

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

4.1.1 ค่า pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ค่า pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้ง 8 สูตรแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่า pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติก มีค่า pH ต่ำกว่าของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมโพรไบโอติกทุกสูตร ($p \leq 0.05$) โดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกแสดงค่า pH อยู่ระหว่าง 6.53 – 6.62 ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติม *L. casei* 01 แสดงค่า pH อยู่ช่วง 6.75 - 6.76

ตารางที่ 4.1 pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

สูตร	pH
PX	6.62 ^b ± 0.03
PXC	6.53 ^c ± 0.03
PG	6.59 ^{bc} ± 0.05
PGC	6.57 ^{bc} ± 0.05
X	6.76 ^a ± 0.02
XC	6.76 ^a ± 0.09
G	6.75 ^a ± 0.01
GC	6.75 ^a ± 0.01

a, b, c แสดงความแตกต่างภายในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

การที่ pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่าต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุม เป็นผลมาจากในสูตรการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติกมีการเติมนมผสมอินูลินที่ผ่านการหมักโดย *L. casei* 01 จนกระทั่งมีปริมาณเชื้อเริ่มต้นประมาณ 10^8 cfu/ml ในระหว่าง *L. casei* 01 เจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน ก็จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสในนม เป็นกรดแลคติก โดยผ่านกลไก Lactic acid fermentation กลไกนี้เริ่มจากการเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดคือ น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลกาแลคโตส ซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการไกลโคไลซิสได้เป็นกรดไพรูเวต จากนั้นกรดไพรูเวตส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก และกรดไพรูเวตบางส่วนจะเข้าสู่วัฏจักรกรดซิตริก (Citric cycle) ได้เป็นกรดชนิดอื่นอย่าง กรดมาริก กรดฟูมาริก และสารอินทรีย์อื่นๆ (Diaz - Muniz และคณะ, 2006) ดังนั้นเมื่อนำนมที่ผ่านการหมักมาเทกลับเข้าไปในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม จึงทำให้ pH มีค่าต่ำกว่าสูตรควบคุม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Akin และคณะ (2007) ที่ผลิตไอศกรีมโพรไบโอติก โดยการแบ่งนมมาหมักด้วยเชื้อ Lactic acid bacteria ก่อนนำกลับไปผสมกับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม พบว่าค่า pH ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่าต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่เติมโพรไบโอติก

4.1.2 ปริมาณโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* 01 ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ปริมาณของ *L. casei* 01 ที่ยังมีชีวิตในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยปริมาณของ *L. casei* 01 ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกทุกสูตรมีจำนวนอยู่ระหว่าง 7.61 - 7.69 log cfu/ml และไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าปริมาณโพรไบโอติกเริ่มต้นของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ *L. casei* 01 ที่มีชีวิตในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติก

สูตร	จำนวน <i>L. casei</i> 01 ^{ns} (log cfu/ml)
PX	7.63 ± 0.05
PXC	7.67 ± 0.05
PG	7.69 ± 0.06
PGC	7.61 ± 0.04

ns คือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p > 0.05)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แทนแทนกัน
 แทนกันร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัม
 ร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

4.1.3 ลักษณะกายภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การทดสอบลักษณะกายภาพของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้ง 8 สูตร ศึกษาโดยทำการวัดค่าทางสมบัติวิทยากระแส 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบแบบให้แรงเฉือน (Steady shear testing) และการทดสอบเชิงพลวัต (Dynamic หรือ Oscillation testing) ข้อมูลการศึกษาสมบัติวิทยากระแส มีประโยชน์ในด้านการออกแบบการผลิต และการควบคุมการผลิต การออกแบบและกำหนดเครื่องจักรกล หรือใช้เป็นแนวทางช่วยในการปรับเครื่องจักรกลที่มีอยู่เดิม ให้เหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ คำนวณพลังงาน และต้นทุนที่ใช้ในการผลิต

4.1.3.1 การทดสอบแบบให้แรงเฉือน (Steady shear testing)

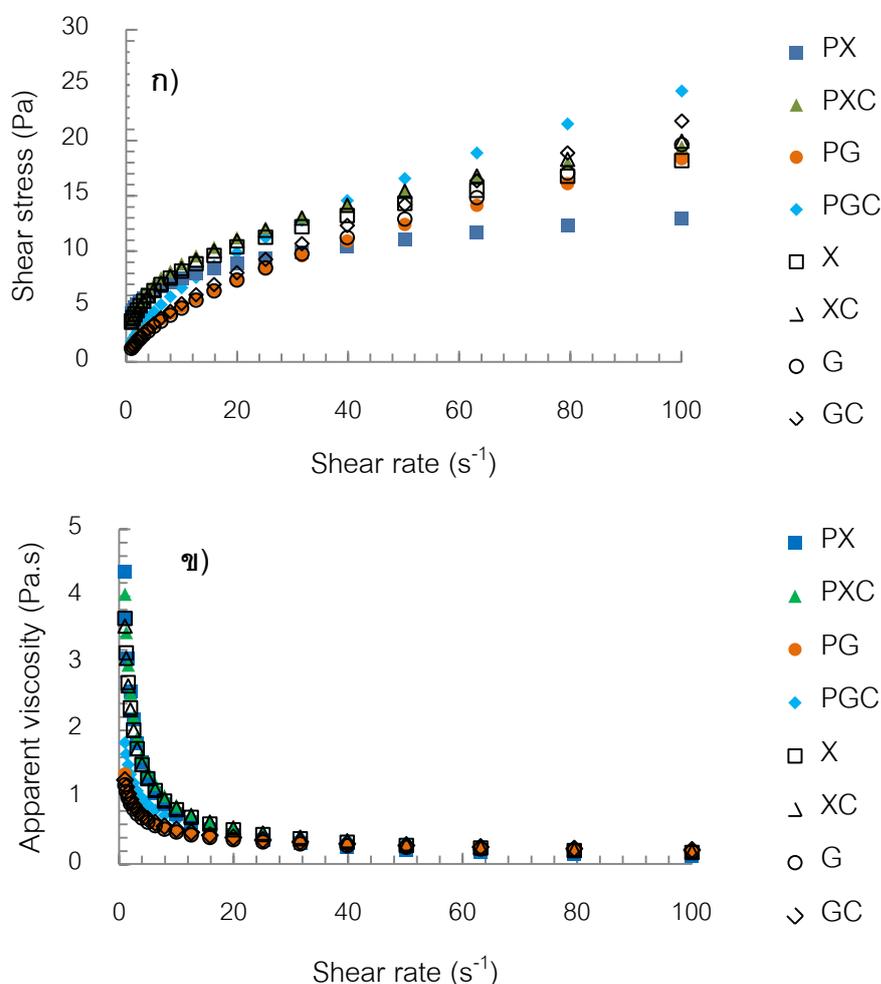
การทดสอบแบบให้แรงเฉือนเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเฉือน (Shear rate) และแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ทำได้โดยการเพิ่มระดับอัตราเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$, s⁻¹) ตั้งแต่ 1 ถึง 100 s⁻¹ แล้วสังเกตการตอบสนองของแรงเค้นเฉือน (Shear stress, σ , Pa) ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในหาค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity, η , Pa.s) จากความชันของกราฟในช่วงอัตราเฉือนตั้งแต่ 1 ถึง 100 s⁻¹ หรือใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ผลการทดสอบสมบัติวิทยากระแสแบบให้แรงเฉือนส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแสดงดังรูปที่ 4.1 (ก-ข) พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้ง 8 สูตรแสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning โดยพฤติกรรมการไหลในลักษณะนี้คือความหนืดของของไหลจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนมากขึ้น Farhoosh และ Riazi (2007) อธิบายว่าพฤติกรรม Shear thinning

ส่วนใหญ่เกิดกับวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เช่น โปรตีน หรือพอลิแซ็กคาไรด์ พอลิเมอร์เหล่านี้เป็นสารที่มีโมเลกุลยาว พันกันคล้ายเส้นด้าย และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ เมื่อให้แรงเฉือนพอลิเมอร์เหล่านี้จะเกิดการเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกับแรงที่ได้รับ Steffe (1996) อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพฤติกรรม Shear thinning ขึ้นอยู่กับขนาดแรงที่ได้รับ หากได้รับแรงไม่มากพอที่จะทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โมเลกุลที่พันเกี่ยวกันจะเกิดการเคลื่อนที่ตามแรงโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างยังสามารถกักเก็บน้ำได้ ในช่วงนี้ความหนืดจะมีค่าคงที่ แต่เมื่อได้รับแรงมากขึ้นจนสามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลงได้ ส่งผลให้โครงสร้างที่พันเกี่ยวกันกระจายตัวออก ช่องว่างที่กักเก็บน้ำจึงเล็กลงหรือหายไป น้ำจึงถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก ความหนืดจึงลดลง พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นสายยาวและมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สำคัญคือ สารให้ความคงตัว (Marshall และคณะ, 2003) สารให้ความคงตัวทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยผ่านกลไกสำคัญคือความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) โดยขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารให้ความคงตัว (BahramParvar และ Mazaheri, 2011) ดังนั้นการที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแสดงพฤติกรรมเป็นแบบ Shear thinning จึงสามารถอธิบายได้โดยในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมยังไม่ได้รับแรงเฉือน สารให้ความคงตัวจะอยู่ในสภาพอิมิตัวด้วยน้ำ โมเลกุลของสารให้ความคงตัวจะมีแรงภายในเพื่อคงรูปร่างให้สมดุล และแรงระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนที่จับกับน้ำ เมื่อได้รับแรงเฉือนที่ไม่สูงมาก แรงภายในหรือแรงระหว่างโมเลกุลมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงกระทำจากภายนอกของเหลวจะแสดงลักษณะการไหลแบบ Newtonian โดยมีค่าความหนืดคงที่ แต่เมื่อได้รับแรงเฉือนสูงขึ้นแรงกระทำจากภายนอกมีอิทธิพลเหนือกว่าแรงภายในโครงสร้างของสารให้ความคงตัวทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามกระแสของการไหล และเริ่มเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับแรงเฉือนที่ได้รับ นอกจากนี้แรงจากภายนอกยังสลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสารให้ความคงตัวกับของไหลส่งผลให้แรงต้านทานการไหลลดลงหรือความหนืดมีค่าลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) กับอัตราเฉือน (Shear rate) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ข) นอกจากนี้ชี้ให้เห็นว่ามีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning โดยที่อัตราเฉือนมากขึ้นค่าความหนืดลดลงแล้ว ยังแสดงให้เห็นว่ายิ่งอัตราเฉือนสูงขึ้น ยิ่งทำให้อิทธิพลของสารให้ความคงตัวลดลง เพราะค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมใกล้เคียงกันมากขึ้น ดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมที่เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตมีอัตราเฉือนสูงถึง $10 - 1,000 \text{ s}^{-1}$ (Steffe, 1996) ยิ่งทำให้ความหนืดปรากฏของส่วนผสม

ทำไอศกรีมไม่แตกต่างกัน แสดงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติกในระดับอุตสาหกรรมโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอัตราเฉือน (Shear rate) กับแรงเค้นเฉือน (Shear stress) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) โดย ก) คือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Shear rate) กับแรงเค้นเฉือน (Shear stress) และ ข) คือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Shear rate) กับความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้ง 8 สูตร ได้แก่ สูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่เติมสารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (PX) แซนแทนกันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PXC) กัวร์กัน (PG) และ กัวร์กันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PGC) และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่เติมสารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (X) แซนแทนกันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (XC) กัวร์กัน (G) และ กัวร์กันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (GC)

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นเฉือน (Shear stress) กับ อัตราเฉือน (Shear rate) สามารถอธิบายได้จากรูปแบบสมการแบบ Herchel – Bulkey ซึ่งประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ 3.1

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดย	σ	คือ แรงเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น Pa
	K	คือ ดัชนีความคงตัว (Consistency index) มีหน่วยเป็น Pa.s ⁿ
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s ⁻¹
	n	คือ ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index)
	σ_0	คือ ความเค้นคราก มีหน่วยเป็น (Yield stress, Pa)

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ทางสมบัติวิทยากระแสของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

สูตร	σ_0	n	K (Pa.s ⁿ)	η_{50} (Pa.s)
PX	2.907 ^c ± 0.057	0.557 ^e ± 0.014	1.467 ^b ± 0.423	0.318 ^a ± 0.01
PXC	2.578 ^d ± 0.054	0.500 ^f ± 0.012	1.961 ^a ± 0.474	0.328 ^a ± 0.01
PG	0.444 ^g ± 0.066	0.624 ^{cd} ± 0.034	0.930 ^{de} ± 0.219	0.224 ^c ± 0.01
PGC	0.597 ^f ± 0.061	0.657 ^{bc} ± 0.011	1.212 ^c ± 0.288	0.327 ^a ± 0.02
X	3.822 ^a ± 0.030	0.657 ^{bc} ± 0.012	0.893 ^e ± 0.373	0.311 ^{ab} ± 0.01
XC	3.153 ^b ± 0.026	0.600 ^d ± 0.013	1.165 ^{cd} ± 0.339	0.306 ^{ab} ± 0.01
G	0.777 ^e ± 0.055	0.713 ^a ± 0.008	0.718 ^e ± 0.160	0.249 ^{bc} ± 0.01
GC	0.648 ^f ± 0.062	0.695 ^{ab} ± 0.005	0.974 ^{cde} ± 0.125	0.308 ^{ab} ± 0.00

a, b, c

แสดงความแตกต่างภายในแถวตั้งเดียวกัน (p < 0.05)

PX, PXC, PG และ PGC

คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัม ร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC

คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัม ร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม (ตารางที่ 4.3) ค่าความเค้นคราก (Yield stress, σ_0) ของส่วนผสมไอศกรีมอยู่ในช่วง 0.444 – 3.822 Pa เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของชนิดของสารให้ความคงตัวต่อค่า Yield stress พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แทนแทนกัมทั้งสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติกทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปไซ – คาราจีแนน มี Yield stress สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมทั้งสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติกทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปไซ – คาราจีแนน ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่า Yield stress เป็นค่าที่แสดงพลังงานที่น้อยที่สุด ที่ทำให้วัสดุเริ่มเคลื่อนที่ หรือเป็นค่าแรงสูงสุดที่โครงสร้างทนแรงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย แสดงให้เห็นว่าแทนแทนกัมมีโครงสร้างที่เคลื่อนที่ได้ยากและทนต่อแรงได้มากกว่ากัวร์กัม ทั้งนี้เป็นเพราะแทนแทนกัมสามารถเกิด Self association จนเป็นโครงสร้างแบบเจลอ่อนได้ (Weak gel) ซึ่งโครงสร้างเจลอ่อนนี้มีแรงยึดเหนี่ยวภายในและแรงระหว่างโมเลกุลสูง (Morris และคณะ, 1977) สามารถทนต่อแรงและเกิดการไหลได้ยาก ค่า Yield stress ที่คำนวณได้จึงมีค่าสูง ในขณะที่กัวร์กัมแสดงโครงสร้างแบบ Random coil (Morris และคณะ, 1981) ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวภายในโครงสร้างน้อย โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งเกิดการไหลได้ง่าย ค่า Yield stress จึงมีค่าต่ำกว่าแทนแทนกัม

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติมแคปไซ – คาราจีแนนต่อค่า Yield stress พบว่าการเติมแคปไซ – คาราจีแนนร่วมกับแทนแทนกัมหรือกัวร์กัมลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ทำให้ค่า Yield stress ต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ($p \leq 0.05$) ยกเว้นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกัวร์กัมที่แสดงค่าลดลงเมื่อใช้ร่วมกับแคปไซ – คาราจีแนน

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม *L. casei* 01 ลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกันต่อค่า Yield stress พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกมีค่า Yield stress ต่ำกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$)

ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทุกสูตรแสดงค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index, n) ต่ำกว่า 1 หมายถึงส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning โดยค่า Flow behavior index ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอยู่ในช่วง 0.500 – 0.713 และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปไซ – คาราจีแนน มีแนวโน้มแสดงค่า Flow behavior index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมแบบเดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน ทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก แสดงให้เห็นว่า

เมื่อส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กั้วร็กัมได้รับแรงเฉือน โครงสร้างที่เป็น Random coil ของกั้วร็กัมสามารถตอบสนองต่อแรงได้อย่างรวดเร็ว และเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางของการไหลได้ง่าย ทำให้ค่า Flow behavior index ของผลิตภัณฑ์เข้าใกล้ 1 และมีค่าสูงกว่าแซนแทนกัม ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soukoulis และคณะ (2008) ซึ่งได้ทำงานวิจัยในไอศกรีมที่ไม่เติมโพรไบโอติก พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กั้วร็กัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน แสดงค่า Flow behavior index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติมแคปป์า – คาราจีแนนลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมต่อค่า Flow behavior index พบว่าการเติมแคปป์า – คาราจีแนนร่วมกับแซนแทนกัมหรือกั้วร็กัมลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ทำให้ค่า Flow behavior index ต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ที่เป็นเช่นนี้เพราะแคปป์า – คาราจีแนนสามารถเกิดโครงสร้างเจลอ่อน (Weak gel) เช่นเดียวกับแซนแทนกัม นอกจากนี้ประจุลบของหมู่ซัลเฟตจากแคปป์า – คาราจีแนน ยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกของเคซีนไมเซลล์หรือแคปป์า – เคซีน บริเวณตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 97 - 112 (Dagleish และ Morris, 1988; Snoeren และคณะ, 1976; Snoeren และคณะ, 1975) เกิดเป็นโครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงสามารถทนต่อแรงได้มากขึ้น และเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางของการไหลได้ยาก ทำให้ค่า Flow behavior index มีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียว

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม *L. casei* 01 ลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกัน ต่อค่า Flow behavior index พบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกมีค่า Flow behavior index ต่ำกว่าสูตรควบคุม แสดงถึงการจัดเรียงตัวตามทิศทางของการไหลของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกเป็นไปได้ยากกว่าสูตรควบคุม จากงานวิจัยของ Lee และ Lucey (2004) ที่ศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของเจลโยเกิร์ต พบว่าเมื่อ pH ของโยเกิร์ตลดต่ำลงในระหว่างการบ่ม โครงสร้างในระดับจุลภาค (Microstructure) แสดงให้เห็นถึงโครงข่ายของโปรตีนเคซีนที่มีความหนาแน่นและเชื่อมต่อกันมากขึ้น นอกจากนี้ pH ยังมีผลต่อโครงสร้างของโปรตีนเวย์ Damodaran และ Paraf (1997) อธิบายว่า ณ สภาวะที่มี pH ต่ำหรือมีประจุบวกในระบบมากขึ้น ประจุบวกที่มากขึ้นเกิดอันตรกิริยากับประจุลบที่ผิวของโปรตีนเวย์ ทำให้แรงผลักระหว่างประจุที่ผิวลดลง โปรตีนเวย์จึงเคลื่อนที่ใกล้กันมากขึ้น หรืออาจเชื่อมต่อกันเป็นร่างแห ดังนั้นส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

โพรไบโอติกซึ่งมีค่า pH ต่ำกว่าสูตรควบคุม น่าจะมีโครงข่ายของโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ตีที่มีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ส่งผลให้สามารถทนต่อแรงได้มากขึ้น และเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางของการไหลได้ยาก ค่า Flow behavior index ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกจึงมีค่าต่ำลง

ค่าดัชนีความคงตัว (Consistency index, K) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความคงตัวของโครงสร้างอาหาร หรือเป็นความหนืด ณ สภาพปกติของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่มีการให้แรงลงไป (BahramParvar และคณะ, 2010) จากผลการทดลองพบว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมแสดงค่า Consistency index อยู่ในช่วง 0.718 – 1.961 Pa.sⁿ (ตารางที่ 4.3) โดยส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน แสดงค่า Consistency index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติกที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกัวร์กัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า-คาราจีแนน ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soukoulis และคณะ (2008) ซึ่งพบว่าไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า-คาราจีแนน แสดงค่า Consistency index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมทั้งใช้เดี่ยวและใช้ร่วมกับแคปป์า-คาราจีแนน ทั้งนี้ผู้วิจัยให้เหตุผลว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมมีความสามารถในการเกิดโครงสร้างเจลอ่อน (Weak gel) ทำให้รูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างมีความหนาแน่นสูงขึ้น ค่า Consistency index จึงมีค่าสูง ในขณะที่กัวร์กัมแสดงโครงสร้างรูปร่างเป็นแบบ Random coil ซึ่งโครงสร้างมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมมีค่า Consistency index ต่ำกว่าไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัม

และเมื่อเปรียบเทียบบิทธิพลของการเติมแคปป์า – คาราจีแนนต่อค่า Consistency index พบว่าการเติมแคปป์า – คาราจีแนนร่วมกับแซนแทนกัมหรือกัวร์กัมลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ทำให้ค่า Consistency index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการเติมแคปป์า – คาราจีแนน ทำให้โครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความหนาแน่นและมีความคงตัวสูงขึ้น เนื่องจากความสามารถในการเกิดโครงสร้างเจลอ่อนของแคปป์า – คาราจีแนน ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีความซับซ้อน มีแรงยึดเหนี่ยวภายในและแรงระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความหนาแน่นและความคงตัวสูงขึ้น ค่า Consistency index จึงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนของแคปป์า – คาราจีแนน ยังทำให้โครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีโครงข่าย

