึงประเภทของของไหลได้ โดยการหาค่าดัชนีการไหล (Flow behavior index) หรือค่า n เป็นค่าที่ บอกว่าของไหลที่ทำการศึกษามีลักษณะการไหลคล้ายคลึงกับของไหลพวก Newtonian มากน้อยต่างกัน ถ้าค่า n เท่ากับ 1 แสดงว่าของไหลนั้นประพฤติตัวเป็นแบบของไหล Newtonian และถ้าค่า ไม่เท่ากับ 1 ของไหลดังกล่าวเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian โดยหากค่า n มีค่าน้อยกว่า 1 ($n < 1$) เป็นของไหลประเภท Shear thinning และ หากค่า n ใหญ่ แสดงให้เห็นว่าของไหลมีความเป็น Shear thinning มากยิ่งขึ้น พฤติกรรมนี้ส่วนใหญ่เกิดกับวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ โดยพอลิเมอร์เหล่านี้เป็นสารที่มีโมเลกุลยาวจะพันกันคล้ายเส้นด้าย และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ เมื่อให้แรงเฉือนพอลิเมอร์เหล่านี้จะเกิดการเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกับแรงที่ทำให้ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และยังทำให้ช่องว่างที่กักเก็บน้ำเล็กลงหรือหายไป น้ำจึงถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก ความต้านทานการไหลจึงลดลง (Farhoosh และ Riazi, 2007) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะโมเลกุลของวัสดุที่เกิดการไหลแบบ Shear thinning โดย ก) คือไม่มีแรงกระทำและ ข) คือ เมื่อถูกแรงกระทำ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Steffe (1996)

และหากค่า n มีค่ามากกว่า 1 ($n > 1$) เป็นของไหลประเภท Shear thickening และหากค่า n ยิ่งมาก แสดงให้เห็นว่าของไหลมีความเป็น Shear thickening สูงมาก ยิ่งขึ้น ส่วนใหญ่จะพบที่ความเข้มข้นมากของพอลิเมอร์บางชนิด เช่น น้ำแป้งดิบ แป้งชูบทอด เมื่อออกแรงเพื่อให้ของเหลวนี้เคลื่อนที่จะทำให้โมเลกุลที่ชิดกันขยายออกได้มากขึ้น ช่องว่างระหว่างโมเลกุลมีขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์จับน้ำได้มากขึ้น ปริมาณน้ำจึงสามารถแทรกอยู่ในระหว่างช่องว่าง ได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะโมเลกุลของวัสดุที่เกิดการไหลแบบ Shear thickening โดย ก) คือไม่มีแรงกระทำและ ข) คือเมื่อถูกแรงกระทำ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Steffe (1996)

สำหรับค่า K เป็นค่าดัชนีความคงตัว (Consistency index) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความคงตัวของอาหาร หรือเป็นความหนืด ณ สภาพปกติของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่มีการให้แรงลงไป (Soukoulis และคณะ, 2008, BahramParvar และคณะ, 2010)

Power law model ยังสามารถเขียนสมการได้ในรูปความสัมพันธ์ของความหนืดกับ Shear rate ได้ดังสมการที่ 2.9 ซึ่งสมการดังกล่าวใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ได้ดี ในช่วงที่ค่า Shear rate สูง ๆ ($\dot{\gamma} > 1$) (Macosko, 1994)

$$\eta = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{สมการที่ 2.9})$$

เมื่อ	η	คือ ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) มีหน่วยเป็น Pa.s
	K	คือ ค่าคงที่การไหล มีหน่วยเป็น Pa.s ⁿ
	n	คือ ค่าดัชนีการไหล (Power law index)
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s ⁻¹

2.4.4.2 Herchel – Bulky model

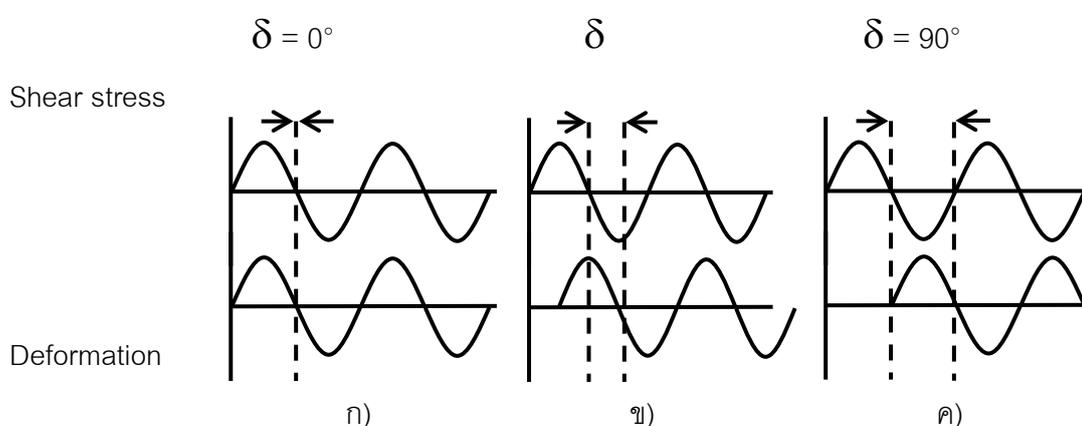
เป็นโมเดลที่ใช้อธิบายสมบัติวิหยากระแสของวัสดุที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทันทีที่ได้รับแรง แต่จะเริ่มเคลื่อนที่ได้เมื่อแรงที่มีค่ามากกว่าความเค้นคราก (Yield stress, σ_0) ก่อน ที่เป็นเช่นนี้เพราะโมเลกุลของโครงสร้างมีแรงยึดเหนี่ยวกันมาก เพื่อให้เกิดการไหลจะต้องทำลายแรงเหล่านี้ก่อน โดยโมเดลแสดงดังสมการที่ 2.8

ค่า Yield stress เป็นค่าที่แสดงพลังงานที่น้อยที่สุด ที่ทำให้วัสดุเริ่มเคลื่อนที่ ใช้ประโยชน์ในอธิบายการแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และเป็นค่าแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายต่อโครงสร้างของวัสดุ

2.4.5 สมบัติเชิงวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic property) การทดสอบแบบสั่น (Oscillation testing)

การทดสอบแบบสั่นเป็นการศึกษาคุณสมบัติการไหลหนืดและการยืดหยุ่นของวัสดุ ตลอดจนสามารถศึกษาไปถึงโครงสร้างโมเลกุลได้ด้วย การศึกษาสมบัติการไหลหนืดและการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์โดยวิธีการสั่นนี้มีความสะดวก และความไวมากกว่าการทดสอบแบบคืบ (Creep and Recovery) หรือการพักความเค้น (Stress relaxation) และเป็นที่ยอมรับและสำคัญต่อการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของวัสดุพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาโครงสร้างโมเลกุล (Molecular structure) ได้ดี การทดสอบแบบสั่นอาจกระทำได้หลายรูปแบบทั้งวิธียืดหรือวิธีกดหรือวิธีเฉือน แต่ที่นิยมคือวิธีเฉือนเป็นวิธีที่ควบคุมให้ความเครียดคงที่ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นไปตามความถี่ของการสั่นหรือตามเวลาของการสั่นหรืออุณหภูมิ

ในการสั่น ในทำนองเดียวกันอาจให้ความเค้นคงที่แล้ววัดความเครียดที่เปลี่ยนไปตามความถี่ของการสั่นเช่นเดียวกับการวัดความเค้น สำหรับวิธีการสั่นนี้ใช้กับอาหารเหลวและอาหารกึ่งแข็ง (เจล) โดยอาหารจะถูกวางไว้ระหว่างแผ่นกรวยกับแผ่นเรียบ (Cone and plate) หรือแผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ (Plate and plate) แผ่นบนจะหมุนในแนวราบไปและกลับตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ จะปรากฏคลื่นในการการสั่น 2 คลื่น คือคลื่นของความเค้นและคลื่นของความเครียด ถ้าเป็นวิธีสั่นแบบให้ความเครียดคงที่ การตอบสนองของความเค้นจะมีความต่างเฟสกัน ระหว่าง 0-90 องศา (อรุณี, 2548) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 มุมเฟสที่เปลี่ยนเมื่อให้ความเค้นหรือความเครียดแบบสั่น ก) Ideal elastic
ข) Viscoelastic และ ค) Ideal viscous

ที่มา: Figura และ Teixeira (2007)

ความเครียดสั่นมีสมการดังนี้

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (\text{สมการที่ 2.10})$$

เมื่อ γ คือ ความเครียดสั่น
 γ_0 คือ ความเครียดเฉือนสูงสุด
 ωt คือ ความถี่ที่เวลาใดๆ
 วัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material) ความเค้นที่ตอบสนองต่อความเครียดแบบสั่นจะทำมุมต่างเฟส δ จะอยู่ระหว่าง 0-90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ข) ความเค้นที่ตอบสนองมีสมการเป็น

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega_t + \delta) \quad (\text{สมการที่ 2.11})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้น (Pa)
	σ_0	คือ ความเค้นเฉือนสูงสุด
	ω_t	คือ ความถี่ที่เวลาใดๆ
	δ	คือ มุมต่างเฟส

วัสดุยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Ideal elastic material) ความเค้นที่ตอบสนองต่อความเครียดแบบสั้นจะทำมุมต่างเฟส $\delta = 0$ องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ก) ความเค้นที่ตอบสนองมีสมการเป็นดังสมการที่ 2.12

$$\sigma = G\gamma_0 \sin(\omega_t) \quad (\text{สมการที่ 2.12})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้น
	γ_0	คือ ความเครียดเฉือนสูงสุด
	G	คือ Elastic modulus

วัสดุไหลหนืดสมบูรณ์ (Ideal viscous material) ความเค้นที่ตอบสนองต่อความเครียดแบบสั้นจะทำมุมต่างเฟส $\delta = 90$ องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ค) ความเค้นที่ตอบสนอง มีสมการเป็นดังนี้

$$\sigma = \eta\omega_0 \sin(\omega_t + 90) \quad (\text{สมการที่ 2.13})$$

เมื่อ	σ	คือ ความเค้น
	γ_0	คือ ความเครียดเฉือนสูงสุด
	ω_t	คือ ความถี่ที่เวลาใดๆ
	η	คือ ความหนืด

วัสดุวิสโคอิลาสติกสามารถแสดงสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นและวัสดุไหลหนืด ที่ตอบสนองต่อการสั่น ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ได้ในค่า Complex modulus: G^*

$$G^* = G' + G'' \quad (\text{สมการที่ 2.14})$$

เมื่อ G' คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) จะมีเฟสเดียวกับเฟสจริงของความเครียด แสดงถึงสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือ Elastic modulus โดยวัสดุจะสะสมพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปไว้ภายในวัสดุ เพื่อใช้ในการคืนสู่รูปเดิม (Storage partition) เมื่อถอนแรงเค้น (Stress) และแสดง Solid-body like behavior ของวัสดุที่ทดสอบ ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่น้ำในองค์ประกอบทั้งหมดแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ จะทำให้มีค่า Storage modulus สูงสุด อีกทั้งยังหมายถึง การมีคุณลักษณะแบบ Stiffness หรือ Rigidity ของไอศกรีมด้วย (Wildmoser และคณะ, 2005)

$$G' = (\sigma_0 / \gamma_0) \cos \delta \quad (\text{สมการที่ 2.15})$$

G'' คือ ค่าโมดูลัสหนืด (Viscous modulus) จะมีเฟสต่างจากเฟสจริง 90 องศาแสดงถึงสมบัติการไหลหนืดของวัสดุ หรือ Viscous modulus ซึ่งในส่วนี้พลังงานถูกใช้ในการสร้างและสลายพันธะตลอดเวลาที่เกิดการเปลี่ยนรูปและจะสูญเสียหายไป (Loss partition) ก่อนสิ้นสุดช่วงเวลาที่กำหนดและแสดง Viscous fluid behavior (Flowability) ของวัสดุที่ทดสอบโดยในวัสดุที่เป็น Non-elastic fluid ค่าพลังงานที่ทำให้เสียสภาพโดยรวมจะเปลี่ยนเป็นค่าความร้อน แต่ในไอศกรีมค่า Viscous modulus จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิลง ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็งและความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น Flowability จึงลดลง (Wildmoser และคณะ, 2005)