ระหว่างโปรตีนและแคปไซม์ – คาราจีแนนหนาแน่นขึ้น (Dalgleish และ Morris, 1988; Snoeren และคณะ, 1976; Snoeren และคณะ, 1975) ค่า Consistency index จึงมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม *L. casei* 01 ลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกันต่อค่า Consistency index พบว่าการเติม *L. casei* 01 มีแนวโน้มทำให้ค่า Consistency index สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของ pH ส่งผลให้โครงสร้างร่างแหของโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ค่า Consistency index ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกจึงสูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกเมื่อใช้แคปไซม์ – คาราจีแนนร่วมด้วย ส่งผลให้ค่า Consistency index สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรอื่น ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเกิดจากประจุบวกที่ได้จากกระบวนการหมักกรดแลคติกของ *L. casei* 01 สามารถจับกับประจุลบที่ผิวของเคซีนไมเซลล์ ทำให้ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ประจุลบของหมู่ซัลเฟตจากแคปไซม์ – คาราจีแนนซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกของเคซีนไมเซลล์หรือแคปไซม์ – เคซีน บริเวณตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 97 – 112 (Dalgleish และ Morris, 1988; Snoeren และคณะ, 1976; Snoeren และคณะ, 1975) สามารถเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกบนผิวของเคซีนไมเซลล์ได้ง่ายขึ้น ส่งเสริมการเกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Consistency index สูงขึ้น

ค่าความหนืดปรากฏหรือ Apparent viscosity (η_{50} , Pa) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้อัตราเฉือนเท่ากับ 50 s^{-1} แสดงดังตารางที่ 4.3 ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมแสดงค่าความหนืดไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.224 - 0.328 Pa.s และค่าความหนืดปรากฏระหว่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมกับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกันไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อาจเป็นเพราะที่อัตราเฉือนเท่ากับ 50 s^{-1} สามารถทำให้โครงสร้างของสารให้ความคงตัวและโปรตีนทั้งหมดเกิดการจัดเรียงตัวตามกระแสของการไหล ค่าความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมจึงไม่แตกต่างกัน

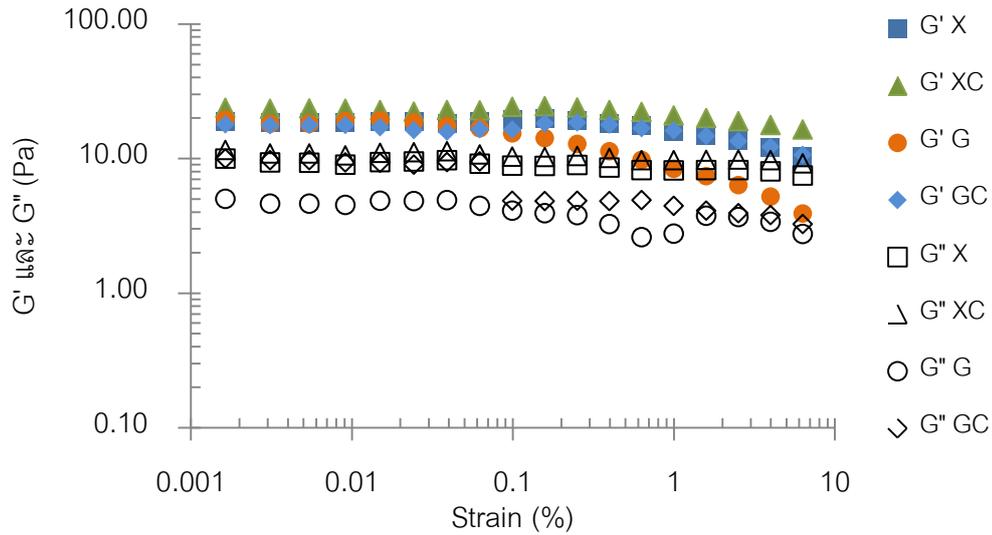
4.1.3.2 การทดสอบเชิงพลวัต (Dynamic หรือ Oscillation testing) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

การทดสอบเชิงพลวัตของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นการประเมินสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ซึ่งเป็นสมบัติร่วมระหว่างของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) และของเหลวไหลหนืด (Viscous fluid) ของตัวอย่าง เป็นการทดสอบโดยควบคุมให้

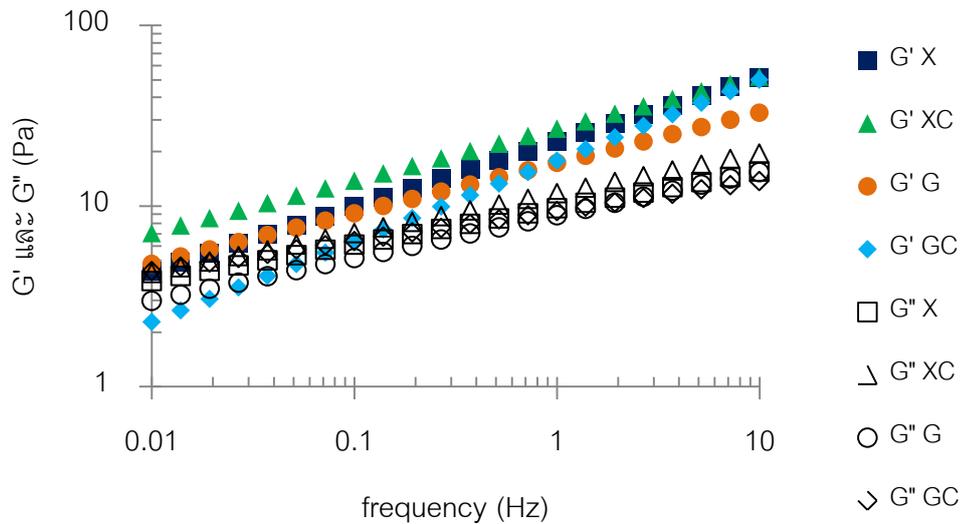
ความเครียด (Strain) คงที่ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงความเค้น (Stress) ไปตามความถี่ของการสั่น โดยที่อุณหภูมิคงที่

ในการทดสอบหาความเครียด (Strain) ที่เหมาะสมสำหรับ ตัวอย่างส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ใช้วิธี Amplitude sweep เพื่อหาช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยแสดงสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (Linear viscoelastic) ซึ่งแสดงค่าระหว่าง Elastic modulus (G') และค่า Viscous modulus (G'') โดยกำหนดให้มีความถี่ (Frequency) 1.0 เฮิรตซ์ ช่วงร้อยละความเครียด Complex shear strain (%) 0.001-10 กำหนด Gap 1.5 มิลลิเมตร ใช้หัววัด 40 mm Cone and plate geometry อุณหภูมิของเครื่องรีโอมิเตอร์ขณะทดสอบเท่ากับ 4 °C

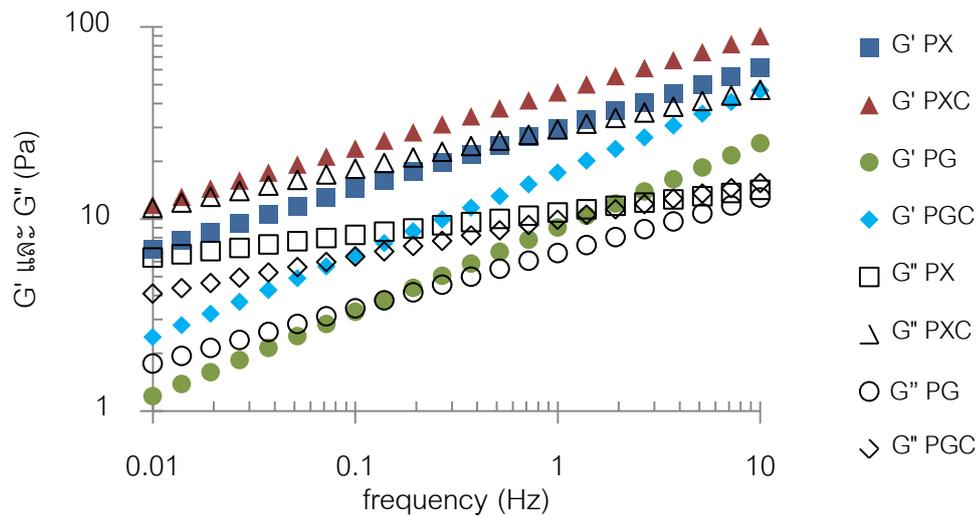
จากรูปที่ 4.2 ตัวอย่างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุม ทั้ง 4 สูตร แสดงช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมอยู่ในช่วง ความเครียดประมาณ 0.001 – 0.05 % ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า Elastic modulus (G') และค่า Viscous modulus (G'') คงที่ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างของตัวอย่างไม่มีการเสื่อมสภาพ เมื่อมีแรงกระทำต่อ ตัวอย่าง จึงทำการคัดเลือกค่าเท่ากับ 0.01% เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสดโดยวิธี Frequency sweep step ที่ความถี่ 0.01-10 Hz เพื่อศึกษาค่า Elastic modulus (G') ค่า Viscous modulus (G'') และค่า Complex viscosity (η^*)



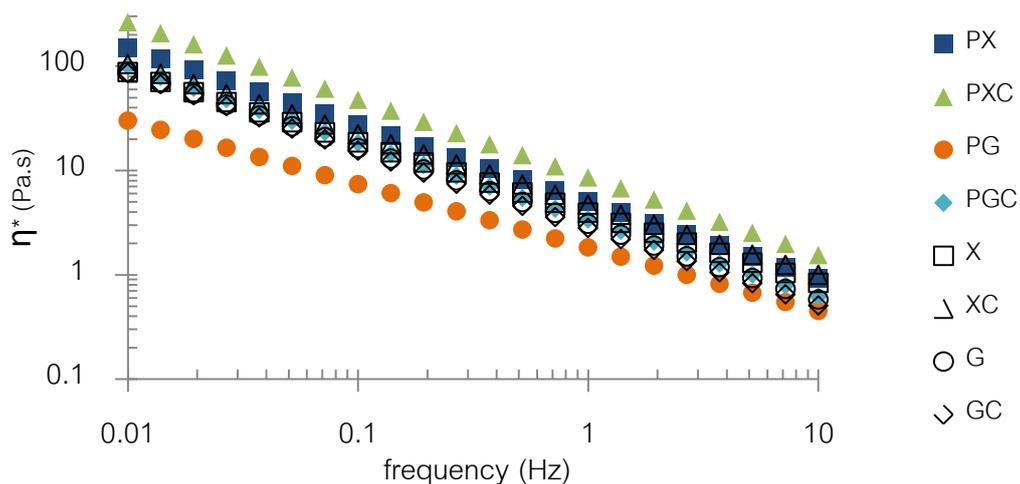
รูปที่ 4.2 ค่า G' และ G'' จากการทดสอบ Amplitude sweep ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมทั้ง 4 สูตร ได้แก่ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนแทนกัมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกัน (X) แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (XC) กัวร์กัม (G) และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน คือ (GC)



รูปที่ 4.3 ค่า G' และค่า G'' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมทั้ง 4 สูตร ได้แก่ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัม (X) แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (XC) กัวร์กัม (G) และ กัวร์กัมร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (GC)



รูปที่ 4.4 ค่า G' และค่า G'' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกทั้ง 4 สูตร ได้แก่ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (PX) แซนแทนกันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PXC) กัวร์กัน (PG) และกัวร์กันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PGC)



รูปที่ 4.5 ค่า Complex viscosity (η^*) ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้ง 8 สูตร ได้แก่ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่เติมสารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (PX) แซนแทนกันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PXC) กัวร์กัน (PG) และ กัวร์กันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (PGC) และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่เติมสารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (X) แซนแทนกันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (XC) กัวร์กัน (G) และ กัวร์กันร่วมกับแคปไซ-คาราจีแนน (GC)

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่า Elastic modulus (G') และค่า Viscous modulus (G'') ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมและส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกตามลำดับ พบว่าค่า Elastic modulus (G') และ Viscous modulus (G'') ในทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่มากขึ้น เนื่องจากค่าโมดูลัสเป็นค่าที่แปรผันตรงกับพลังงานที่ได้รับ เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น พลังงานในระบบจึงสูงขึ้น ทำให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น (Granger และคณะ, 2005)

อย่างไรก็ตามพบว่าทั้งส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกและส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกันแสดงค่า Elastic modulus (G') มีค่าสูงกว่า Viscous modulus (G'') ตลอดช่วงความถี่ 0.01 – 10 Hz แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกันเกิดเป็นแบบเจลอ่อนซึ่งมีสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) และสามารถทนต่อแรงภายนอกได้มากจึงแสดงค่า G' มีค่าสูงกว่า G'' ตลอดช่วงความถี่ (Steffe, 1996)

แต่สำหรับส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกัวร์กันแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่เกิดจุดตัดกันระหว่างค่า Elastic modulus (G') และ Viscous modulus (G'') (รูปที่ 4.3 และ 4.4) โดยในช่วงความถี่ต่ำค่า G'' มีค่าสูงกว่า G' แสดงว่ามีความเป็นของเหลวเด่นชัดกว่าความเป็นของแข็ง ต่อมาในช่วงความถี่สูงขึ้น ค่า G' มีค่าสูงกว่า G'' ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความเป็นของแข็งเด่นชัดกว่าความเป็นของเหลว การเปลี่ยนแปลงของค่า G' และ G'' ในลักษณะเช่นนี้คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของสารละลายเข้มข้น (Concentrated solution) (Steffe, 1996) ณ สภาวะปกติสารละลายเข้มข้นมักแสดงสมบัติความเป็นของเหลวเพราะมีส่วนที่เป็นของเหลวสูงกว่าของแข็ง เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกเล็กน้อย พลังงานที่ได้รับจะแสดงอิทธิพลต่อของเหลวมากกว่าของแข็ง โดยจะปลดปล่อยพลังงานในทันทีด้วยการไหลหรือเปลี่ยนเป็นความร้อน ไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ในโครงสร้างได้ เมื่อได้รับแรงมากขึ้นพลังงานจะมีอิทธิพลต่อของแข็งมากขึ้น พลังงานที่ให้ส่งผลให้โครงสร้างภายในพอลิเมอร์จัดเรียงตัวใหม่หรือมีการพันเกี่ยวกันของพอลิเมอร์ ที่สามารถรักษาพลังงานไว้ในโครงสร้างได้ เป็นการเสียรูปที่สามารถคืนรูปเดิมได้ ซึ่งเกิดจากการสร้างหรือสลายพันธะภายในโครงสร้าง จึงทำให้ G' มีค่าสูงกว่า G'' (Rosen, 1993)

จากผลการทดลองยังพบว่าการเติมแคปไซซิน – คาราจีแนน ลงในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ทำให้ค่า G' และ G'' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่มีการเติมแคปไซซิน – คาราจีแนน มีค่าสูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

ที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวทั้งในสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก นอกจากนี้ยังพบว่า ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกั๊วรัก็มร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน แสดงจุดตัดกันระหว่างค่า G' และ G'' ที่ความถี่ต่ำกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้ สารให้ความคงตัวชนิดกั๊วรัก็มชนิดเดียว เนื่องจากแคปป์า – คาราจีแนนสามารถเกิดเจลได้ ทำให้ ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีความเป็นของแข็งเด่นชัดขึ้น จึงสามารถทนต่อแรงเฉือนได้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของ *L. casei* 01 ต่อค่า G' และ G'' พบว่าไอศกรีมที่มีการเติม *L. casei* 01 มีค่า G' และ G'' สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ไม่ เติม *L. casei* 01 ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของ pH ที่ต่ำกว่าของสูตรที่มีการเติม *L. casei* 01 โดย pH ที่ต่ำกว่าส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ในนม (Protein – protein interaction) ทำให้โครงสร้างของโปรตีนนมมีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น จึงแสดงความเป็น ของแข็งสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ Lucey (2004) ที่ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของเจลโยเกิร์ต พบว่าเมื่อค่า pH ของโยเกิร์ตลดต่ำลงในระหว่างการบ่ม ค่า G' มี ค่าสูงขึ้น โดยผู้วิจัยได้อธิบายว่าค่า G' ที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากโครงสร้างในระดับจุลภาค แสดงให้ เห็นถึงโครงข่ายของโปรตีนเคซีนที่มีความหนาแน่นและเชื่อมต่อกันมากขึ้น จึงสามารถทนต่อแรง ได้มากขึ้น ค่า G' จึงสูงขึ้น

ค่าความหนืดเชิงซ้อนหรือ Complex viscosity (η^*) ของส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีมทุกสูตรมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.5) แสดงถึงการไหลแบบ Non - newtonian fluid แบบ Shear thinning โดยค่า Complex viscosity มีแนวโน้มคล้ายกับค่า G' และ G'' คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมมีแนวโน้มแสดงค่า Complex viscosity สูง กว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้กั๊วรัก็ม และส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้แคปป์า - คาราจีแนนมีแนวโน้มแสดงค่า Complex viscosity สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่ใช้สารให้ ความคงตัวเพียงชนิดเดียว รวมทั้งส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกมีแนวโน้มแสดงค่า Complex viscosity สูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุม จากที่กล่าวมาทำให้ส่วนผสม พร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน มีค่าความหนืด เชิงซ้อนสูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกสูตรอื่น และสูงกว่าส่วนผสมพร้อมทำ ไอศกรีมสูตรควบคุม แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดเชิงซ้อนของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมเป็นผล มาจากอิทธิพลร่วมของการเติม *L. casei* 01 และการใช้แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดโครงสร้างขนาดใหญ่ของเคซีนไมเซลล์ที่เกิดเป็นโครงข่ายกับแคปป์า – คาราจีแนน (Dalgleish และ Morris, 1988; Snoeren และคณะ, 1976; Snoeren และคณะ,

1975) และการลดลงของ Electrostatic repulsion บนผิวของเคซีนไมเซลล์ ที่เกิดจากประจุบวกที่ได้จากกระบวนการหมักกรดแลคติกของ *L. casei* 01 ซึ่งน่าจะทำให้แคปไซ - คาราจีแนนเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกบนผิวของเคซีนไมเซลล์ได้ง่ายขึ้น รวมทั้งการเกิดโครงสร้างเจลอ่อนของแซนแทนกัม ซึ่งสามารถกักเก็บน้ำได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดเชิงซ้อนของส่วนผสมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน มีค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่าไอศกรีมสูตรอื่น

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่สูงขึ้น ค่าความหนืดของส่วนผสมทำไอศกรีมใกล้เคียงกันมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่วัดได้จากแบบการให้แรงเฉือน (Steady shear) ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตไอศกรีมโพรไบโอติกในระดับอุตสาหกรรมโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม เพราะในระดับอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการผลิตที่มีความถี่สูงกว่าในระดับที่ทำการศึกษา ทำให้ความหนืดของส่วนผสมทำไอศกรีมโพรไบโอติกไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม

4.2 ผลของกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) ต่อคุณภาพไอศกรีม

4.2.1 การขึ้นฟู (Overrun)

จากผลการทดลองพบว่าไอศกรีมทั้ง 8 สูตรแสดงค่าร้อยละการขึ้นฟูไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แม้ว่าส่วนผสมทำไอศกรีมแต่ละสูตรจะแสดงสมบัติวิทยากระแสที่แตกต่างกัน โดยการขึ้นฟูอยู่ในช่วงร้อยละ 31 – 40

การขึ้นฟูแสดงถึงความสามารถในการเกิดโฟม (Foaming ability) ของส่วนโปรตีนนม ไขมันนม อิมัลซิไฟเออร์ และสารให้ความคงตัว โดยทั่วไปไอศกรีมที่แสดงค่าสมบัติวิทยากระแสที่แตกต่างกัน จะแสดงค่าการขึ้นฟูแตกต่างกัน Kailasapathy และ Songvanich (1998) พบว่าส่วนผสมทำไอศกรีมที่มีค่าความหนืดสูงทำให้การขึ้นฟูมีค่าสูงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามความหนืดของส่วนผสมทำไอศกรีมต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การขึ้นฟูที่ดี หากความหนืดมากเกินไปจะทำให้อากาศเข้าในโครงสร้างได้ยาก แต่ถ้าความหนืดน้อยเกินไปจะทำให้โครงสร้างไม่สามารถกักเก็บอากาศที่เข้าไปในเนื้อไอศกรีมได้ นอกจากนี้การขึ้นฟูของตัวอย่างไอศกรีมที่ผลิตได้ทุกตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าการขึ้นฟูของไอศกรีมทางการค้าซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 75 – 90 (Marshall และ Arbuckle, 1996) อาจเป็นผลจากเครื่องปั่นไอศกรีมแบบครัวเรือนที่ใช้มีค่าแรงเฉือนต่ำ และใช้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ (ประมาณ 45 - 50 นาที) ทำให้เซลล์อากาศในไอศกรีมมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีปริมาณน้อยลง และมีร้อยละการขึ้นฟูของ