$$G'' = (\sigma_0 / \gamma_0) \sin \delta \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่า Loss tangent: $\tan \delta$ เพื่อแสดงสัดส่วนของการแสดงสมบัติการไหลหนืดต่อสมบัติการยืดหยุ่น

$$\tan \delta = G'' / G' \quad (\text{สมการที่ 2.17})$$

ค่า Loss tangent หรือค่า $\tan \delta$ เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนของการแสดงสถานะของการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น ค่า Loss tangent: $\tan \delta$ แปรผันตามความถี่ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ นี้เป็นตัวชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแก้วสู่สถานะยางได้ เนื่องจาก $0 \leq \delta \leq \pi/2$ ค่า Loss tangent หรือค่า $\tan \delta$ จึงมีค่าตั้งแต่ 0 - ∞ ถ้าค่า $\tan \delta$ มากกว่า 1 แสดงว่าวัสดุมีการไหลหนืดมากกว่าการยืดหยุ่น แต่ถ้าน้อยกว่า 1 แสดงว่าวัสดุมีการยืดหยุ่นมากกว่าการไหลหนืด (Rosenthal, 1999)

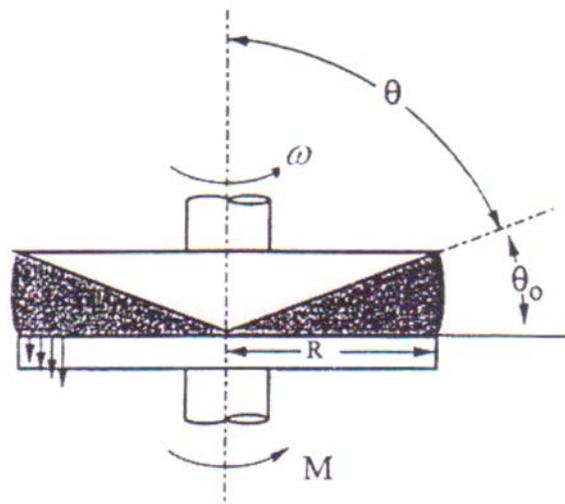
การทดสอบคุณลักษณะทางวิทยากระแส สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภท คือ 1) การทดสอบแบบให้แรงเฉือน (Steady shear testing) เช่น การทดสอบแบบหมุน (Rotational test) สามารถหาค่าโมดูลัส ค่าดัชนีการไหล ค่า Yield stress เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการควบคุมคุณภาพอาหาร การประยุกต์ใช้ในการออกแบบการผลิต และ 2) การทดสอบเชิงพลวัต (Dynamic tests) เช่น การทดสอบแบบสั่น (Oscillatory testing) ค่าที่ได้จะแสดงถึงสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, G') และค่าโมดูลัสหนืด (Viscous modulus, G'') ในการทดสอบแบบ Dynamic test จะมีการทดสอบความเหมาะสมของช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการทำการทดลอง โดยให้ค่าความเค้นหรือความเครียดแก่ตัวอย่าง ซึ่งเรียกว่า Stress sweep หรือ Strain sweep ตามลำดับ โดยช่วงของความถี่ที่เลือกคือช่วงที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสหนืดแปรผันตรงตามความถี่ โดยจะเรียกช่วงความถี่นี้ว่า Linear viscoelastic range (LVR) ซึ่งนิยมใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ

2.4.6 เครื่องมือวัดทางวิทยากระแส

เครื่องมือวัดทางวิทยากระแสสามารถแบ่งตามประเภทของแรงที่กระทำได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่เครื่องมือวัดพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear behavior) เช่น คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary viscometer) เครื่องมือวัดชนิดสั่น และเครื่องมือวัดพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear behavior) เช่น เครื่องมือวัดชนิดสั่น (Oscillating) การทดสอบแบบไดนามิกเป็นการทดสอบชนิดใช้ความเค้น หรือความเครียดต่ำ (Small deformation) เครื่องมือวัดระบบไดนามิกวิทยากระแสทั่วไปนั้นสาร ตัวอย่างจะถูกสั่นภายใต้การกระทำของความเค้นหรือความเครียดที่กำหนด ไดนามิครีโอมิเตอร์แบ่งออกเป็น

2.4.6.1 เครื่องรีโอมิเตอร์ชนิดหมุนแบบกรวยกับแผ่นเรียบ (Cone and plate rheometer)

รีโอมิเตอร์แบบกรวยกับแผ่นเรียบวัสดุที่ศึกษาจะถูกบรรจุอยู่ระหว่างกรวยและแผ่นเรียบที่ รัศมี R มียอดของกรวยอยู่บนแผ่นเรียบทำมุม α ซึ่งปกติจะน้อยกว่า 5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางของรีโอมิเตอร์แบบกรวยกับแผ่นเรียบ

ที่มา: Rao (1999)

เมื่อแผ่นเรียบอยู่นิ่ง และกรวยหมุนด้วยความเร็วคงที่ ω_0 ของไหล จะเกิดการเคลื่อนที่แบบลามินาร์ ของไหลจะแบ่งเป็นชั้นเล็กๆ ที่มีลักษณะเป็นกรวยมีจุดยอดอยู่ที่ จุดศูนย์กลางกลางของแผ่นเรียบ ของไหลที่จุดใดๆ (P) ห่างจากจุดศูนย์กลางรัศมี r และทำมุม θ กับ แกนกรวย โดยที่ θ_0 มุมของ Cone ในหน่วย rad ดังรูปที่ 2.16 จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω จะ ได้อัตราเฉือนคือ

$$\dot{\gamma} = - (d\omega / d\theta) \quad (\text{สมการที่ 2.18})$$

เนื่องจากอัตราเฉือนในเนื้อของของไหลเท่ากัน และในกรณีนี้ θ มี ค่าเข้าใกล้ 90 องศาและ α มีขนาดเล็กมาก จะได้ความเค้นเฉือนที่จะก่อให้เกิดโมเมนต์บนพื้นผิว ดังสมการต่อไปนี้

$$M = (2\pi / 3) R^3 \sigma \quad (\text{สมการที่ 2.19})$$

เมื่อ	M	คือ โมเมนต์การหมุน มีหน่วยเป็น N.m
	R	คือ รัศมีของแผ่นเรียบ มีหน่วยเป็น m
	σ	คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa
	θ_0	คือ มุมของกรวย มีหน่วยเป็น rad

$$\dot{\gamma} = \omega_0 / \alpha \quad (\text{สมการที่ 2.20})$$

- เมื่อ $\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s^{-1}
 ω_0 คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็น $rad.s^{-1}$
 α คือ มุมระหว่างกรวยและแผ่นเรียบ มีหน่วยเป็น rad

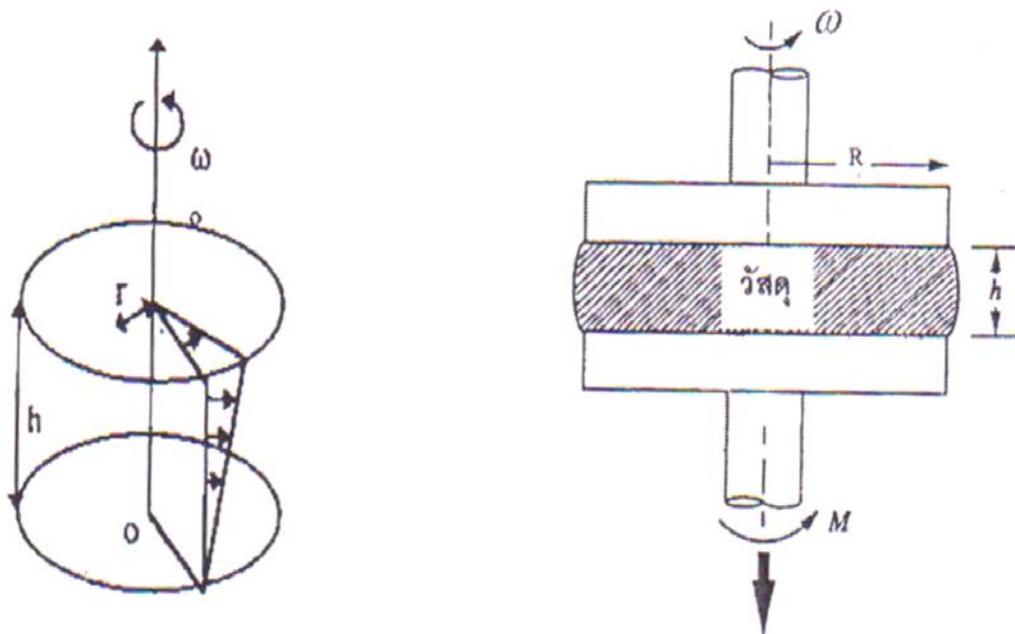
2.4.6.2 เครื่องรีโอมิเตอร์ชนิดแผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ

(Plate and Plate rheometer)

รีโอมิเตอร์แบบกรวยกับแผ่นเรียบวัสดุที่ศึกษาจะถูกบรรจุอยู่ระหว่างกรวยและแผ่นเรียบที่มีรัศมี R โดยมีแผ่นเรียบแผ่นบนเป็นตัวหมุนกลับไปกลับมาเป็นมุมขนาดเล็กแผ่นเรียบแผ่นล่างอยู่นิ่งและเป็นตัววัดแรงกระทำ ภาพตัดขวางของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2.17

ความเร็วเชิงมุมในแต่ละชั้นที่ความสูง Z มีค่าเป็น $\omega(z)$ โดยที่ $\omega(z)$ มีค่าเป็น 0 ที่แผ่นเรียบแผ่นล่าง และมีค่าเป็น $\omega_0(h)$ ที่แผ่นบนอัตราเฉือนที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างที่ตำแหน่ง (r,z) จะเป็น ฟังก์ชันของ r เท่านั้น ดังสมการที่ 21

$$\varepsilon = r(dw/dz) = r\omega_0 / h \quad (\text{สมการที่ 2.21})$$



รูปที่ 2.17 ภาพตัดขวางของแผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ

ที่มา: Rao (1999); อรุณี (2548)

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างเครื่องรีโอมิเตอร์แบบกรวยกับแผ่นเรียบ (Cone and Plate) และแผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ (Plate and Plate)

ชนิดของรีโอมิเตอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบกรวยกับแผ่นเรียบ (Cone and Plate)	อัตราเฉือนภายในของไหลจะคงที่ในทุกตำแหน่งเพราะอัตราเฉือนขึ้นกับความเร็วเชิงมุมในการสั่น (ω) และมุมของกรวย ซึ่งเป็นค่าคงที่ส่วนความเร็วเชิงมุมในการสั่นของวัสดุเท่ากันทุกตำแหน่งใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง มีความเที่ยงตรงแม่นยำสูง ทำการทดลองง่ายและใช้สารตัวอย่างน้อย	ค่าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวอย่าง ไม่เหมาะกับของไหลที่มีความหนืดต่ำมาก
แผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ (Plate and Plate)	ความหนืดสูง หรือพอลิเมอร์ที่มีสถานะหลอม มีความเที่ยงตรงแม่นยำสูง ทำการทดลองง่ายและใช้สารตัวอย่างน้อย	ค่าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวอย่าง อัตราเฉือนภายในของไหลจะคงที่ในทุกตำแหน่งเพราะอัตราเฉือนขึ้นกับความเร็วจึงมุมในการสั่น (ω)

2.5 ข้อมูลสมบัติวิทยาการกระแสของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

มีการศึกษาข้อมูลของวิทยาการกระแสในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและไอศกรีมในงานวิจัยต่างๆ โดยข้อมูลเฉพาะในการศึกษาผลของสารให้ความคงตัวในไอศกรีม

2.5.1 สมบัติวิทยาการกระแสของไอศกรีม

Goff และคณะ (1993) ศึกษาผลของสารให้ความคงตัว คือ โลคัสปีนแกมเข้มข้นร้อยละ 0.15 ผสมกับคาราจีแนนและแซนแทนแกมเข้มข้นร้อยละ 0.02 ต่อสมบัติวิทยาการกระแสในด้านความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมที่ไม่มีการใช้สารให้ความคงตัว พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีการใช้สารให้ความคงตัวสามารถเพิ่มความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมได้และยังสามารถลดการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งของ

ไอศกรีมได้มากกว่าไอศกรีมที่ไม่มีการเติมสารให้ความคงตัว ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 สัปดาห์