ไอศกรีมต่ำ (Sofjan และ Hartel, 2004) จากงานวิจัยของ Chang และ Hartel (2002b) พบว่าระยะเวลาในการตีปั่นเป็นไอศกรีมที่มากเกินไปจะทำให้ค่าการขึ้นฟูลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวของฟองอากาศมากขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าชนิดของสารให้ความคงตัวและการเติม *L. casei* 01 ไม่มีผลต่อร้อยละการขึ้นฟูของไอศกรีม

แต่เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลชนิดของสารให้ความคงตัวเฉพาะไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกต่อค่าการขึ้นฟู พบว่าไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกัวร์กัมแสดงค่าการขึ้นฟูสูงกว่าไอศกรีมโพรไบโอติกสูตรอื่น ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ค่าการขึ้นฟูของไอศกรีม

สูตร	การขึ้นฟู (ร้อยละ) ^{ns}
PX	31.57 ^b ± 2.36
PXC	33.53 ^b ± 1.84
PG	39.59 ^a ± 1.89
PGC	32.82 ^b ± 2.97
X	32.18 ± 3.07
XC	31.07 ± 1.95
G	33.53 ± 8.04
GC	34.42 ± 5.29

ns คือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

a,b คือมีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะในไอศกรีมสูตรโพรไบโอติก ($p \leq 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมแซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัมแซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Soukoulis และคณะ (2008) พบว่าไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกันมีค่าการขึ้นฟูสูงกว่าไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัม เนื่องจากความหนืดของไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกันมีค่าสูง ทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศภายในโครงสร้างช้าลง และสามารถชะลอการหลุดของฟองอากาศได้ ส่งผลทำให้โครงสร้างสามารถเก็บอากาศได้มาก นอกจากนี้แซนแทนกันมีความสามารถในการเกิดเจลได้ เจลที่เกิดขึ้นเพิ่มความเกะกะ (Steric hindrance) ของระบบ ทำให้มีประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่หรือหลุดออกของฟองอากาศที่ขึ้น และยังพบว่าค่าการขึ้นฟูมีผลมาจากปริมาณของแคปไซ-คาราจีแนนที่ใช้ เพราะโครงสร้างเจลที่เกิดขึ้นระหว่างแคปไซ-คาราจีแนนกับโปรตีนเคซีนสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่หรือหลุดออกของฟองอากาศได้เช่นกัน

4.2.2 ผลของกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) ต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* 01

กระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) เป็นกระบวนการสำคัญกระบวนการหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีการเติมอากาศ การใช้อุณหภูมิต่ำ การเกิดผลึกน้ำแข็ง และมีการให้แรงเฉือนจากใบพัดกวน (Cruz และคณะ, 2009) โดยแต่ละปัจจัยส่งผลต่อการรอดชีวิตดังนี้ ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นบริเวณที่ใกล้กับเซลล์และผลึกน้ำแข็งที่เกิดภายในไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ของเซลล์โพรไบโอติกอาจสร้างความเสียหายแก่เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) และผนังเซลล์ (Cell wall) ทำให้เซลล์โพรไบโอติกบาดเจ็บและลดจำนวนลง (Gill, 2006) โดยทั่วไปโพรไบโอติกในกลุ่ม Lactic acid bacteria (LAB) ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิด Facultative anaerobic เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน แต่ในระหว่างกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมซึ่งมีการเติมออกซิเจนจากอากาศเข้าไปในส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม ทำให้เกิดสภาวะ Oxygen toxicity ขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้โพรไบโอติกลดจำนวนลง (Talwalkar และ Kailasapathy, 2004) นอกจากนี้แรงเฉือนที่เกิดจากใบพัดกวน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เซลล์โพรไบโอติกบาดเจ็บและล้มตายได้ เนื่องจากแรงเฉือนสามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของโพรไบโอติก ส่งผลให้โพรไบโอติกลดจำนวนลง (Alamprese ดชและคณะ, 2005)

จากงานวิจัยของ Alamprese และคณะ (2002) ศึกษาการรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. johnsonii* La1 ในระหว่างกระบวนการผลิตไอศกรีม พบว่าผลของกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมทำให้ปริมาณ *L. johnsonii* La1 ในไอศกรีมมีปริมาณการรอดชีวิตลดลงจาก 5.3×10^7 cfu/g เหลือเพียง 2.9×10^7 cfu/g โดยคิดเป็นอัตราการรอดชีวิตเพียงร้อยละ

55 แสดงให้เห็นว่าผลของกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมทำให้โพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. johnsonii* La1 ลดจำนวนลงอย่างมาก

Haynes และ Playne (2002) ศึกษาการรอดชีวิตในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้โพรไบโอติก 3 สายพันธุ์ได้แก่ *L. acidophilus*, *B. lactis* และ *L. paracasei* พบว่าโพรไบโอติกทั้ง 3 สายพันธุ์มีปริมาณลดลงอย่างมากจากกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม โดยเฉพาะ *L. acidophilus* แสดงอัตราการรอดชีวิตเพียงร้อยละ 20 - 40 ในขณะที่ *B. lactis* และ *L. paracasei* แสดงอัตราการรอดชีวิตอยู่ที่ร้อยละ 30 - 50 และ 40 - 70 ตามลำดับ

จากงานวิจัยข้างต้นชี้ให้เห็นว่ากระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้มีปริมาณการรอดชีวิตของโพรไบโอติกลดลงอย่างมาก ปริมาณโพรไบโอติกที่สามารถแสดงประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ ต้องมีปริมาณเชื้อโพรไบโอติกที่มีชีวิตมากกว่า 10^6 cfu ต่อหน่วยบริโภค (Lee และ Salminen, 1996) โดยตามเอกสารแนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541 ได้กำหนดหนึ่งหน่วยบริโภคของไอศกรีมเท่ากับ 80 กรัม ดังนั้นปริมาณโพรไบโอติกที่รอดชีวิตควรไม่น้อยกว่า 10^6 cfu ต่อ 80 กรัมของไอศกรีม คิดเป็น 1.25×10^4 cfu ต่อกรัมไอศกรีม หรือ $4.097 \log$ cfu ต่อกรัมไอศกรีม

จากผลการทดลองพบว่า *L. casei* 01 มีจำนวนลดลงหลังจากผ่านกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม โดยมีการรอดชีวิตอยู่ในช่วงร้อยละ 90 - 92 และมีจำนวน *L. casei* 01 ที่รอดชีวิตมากกว่า $7 \log$ cfu/ml (ตารางที่ 4.5) ซึ่งมากกว่าปริมาณที่แนะนำให้บริโภค แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมสามารถทำให้ปริมาณ *L. casei* 01 ลดจำนวนลงได้เล็กน้อย โดยปริมาณ *L. casei* 01 ที่รอดชีวิตภายหลังกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม ยังสามารถแสดงประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้

เมื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารให้ความคงตัวต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 พบว่าชนิดของสารให้ความคงตัวไม่มีผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ทั้งก่อนและหลังกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม ($p > 0.05$) โดยไอศกรีมโพรไบโอติกทุกสูตรแสดงอัตราการรอดชีวิตสูงกว่าร้อยละ 90 โดยมีจำนวน *L. casei* 01 ที่มีการรอดชีวิตมากกว่า $7 \log$ cfu/ml ซึ่งมากกว่าปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน ($> 4.097 \log$ cfu/g) แม้ว่าสารให้ความคงตัวแต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติวิทยากระแสของไอศกรีมที่แตกต่างกัน แต่ก็ไม่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 อาจเป็นเพราะสารให้ความคงตัวยังไม่มีผลต่อจำนวน และขนาดผลึกของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Flores และ Goff, 1999b) ประกอบกับผลึกน้ำแข็งในชั้นตอนนี้ยังมีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อย ดังนั้นผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใน

ระหว่างกระบวนการนี้จึงไม่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้กั๋วร้กั้มแม้มีค่าสูงกว่าไอศกรีมโพรไบโอติกสูตรอื่น ($p \leq 0.05$) แต่จำนวนการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ก็ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนที่อยู่ภายในไอศกรีมแม้มีปริมาณแตกต่างกัน แต่ก็ไม่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01

ตารางที่ 4.5 จำนวนของ *L. casei* 01 (log cfu/ml) และร้อยละของการรอดชีวิต ก่อนและหลังกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) ของไอศกรีมโพรไบโอติก

สูตร	จำนวน <i>L. casei</i> 01	จำนวน <i>L. casei</i> 01	การรอดชีวิต (ร้อยละ) ^{ns}
	ก่อนแช่แข็ง ^{ns} (log cfu/ml)	หลังแช่แข็ง ^{ns} (log cfu/ml)	
PX	7.63 ± 0.05	7.55 ± 0.05	92.23 ± 5.67
PXC	7.67 ± 0.05	7.58 ± 0.02	91.60 ± 4.59
PG	7.69 ± 0.06	7.60 ± 0.03	90.40 ± 8.41
PGC	7.61 ± 0.04	7.53 ± 0.10	91.65 ± 5.57

ns คือไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กั๋วร้กั้มและกั๋วร้กั้มร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ลดลงระหว่างกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมน่าจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งภายในเซลล์ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายแก่เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) และผนังเซลล์ (Cell wall) น่าจะส่งผลให้ *L. casei* 01 ลดจำนวนลงมากกว่านี้ ดังที่พบในงานวิจัยของ Haynes และ Playne (2002) และ Alamprese และคณะ (2002) ซึ่งพบว่า *L. acidophilus*, *B. lactis*, *L. paracasei* และ *L. johnsonii* La1 ที่เติมลงในไอศกรีมรอดชีวิตหลังกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีมได้ร้อยละ 20 – 70 สาเหตุที่ *L. casei* 01 รอดชีวิตได้สูงกว่ามาก (มากกว่าร้อยละ 90) น่าจะมาจากการทำงานของ *L. casei* มียีน *csp-A* (Cold Shock Protein-A) ที่สามารถสร้างโปรตีนเพิ่มภายในเซลล์ ทำให้ความเข้มข้นภายในเซลล์เพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งของเซลล์จึงลดต่ำลง (Sauvageot และคณะ, 2006) นอกจากนี้ *L. casei* ยังมียีนที่สามารถสังเคราะห์โปรตีน เช่น เอนไซม์ได้ใน

สภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์ ทำให้มีชีวิตรอดได้ (Beaufils และคณะ, 2007)

4.3 ผลของอายุการเก็บต่อคุณภาพไอศกรีม

4.3.1 ค่า pH ในระหว่างการเก็บรักษา

ค่า pH ของไอศกรีมที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วันแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่า pH ของไอศกรีมสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติม *L. casei* 01 ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดอายุการเก็บรักษา ($p > 0.05$) ส่วน pH ของไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมของ *L. casei* 01 ที่รอดชีวิต สามารถเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมในการเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสเป็นกรดแลคติกและสารอินทรีย์อื่นแม้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จากงานวิจัยของ Diaz-Maniz และคณะ (2006) พบว่า *L. casei* สามารถเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสเป็นกรดแลคติก กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เอทานอล ไดอะซิติก และอะซิโทอิน โดยมีปริมาณกรดแลคติกและกรดอะซิติกที่สูงและใกล้เคียงกัน จึงเป็นไปได้ว่าในระหว่างการเก็บรักษา *L. casei* 01 ที่มีชีวิตรอดสามารถผลิตกรดแลคติกและสารอินทรีย์ ทำให้ pH ลดลงอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.6 ค่า pH ของไอสกรีมีในระหว่างการเก็บรักษา 210 วัน

สูตร	pH ที่อายุการเก็บ									
	0 วัน		15 วัน		30 วัน		45 วัน		60 วัน	
PX	6.62 ^{bA}	± 0.03	6.60 ^{bA}	± 0.02	6.56 ^{bB}	± 0.05	6.51 ^{bBC}	± 0.02	6.49 ^{bcCD}	± 0.02
PXC	6.53 ^{cA}	± 0.03	6.52 ^{cAB}	± 0.02	6.49 ^{cAB}	± 0.02	6.48 ^{bBC}	± 0.01	6.45 ^{cCD}	± 0.02
PG	6.59 ^{bcA}	± 0.05	6.56 ^{cbAB}	± 0.05	6.54 ^{cbABC}	± 0.05	6.50 ^{bBCD}	± 0.06	6.48 ^{bcBCD}	± 0.06
PGC	6.60 ^{bcA}	± 0.05	6.57 ^{bAB}	± 0.04	6.55 ^{bABC}	± 0.03	6.53 ^{bBCD}	± 0.03	6.52 ^{bBCD}	± 0.01
X ^{ns}	6.76 ^a	± 0.02	6.73 ^a	± 0.02	6.76 ^a	± 0.02	6.76 ^a	± 0.00	6.75 ^a	± 0.01
XC ^{ns}	6.76 ^a	± 0.09	6.77 ^a	± 0.02	6.77 ^a	± 0.02	6.77 ^a	± 0.02	6.71 ^a	± 0.08
G ^{ns}	6.75 ^a	± 0.01	6.74 ^a	± 0.02	6.75 ^a	± 0.01	6.75 ^a	± 0.01	6.74 ^a	± 0.02
GC ^{ns}	6.75 ^a	± 0.01	6.73 ^a	± 0.01	6.72 ^a	± 0.02	6.75 ^a	± 0.01	6.73 ^a	± 0.02
A,B,C ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)									
a,b,c ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)									
ns	ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวอนเดียวกัน ($p > 0.05$)									
PX, PXC, PG และ PGC	คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอสกรีมีโพโรไบโอดีคที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ									
X, XC, G และ GC	คือส่วนผสมพร้อมทำไอสกรีมีสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ									

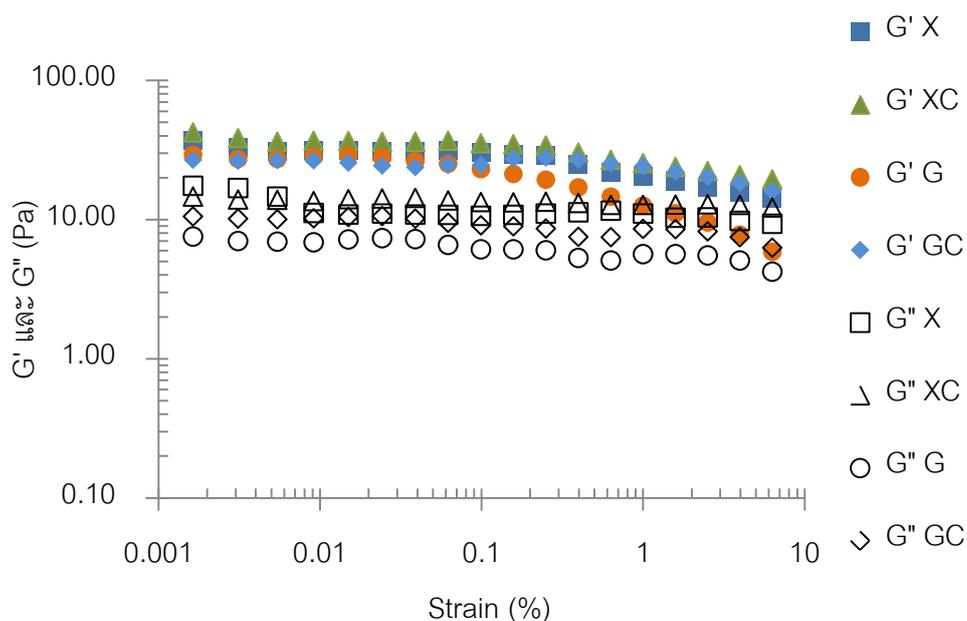
ตารางที่ 4.6(ต่อ) ค่า pH ของไคสกริมทั้ง ค่า pH ของไคสกริมในระหว่างการเก็บรักษา 210 วัน

สูตร	pH ที่อายุการเก็บ			
	90 วัน	120 วัน	150 วัน	210 วัน
PX	6.47 ^{cd CDE} ± 0.01	6.46 ^{cd DE} ± 0.02	6.45 ^{b DE} ± 0.03	6.43 ^{b E} ± 0.03
PXC	6.45 ^{d CD} ± 0.03	6.44 ^{d DE} ± 0.02	6.44 ^{b CDE} ± 0.04	6.41 ^{b E} ± 0.01
PG	6.53 ^{c BCD} ± 0.04	6.53 ^{c CD} ± 0.02	6.47 ^{b D} ± 0.04	6.41 ^{b E} ± 0.02
PGC	6.51 ^{cd BCD} ± 0.02	6.51 ^{cd CD} ± 0.01	6.48 ^{b D} ± 0.03	6.39 ^{b D} ± 0.02
X ^{ns}	6.72 ^b ± 0.02	6.74 ^b ± 0.02	6.76 ^a ± 0.04	6.76 ^{a A} ± 0.06
XC ^{ns}	6.77 ^{ab} ± 0.02	6.75 ^{ab} ± 0.03	6.80 ^a ± 0.06	6.81 ^a ± 0.05
G ^{ns}	6.80 ^a ± 0.03	6.74 ^a ± 0.05	6.77 ^a ± 0.05	6.78 ^a ± 0.03
GC ^{ns}	6.79 ^{ab} ± 0.09	6.76 ^{ab} ± 0.02	6.77 ^a ± 0.05	6.77 ^a ± 0.03
A,B,C ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)			
a,b,c ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)			
ns	ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวอนเดียวกัน ($p > 0.05$)			
PX, PXC, PG และ PGC	คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไคสกริมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน ตามลำดับ			
X, XC, G และ GC	คือส่วนผสมพร้อมทำไคสกริมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน ตามลำดับ			

4.3.2 สมบัติวิทยากระแสของไอศกรีม

การทดสอบสมบัติวิทยากระแสของไอศกรีมทั้ง 8 สูตรทำได้โดยการทดสอบเชิงพลวัต (Dynamic หรือ Oscillation testing) ตลอดอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน โดยทำการวัดค่าในวันที่ 0, 15, 30, 45, 60, 90, 150 และ 210 ในการทดสอบหาความเครียด (Strain) ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างไอศกรีม ใช้วิธี Amplitude sweep เพื่อหาช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ของไอศกรีม โดยแสดงสมบัติวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (Linear viscoelastic) ซึ่งแสดงค่าระหว่าง Elastic modulus (G') และค่า Viscous modulus (G'')

จากรูปที่ 4.6 ไอศกรีมสูตรควบคุมทั้ง 4 สูตร แสดงช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ของไอศกรีมอยู่ในช่วงความเครียดประมาณร้อยละ 0.002 – 0.015 ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า G' และค่า G'' คงที่ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างของตัวอย่างไม่มีการเสื่อมสภาพ เมื่อมีแรงกระทำต่อตัวอย่าง จึงทำการคัดเลือกร้อยละความเครียดเท่ากับ 0.01 เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสโดยวิธี Frequency sweep step ที่ความถี่ 0.01-10 Hz เพื่อใช้สำหรับศึกษาค่า G' , G'' และค่า Complex viscosity (η^*) ของไอศกรีมตลอดอายุการเก็บรักษา 210 วัน และจากรูปที่ 4.6 ค่า G' ของไอศกรีมมีค่าสูงกว่า G'' แสดงถึงลักษณะเด่นของสมบัติความเป็นของแข็ง (Elastic) ของไอศกรีมสูงกว่าสมบัติความเป็นของเหลว (Fluid) เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการปั่นเป็นไอศกรีม (Freezing) และแช่แข็ง (Hardening) ของการผลิตเป็นไอศกรีม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมที่สำคัญ ได้แก่ น้ำเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็ง การเกิดกระบวนการ Partial coalescence ของเม็ดไขมัน (Fat globules) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของเม็ดไขมันเรียงต่อกันเป็นสายยาวและเกิดเป็นร่างแห ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่สามารถหุ้มอากาศได้ (Marshall และ Arbuckle, 1996) นอกจากนี้ Wilbery และคณะ (1998) และ Granger และคณะ (2005) ยังรายงานว่าผลึกน้ำแข็ง และร่างแหของไขมันที่เกิดขึ้น ทำให้ G' ของไอศกรีมมีค่าสูงขึ้นกว่า G' ของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของผลึกน้ำแข็ง (Frozen phase) ทำให้ความเป็นของแข็งของไอศกรีมเพิ่มขึ้นด้วย