Flores and Goff (1999b) ศึกษาผลของสารให้ความคงตัวชนิด ซีเอ็มซี กัวร์กัม และแซนแทนกัมต่อสมบัติทางวิทยาการแช่ของไหลในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม พบว่า สารให้ความคงตัวทุกชนิดมีผลต่อพฤติกรรมกรรมกรไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยส่งผลให้มีพฤติกรรมกรไหลแบบ Non-Newtonian ในขณะที่ไอศกรีมที่ไม่สารให้ความคงตัวแสดง พฤติกรรมกรไหลเป็นแบบ Newtonian โดยพบว่าที่ความหนืดปรากฏของไอศกรีมที่ใช้สารให้ ความคงตัวชนิดแซนแทนแสดงความหนืดปรากฏน้อยกว่าสารให้ความคงตัวชนิดอื่น

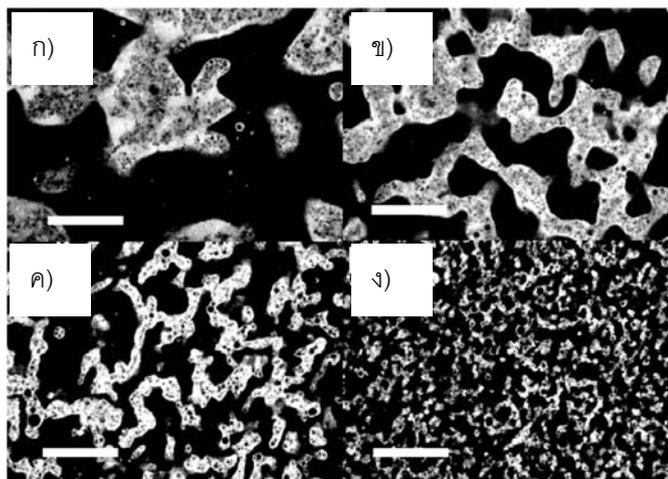
Bolliger และคณะ 2000 ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวิสโคอี-ลาสติก (Viscoelasticity) ของสารให้ความคงตัวในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ต่อการโตของผลึก น้ำแข็งโดยแปรระดับความเข้มข้นของกัวร์กัม (Guar gum) จากร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 0.25 พบว่า เมื่อเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของกัวร์กัม อัตราการตกผลึกของผลึกน้ำแข็งมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, G') ของไอศกรีมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ของกัวร์กัมสูงขึ้น

Minhas และคณะ (2002) พบว่าเมื่อใช้สารให้ความคงตัวชนิดโซเดียม-อัลจิเนต เจลาตินและกัวร์กัม เปรียบเทียบกับไอศกรีมที่ไม่ใช้สารให้ความคงตัว พบว่าโดยไอศกรีม มิกซ์ทุกชนิดจะมีพฤติกรรมกรไหลแบบ Shear thinning ไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวแสดงค่า Consistency coefficient สูงกว่าไอศกรีมที่ไม่มีการเติมสารให้ความคงตัว และไอศกรีมที่ใช้ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้โซเดียมอัลจิเนตแสดงค่า Consistency coefficient สูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้เจลาติน และกัวร์กัมตามลำดับ นอกจากนี้ผู้วิจัยยัง พบว่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีผลต่อการยอมรับในด้านความหนืด เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของไอศกรีมที่ได้

Vega และ Goff (2005) ผลของระดับความเข้มข้นของสารให้ความคงตัว ชนิดแคปปา - คาราจีแนน (*keppa - carrageenan*) ร้อยละ 0 - 0.02 ที่ใช้ร่วมกับสารให้ความ คงตัวชนิดไลคัสปีนกันเข้มข้นร้อยละ 0.14 ต่อสมบัติวิทยาการแช่ของโปรตีนเฟส (Protein phase) และซีรัมเฟส (Serum phase) ภายหลังการแยกเฟส (Protein-polysaccharide phase separation) ของซอฟท์เสิร์ฟส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (Soft-serve ice cream mix) โดยถ่ายภาพจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดคอนโฟคัล (Confocal scanning laser microscopy, CSLM) พบว่าก่อนการแยกเฟสส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมชนิดซอฟท์เสิร์ฟที่มีการเติม

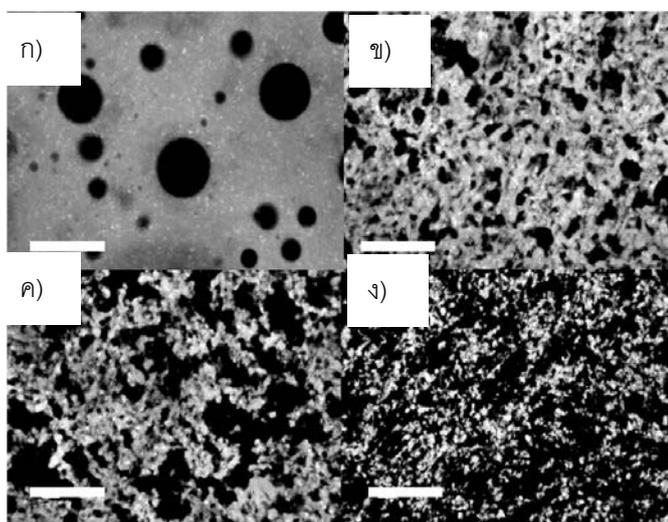
แคปป่า – คาราจีแนนที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้เพิ่มการกระจายตัวของโปรตีนในซีรัมได้ดีมากขึ้น ดังรูปที่ 2.18 เมื่อทิ้งไว้ 21 วันที่อุณหภูมิ 5 °C เกิดการแยกชั้นเป็นส่วนของโปรตีนและส่วนซีรัม แล้วนำส่วนที่แยกชั้นมาวิเคราะห์พบว่าในส่วนของซีรัมเฟสอิทธิพลของแคปป่า – คาราจีแนนทำให้ปริมาณของเหลวที่แยกชั้นลดลงได้ แต่ไม่มีผลต่อพฤติกรรมส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซอฟท์เสิร์ฟ โดยทุกสูตรแสดงค่า G'' สูงกว่า G' โดยแสดงสมบัติเป็นสารละลายเจือจาง (Dilute solution) สำหรับส่วนโปรตีนพบว่าการเติมแคปป่า – คาราจีแนนทำให้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นและสามารถกักเก็บส่วนน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากขึ้น (รูปที่ 2.19) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของแคปป่า – คาราจีแนนมากกว่าร้อยละ 0.0125 ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซอฟท์เสิร์ฟจะแสดงพฤติกรรมแบบเจลอ่อน (Weak – gel) โดยค่า G' สูงกว่า G'' ซึ่งแสดงถึงความเป็นของแข็งสูงกว่าของเหลวของตัวอย่าง

Chavez-Montes และคณะ (2007) ศึกษาผลของสารให้ความคงตัว 2 ชนิดคือแซนแทนกัมและกัวร์กัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.15 ทั้งที่ใช้เดี่ยวกับใช้ร่วมกับอิมัลซิไฟเออร์ 2 ชนิดคือทวิน 80 และหรือโมโนกลีเซอไรต์ ที่ความเข้มข้น 0.2 ต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) หรือ G' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมพบว่า ไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัมแสดงค่า G' สูงกว่ากัวร์กัมเมื่อใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดเดียวกัน เนื่องจากแซนแทนกัมทำให้ค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของอิมัลซิไฟเออร์พบว่าไอศกรีมที่ใช้ทวิน 80 ร่วมกับโมโนกลีเซอไรต์เนื่องจากส่งเสริมการเกิดกระบวนการ Partial coalescence ของเม็ดไขมัน และเพิ่มความสามารถในการดูดซับอากาศไว้ที่รอยต่อระหว่างน้ำและอากาศ



รูปที่ 2.18 ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมชนิดซอฟท์เสิร์ฟก่อนการแยกเฟสที่ใช้ความเข้มข้นของแคปปี้ – คาราจีแนนต่างๆ คือ ก) คือไม่มีการใช้แคปปี้ – คาราจีแนน, ข) ร้อยละ 0.0125, ค) ร้อยละ 0.015 และ ง) ร้อยละ 0.02 โดยพื้นที่สีขาวคือ ส่วนของโปรตีนเฟส พื้นที่สีดำคือ บริเวณซีรัมเฟสและแท่งสีขาวคือความยาว 40 μm

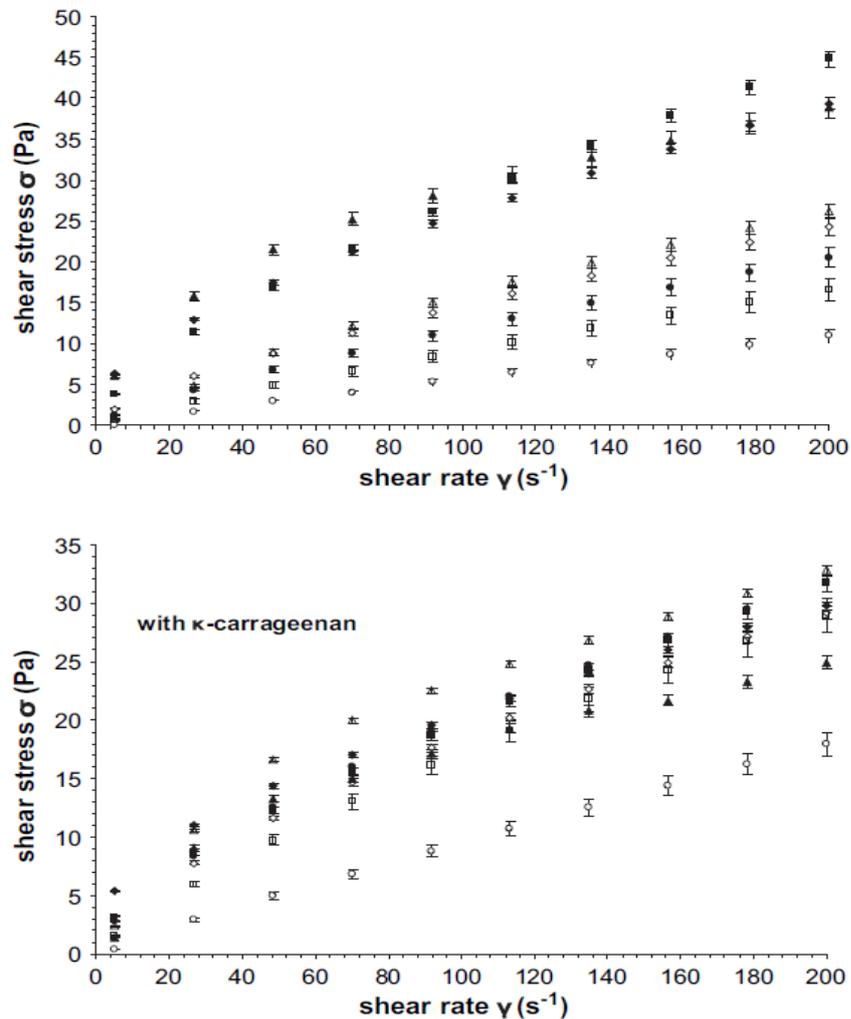
ที่มา ; Vega และ Goff (2005)



รูปที่ 2.19 โปรตีนเฟสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมซอฟท์เสิร์ฟก่อนการแยกเฟสที่ใช้ความเข้มข้นของแคปปี้ – คาราจีแนนต่างๆ คือ ก) คือไม่มีการใช้แคปปี้ – คาราจีแนน, ข) ร้อยละ 0.0125, ค) ร้อยละ 0.015 และ ง) ร้อยละ 0.02 โดยพื้นที่สีขาวคือ ส่วนของโปรตีนเฟส พื้นที่สีดำคือบริเวณซีรัมเฟสและแท่งสีขาวคือความยาว 40 μm

ที่มา ; Vega และ Goff (2005)