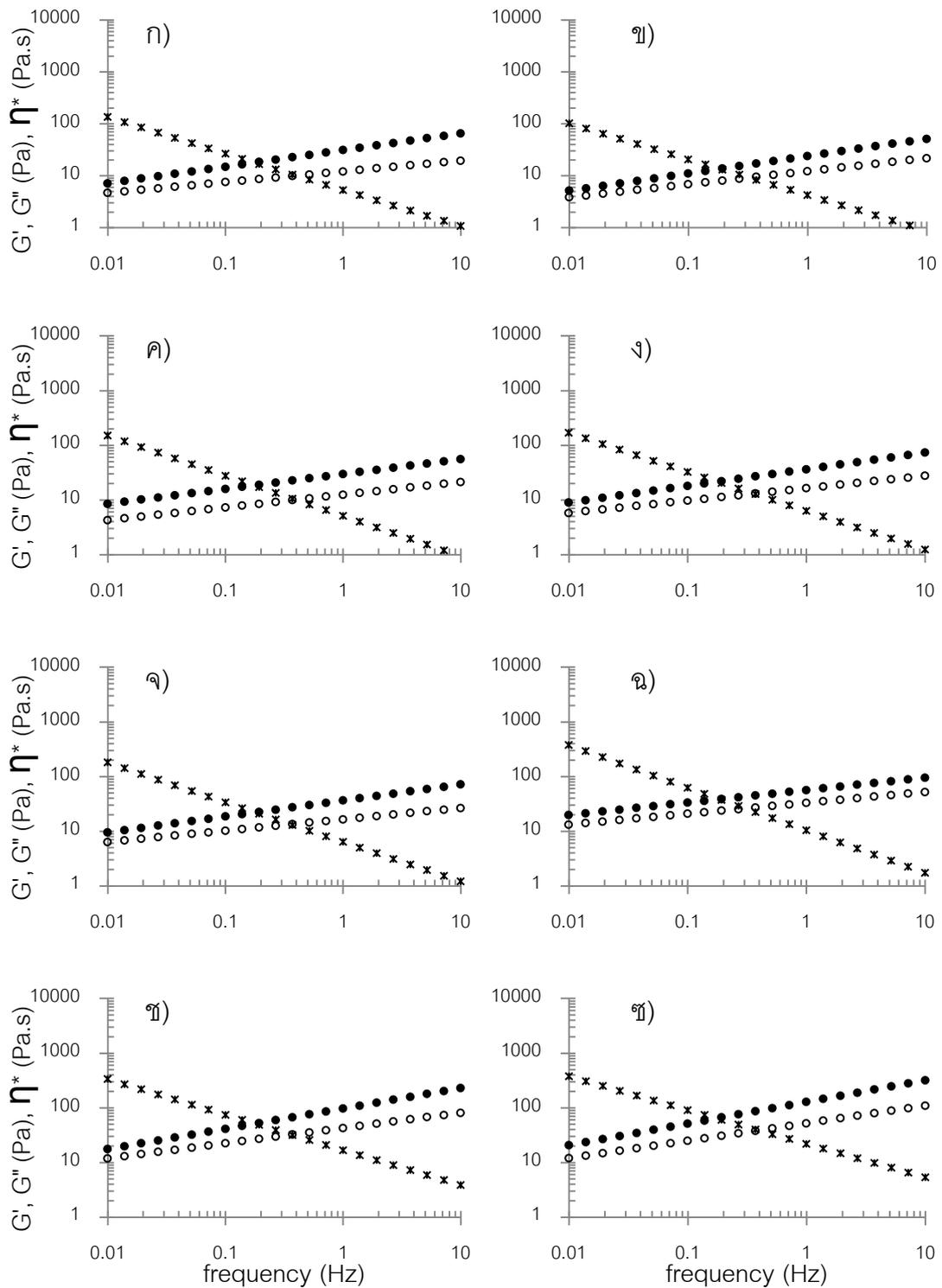
รูปที่ 4.6 ค่า G' และ G'' จากการทดสอบ Amplitude sweep ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ของไอศกรีมสูตรควบคุมทั้ง 4 สูตร ได้แก่ ไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัน (X) แซนแทนกันร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน (XC) กัวร์กัม (G) และ กัวร์กัมร่วมกับแคปปา-คาราจีแนน (GC)

แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.6 ค่า G' และ G'' มีค่าลดลงมากเมื่อร้อยละ ความเครียดมากกว่า 0.15 อาจเนื่องมาจากผลึกน้ำแข็งเกิดการละลาย หรือโครงสร้างอื่น เช่น ฟองอากาศ ไขมัน โปรตีน หรือ สารให้ความคงตัว เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกทำลายไปจากการที่ได้รับความถี่สูงเกินไป (Rao, 1999)

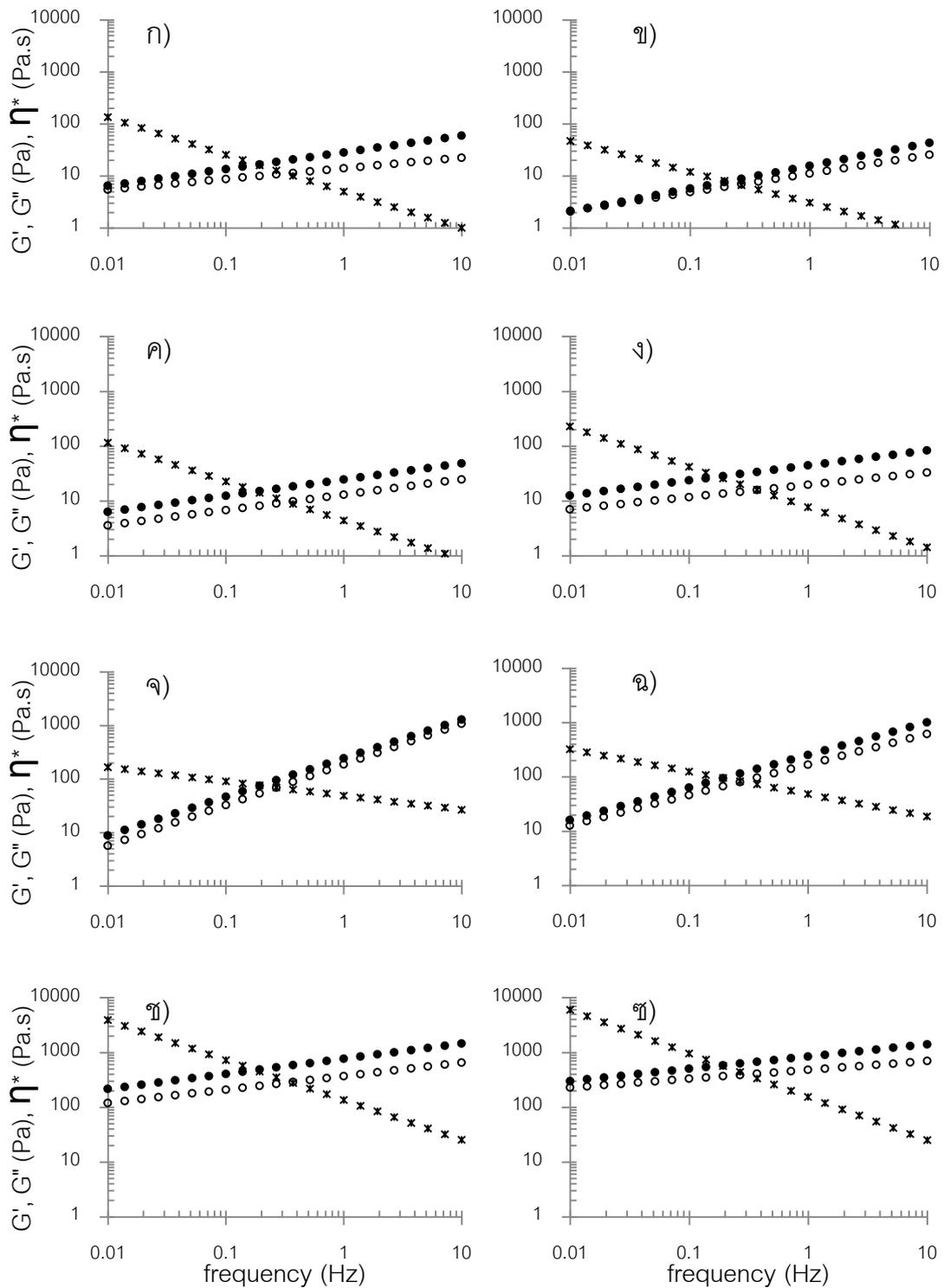
การเปลี่ยนแปลงของ G' , G'' และ η^* ของไอศกรีมทั้ง 8 สูตรแสดงดังรูปที่ 4.7 - 4.14 ไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกและสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกันและกัวร์กัมมีค่า G' สูงกว่า G'' ตลอดอายุการเก็บรักษา ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมแบบเจลอ่อน (Weak gel behavior) ทั้งนี้ เนื่องจากผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมและการเกิดร่างแหของเม็ดไขมัน ช่วยส่งเสริมสมบัติความแข็งแรงสูงขึ้น จึงทำให้ไอศกรีมทุกสูตรแสดง G' มีค่าสูงกว่า G'' นอกจากนี้ค่า G' ยังมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าไอศกรีมมีสมบัติความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อเก็บรักษานานขึ้น โดยกระบวนการที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษา คือ กระบวนการเกิด Recrystallization ของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งเกิดภายใต้สภาวะการเก็บ

รักษาของไอศกรีมในตู้แช่แข็งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงสั้นๆ ตลอดเวลา กระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และจำนวนผลึกน้ำแข็งลดลง (Donhowe และ Hartel, 1996) ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ทำให้ไอศกรีมมีสมบัติความเป็นของแข็งสูงขึ้น ส่งผลให้มีค่า G' สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Klesment และคณะ (2011) ที่มีการศึกษาอิทธิพลของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของไอศกรีมในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 13 เดือน พบว่าค่า G' ของไอศกรีมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการเก็บรักษา ผู้วิจัยอธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของค่า G' เป็นผลมาจากขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่ขึ้นจากการเกิด Ice recrystallization

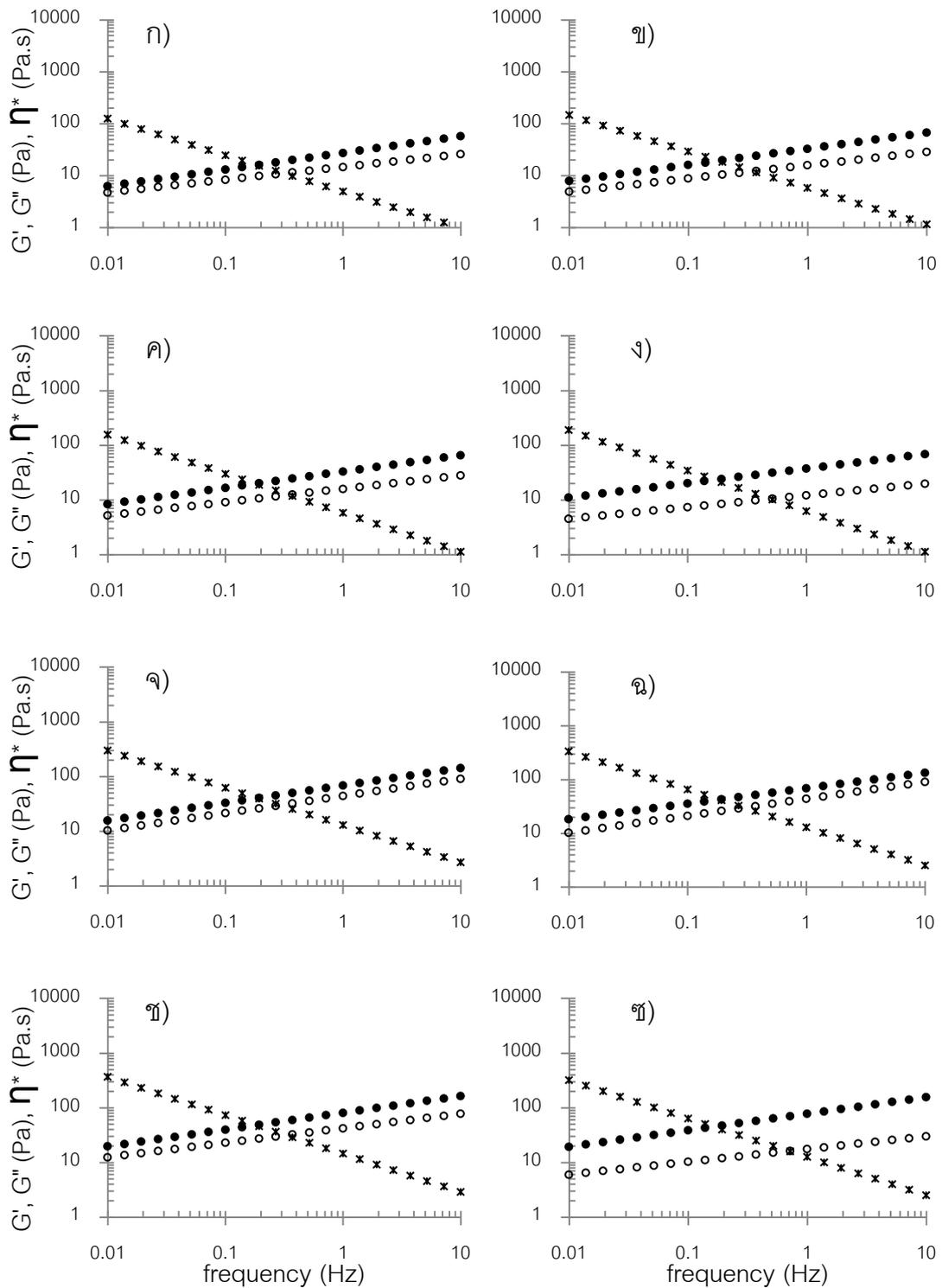
ค่าความหนืดเชิงซ้อนหรือค่า η^* (Complex viscosity) ของไอศกรีมทุกสูตร ตลอดอายุการเก็บรักษาแสดงค่า η^* ของไอศกรีมมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น เป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลแบบ Non-newtonian fluid ชนิด Shear thinning โดยความถี่สูงทำให้พอลิเมอร์ที่ประสานกันเป็นโครงสร้างแบบ Weak gel กระจายตัวออก ทำให้ต้านทานแรงได้ลดลง ช่องว่างที่กักเก็บน้ำเล็กลงหรือหายไป น้ำที่กักเก็บไว้จึงถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก ค่าความหนืดเชิงซ้อนจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า η^* ของไอศกรีมมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษามากขึ้น เนื่องจากปริมาณผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่มีจำนวนมากขึ้นจากกระบวนการเกิด Recrystallization (G' สูงขึ้น) ทำให้ความหนืดเชิงซ้อนมีค่ามากขึ้นตามอายุการเก็บรักษา



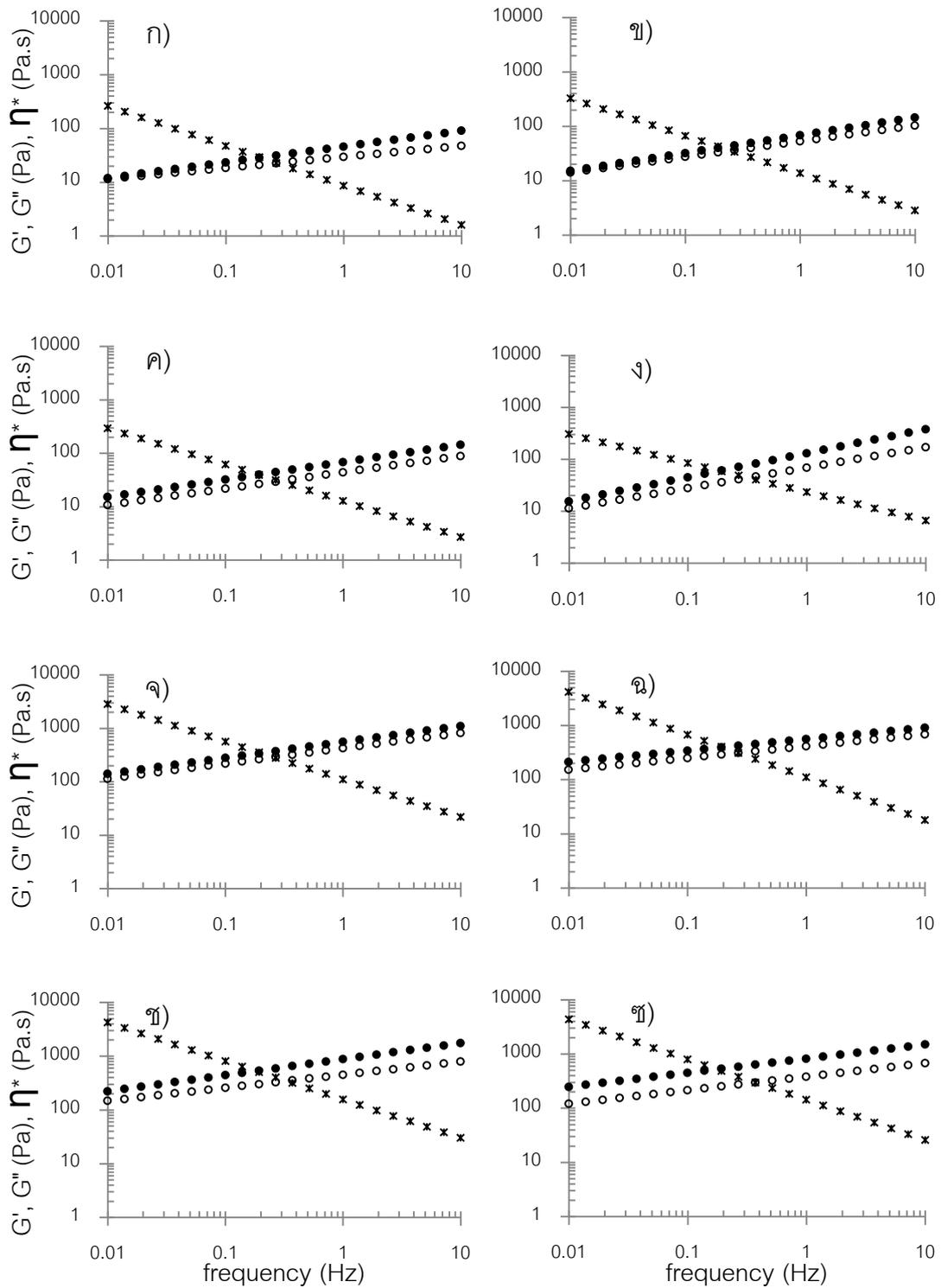
รูปที่ 4.7 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮโดรเจลที่เตรียมด้วยวิธี crosslinking ที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน ฉ) 60 วัน จ) 90 วัน ฉ) 150 วัน และ ช) 210 วัน



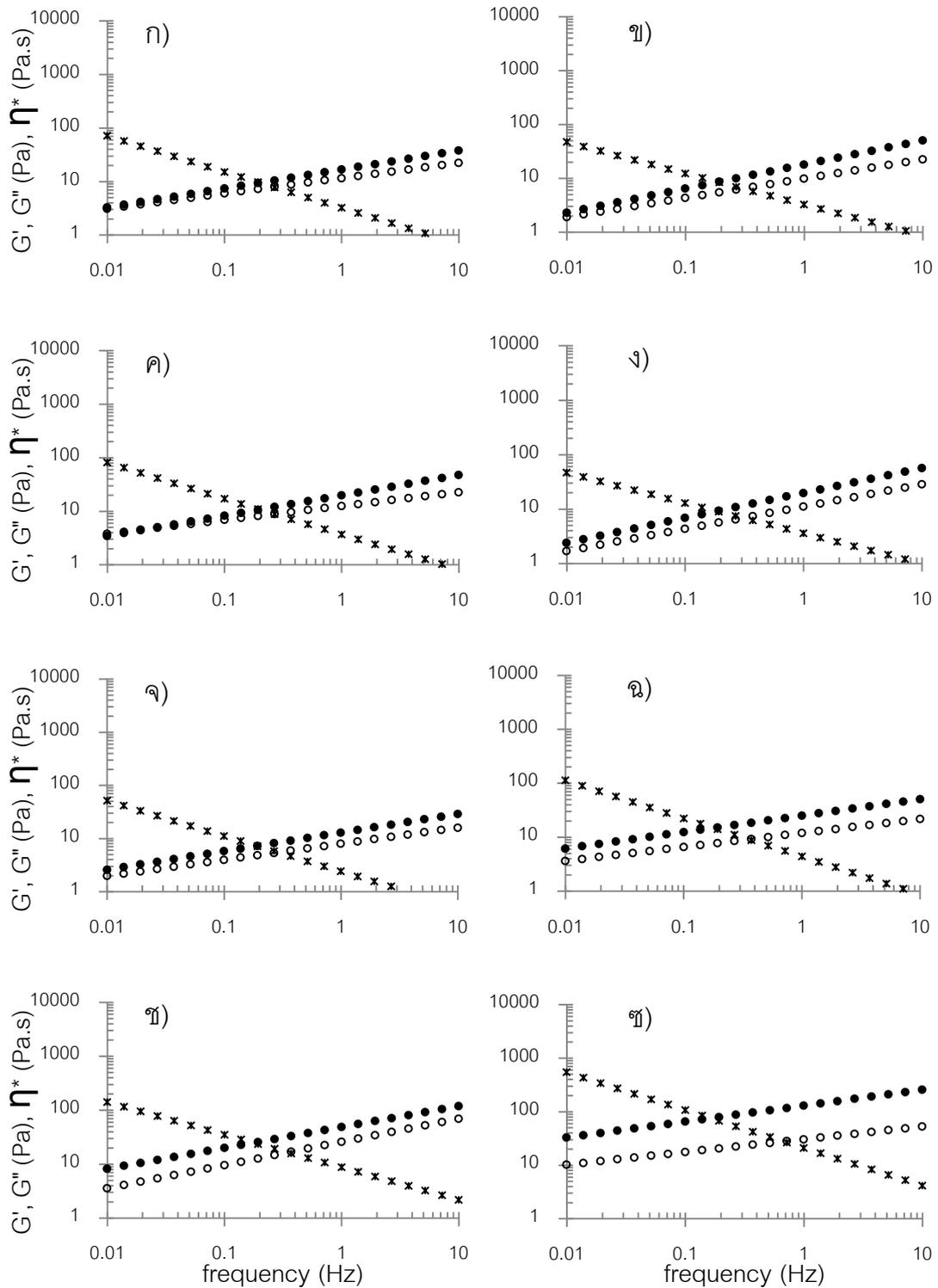
รูปที่ 4.8 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของโพลีบิวทีนที่ใช้แทนแทนกันที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน ฉ) 60 วัน จ) 90 วัน ฉ) 150 วัน และ ช) 210 วัน



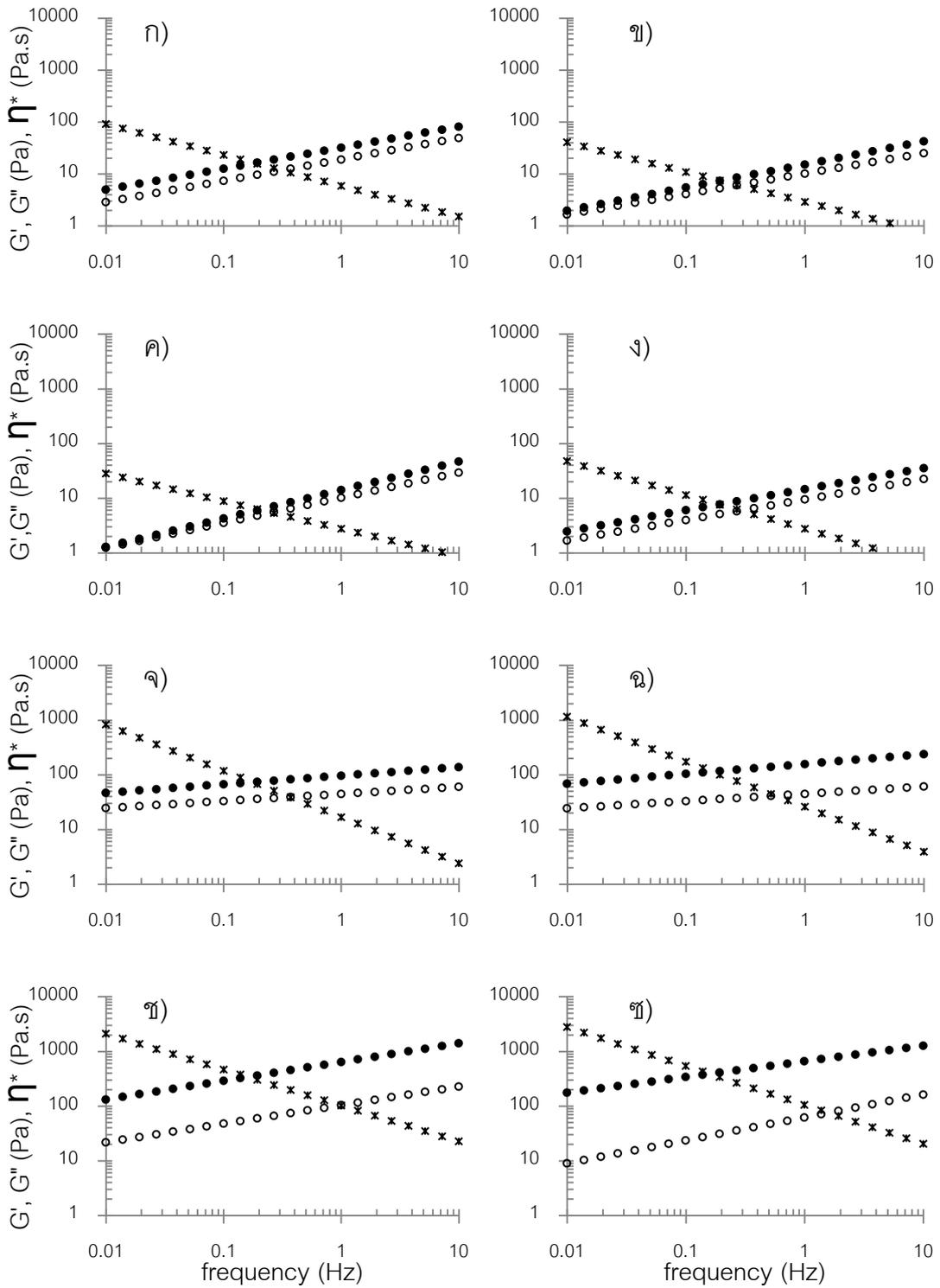
รูปที่ 4.9 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮโดรเจลที่แช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0 วัน (ก) 15 วัน (ข) 30 วัน (ง) 45 วัน (จ) 60 วัน (ฉ) 90 วัน (ช) 150 วัน และ (ซ) 210 วัน



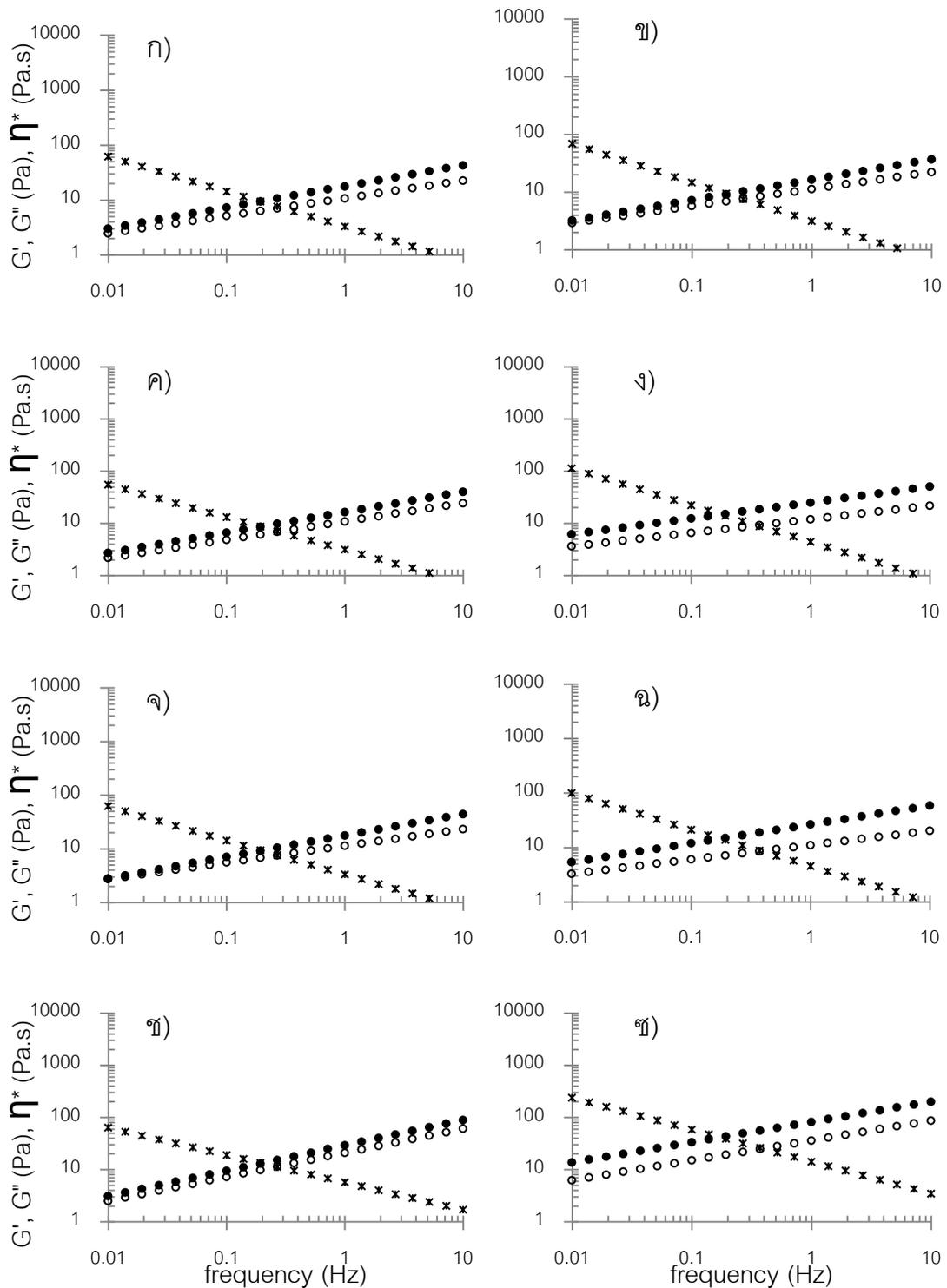
รูปที่ 4.10 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไอศกรีมโพรวไโอดิกที่ใช้แซนแทนกัมร่วมแคปป์า - คาราจีแนนที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน จ) 60 วัน ฉ) 90 วัน ช) 150 วัน และ ซ) 210 วัน



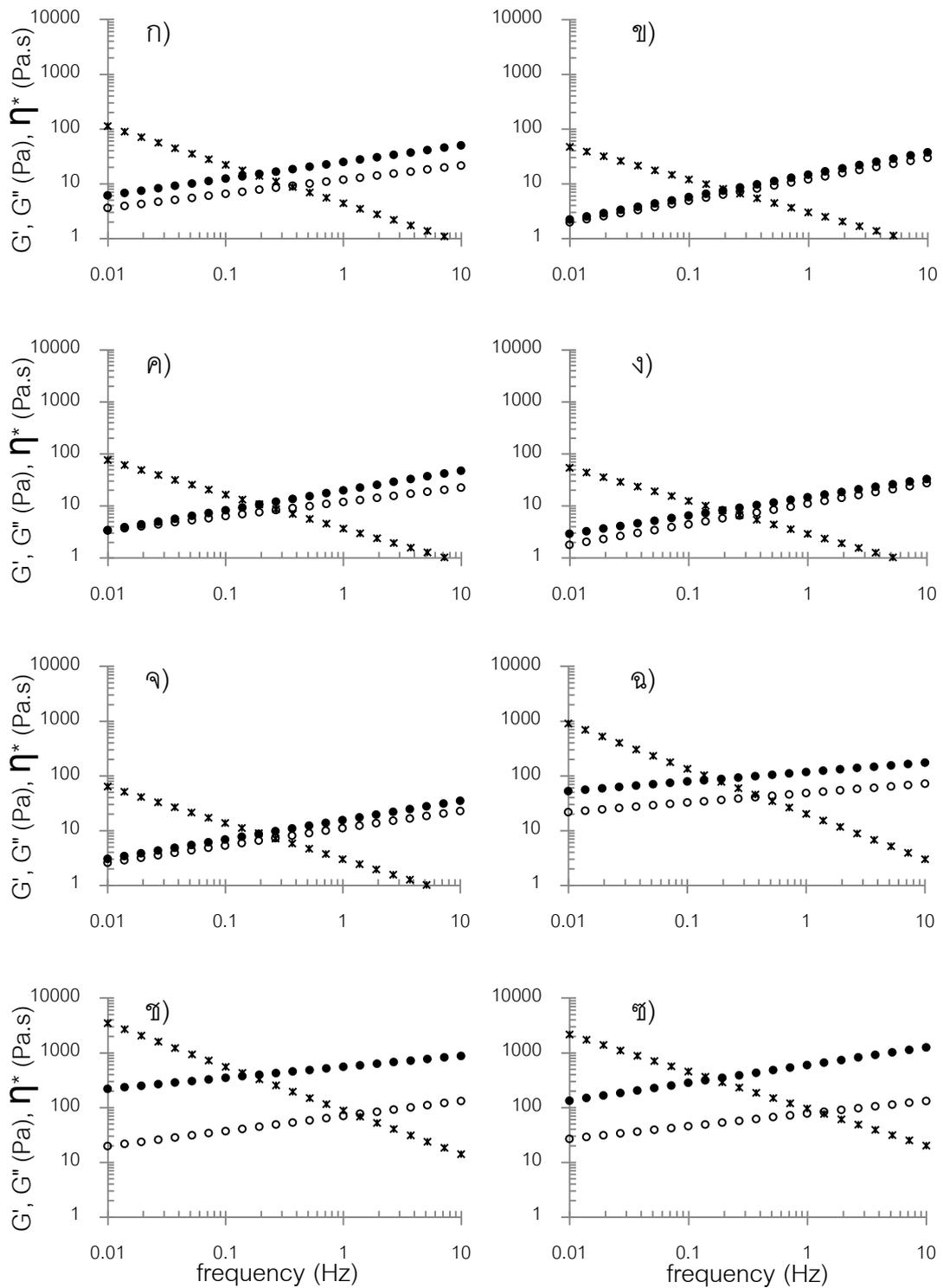
รูปที่ 4.11 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮโดรเจลที่เตรียมด้วยวิธี crosslinking ที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน จ) 60 วัน ฉ) 90 วัน ช) 150 วัน และ ซ) 210 วัน



รูปที่ 4.12 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮโดรเจลโพรโปไฮติกที่ใช้กักรักษาที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน จ) 60 วัน ฉ) 90 วัน ช) 150 วัน และ ช) 210 วัน



รูปที่ 4.13 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮโดรเจลสูตรควบคุมที่ใช้กั้วร็กัมร่วมกับ แคปไซ์-คาราจีแนนที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน จ) 60 วัน ฉ) 90 วัน ช) 150 วัน และ ซ) 210 วัน



รูปที่ 4.14 ค่า G' (●) ค่า G'' (○) และค่า η^* (*) ของไฮสกริมโพรไบโอติกที่ใช้กักรักหมักร่วมกับ แคนป้า - คาราจีแนนที่อายุการเก็บรักษา ก) 0 วัน ข) 15 วัน ค) 30 วัน ง) 45 วัน จ) 60 วัน ฉ) 90 วัน ช) 150 วัน และ ช) 210 วัน

อย่างไรก็ตามค่า G' ในการทดลองนี้ไม่ได้บ่งบอกถึงขนาดของผลึกน้ำแข็ง ขณะเก็บรักษาไอศกรีมอย่างแท้จริง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้วัดค่าสมบัติวิทยากระแสในงานวิจัยนี้คือ -3°C (เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ) ที่อุณหภูมินี้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กสามารถละลายกลายเป็นน้ำได้ ส่วนผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะละลายบางส่วน ทำให้เหลือผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กลง ค่า G' ที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่า G' ของไอศกรีมที่อุณหภูมิในการเก็บรักษา (-18°C) แต่ค่า G' สามารถใช้เปรียบเทียบความเป็นผลึกได้ชัดเจนขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการ Recrystallization เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น ในขณะที่ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กมีจำนวนลดลง (Donhowe และ Hartel, 1996) ดังนั้นค่า G' ที่แสดงออกมาในช่วงต้นของอายุการเก็บรักษาจึงสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของโครงสร้างของไอศกรีมมากกว่าผลึกน้ำแข็ง แต่ในช่วงอายุการเก็บที่สูงขึ้น ค่า G' สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของผลึกน้ำแข็งมากกว่าโครงสร้างของไอศกรีม

เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารให้ความคงตัวและโพรไบโอติกต่อค่า G' , G'' และ η^* ของไอศกรีม ณ อายุการเก็บรักษาหนึ่งๆ จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า G' , G'' และ η^* กับค่า ω ของไอศกรีมทุกสูตรโดยใช้รูปแบบสมการของ Power law ดังสมการที่ 3.2 – 3.4 ค่าคงที่ K' , K'' และ K^* และค่า n' , n'' และ n^* แสดงในตารางที่ 4.7 ถึง 4.14

$$G' = K'(\omega)^{n'} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$G'' = K''(\omega)^{n''} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$\eta^* = K^*(\omega)^{n^{*-1}} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

ตารางที่ 4.7 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตคอมพอสิต
แซนแทนกัน

วันที่	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	30.940	0.320	0.995	12.020	0.207	0.940	5.308	0.101	0.947
15	23.674	0.333	0.985	12.115	0.251	0.962	4.247	0.313	0.977
30	29.467	0.272	0.977	12.367	0.232	0.912	5.089	0.265	0.940
45	36.112	0.304	0.985	16.285	0.226	0.952	6.322	0.289	0.977
60	36.210	0.293	0.983	16.355	0.207	0.950	6.344	0.275	0.912
90	56.049	0.228	0.965	32.755	0.199	0.959	10.337	0.220	0.952
150	96.560	0.372	0.987	42.404	0.278	0.976	16.848	0.354	0.985
210	127.240	0.397	0.987	51.835	0.320	0.949	21.916	0.384	0.952

ตารางที่ 4.8 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตคอมพอสิตที่ใช้
แซนแทนกันร่วมกับแคปปีลา - คาราจีแนน

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	27.272	0.320	0.974	14.635	0.245	0.975	4.941	0.301	0.995
15	32.756	0.310	0.974	15.792	0.254	0.978	5.796	0.298	0.973
30	32.796	0.297	0.973	15.821	0.244	0.979	5.081	0.286	0.975
45	37.078	0.264	0.988	12.016	0.215	0.925	6.207	0.259	0.973
60	68.021	0.319	0.961	43.807	0.315	0.961	12.877	0.318	0.979
90	68.643	0.286	0.980	43.674	0.316	0.967	12.956	0.294	0.925
150	80.468	0.307	0.978	41.991	0.265	0.950	14.459	0.298	0.988
210	77.293	0.302	0.933	17.448	0.233	0.958	12.620	0.298	0.925

ตารางที่ 4.9 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตที่ใส่กั้วร์กัม

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	16.572	0.353	0.937	11.458	0.286	0.969	3.216	0.329	0.974
15	17.896	0.447	0.970	9.794	0.357	0.977	3.262	0.423	0.925
30	19.568	0.379	0.925	12.387	0.259	0.940	3.720	0.337	0.969
45	19.511	0.457	0.937	10.943	0.409	0.958	3.565	0.445	0.925
60	12.750	0.349	0.979	7.864	0.303	0.937	2.387	0.335	0.940
90	24.762	0.305	0.987	11.794	0.259	0.914	4.370	0.296	0.958
150	48.192	0.387	0.853	25.532	0.429	0.829	8.687	0.396	0.937
210	128.010	0.298	0.975	30.173	0.238	0.942	20.944	0.294	0.958

ตารางที่ 4.10 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตที่ใส่กั้วร์กัมร่วมกับแคปไซน - คาราจีแนน

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	17.570	0.384	0.976	10.657	0.320	0.948	3.279	0.365	0.937
15	16.312	0.354	0.946	11.243	0.294	0.973	3.161	0.333	0.967
30	16.181	0.390	0.967	10.773	0.351	0.906	3.097	0.377	0.948
45	24.762	0.305	0.987	11.794	0.259	0.914	4.370	0.296	0.967
60	17.458	0.399	0.946	11.229	0.311	0.955	3.320	0.369	0.906
90	26.237	0.347	0.979	10.946	0.264	0.923	4.537	0.332	0.914
150	28.713	0.485	0.964	20.747	0.461	0.974	5.640	0.477	0.987
210	81.043	0.389	0.982	35.761	0.382	0.968	14.099	0.387	0.914

ตารางที่ 4.11 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีโพลีเมอร์โพรโปอิดิกที่ใช้
แซนแทนกัม

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	28.297	0.320	0.942	13.988	0.205	0.952	5.057	0.292	0.987
15	15.675	0.439	0.936	11.129	0.359	0.896	3.073	0.409	0.961
30	24.384	0.294	0.961	12.919	0.280	0.967	4.392	0.291	0.952
45	44.131	0.273	0.967	19.585	0.224	0.932	7.692	0.264	0.961
60	244.111	0.722	0.955	186.680	0.760	0.928	48.960	0.735	0.967
90	252.480	0.599	0.925	168.058	0.562	0.939	48.316	0.585	0.932
150	765.315	0.276	0.970	369.480	0.247	0.942	135.310	0.270	0.967
210	840.000	0.224	0.922	478.520	0.162	0.984	154.210	0.207	0.932

ตารางที่ 4.12 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีโพลีเมอร์โพรโปอิดิกที่ใช้
แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	45.643	0.293	0.994	29.277	0.205	0.972	8.673	0.213	0.994
15	67.967	0.327	0.967	52.974	0.289	0.844	13.729	0.311	0.965
30	67.967	0.327	0.965	43.848	0.306	0.959	12.876	0.320	0.972
45	130.650	0.462	0.971	68.854	0.392	0.943	23.567	0.445	0.965
60	556.143	0.299	0.973	424.377	0.286	0.913	111.350	0.294	0.959
90	557.153	0.211	0.936	414.688	0.219	0.971	110.540	0.213	0.943
150	867.694	0.298	0.985	445.410	0.243	0.940	155.480	0.285	0.971
210	819.270	0.260	0.988	381.640	0.250	0.979	143.850	0.258	0.943

ตารางที่ 4.13 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตโพลาอิมิไนด์ที่ใช้
กั้วร์กัม

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	31.917	0.405	0.985	18.921	0.412	0.970	5.905	0.408	0.971
15	15.153	0.444	0.927	10.090	0.393	0.890	2.902	0.427	0.920
30	13.990	0.520	0.920	10.145	0.459	0.823	2.757	0.470	0.970
45	14.508	0.385	0.984	10.086	0.367	0.916	2.750	0.382	0.820
60	95.651	0.157	0.979	44.321	0.130	0.936	16.784	0.152	0.982
90	156.428	0.180	0.988	44.545	0.133	0.946	25.899	0.176	0.916
150	334.827	0.343	0.936	103.310	0.340	0.893	55.768	0.343	0.984
210	354.450	0.287	0.948	61.597	0.420	0.959	57.341	0.290	0.916

ตารางที่ 4.14 ค่า G' , G'' และ η^* จากสมการ Power law ของไฮดรอกซีเมทิลอะครีเลตโพลาอิมิไนด์ที่ใช้
กั้วร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน

วัน	$G' = K'(\omega)^{n'}$			$G'' = K''(\omega)^{n''}$			$\eta^* = K^*(\omega)^{n^*-1}$		
	K' (Pa)	n'	R^2	K'' (Pa)	n''	R^2	K^* (Pa.s)	n^*	R^2
0	24.762	0.305	0.987	11.794	0.259	0.914	4.369	0.296	0.982
15	14.566	0.410	0.935	11.967	0.393	0.908	3.009	0.403	0.953
30	19.701	0.381	0.953	11.829	0.274	0.944	3.683	0.347	0.914
45	14.578	0.352	0.962	10.917	0.394	0.962	2.902	0.366	0.953
60	15.347	0.352	0.921	10.959	0.315	0.917	3.004	0.339	0.944
90	116.099	0.173	0.913	48.012	0.173	0.963	19.995	0.179	0.962
150	350.630	0.201	0.938	69.622	0.275	0.890	56.928	0.203	0.962
210	492.430	0.325	0.942	77.093	0.231	0.918	79.381	0.322	0.962

ตารางที่ 4.15 ค่า G' (Pa) ของไอศกรีมที่ $\omega = 10$ (rad/s) ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)							
	0	15	30	45	60	90	150	210
PX	59.15	43.08	48.01	82.80	1287.03	1003.75	1445.57	1407.60
PXC	89.59	144.14	146.34	378.89	1107.10	904.85	1724.91	1491.17
PG	81.10	42.07	46.28	35.23	137.40	236.98	1398.06	1267.88
PGC	49.97	37.44	47.38	32.76	34.54	172.99	874.70	1251.23
X	64.61	50.96	55.07	72.77	71.04	94.75	227.40	317.19
XC	56.99	66.91	65.02	68.16	141.89	132.65	163.24	154.93
G	37.37	50.10	46.83	55.91	28.49	49.97	117.56	254.06
GC	42.55	36.84	39.74	49.97	43.77	58.31	87.78	198.25
PX, PXC, PG และ PGC	คือไอศกรีมโฟรโบโอดิกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและ กัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ							
X, XC, G และ GC	คือไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและ กัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ							

เมื่อนำค่าคงที่จากตารางที่ 4.7 – 4.14 และ $\omega = 10$ rad/s มาแทนในสมการที่ 3.2 เพื่อคำนวณ G' ณ อายุการเก็บรักษาต่างๆ โดยได้ค่า G' ดังแสดงในตารางที่ 4.15 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารให้ความคงตัวและการเติม *L. casei* 01 ต่อค่า G' ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าในช่วงเริ่มต้นของอายุการเก็บรักษา (วันที่ 0 – 30) ค่า G' ของไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมทั้งสูตรควบคุมและสูตรโฟรโบโอดิกทั้งที่ใช้เดี่ยว หรือใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน มีแนวโน้มสูงกว่าไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัมทั้งสูตรควบคุมและสูตรโฟรโบโอดิกทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปป์า – คาราจีแนน แสดงให้เห็นว่าแซนแทนกัมแสดงสมบัติความเป็นของแข็งและมีโครงสร้างที่ทนต่อแรงสูงกว่ากัวร์กัม เนื่องจากความสามารถเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหจนเป็นโครงสร้างแบบเจลอ่อน (Weak gel) ของแซนแทนกัม ซึ่งแสดงสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic

solid) มีแรงยึดเหนี่ยวภายในและระหว่างโมเลกุลสูงกว่ากั้วร์กัมที่มีโครงสร้างแบบ Random coil ทำให้ G' ของไอศกรีมที่ใช้แซนแทนกัมสูงกว่าไอศกรีมที่ใช้กั้วร์กัม แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุการเก็บรักษามากขึ้น (150 - 210) พบว่าค่า G' และ η^* ของไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกและสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัมและไอศกรีมที่ใช้กั้วร์กัมมีค่า G' ใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าในช่วงหลังที่อายุการเก็บรักษามากขึ้น อิทธิพลของผลึกน้ำแข็งมีผลต่อค่า G' เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการเกิด Ice recrystallization และสูงกว่าอิทธิพลของโครงสร้างของไอศกรีม

เมื่อมีการใช้แคปปา - คาราจีแนนร่วมกับสารให้ความคงตัวชนิดอื่นในไอศกรีมทั้งสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก พบว่าไอศกรีมที่มีการใช้แคปปา - คาราจีแนนร่วมกับแซนแทนกัม หรือกั้วร์กัม แสดงค่า G' ของไอศกรีมสูงกว่า G'' ตลอดอายุการเก็บรักษา แสดงถึงพฤติกรรมแบบเจลอ่อน (Weak gel behavior) คล้ายไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ในช่วงเริ่มต้นของอายุการเก็บรักษา (วันที่ 0 - 30) ไอศกรีมที่มีการใช้แคปปา - คาราจีแนนร่วมด้วยมีค่า G' สูงกว่าไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียว ทั้งในไอศกรีมสูตรควบคุมหรือในสูตรโพรไบโอติก ทั้งนี้เนื่องจากแคปปา-คาราจีแนนสามารถจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหร่วมกับเคซีนไมเซลล์ได้ (Spagnuolo และคณะ, 2005) ส่งเสริมให้ไอศกรีมสามารถทนต่อแรงภายนอกได้มากขึ้น จึงแสดงสมบัติความเป็นของแข็งสูงชันกว่าไอศกรีมที่ไม่มีการเติมแคปปา - คาราจีแนน แต่เมื่ออายุการเก็บรักษามากขึ้นอิทธิพลจากโครงสร้างร่างแหของแคปปา - คาราจีแนนส่งผลต่อค่า G' ลดลง ในขณะที่กระบวนการเกิด Ice recrystallization มีผลทำให้ค่า G' สูงขึ้น ดังนั้นค่า G' ของไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปปา - คาราจีแนน จึงมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

ผลของการเติม *L. casei* 01 ลงไปในไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดแซนแทนกัม และกั้วร์กัม (ตารางที่ 4.15) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า G' พบว่าในการเปลี่ยนแปลงในช่วงวันที่ 0 - 45 ของอายุการเก็บรักษา ค่า G' ของไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมและกั้วร์กัม มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม แสดงให้เห็นว่าไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมและกั้วร์กัม มีโครงสร้างที่ทนต่อแรงได้น้อยลง แต่หลังจากนั้นค่า G' เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมที่มีอายุการเก็บมากขึ้นมีโครงสร้างที่ทนต่อแรงได้สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในไอศกรีมโพรไบโอติกทุกสูตรมีส่วนผสมของอินูลินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลฟรุคโตสและจัดเป็นสารในกลุ่มพรีไบโอติก ซึ่งอินูลินถูกใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อส่งเสริมการรอดชีวิตของโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม Makras และคณะ (2005) พบว่า *L. casei* สามารถย่อยอินูลิน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลสายสั้นลงที่มีโมเลกุลน้ำตาลฟรุคโตสตั้งแต่ 2 - 6 โมเลกุล

การที่ไอศกรีมมีปริมาณน้ำตาลสายสั้นเหล่านี้เพิ่มขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของน้ำในส่วนที่ไม่แข็งตัว (Unfrozen phase) ลดต่ำลง (Freezing point depression) ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติ Colligative ส่งผลให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็งได้น้อยลง และมีปริมาณน้ำในส่วนที่ไม่แข็งตัวมากขึ้น ความหนืดของส่วนที่ไม่แข็งตัวลดลง เป็นสาเหตุให้ค่า G' ลดลง แต่เมื่ออายุการเก็บรักษามากขึ้น อิทธิพลของอินูลินจะลดลง เนื่องจากปริมาณของอินูลินลดลงจากการย่อยของ *L. casei* 01 ทำให้ อิทธิพลของน้ำตาลสายสั้นลดลงตามไปด้วย ดังนั้นในช่วงหลังจาก 45 วันแรก การเปลี่ยนแปลง ของค่า G' จึงเกิดจากอิทธิพลของผลึกน้ำแข็งหรือกระบวนการ Recrystallization ของผลึกน้ำแข็ง มากขึ้น ส่งผลให้ ค่า G' สูงขึ้นตามอายุการเก็บรักษา

นอกจากนี้ความแตกต่างของค่า G' ระหว่างไอศกรีมสูตรควบคุมกับ ไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมและกัวร์กัม ยังเป็นผลมาจากอิทธิพลของ pH อีกด้วย เมื่อ อายุการเก็บรักษานานขึ้น ค่า pH ของไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่าลดลง โดยค่า pH ที่ลดลง จะ ส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ในนม (Protein – protein interaction) ทำให้โครงสร้างของโปรตีนนมมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น จึงแสดง ความเป็นของแข็งสูงขึ้น (Lee และ Lucey, 2004)

แต่อย่างไรก็ตาม pH ที่ลดลงอาจกระตุ้นให้เกิดการแยกเฟส (Phase separation) ระหว่างโปรตีนกับสารให้ความคงตัว ซึ่งเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีน และโปรตีนเวย์ในนมที่เกิดมากขึ้นในช่วงหลังของอายุการเก็บรักษา (pH ลดลงมาก) ทำให้ เกิดปรากฏการณ์ Depletion flocculation ทำให้โปรตีนและสารให้ความคงตัวที่เคยกระจายตัว ผสมกันอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอโดยมีน้ำล้อมรอบโมเลกุลทั้งสองอยู่ ต่างเคลื่อนที่เข้าหาโมเลกุล ชนิดเดียวกันมากขึ้น เมื่อโมเลกุลอยู่ชิดกันมากขึ้น (Sybbe และคณะ, 1998) อาจทำให้ปริมาณน้ำ ที่เคยล้อมรอบโมเลกุลลดลง ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในส่วนที่ไม่แข็งตัวมากขึ้น ปริมาณน้ำที่มาก ขึ้นนี้สามารถเคลื่อนที่ไปรวมกับผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่เดิม ทำให้ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่มีจำนวน มากขึ้น ทำให้ไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่า G' สูงกว่าไอศกรีมสูตรควบคุม

งานวิจัยของ Morishita และคณะ (1974) แสดงให้เห็นว่า *L. casei* จำเป็นต้องใช้กรดอะมิโนบางชนิด เช่น อะลานีน ทริปโตเฟน ไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีอยู่ใน โปรตีนนม เพื่อใช้ในการดำรงชีวิต ซึ่งส่งผลถึงสมบัติวิทยาการระส่ำได้ โดย *L. casei* ที่มีชีวิตอาจจะ ปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสายโพลีเปปไทด์ (Polypeptide) ที่เป็นโครงสร้างของโปรตีนเวย์หรือ โปรตีนเคซีนทำให้สายของโปรตีนสั้นลง ทำให้โปรตีนสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ หรืออาจ กระตุ้นให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนแล้วเกิดการแยกเฟสมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถ

เคลื่อนที่เข้าไปรวมกับผลึกน้ำแข็งได้มากขึ้น ผลึกน้ำแข็งจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจเป็นอีกสาเหตุที่ส่งผลทำให้ G' สูงขึ้นตามอายุการเก็บรักษา

เมื่อเปรียบเทียบไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกที่มีการใช้แคปป้า – คาราจีแนนร่วมด้วย กับไอศกรีมสูตรควบคุมที่มีการใช้แคปป้า – คาราจีแนน พบว่าค่า G' ของไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกที่มีการใช้แคปป้า – คาราจีแนนสูงกว่าไอศกรีมสูตรควบคุมที่มีการใช้แคปป้า – คาราจีแนน แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของโพรไบโอติกที่ทำให้ไอศกรีมแสดงสมบัติความเป็นของแข็งของไอศกรีมสูงขึ้น เนื่องจากค่า pH ของไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่าลดลง ส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ในนม (Protein – protein interaction) และอาจทำให้อันตรกิริยาระหว่างแคปป้า – คาราจีแนนกับเคซีนไมเซลล์สูงขึ้น ทำให้โครงสร้างของโปรตีนมีแรงยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น จึงแสดงความเป็นของแข็งสูงขึ้น (G' สูงขึ้น) และไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกมี G' สูงกว่าสูตรควบคุมมาก แสดงให้เห็นว่าไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกมีสมบัติความเป็นของแข็งมากกว่าไอศกรีมสูตรควบคุม อาจเป็นผลจากกระบวนการเกิด Ice recrystallization การเกิด Phase separation ของโปรตีนและสารให้ความคงตัว และการใช้โปรตีนของเชื้อ *L. casei* 01 ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

นอกจากนี้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโพรไบโอติกกับแคปป้า – คาราจีแนนในไอศกรีม ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า G' โดยในไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม หรือ กัวร์กัมร่วมกับแคปป้า – คาราจีแนน แสดงการลดลงของค่า G' ไม่ชัดเจนเท่ากับไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม หรือ กัวร์กัมเพียงชนิดเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องจากโครงสร้างเจลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างแคปป้า – คาราจีแนนกับเคซีนไมเซลล์ และอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ที่เป็นผลมาจาก pH ส่งเสริมให้โครงสร้างแข็งแรงและทนต่อแรงได้สูงขึ้น ซึ่งอาจมีอิทธิพลสูงกว่า Phase separation ของโปรตีนกับสารให้ความคงตัว และการใช้โปรตีนของเชื้อ *L. casei* 01

เนื่องจากค่า G' ของไอศกรีมที่อายุการเก็บรักษาตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป แสดงถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็งมากกว่าอิทธิพลของโครงสร้างไอศกรีม ดังนั้นความชันของกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง G' ที่ ω เท่ากับ 10 rad/s กับอายุการเก็บรักษา ที่อายุการเก็บตั้งแต่ 45 วันขึ้นไปสามารถแสดงได้ถึงถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็ง (ตารางที่ 4.16) พบว่าค่าความชันของ G' ในไอศกรีมมีค่ามากกว่า 0 แสดงให้เห็นว่า G' มีค่าสูงขึ้นตามอายุการเก็บรักษา ซึ่งให้เห็นว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการ Ice recrystallization นอกจากนี้ไอศกรีมที่แสดงค่า

ความชันสูงแสดงให้เห็นถึงอัตราการขยายขนาดผลึกน้ำแข็งมีค่าสูง ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากกว่าไอศกรีมที่แสดงค่าความชันต่ำ

ตารางที่ 4.16 ค่าความชันของ $G' (\omega = 10 \text{ rad/s})$ ของไอศกรีมตั้งแต่วันที่ 45 - 210 วัน

สูตร	ค่าความชัน	R^2
PX	5.53	0.448
PXC	6.11	0.636
PG	8.85	0.840
PGC	8.04	0.972
X	1.26	0.971
XC	0.38	0.486
G	1.60	0.881
GC	0.87	0.863
PX, PXC, PG และ PGC	คือไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและ กัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ	
X, XC, G และ GC	คือไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและ กัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ	

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารให้ความคงตัวต่อค่าความชันของ G' พบว่า ไอศกรีมโพรไบโอติกและสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัมแสดงค่าความชันของ G' ต่ำกว่าไอศกรีมที่ใช้กัวร์กัม แสดงให้เห็นว่าแซนแทนกัมมีความสามารถในการยับยั้งหรือชะลออัตราการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการ Ice recrystallization ได้ดีกว่ากัวร์กัม โดยความสามารถในการชะลอหรือยับยั้งอัตราการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งของแซนแทนกัม มาจากกลไกการเพิ่มความหนืด และความสามารถในการเกิดเจลแม้ที่อุณหภูมิต่ำ (BahramParvar และ Mazaheri, 2011) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจะละลายกลายเป็นน้ำ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกครั้ง น้ำที่ละลายจะเคลื่อนที่ไปหาผลึกน้ำแข็งแล้วเปลี่ยนสถานะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งอีกครั้ง ทำให้ผลึกน้ำแข็งมี

ขนาดใหญ่ขึ้น (Donhowe และ Hartel, 1996) แชนแทนกัมสามารถเกิดโครงสร้างเป็นเจลอ่อน ซึ่งสามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้ ทำให้น้ำในโครงสร้างเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงสามารถชะลอการรวมตัวของน้ำเพื่อกลายเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้ดี ในขณะที่กั้วร์กัมมีโครงสร้างแบบ Random coil ซึ่งชะลอการเคลื่อนที่ของน้ำได้น้อยกว่า น้ำจึงเคลื่อนที่รวมตัวกันเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้ง่าย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Regand และ Goff (2003) ที่พบว่าการใช้แชนแทนกัมมีประสิทธิภาพการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่ากั้วร์กัม โดยแชนแทนกัมสามารถชะลอหรือลดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างผลึกน้ำแข็งได้ ผ่านกลไกการยับยั้งการเพิ่มความหนืดในระดับจุลภาคของในส่วนที่ไม่แข็งตัว ซึ่งสามารถชะลอกระบวนการละลาย-การแพร่-การโตของผลึกน้ำแข็งได้ (Melt-Diffuse-Regrow) นอกจากนี้งานวิจัยของ Soukoulis และคณะ (2008) ก็แสดงผลไปในทิศทางเดียวกันโดยพบว่าไอศกรีมที่ใช้แชนแทนกัมสามารถยับยั้งการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้ดีกว่าการใช้กั้วร์กัม

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแคปป่า – คาราจีแนนต่อค่าความชันของ G' พบว่าไอศกรีมที่มีใช้แคปป่า – คาราจีแนนร่วมกับแชนแทนกัมหรือกั้วร์กัมทั้งในสูตรโพรไบโอติกและสูตรควบคุมแสดงค่าความชันต่ำกว่าไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวเพียงชนิดเดียวทั้งในสูตรโพรไบโอติกและสูตรควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมแคปป่า – คาราจีแนนสามารถลดอัตราการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งได้ เนื่องจากแคปป่า – คาราจีแนนมีความสามารถในการเกิดเจลอ่อน และสามารถเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนทำให้เกิดโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถกักเก็บน้ำได้มาก และขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำได้ดี การขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งเกิดได้ยาก ค่าความชันของ G' ในไอศกรีมที่มีใช้แคปป่า – คาราจีแนนร่วมกับสารให้ความคงตัวชนิดอื่นจึงลดลง ดังนั้นจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดของสารให้ความคงตัวมีผลต่ออัตราการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งที่แตกต่างกัน ทำให้ผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมมีขนาดที่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม *L. casei* 01 กับไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกันกับต่อค่าความชันของค่า G' พบว่าการเติม *L. casei* 01 ทำให้ค่าความชันของ G' มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม *L. casei* 01 ส่งเสริมการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิด Phase separation ของโปรตีนและสารให้ความคงตัว และการใช้โปรตีนในการดำรงชีวิตของเชื้อ *L. casei* 01 ดังได้อธิบายไว้ข้างต้น

นอกจากนี้ยังพบอันตรกิริยาระหว่าง *L. casei* 01 และแคปป่า – คาราจีแนนต่อค่าความชันของ G' โดยไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แชนแทนกัมหรือกั้วร์กัมร่วมกับแคปป่า – คาราจีแนน มีค่าความชันของ G' น้อยกว่าไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แชนแทนกัมหรือกั้วร์กัมเพียง

ชนิดเดียวประมาณ 4 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่ไอศกรีมสูตรโพรไบโอติกที่ใช้ แชนแทนกัมหรือกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนนแสดงค่าความชันของ G' มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากไอศกรีมโพรไบโอติกมีค่า pH ลดลงตามอายุการเก็บรักษา มีผลทำให้เกิด Phase separation ของโปรตีนและสารให้ความคงตัว ซึ่งส่งผลให้เจลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างแคปป์า - คาราจีแนนกับเคซีนไมเซลล์ และอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ เกิดได้สูงขึ้น ทำให้น้ำที่เคยล้อมรอบโมเลกุลของโปรตีนและสารให้ความคงตัวถูกผลักออกจากโครงสร้างมากขึ้น (Syrbe และคณะ, 1998) น้ำอิสระในส่วนที่ไม่แข็งตัวจึงมีปริมาณมากขึ้น ปริมาณน้ำที่มากขึ้นนี้สามารถเคลื่อนที่ไปรวมกับผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่เดิมทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งสูงขึ้น ค่าความชันของ G' ของไอศกรีมโพรไบโอติกที่มีการใช้ร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนนจึงมีค่าสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับความชันของ G' ในไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียว

4.3.3 การรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ในระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อเก็บรักษาไอศกรีมไว้ที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 210 วัน จำนวนของ *L. casei* 01 ที่มีชีวิตรอดในระหว่างอายุการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.17 เมื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารให้ความคงตัวต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 พบว่าชนิดของสารให้ความคงตัวไม่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ที่ทุกอายุการเก็บรักษา ($p > 0.05$) และเมื่อศึกษาอิทธิพลของอายุการเก็บรักษาต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 พบว่าปริมาณของ *L. casei* 01 ที่รอดชีวิตคงที่ตลอดอายุการเก็บรักษา ($p > 0.05$) โดยหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน *L. casei* 01 มีจำนวนที่รอดชีวิตสูงถึง $7.44 - 7.54 \log \text{cfu/ml}$ จากจำนวนเริ่มต้น $7.51 - 7.58 \log \text{cfu/ml}$ คิดเป็นอัตราการรอดชีวิตมากกว่าร้อยละ 95 การรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ในปริมาณที่สูงนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Homayouni และคณะ (2008a) ที่ศึกษาการรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* ในไอศกรีมที่เก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา -20°C พบว่า *L. casei* มีปริมาณการรอดชีวิตมากกว่า 10^7cfu/ml

อย่างไรก็ตาม Gill (2006) ได้อธิบายถึงการลดจำนวนของจุลินทรีย์ทั่วไปภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ น้ำที่อยู่ทั้งภายในและภายนอกเซลล์เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งทำให้ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดการบาดเจ็บ เยื่อหุ้มเซลล์ฉีกขาด เซลล์หยุดกิจกรรมและตายลง นอกจากนี้ภายใต้สภาวะในการเก็บรักษาที่มีการขึ้น - ลงของอุณหภูมิตลอดเวลา ทำให้ขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นก็อาจจะลดปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตลง

ตารางที่ 4.17 จำนวนของ *L. casei* 01 ที่มีชีวิตรอดในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน ของสูตรไอศกรีมโฟรโปไอติก

สูตร	จำนวนของ <i>L. casei</i> 01 (log cfu/ml)				
	0 ^{ns}	15 ^{ns}	30 ^{ns}	45 ^{ns}	60 ^{ns}
PX ^{ns}	7.55 ± 0.05	7.55 ± 0.04	7.54 ± 0.02	7.54 ± 0.02	7.53 ± 0.04
PXC ^{ns}	7.58 ± 0.02	7.56 ± 0.05	7.56 ± 0.07	7.54 ± 0.03	7.55 ± 0.05
PG ^{ns}	7.57 ± 0.04	7.56 ± 0.04	7.57 ± 0.04	7.55 ± 0.04	7.59 ± 0.01
PGC ^{ns}	7.51 ± 0.05	7.54 ± 0.05	7.53 ± 0.02	7.53 ± 0.03	7.60 ± 0.03

ตารางที่ 4.17 (ต่อ) จำนวนของ *L. casei* 01 ที่มีชีวิตรอดในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน ของสูตรไอศกรีมโฟรโปไอติก

สูตร	จำนวนของ <i>L. casei</i> 01 (log cfu/ml)			
	90 ^{ns}	120 ^{ns}	150 ^{ns}	210 ^{ns}
PX ^{ns}	7.55 ± 0.03	7.46 ± 0.03	7.45 ± 0.06	7.44 ± 0.21
PXC ^{ns}	7.53 ± 0.05	7.58 ± 0.13	7.58 ± 0.12	7.47 ± 0.16
PG ^{ns}	7.58 ± 0.09	7.62 ± 0.05	7.56 ± 0.04	7.48 ± 0.04
PGC ^{ns}	7.57 ± 0.07	7.58 ± 0.05	7.51 ± 0.01	7.54 ± 0.06

ns คือไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)
 PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโฟรโปไอติกที่ใช้แทนแทนกัม
 แทนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัม
 ร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Akin และคณะ (2005) ที่ศึกษาการรอดชีวิตในระหว่างอายุการเก็บรักษาของโฟรโปไอติกสายพันธุ์ *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, *L. acidophilus* และ *B. lactis* ในไอศกรีมโฟรโปไอติกที่อุณหภูมิ -18 °C เป็นเวลา 90 วัน พบว่าหลังอายุการเก็บ 90 วัน การรอดชีวิตของโฟรโปไอติกทั้ง 3 สายพันธุ์ลดจำนวนจาก 10^9 - 10^{10} cfu/g เหลือ 10^5 - 10^7 cfu/g ซึ่งผู้วิจัยให้เหตุผลว่าการลดลงของโฟรโปไอติกเป็นผลมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็งที่มี

ขนาดใหญ่ และออกซิเจนที่อยู่โครงสร้างของไอศกรีมที่ทำให้เกิดภาวะ Oxygen toxicity ซึ่งส่งผลให้เซลล์บาดเจ็บและลดจำนวนลง และจากงานวิจัยของ Akalin และ Erisir (2002) ที่ศึกษาการรอดชีวิตของโพรไบโอติก *L. acidophilus* La-5 และ *B. animalis* Bb-12 ในระหว่างการเก็บรักษาของไอศกรีมไขมันต่ำที่มีการเติมอินูลินหรือโอลิโกฟรุคโตส ที่อุณหภูมิ -18 °C เป็นเวลา 90 วัน พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาทั้ง *L. acidophilus* La-5 และ *B. animalis* Bb-12 มีปริมาณลดลงจากปริมาณเริ่มต้น 6 log cfu/g เหลือ 5 log cfu/g ซึ่งผู้วิจัยก็ให้เหตุผลเช่นกันว่าการลดลงของปริมาณโพรไบโอติกเป็นผลมาจากการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งในไอศกรีม

นอกจากนี้ Ferraz และคณะ (2012) ทำการศึกษาอิทธิพลของการขึ้นฟูในไอศกรีม 3 ระดับ คือร้อยละ 45, 60 และ 90 ต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. acidophilus* ในไอศกรีมที่เก็บรักษาเป็นเวลา 60 วัน พบว่าเมื่อร้อยละการขึ้นฟูสูงขึ้น ทำให้การรอดชีวิตของโพรไบโอติกลดลงมากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะไอศกรีมที่มีการขึ้นฟูร้อยละ 90 มีปริมาณลดลงจากปริมาณเริ่มต้น 8 log cfu/g เหลือ 6 log cfu/g โดยจำนวนของโพรไบโอติกลดลงเป็นผลมาจากภาวะออกซิเจนเป็นพิษในระหว่างการเก็บรักษา

จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมาชี้ให้เห็นว่าในระหว่างการเก็บรักษาไอศกรีม ปริมาณโพรไบโอติกที่เติมลงไปมีปริมาณลดลง ไม่ว่าจะมีการเติมอินูลินหรือไม่ก็ตาม ซึ่งนักวิจัยส่วนใหญ่ให้เหตุผลว่าเป็นสาเหตุจากผลึกน้ำแข็งและปริมาณออกซิเจนในไอศกรีม จากผลการศึกษาร้อยละการขึ้นฟูในหัวข้อ 4.2.1 ที่พบว่าในไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้กัวยร์กัมมีร้อยละการขึ้นฟูสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวที่แตกต่างกันมีปริมาณออกซิเจนไม่เท่ากัน และผลการศึกษาสมบัติวิทยากระแสนของไอศกรีมโพรไบโอติกในหัวข้อ 4.3.2 ที่พบว่าในระหว่างการเก็บรักษา G' ของไอศกรีมโพรไบโอติกทุกสูตรมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากค่าความชันของค่า G' ตั้งแต่วันที่ 45 - 210 วัน (ตารางที่ 4.16) แสดงให้เห็นว่าไอศกรีมที่ใช้สารให้ความคงตัวต่างชนิดกันมีขนาดของผลึกน้ำแข็งที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามสำหรับ *L. casei* 01 ที่ใช้ในการทดลองนี้ แม้อากาศในไอศกรีมมีปริมาณแตกต่างกัน หรือผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือผลึกน้ำแข็งมีขนาดแตกต่างกัน ก็ไม่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าชนิดของสารให้ความคงตัวที่ใช้ในไอศกรีมไม่มีผลต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* 01 ที่เติมลงในไอศกรีม

การรอดชีวิตของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* 01 ในปริมาณที่สูงนี้อาจเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมของไอศกรีมที่เป็นแหล่งอาหารสมบูรณ์เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ (Adriano และคณะ 2009) และความสามารถของ *L. casei* ในการรอดชีวิตระหว่างการเก็บรักษา

ภายใต้อุณหภูมิต่ำ ทนกับออกซิเจนปริมาณน้อยได้ดี และทนต่อผลึกน้ำแข็ง โดย Sauvageot และคณะ (2006) ศึกษากลไกในการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ พบว่า *L. casei* มียีน csp-A (Cold Shock Protein-A) ที่สามารถสร้างโปรตีนเพิ่มภายในเซลล์ ทำให้ความเข้มข้นภายในเซลล์เพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งจึงลดต่ำลง นอกจากนี้ *L. casei* ยังมียีนที่สามารถสังเคราะห์โปรตีน เช่น เอนไซม์ ทำให้สามารถเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์และมีชีวิตรอดได้ (Beaufils และคณะ, 2007) จากงานวิจัยของ Kim และคณะ (2009) พบว่าโปรตีนสายสั้นที่พบได้ทั่วไปในสิ่งมีชีวิต เช่น ไกลซีน-ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน หรือไกลซีน-โพรลีน-อะลานีน-ไกลซีน มีความสามารถในการยับยั้งการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง โดยโปรตีนเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ไปจับกับ Active site ที่ผิวของผลึกน้ำแข็ง ณ บริเวณที่มีการขยายขนาด จึงเป็นไปได้ว่าโปรตีนสายสั้นที่ *L. casei* 01 สร้างขึ้นอาจเป็นโปรตีนในกลุ่มนี้ จึงทำให้ผลึกน้ำแข็งที่อยู่บริเวณรอบเซลล์ไม่เกิดการขยายขนาดจนทำให้เซลล์เกิดการบาดเจ็บและลดจำนวนลงได้

4.3.4 สมบัติการละลายของไอศกรีม

สมบัติการละลายของไอศกรีมเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของส่วนผสมในไอศกรีม เมื่อนำไอศกรีมจากอุณหภูมิ -18°C มาตั้งบนตะแกรงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25°C อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ผลึกน้ำแข็งที่ผิวด้านนอกของไอศกรีมละลายกลายเป็นน้ำ ทำให้เกิดความแตกต่างของน้ำที่ภายนอกและภายในโครงสร้างของไอศกรีม จึงเกิดการถ่ายเทมวล น้ำ (ในที่นี้คือ melted ice cream) จึงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของไอศกรีม โดยน้ำต้องเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศที่หุ้มโปรตีนและไขมันที่เรียงต่อกันเป็นสายยาว รวมทั้งส่วนที่ไม่แข็งตัว ที่มีสารให้ความคงตัว และโปรตีนที่ละลายอยู่ส่วนต่างๆ เหล่านี้ทำหน้าที่ชะลอการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้าง ในขณะที่น้ำเคลื่อนที่ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งเปลี่ยนเป็นน้ำมากขึ้น ปริมาณน้ำที่มากขึ้นจึงรวมตัวกันไหลผ่านโครงสร้างแล้วหยดลงผ่านตะแกรง (Marshall และคณะ, 2003; Muse และ Hartel, 2004)

เมื่ออายุการเก็บรักษามากขึ้น ไอศกรีมทุกสูตรแสดงค่าการละลาย First drip และ Total melting time สูงขึ้น (ตารางที่ 4.18 และ 4.19) เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษา ไอศกรีม ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นจากกระบวนการ Recrystallization และฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจากกระบวนการ Air cell coalescence (Chang และ Hartel, 2002) ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่และฟองอากาศขนาดใหญ่มีค่าการนำความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กและฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้น้ำละลายออกมาช้าลงและต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่อ้อมผ่านผลึกน้ำแข็งและฟองอากาศเหล่านั้น (Muse และ Hartel, 2004b) จึงทำให้ค่าการละลายทั้งสองค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาชนิดของสารให้ความคงตัวต่อค่า Total melting time พบว่า ในช่วงแรกของการเก็บ (60 วัน) ไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม ไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซม์ – คาราจีแนน และไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซม์ – คาราจีแนน แสดงค่า Total melting time สูงกว่าไอศกรีมสูตรอื่น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของโครงสร้างของไอศกรีม ซึ่งเป็นโครงสร้างร่างแหของแซนแทนกัม หรือโครงสร้างของ โปรตีน – โปรตีน – คาราจีแนน ที่สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำที่ละลายออกมาได้มาก แต่เมื่ออายุการเก็บมากขึ้น ไอศกรีมสูตรอื่นๆ มีค่า Total melting time เพิ่มสูงขึ้นและเข้าใกล้ค่า Total melting time ของทั้งสามสูตร แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของโครงสร้างเริ่มมีผลลดลง แต่อิทธิพลของผลึกน้ำแข็งและฟองอากาศมีผลสูงมากขึ้น

การเติมแคปไซม์ – คาราจีแนนลงในไอศกรีม ทำให้ค่า First drip ของไอศกรีมสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมที่ไม่ได้เติมแคปไซม์ – คาราจีแนนทั้งในไอศกรีมสูตรควบคุมและสูตรโพรไบโอติก ($p \leq 0.05$) ซึ่งน่าจะเกิดจากโครงสร้างที่เป็นร่างแหของแคปไซม์ – คาราจีแนนทำให้น้ำที่ละลายออกมาใช้เวลานานในการเคลื่อนที่นานขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการเก็บสูงๆ พบว่า ไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับแคปไซม์ – คาราจีแนนซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อนกลับมีค่า First drip ต่ำกว่าไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้กัวร์กัม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของผลึกน้ำแข็งและฟองอากาศที่เข้ามามีบทบาทต่อค่า First drip ของไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้กัวร์กัมมากกว่า โครงสร้างร่างแหเมื่อเก็บไอศกรีมไว้นานขึ้น

ตารางที่ 4.18 ค่า First drip ของไผ่ศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	First drip (นาฬิกา) ที่อายุการเก็บ									
	0 วัน		15 วัน		30 วัน		45 วัน		60 วัน	
PX	15.27 ^{dB}	± 0.26	15.23 ^{dB}	± 0.26	15.19 ^{dB}	± 0.26	14.89 ^{dB}	± 0.39	14.94 ^{dB}	± 0.50
PXC	16.63 ^{bcD}	± 0.51	16.57 ^{bcD}	± 0.53	16.67 ^{bcD}	± 0.47	16.87 ^{bD}	± 0.11	16.77 ^{bcD}	± 0.35
PG	17.38 ^{abD}	± 0.17	17.33 ^{abD}	± 0.16	17.30 ^{abD}	± 0.16	17.25 ^{abD}	± 0.16	16.96 ^{bcD}	± 0.59
PGC ^{ns}	18.15 ^a	± 0.70	18.09 ^a	± 0.66	18.10 ^a	± 0.65	18.04 ^a	± 0.62	18.05 ^{ab}	± 0.63
X	16.06 ^{cdB}	± 0.47	16.03 ^{cdB}	± 0.48	15.90 ^{cdB}	± 0.62	15.88 ^{cB}	± 0.63	16.53 ^{cB}	± 0.39
XC	16.03 ^{cdC}	± 0.54	15.97 ^{cdC}	± 0.55	15.91 ^{cdC}	± 0.55	15.71 ^{cC}	± 0.62	15.92 ^{cdC}	± 0.54
G	14.41 ^{eC}	± 0.10	14.37 ^{eC}	± 0.12	14.36 ^{eC}	± 0.14	14.32 ^{dC}	± 0.17	13.78 ^{eC}	± 1.12
GC	18.14 ^{aB}	± 0.56	18.09 ^{aB}	± 0.57	18.02 ^{aB}	± 0.57	17.96 ^{aB}	± 0.59	18.45 ^{aB}	± 1.23
A,B,C ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)									
a,b,c ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)									
ns	ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวอนเดียวกัน ($p > 0.05$)									
PX, PXC, PG และ PGC	คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไผ่ศกรีมโพธิ์โตติกที่ใช้แทนแทนกัม แทนแทนกัมร่วมกับแคปป์ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์ - คาราจีแนน ตามลำดับ									
X, XC, G และ GC	คือส่วนผสมพร้อมทำไผ่ศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แทนแทนกัม แทนแทนกัมร่วมกับแคปป์ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปป์ - คาราจีแนน ตามลำดับ									

ตารางที่ 4.18 (ต่อ) ค่า First drip ของไคสกริมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	First drip (นาที่) ที่อายุการเก็บ			
	90 วัน	120 วัน	150 วัน	210 วัน
PX	20.35 ^{cdA} ± 0.49	21.55 ^{cA} ± 0.73	21.40 ^{defA} ± 1.21	20.95 ^{bcdA} ± 1.12
PXC	24.02 ^{aC} ± 0.22	27.27 ^{aA} ± 0.16	27.68 ^{aA} ± 1.36	27.70 ^{aA} ± 0.64
PG	21.94 ^{bBC} ± 0.33	22.47 ^{bcAB} ± 1.00	22.98 ^{bcdA} ± 0.57	23.33 ^{bA} ± 1.00
PGC ^{ns}	19.31 ^{de} ± 0.79	18.40 ^e ± 0.88	19.57 ^f ± 1.02	19.37 ^d ± 1.73
X	20.21 ^{cdA} ± 0.16	19.87 ^{deA} ± 0.39	20.21 ^{efA} ± 0.73	19.70 ^{cdA} ± 1.90
XC	21.23 ^{bcB} ± 0.66	22.16 ^{cAB} ± 1.16	23.34 ^{bA} ± 0.91	22.82 ^{bAB} ± 2.36
G	18.78 ^{eB} ± 1.11	20.82 ^{cdA} ± 1.21	22.06 ^{cdeA} ± 1.19	22.27 ^{bcA} ± 0.94
GC	23.26 ^{bA} ± 0.77	23.82 ^{bA} ± 1.09	24.53 ^{bA} ± 1.06	23.77 ^{abA} ± 1.41
A,B,C ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)			
a,b,c ...	แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)			
ns	ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวอนเดียวกัน ($p > 0.05$)			
PX, PXC, PG และ PGC	คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไคสกริมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ			
X, XC, G และ GC	คือส่วนผสมพร้อมทำไคสกริมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ			

ตารางที่ 4.19 ค่า Total melting time ของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	Total melting time (นาที) ที่อายุการเก็บ									
	0 วัน		15 วัน		30 วัน		45 วัน		60 วัน	
PX	33.73 ^{bcC}	± 0.73	33.64 ^{bC}	± 0.73	33.55 ^{bcC}	± 0.74	32.91 ^{bcC}	± 1.42	32.72 ^{abC}	± 1.41
PXC	35.99 ^{aB}	± 1.00	35.86 ^{aB}	± 1.02	35.74 ^{aB}	± 1.05	35.54 ^{aB}	± 0.52	35.39 ^{aB}	± 0.57
PG	31.89 ^{cC}	± 0.34	31.78 ^{cC}	± 0.38	31.61 ^{cdC}	± 0.36	30.87 ^{cdC}	± 0.34	32.12 ^{bC}	± 2.70
PGC	31.96 ^{cC}	± 1.53	31.56 ^{cC}	± 1.28	31.40 ^{cdC}	± 1.22	31.04 ^{cdC}	± 1.83	30.66 ^{bC}	± 2.33
X	32.87 ^{bC}	± 1.65	32.76 ^{bC}	± 1.56	32.72 ^{bcC}	± 1.80	33.29 ^{bC}	± 1.26	32.54 ^{abC}	± 1.33
XC	34.97 ^{abCDE}	± 0.44	34.87 ^{abCDE}	± 0.45	34.74 ^{abDE}	± 0.45	34.62 ^{abDE}	± 0.45	33.00 ^{abE}	± 1.93
G	29.73 ^{dC}	± 1.81	29.83 ^{dC}	± 1.16	29.88 ^{dC}	± 1.30	29.82 ^{dC}	± 1.30	30.48 ^{bC}	± 0.11
GC	32.24 ^{cC}	± 1.19	31.11 ^{cC}	± 0.89	32.14 ^{cC}	± 1.68	32.71 ^{bcC}	± 0.88	33.48 ^{abC}	± 1.27

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.19 (ต่อ) ค่า Total melting time ของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	Total melting time (นาที) ที่อายุการเก็บ							
	90 วัน		120 วัน		150 วัน		210 วัน	
PX	38.15 ^{bB}	± 0.94	40.74 ^{bcA}	± 0.63	40.78 ^{bcA}	± 2.04	39.14 ^{bcAB}	± 1.00
PXC	42.52 ^{aA}	± 0.81	43.82 ^{aA}	± 2.96	45.68 ^{aA}	± 2.59	44.16 ^{aA}	± 3.27
PG	35.34 ^{cB}	± 1.11	36.63 ^{cB}	± 0.77	45.06 ^{aA}	± 1.37	44.13 ^{aA}	± 0.61
PGC	35.04 ^{cB}	± 0.64	36.60 ^{cB}	± 0.58	40.68 ^{bcA}	± 1.93	42.01 ^{abA}	± 1.41
X	34.18 ^{cC}	± 0.98	34.84 ^{cBC}	± 0.65	37.71 ^{cdA}	± 1.57	37.06 ^{cAB}	± 2.37
XC	37.88 ^{bAB}	± 1.45	39.65 ^{cA}	± 1.98	36.45 ^{dBCD}	± 1.93	37.43 ^{cABC}	± 1.91
G	34.79 ^{cB}	± 0.39	36.27 ^{cB}	± 0.65	39.70 ^{bcdA}	± 2.33	40.36 ^{bcA}	± 2.02
GC	38.74 ^{bB}	± 1.05	42.20 ^{bA}	± 0.63	42.57 ^{abA}	± 2.06	44.25 ^{bcA}	± 1.00