Soukoulis และคณะ (2008) ศึกษาผลของชนิดสารให้ความคงตัว 5 ชนิด ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี กัวร์กัม โซเดียมแอลจีเนต และแซนแทนกัม ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.2 ทั้งที่ใช้เดี่ยวและร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน โดยในการผสมสารให้ความคงตัวร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน ใช้อัตราส่วน 9:1 ต่อสมบัติวิทยากระแสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมและการยอมรับของผู้บริโภค ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกชนิดแสดงให้เห็นพฤติกรรมแบบ Shear thinning (รูปที่ 2.20) เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวพบว่าความเข้มข้นต่ำ รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นเฉือน (Shear stress) กับอัตราเฉือน (Shear rate) เป็นเส้นตรงมากกว่าที่ความเข้มข้นสูงแสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำพฤติกรรมการไหลจะเข้าใกล้แบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) มากกว่าที่ความเข้มข้นสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารให้ความคงตัว ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning มากขึ้น และจากรูปแบบความสัมพันธ์แบบ Power law พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกสูตรแสดงค่าดัชนีการไหลค่า n ลดลง เมื่อเพิ่มเข้มข้นของสารให้ความคงตัว แสดงว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning มากขึ้น และพบว่าค่าดัชนีความคงตัวหรือค่า K มีค่าสูงขึ้น โดยผู้วิจัยอธิบายว่าการเพิ่มความเข้มข้นสารให้ความคงตัวทำให้รูปแบบการจัดเรียงของพอลิแซ็กคาไรด์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจับน้ำได้มากขึ้น ทำให้มีแรงต้านทานการไหลมากขึ้น ผลลัพธ์จึงมีค่า K สูงขึ้น

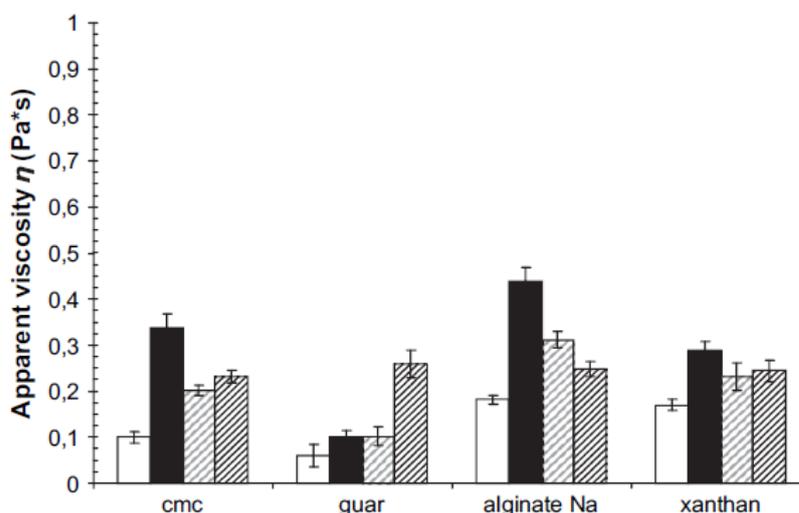


รูปที่ 2.20 พฤติกรรมทางสมบัติวิทยากระแสของไฮดรอกซ์ที่เติมและไม่เติมแป้ง - คาราจีแนน โดย
 สี่เหลี่ยมโปร่งใสคือ ซีเอ็มซี วงกลมโปร่งใสคือ กัวร์กัม สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนโปร่งใสคือ
 แชนแทน สามเหลี่ยมโปร่งใสคือ โซเดียมแอลจีเนต สี่เหลี่ยมทึบคือ CMC วงกลมทึบ
 คือ กัวร์กัม สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนทึบคือ แชนแทน สามเหลี่ยมทึบคือ โซเดียมแอล-
 จีเนต

ที่มา: Soukoulis และคณะ (2008)

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการใช้แป้ง-คาราจีแนน พบว่าการเติมแป้ง-คาราจีแนนร่วมกับสารให้ความคงตัวชนิดอื่น ทำให้ค่า K มีแนวโน้มสูงขึ้น ค่า n มีแนวโน้มลดลง สำหรับอิทธิพลของสารให้ความคงตัวพบว่า โซเดียมแอลจีเนตและแชนแทนก็มีพฤติกรรมเป็น Shear thinning สูงกว่ากัวร์กัมและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ผู้วิจัยอธิบายว่าเป็นเพราะ

โซเดียมแอลจีเนตมีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับแคลเซียมในนมได้ กัทำให้เกิดเป็นการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจนเกิดเป็นโครงสร้างเจลทำให้ความหนืดปรากฏสูงขึ้น ในขณะที่เซนแทนกัมที่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบกลายเป็นเจลอ่อน (Weak gel) ได้ แต่ลักษณะของเจลเซนแทนกัมมีความสามารถเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (Free flow) ของโมเลกุลได้ดีกว่าเจลของแอลจีเนต จึงแสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning น้อยกว่าแอลจีเนต (ค่า n สูง) ในทางกลับกันกัวร์กัมและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแสดงรูปร่างเป็นแบบ Random coil ซึ่งโมเลกุลเคลื่อนที่อย่างอิสระมาก จึงแสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning ได้น้อย (ค่า n สูง) สำหรับค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวร้อยละ 0.2 ของโซเดียมแอลจีเนตและเซนแทนกัมแสดงค่าความหนืดสูงสุด (รูปที่ 2.21) เป็นผลมาจากการเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างเจลทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำอิสระถูกจำกัด ส่งผลให้สามารถต้านทานการไหลได้มากขึ้น ความหนืดจึงในระบบเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นความหนืดของระบบยังขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงหน้าที่ของสารให้ความคงตัวที่ใช้ด้วย หากสารให้ความคงตัวมีรูปร่างแบบ Random coil ลอยอยู่ในเมทริกซ์ของอาหารจะแสดงความหนืดที่น้อยกว่าสารให้ความคงตัวที่สามารถเกิดเจลได้ นอกจากนี้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส