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ์ - คาราจีแนน ตามลำดับ

4.3.5 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม

ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติและความชอบโดยรวม ดังแสดงในตารางที่ 4.20 – 4.27 พบว่า เมื่ออายุการเก็บผ่านไปเป็นเวลา 210 วัน ความชอบไอศกรีมด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของผู้บริโภคไม่มีการเปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) ยกเว้นไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้กักรัมได้รับการยอมรับในด้านกลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวมสูงขึ้นเมื่ออายุการเก็บมากขึ้น ($p \leq 0.05$) เนื่องจากในช่วงต้นของการเก็บรักษา ไอศกรีมที่ใช้กักรัมมีกลิ่นรสและรสชาติเฉพาะตัวที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ แต่เมื่อเวลาผ่านไป กลิ่นรสและรสชาตินี้ลดลง ผู้บริโภคจึงให้คะแนนการยอมรับสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความชอบของผู้บริโภคต่อไอศกรีมโพรไบโอติกและไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดเดียวกัน พบว่าไอศกรีมโพรไบโอติกได้รับคะแนนการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่าหรือไม่แตกต่าง กับไอศกรีมสูตรควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า *L. casei* 01 สามารถเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสให้เป็นกรดแลคติก กรดอะซิติก กรดอินทรีย์อื่นๆ เช่น ไดอะซิติก อซิโทลดีไฮด์และอะซิโตอิน (Diaz-Maniz และคณะ, 2006) และยังสามารถผลิตกรดไขมันอิสระที่ให้กลิ่นรสและรสชาติ เช่น กรดบิวทิริก กรดปาล์มิติก กรดสเตียริก เป็นต้น (Poveda และ Cabezas, 2006) และอาจมีอันตรกิริยาร่วมกับกลิ่นรสสตรอบเบอร์รี่ที่มีอยู่เดิม ในสัดส่วนที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รสชาติและกลิ่นรสเปรี้ยวหอมกลมกล่อม นอกจากนี้เป็นไปได้ว่าโครงสร้างร่างแหของโปรตีนที่เกิดจากกรดที่ *L. casei* สร้างขึ้นสามารถกักเก็บกลิ่นรส รสชาติ และปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ส่งเสริมให้ไอศกรีมโพรไบโอติกได้รับการยอมรับมากกว่าสูตรควบคุม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soukoulis และ Tzia (2010) ที่ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมโพรไบโอติกกรณีศึกษา พบว่าไอศกรีมโพรไบโอติกมีลักษณะทางประสาทสัมผัสแตกต่างจากสูตรที่ไม่มีการเติมโพรไบโอติกเช่น รสขม รสเปรี้ยว รสฝาด ลักษณะความเป็นก้อน (Bulky) ความเปราะ (Brittle) และความแข็ง (Hard) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามผลการทดลองในด้านสมบัติวิทยากระแสดังแสดงให้เห็นว่าไอศกรีมโพรไบโอติกมีเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็งจนเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่กว่าไอศกรีมสูตรควบคุม แต่ยังคงได้รับคะแนนความชอบสูงกว่า ดังนั้นการยอมรับของผู้บริโภคจึงอาจไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกน้ำแข็ง หรือความหนืดของไอศกรีมเท่านั้น แต่อาจจะเกี่ยวข้องกับลักษณะทางประสาทสัมผัสอื่นๆ นอกจากกลิ่นรสและรสชาติ เช่น ค่าความแข็ง (Hard) ความ

หยาบ (Coarse) ลักษณะเหลว (Watery) ลักษณะเหนียวคล้ายหมากฝรั่ง (Gummy) และความรู้สึกมันคั่งในปาก (Greasy) ของไอศกรีมได้ (Oya และคณะ, 2009)

ไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แทนแทนกันทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปไซซิน-คาราจีแนนได้รับคะแนนการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุดในทุกช่วงอายุการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นร่างแหมากกว่าไอศกรีมสูตรอื่นๆ สามารถกักเก็บกลิ่นรส รสชาติ และปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ในขณะที่ไอศกรีมที่ใช้กั้วร์กัมทั้งที่ใช้เดี่ยวหรือใช้ร่วมกับแคปไซซิน - คาราจีแนน ไม่ว่าจะ เป็นสูตรควบคุมหรือสูตรโพรไบโอติก ได้รับคะแนนการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมน้อยกว่าไอศกรีมสูตรที่ใช้แทนแทนกันทุกช่วงอายุการเก็บรักษา อาจเป็นเพราะว่าแม้ว่าไอศกรีมที่ใช้กั้วร์กัมแสดงพฤติกรรมแบบเจลอ่อนคล้ายไอศกรีมที่ใช้แทนแทนกัน แต่กั้วร์กัมเองไม่สามารถเกิดเจลได้ จึงกักเก็บกลิ่นรส และรสชาติได้น้อยกว่า ไอศกรีมที่ใช้แทนแทนกัน ประกอบกับกั้วร์กัมมีกลิ่นรสเฉพาะตัวที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ ทำให้ได้คะแนนการยอมรับต่ำกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Soukoulis และคณะ (2008) พบว่าชนิดของไฮโดร-คอลลอยด์มีผลต่อการรู้กลิ่นรสในไอศกรีม โดยไอศกรีมที่ใช้แทนแทนกันซึ่งพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ที่มีค่า n ต่ำ ส่งเสริมให้การปลดปล่อยกลิ่นรสชนิดดีกว่า ไอศกรีมที่ใช้กั้วร์กัมที่มีการไหลแบบ Shear thinning ที่มีค่า n สูง นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Klesment และคณะ (2011) ยังพบว่าไอศกรีมวนิลลาที่ใช้สารให้ความคงตัวชนิดกั้วร์กัมได้คะแนนการยอมรับในด้านกลิ่นรสน้อยกว่าไอศกรีมที่แทนแทนกัน

ตารางที่ 4.20 คะแนนการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏของไคสกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)							
	3	33 ^{ns}	65 ^{ns}	90 ^{ns}	120 ^{ns}	150 ^{ns}	210	
PX	7.31 ^{aA} ± 1.18	7.33 ^A ± 1.11	6.50 ^B ± 1.45	7.07 ^A ± 1.26	6.98 ^{AB} ± 1.33	6.84 ^{AB} ± 1.09	6.83 ^{abAB} ± 1.49	
PXC	7.32 ^{aA} ± 1.05	7.29 ^{AB} ± 0.98	6.95 ^{ABC} ± 1.30	6.93 ^{ABC} ± 1.23	7.14 ^{AB} ± 0.96	6.46 ^C ± 1.39	6.80 ^{abBC} ± 1.54	
PG	6.89 ^{bcdAB} ± 1.48	7.17 ^A ± 1.21	6.98 ^{AB} ± 1.34	6.95 ^{AB} ± 1.41	6.84 ^{AB} ± 1.30	6.30 ^C ± 1.15	6.81 ^{abBC} ± 1.53	
PGC ^{ns}	7.14 ^{abcd} ± 1.33	6.67 ± 1.88	6.82 ± 1.57	6.93 ± 1.33	6.64 ± 1.37	6.39 ± 1.56	6.76 ^{bc} ± 1.35	
X ^{ns}	7.18 ^{abc} ± 1.27	6.80 ± 1.42	6.85 ± 1.43	6.87 ± 1.32	6.70 ± 1.41	6.64 ± 1.05	6.83 ^{ab} ± 1.71	
XC	7.23 ^{abA} ± 0.83	7.07 ^{AB} ± 1.43	7.08 ^{AB} ± 1.40	6.96 ^{AB} ± 1.44	6.95 ^{AB} ± 1.00	6.55 ^B ± 1.41	6.90 ^{abAB} ± 1.67	
G ^{ns}	6.80 ^{cd} ± 1.51	7.11 ± 1.38	6.77 ± 1.68	6.77 ± 1.51	7.13 ± 1.18	6.62 ± 1.21	6.97 ^a ± 1.43	
GC ^{ns}	6.78 ^d ± 1.44	6.91 ± 1.58	6.64 ± 1.43	6.71 ± 1.63	6.93 ± 1.25	6.29 ± 1.58	6.30 ^C ± 1.86	

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวบนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวบนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.21 คะแนนการยอมรับในด้านสีของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)						
	3 ^{ns}	33 ^{ns}	65 ^{ns}	90 ^{ns}	120 ^{ns}	150 ^{ns}	210
PX ^{ns}	7.14 ± 1.49	7.32 ± 1.36	6.82 ± 1.49	7.46 ± 1.19	7.16 ± 1.29	7.16 ± 1.04	7.14 ^{bcd} ± 1.28
PXC ^{ns}	7.21 ± 1.51	7.32 ± 0.99	7.07 ± 1.33	7.21 ± 0.97	7.18 ± 1.22	6.79 ± 1.38	7.46 ^{ab} ± 1.87
PG ^{ns}	7.26 ± 1.18	7.29 ± 1.32	7.27 ± 1.20	7.46 ± 1.40	7.21 ± 1.20	6.88 ± 1.17	7.49 ^{ab} ± 1.14
PGC ^{ns}	7.36 ± 1.30	7.18 ± 1.15	7.27 ± 1.15	7.23 ± 1.22	7.13 ± 1.49	7.13 ± 1.41	6.89 ^d ± 1.27
X ^{ns}	7.32 ± 1.14	7.20 ± 1.47	7.07 ± 1.54	7.12 ± 1.16	7.25 ± 1.12	6.92 ± 1.04	7.45 ^{abc} ± 1.37
XC ^{ns}	7.54 ± 1.11	7.41 ± 1.34	7.21 ± 1.53	7.34 ± 1.07	7.20 ± 0.88	7.29 ± 0.97	7.34 ^{bc} ± 1.33
G ^{ns}	7.39 ± 1.06	7.38 ± 1.38	7.27 ± 1.38	7.14 ± 1.26	7.21 ± 1.11	6.80 ± 1.53	7.55 ^a ± 1.14
GC ^{ns}	7.36 ± 1.01	7.27 ± 1.30	7.20 ± 1.29	7.01 ± 1.38	7.27 ± 1.02	6.97 ± 1.25	6.91 ^d ± 1.54

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวบนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 คะแนนการยอมรับในด้านกลิ่นรสของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)						
	3	33	65	90 ^{ns}	120	150	210
PX ^{ns}	6.63 ^a ± 1.45	6.62 ^{ab} ± 1.36	6.53 ^a ± 1.63	6.70 ± 1.41	6.68 ^a ± 1.60	6.45 ^a ± 1.29	6.80 ^a ± 1.18
PXC ^{ns}	6.49 ^{ab} ± 1.59	6.52 ^{abc} ± 1.58	6.59 ^a ± 1.57	6.04 ± 1.52	6.56 ^{ab} ± 1.48	6.43 ^a ± 1.57	6.67 ^a ± 1.68
PG ^{ns}	5.71 ^c ± 1.76	6.70 ^a ± 1.40	6.31 ^{ab} ± 1.51	6.36 ± 1.55	5.93 ^{cd} ± 1.86	5.89 ^{bc} ± 1.69	6.39 ^{bc} ± 1.52
PGC ^{ns}	6.32 ^{abc} ± 1.65	6.13 ^{cd} ± 1.85	5.82 ^c ± 1.71	5.77 ± 1.74	6.07 ^{bc} ± 1.62	5.69 ^c ± 1.44	5.80 ^d ± 1.42
X ^{ns}	6.29 ^{abc} ± 1.63	6.34 ^{bc} ± 1.67	6.11 ^{bc} ± 1.74	6.41 ± 1.59	6.52 ^{abc} ± 1.43	6.47 ^a ± 1.29	5.96 ^{cd} ± 1.75
XC ^{ns}	6.46 ^{ab} ± 1.22	6.21 ^{cd} ± 1.43	5.92 ^{bc} ± 1.94	6.14 ± 1.86	5.99 ^{bc} ± 1.64	6.28 ^{ab} ± 1.52	6.39 ^{bc} ± 1.40
G	5.82 ^{bc C} ± 1.73	6.42 ^{abc AB} ± 1.66	5.57 ^{c C} ± 1.81	6.09 ^{ABC} ± 1.55	5.55 ^{d C} ± 1.51	5.46 ^{cd C} ± 1.64	6.59 ^{ab A} ± 1.49
GC ^{ns}	5.76 ^c ± 1.66	5.91 ^d ± 1.64	5.55 ^c ± 2.15	6.00 ± 1.58	5.84 ^{cd} ± 2.04	5.12 ^d ± 1.86	5.83 ^d ± 1.98

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวบนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวบนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.23 คะแนนการยอมรับในด้านรสชาติของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)						
	3	33	65	90	120	150	210
PX ^{ns}	6.51 ^{ab} ± 1.70	6.60 ^a ± 1.64	6.55 ^{ab} ± 1.90	6.87 ^a ± 1.29	6.58 ^{ab} ± 1.79	6.75 ^a ± 1.76	7.20 ^a ± 1.26
PXC	6.40 ^{abB} ± 1.68	6.45 ^{abAB} ± 1.68	6.60 ^{aAB} ± 1.69	5.57 ^{cC} ± 1.87	6.64 ^{aAB} ± 1.44	6.45 ^{abB} ± 1.62	7.07 ^{abA} ± 1.59
PG ^{ns}	5.71 ^c ± 1.78	6.22 ^{ab} ± 2.03	6.32 ^{bc} ± 1.75	6.17 ^{bc} ± 1.81	5.75 ^{de} ± 1.99	5.89 ^{cd} ± 1.84	6.68 ^{bc} ± 1.33
PGC	5.82 ^{cAB} ± 1.95	5.21 ^{cB} ± 1.92	5.75 ^{deAB} ± 2.12	5.53 ^{cB} ± 1.97	5.89 ^{cdAB} ± 2.04	5.41 ^{dB} ± 1.70	6.36 ^{cA} ± 1.59
X ^{ns}	6.62 ^a ± 1.83	5.91 ^{ab} ± 1.88	6.44 ^{bc} ± 1.68	6.36 ^{ab} ± 1.82	6.10 ^{abcd} ± 1.50	6.37 ^{bc} ± 1.49	6.12 ^c ± 1.97
XC ^{ns}	6.24 ^b ± 1.37	5.88 ^b ± 1.75	5.79 ^{cd} ± 2.43	6.31 ^{ab} ± 1.96	6.44 ^{abc} ± 1.58	6.50 ^{ab} ± 1.71	6.35 ^c ± 1.57
G	5.79 ^{cBC} ± 1.84	6.25 ^{abAB} ± 1.92	5.43 ^{eC} ± 1.92	5.82 ^{bcBC} ± 1.76	5.34 ^{fC} ± 1.62	5.46 ^{dC} ± 1.97	6.62 ^{bcA} ± 1.8
GC ^{ns}	5.82 ^c ± 1.99	5.79 ^b ± 1.81	5.50 ^{de} ± 2.48	5.80 ^{bc} ± 1.90	5.66 ^{ef} ± 2.28	5.39 ^d ± 2.10	5.37 ^d ± 2.06

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวบนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวบนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัม ร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัม ร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.24 คะแนนการยอมรับในด้านเนื้อสัมผัสของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)							
	3	33	65	90 ^{ns}	120	150	210	
PX ^{ns}	6.84 ^a ± 1.57	6.94 ^a ± 1.23	6.47 ^{ab} ± 1.77	6.66 ± 1.33	6.68 ^a ± 1.38	6.66 ^a ± 1.44	6.65 ^a ± 1.58	
PXC ^{ns}	6.61 ^{ab} ± 1.59	6.66 ^{ab} ± 1.53	6.50 ^a ± 1.55	6.20 ± 1.60	6.57 ^a ± 1.45	6.34 ^{ab} ± 1.61	6.59 ^{ab} ± 1.65	
PG ^{ns}	5.83 ^d ± 2.01	6.50 ^b ± 1.41	6.38 ^{abc} ± 1.70	6.11 ± 1.74	6.32 ^b ± 2.18	5.75 ^c ± 1.71	6.03 ^c ± 1.77	
PGC ^{ns}	6.25 ^{bcd} ± 1.94	5.91 ^c ± 1.96	6.14 ^{cd} ± 2.14	6.09 ± 1.89	6.48 ^{ab} ± 1.62	5.89 ^c ± 1.52	6.09 ^c ± 1.55	
X ^{ns}	6.48 ^{ab} ± 1.61	6.30 ^{bc} ± 1.66	6.23 ^{bc} ± 1.64	6.34 ± 1.68	6.25 ^b ± 1.68	6.12 ^{bc} ± 1.55	6.29 ^{bc} ± 1.94	
XC ^{ns}	6.44 ^{bc} ± 1.41	6.14 ^{bc} ± 1.68	5.12 ^d ± 2.19	6.00 ± 1.71	6.32 ^b ± 1.43	6.14 ^{bc} ± 1.60	6.30 ^{bc} ± 1.57	
G ^{ns}	6.05 ^{bcd} ± 1.83	6.38 ^{bc} ± 1.82	6.10 ^{cd} ± 1.79	5.82 ± 1.87	6.16 ^b ± 1.72	5.61 ^c ± 1.93	6.04 ^c ± 1.59	
GC ^{ns}	5.92 ^{cd} ± 1.86	6.21 ^{bc} ± 1.64	6.20 ^{bc} ± 2.02	6.30 ± 1.69	6.14 ^b ± 1.87	5.48 ^c ± 1.86	5.99 ^c ± 1.68	

A,B,C ... แสดงความแตกต่างกันในแถวบนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ... แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวบนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปไซ - คาราจีแนน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.25 คะแนนการยอมรับโดยรวมของไอศกรีมในระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 210 วัน

สูตร	อายุการเก็บรักษา (วัน)						
	3	33	65	90	120	150	210
PX ^{ns}	6.89 ^a ± 1.50	6.96 ^a ± 1.16	6.82 ^{ab} ± 1.71	7.04 ^a ± 1.08	6.80 ^a ± 1.33	6.71 ^{ab} ± 1.44	7.19 ^a ± 1.09
PXC ^{ns}	6.86 ^a ± 1.39	6.89 ^{ab} ± 1.30	7.00 ^a ± 1.25	6.36 ^{abc} ± 1.41	6.89 ^a ± 1.32	6.80 ^a ± 1.49	6.98 ^{ab} ± 1.43
PG ^{ns}	6.25 ^c ± 1.72	6.70 ^{ab} ± 1.20	6.71 ^{bc} ± 1.40	6.40 ^{bc} ± 1.57	6.45 ^b ± 1.99	5.94 ^c ± 1.60	6.73 ^{abc} ± 1.19
PGC ^{ns}	6.48 ^{bc} ± 1.60	6.09 ^c ± 1.88	5.71 ^e ± 1.98	5.96 ^c ± 1.72	6.54 ^{ab} ± 1.71	5.92 ^c ± 1.44	6.46 ^c ± 1.46
X ^{ns}	6.84 ^a ± 1.60	6.67 ^{ab} ± 1.65	6.67 ^{cd} ± 1.59	6.54 ^{ab} ± 1.32	6.48 ^b ± 1.50	6.65 ^{ab} ± 1.25	6.35 ^c ± 1.56
XC ^{ns}	6.73 ^{ab} ± 1.20	6.53 ^{bc} ± 1.52	5.99 ^{de} ± 1.20	6.67 ^{ab} ± 1.53	6.21 ^b ± 1.51	6.77 ^a ± 1.58	6.51 ^c ± 1.61
G	5.93 ^{cB} ± 1.88	6.63 ^{bcA} ± 1.71	5.70 ^{eAB} ± 1.87	6.12 ^{bcAB} ± 1.55	6.18 ^{bAB} ± 1.36	5.67 ^{cB} ± 1.63	6.67 ^{bcA} ± 1.66
GC ^{ns}	6.09 ^c ± 1.87	6.20 ^c ± 1.58	6.05 ^{de} ± 2.10	6.50 ^{ab} ± 1.54	6.16 ^b ± 1.94	5.66 ^c ± 1.72	5.77 ^d ± 1.97

A,B,C ...

แสดงความแตกต่างกันในแถวอนเดียวกัน (0-210 วัน) ($p \leq 0.05$)

a,b,c ...

แสดงความแตกต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน ($p \leq 0.05$)

ns

ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแถวอนหรือแถวตั้งเดียวกัน ($p > 0.05$)

PX, PXC, PG และ PGC

คือสูตรส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมโพรไบโอติกที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัมและกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

X, XC, G และ GC

คือส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้แซนแทนกัม แซนแทนกัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน กัวร์กัม และกัวร์กัมร่วมกับแคปป์า - คาราจีแนน ตามลำดับ