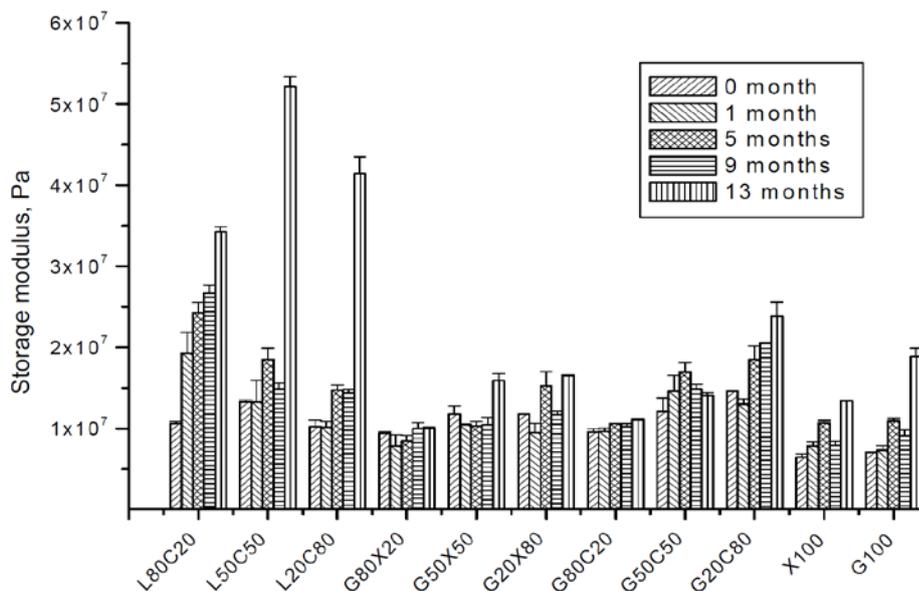
รูปที่ 2.21 ความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่อัตราเฉือนเท่ากับ 50 s^{-1} โดยสี่เหลี่ยมโปร่งใสคือความเข้มข้นร้อยละ 0.1 สี่เหลี่ยมทึบคือความเข้มข้นร้อยละ 0.2 สี่เหลี่ยมลายขวางอ่อนคือใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.01 สี่เหลี่ยมลายขวางเข้มคือใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.02

ที่มา: Soukoulis และคณะ (2008)

ในด้านความแข็ง (Hardness) ของไอศกรีมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ในการวัดถึงการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีม และยังสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของสมบัติวิทยากระแส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยให้เหตุผลว่าสารให้ความคงตัวสามารถควบคุมการเกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกน้ำแข็งได้โดยผ่านกลไก ได้แก่ การเพิ่มความหนืดในระดับจุลภาค (Microviscosity) และการเกิดเจล (Cryogelation) ทั้ง 2 กลไกเกิดขึ้นจากความสามารถของสารให้ความคงตัวในการควบคุมการแพร่ของน้ำในส่วนที่ยังไม่แข็งตัว (Unfrozen phase) รูปร่างและลักษณะของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีความเกะกะ (Steric hindrance) และความสามารถในการอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้าง สำหรับในผลของสมบัติวิทยากระแสต่อต้านการยอมรับผู้วิจัย พบว่าไอศกรีมที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning สูง (ค่า n ต่ำ) สามารถส่งเสริมให้การปลดปล่อยกลิ่นรสดีขึ้น ทำให้คะแนนความเข้มข้นของกลิ่นรสสูงขึ้น

Klesment และคณะ 2011 ศึกษาอิทธิพลของสารให้ความคงตัวและ สารให้ความคงตัว 4 ชนิด ได้แก่ โลคัสปีนัม แคปไซโอออตา-คาราจีแนน กัวร์กัมและแซนแทนกัม ต่อคุณภาพของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีม โดยใช้ความเข้มข้นของสารให้ความคงตัวร้อยละ 2 และมีการใช้สารให้ความคงตัวทั้งแบบชนิดเดี่ยวและใช้ร่วมกัน 2 ชนิด ทำการติดตามวัดสมบัติวิทยากระแสในรูปของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, G') เป็นเวลา 13 เดือน พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิไม่คงที่ทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาด (Recrystallization) ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่าความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามสารให้ความคงตัวที่แตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของผลึกแตกต่างกันออกไปด้วย โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') ของไอศกรีมพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') ของไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัมนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด แสดงว่าสามารถยับยั้งการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งได้ดี อาจเป็นเพราะสารให้ความคงตัวทั้ง 2 ชนิดสามารถเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งสามารถทนต่อแรงกดจากผลึกน้ำแข็งได้มากกว่าเจลที่แข็ง จึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำเพื่อไปที่ผิวของน้ำแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน เจลที่เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะแข็ง มักเปราะแตกหักได้ง่าย อาจถูกทำลายได้โดยผลึกน้ำแข็ง ทำให้ไม่สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำเพื่อไปที่ผิวของน้ำแข็ง จึงแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') สูงกว่าไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (รูปที่ 2.22) แต่อย่างไรก็ตามไอศกรีม

ที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกั้วร์กัมร่วมกับคาราจีแนนที่สัดส่วน 80:20 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') น้อยที่สุด และไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดโลคัสปีนัมร่วมกับคาราจีแนนแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') สูงที่สุด



รูปที่ 2.22 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (G') ของไอศกรีมที่อายุการเก็บต่างๆ โดย C คือคาราจีแนน G คือกั้วร์กัม L คือโลคัสปีนัม และ X คือแซนแทนกัน

ที่มา: Klesment และคณะ (2011)

แม้ว่าจะมีการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของสารให้คงตัวในไอศกรีมมากมาย แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายสมบัติเชิงหน้าที่ของสารให้ความคงตัวได้ชัดเจนทั้งหมด เพราะผลของสารให้ความคงตัวไม่ได้มีผลเพียงด้านใดด้านหนึ่ง แต่มีต่อลักษณะหลายด้านซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กัน เนื่องจากสารให้ความคงตัวแต่ละชนิดแสดงสมบัติเชิงหน้าที่แตกต่างกัน

ดังนั้นโพรไบโอติกและชนิดของสารให้ความคงตัวที่เลือกใช้จึงเป็นปัจจัยสำคัญของการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติก เนื่องจากโพรไบโอติกและสารให้ความคงตัว มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ความหนืดของส่วนผสมไอศกรีม ขนาดของผลึกน้ำแข็ง การรอดชีวิตของโพรไบโอติก กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภค

จากการสืบค้นข้อมูล พบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารให้ความคงตัวและโพรไบโอติกต่อผลิตภัณฑ์ไอศกรีมโพรไบโอติกมาก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้

จึงเน้นการศึกษาการรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* 01 ในไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดต่างๆ ลักษณะสมบัติวิทยากระแสและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมโพรไบโอติกไขมันต่ำ อันจะเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อการนำไปใช้ในการเลือกใช้สารให้ความคงตัวในการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติก และนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติกในระดับอุตสาหกรรม