

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของเวย์โปรตีนต่อความคงตัวของอิมัลชันไขมันนม

4.1.1 ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันมีความสัมพันธ์กับค่า ζ -potential ซึ่งบ่งบอกถึงระดับความแรงของแรงผลักกันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชันที่ประกอบด้วยเวย์โปรตีนทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ โดยค่า ζ -potential จะแสดงค่าเป็นลบเมื่ออิมัลชันมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าค่า pI ค่า ζ -potential จะแสดงค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออิมัลชันมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับค่า pI ซึ่งแสดงถึงจำนวนประจุบวกและประจุลบมีปริมาณเท่ากัน ทำให้ประจุนิวเคลียสของอนุภาคน้ำมันมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้า และค่า ζ -potential จะแสดงค่าเป็นบวกเมื่ออิมัลชันมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าค่า pI โดยปริมาณประจุที่เกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคน้ำมันขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่อะมิโน ($-NH_2$ group) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-COOH$ group) ของโมเลกุลโปรตีนที่ดูดซับบนผิวของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่า pK_a ของโปรตีนและค่าความเป็นกรด-ด่างของสภาพของสารละลายที่อยู่โดยรอบ (Kulmyrzaev and Schubert, 2004; McClements, 2005) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่า pI ของเวย์โปรตีนบนผิวของอนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชันมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 (Morr and Foegeding, 1990; Morr and Ha, 1993; Surh *et al.*, 2006)

ค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยเวย์โปรตีนแต่ละชนิดคือเวย์โปรตีนไอโซเลต (WPI) เวย์โปรตีนเข้มข้น (WPC) และเวย์โปรตีนเข้มข้นที่ปรับแต่งคุณค่าทางโภชนาการ (MWPC) ที่ระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีนแต่ละชนิดร้อยละ 0.3 0.6 และ 0.9 (w/w) ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบไปด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w) และน้ำ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดและระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชัน

ชนิดของเวย์โปรตีน	ระดับความเข้มข้น (% w/w)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
WPI	0.3	6.84 ^f ±0.02
	0.6	6.68 ^d ±0.01
	0.9	6.59 ^b ±0.01
WPC	0.3	6.77 ^c ±0.01
	0.6	6.62 ^c ±0.02
	0.9	6.51 ^a ±0.02
MWPC	0.3	6.78 ^c ±0.00
	0.6	6.68 ^d ±0.00
	0.9	6.60 ^b ±0.01

หมายเหตุ : 1)

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าตัวอย่างอิมัลชันทุกสิ่งทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 4.5 ซึ่งเป็นค่า pI ของเวย์โปรตีน ในระบบอิมัลชัน โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.51-6.84 ค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างอิมัลชันยังมีค่าสูงกว่าค่า pI ของเวย์โปรตีนในระบบอิมัลชันจะส่งผลทำให้จำนวนประจุลบที่ผิวของอนุภาคน้ำมันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อความคงตัวและการเกิด flocculation ของอิมัลชัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอิมัลชันของน้ำมันข้าวโพดที่เติม WPC หรือ MWPC ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (w/w) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 มีค่า ζ -potential เท่ากับ 0 แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ค่า ζ -potential ของอิมัลชันที่เติม WPC และ MWPC มีค่าเท่ากับ -39 mV และ -33 mV ตามลำดับ (Surh *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าอิมัลชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่เติม WPI ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 (w/w) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ค่า ζ -potential มีค่าเท่ากับ -50 mV (Khaloufi *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างอิมัลชันควบคู่กับการวิเคราะห์ค่า ζ -potential ทำให้ผลการศึกษาที่ได้ไม่สามารถยืนยันค่า ζ -potential ของตัวอย่างอิมัลชันที่ศึกษา อีกทั้งเวย์โปรตีนที่ใช้ในการศึกษายังประกอบด้วยสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟอสโฟลิพิด และแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ภาคผนวก ก) ซึ่งสารประกอบและแร่ธาตุดังกล่าวอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันและค่า ζ -potential ของตัวอย่างอิมัลชัน (McClements, 2005)

อิมัลชันที่เติม WPI ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุดคือ 6.84 และอิมัลชันที่เติม WPC ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (w/w) มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุดคือ 6.51 อิมัลชันที่เติม WPC และอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.77 และ 6.78 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนเป็นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันที่เติม WPC มีค่าต่ำกว่าอิมัลชันที่เติม MWPC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอิมัลชันที่เติม WPC มีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยเท่ากับ 6.62 และ 6.51 ขณะที่อิมัลชันที่เติม MWPC มีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยเท่ากับ 6.68 และ 6.60 ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจาก WPC ที่ใช้ในการศึกษามีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า MWPC (ภาคผนวก ก) ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนจึงทำให้อิมัลชันที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงด้วย ส่วนอิมัลชันที่เติม WPI ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.84 และ 6.78 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะองค์ประกอบของ WPI มีปริมาณของเวย์โปรตีนสูงกว่า MWPC อีกทั้งองค์ประกอบของ MWPC ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ได้แก่ แลคโตเฟอริน (lactoferrin) แลคโตเพอออกซิเดส (lactoperoxidase) และอิมมูโนโกลบูลิน (immunoglobulin) ในสัดส่วนที่สูงกว่า WPI และ WPC (Surh *et al.*, 2006) โดยโปรตีนดังกล่าวนี้มีค่า pI เท่ากับ 7.9, 9.6 และ 5-8 ตามลำดับ (Etzel, 2004) ขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันที่เติม MWPC มีค่าเท่ากับ 6.78 ซึ่งต่ำกว่าค่า pI ของโปรตีนดังกล่าว โมเลกุลของโปรตีนที่ดูดซับบนผิวของอนุภาคน้ำมันจะแสดงประจุบวกทำให้ประจุสุทธิที่เกิดขึ้นมีจำนวนประจุลบลดลงและส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันมีค่าลดลง นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจาก MWPC มีปริมาณของแคลเซียม (Ca^{2+}) มากกว่า WPI ทำให้ประจุสุทธิบนผิวของอนุภาคน้ำมันมีค่าลดลงได้เช่นเดียวกัน (McClements, 2005) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ WPI และ MWPC เป็นร้อยละ 0.6 หรือ 0.9 (w/w) ค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันไขมันนมที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันที่แยกศึกษาผลของชนิดและระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีน ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยอิมัลชันที่เติม WPI มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณของเวย์โปรตีนสูงสุด (มีปริมาณเวย์โปรตีนร้อยละ 90 w/w, ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6) รองลงมาได้แก่อิมัลชันที่เติม MWPC (มีปริมาณเวย์โปรตีนร้อยละ 70 และประกอบด้วยโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและฟอสโฟลิพิดในสัดส่วนที่มากกว่าเวย์โปรตีนเข้มข้นทั่วไป, ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5) และอิมัลชันที่เติม WPC (มีปริมาณเวย์โปรตีนร้อยละ 80 w/w,

ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6-6.5) มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุด การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีน แต่ชนิดในอิมัลชันไขมันนมทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเวย์โปรตีนที่ใช้มีค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนมาทางกรดเล็กน้อย (ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6-6.5) การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันจึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันมีค่าลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.2 ผลของชนิดของเวย์โปรตีนต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชัน

ชนิดของเวย์โปรตีน	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
WPI	6.70 ^c ±0.11
WPC	6.63 ^a ±0.11
MWPC	6.68 ^b ±0.08

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงในแต่ละชนิดของเวย์โปรตีนเป็นค่าที่เฉลี่ยจากความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.3 0.6 และ 0.9 (w/w)
- 2) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 3) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชัน

ระดับความเข้มข้น (% w/w)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
0.3	6.80 ^c ±0.03
0.6	6.66 ^b ±0.03
0.9	6.56 ^a ±0.04

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงในแต่ละระดับความเข้มข้นเป็นค่าที่เฉลี่ยจากเวย์โปรตีน 3 ชนิด คือ WPI, WPC และ MWPC
- 2) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 3) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

4.1.2 การเกิดคริม

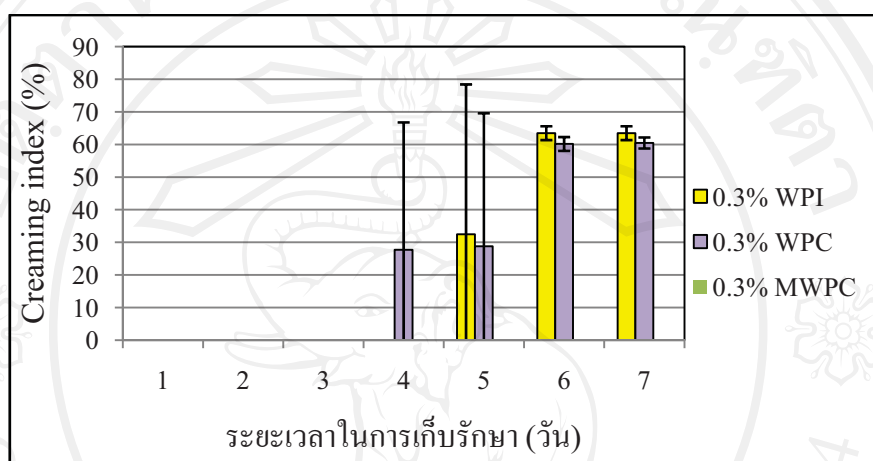
ค่า Creaming index เป็นข้อมูลทางอ้อมที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชัน หากค่า creaming index สูง แสดงถึงอิมัลชันสามารถเกิดคริมได้อย่างรวดเร็ว โดยเป็นผลมาจากอนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชันมีขนาดใหญ่และสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (flocculation) และเกิดการรวมกัน (aggregation) ในที่สุด (Onsaard *et al.*, 2006; Surh *et al.*, 2006; Sun and Gunasekaran, 2009)

จากการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า creaming index ของอิมัลชันไขมันนม พบว่าอิมัลชันที่เติม WPI, WPC และ MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) และอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีค่า creaming index ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยไม่พบการแยกชั้นคริมของอิมัลชันตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งความคงตัวต่อการเกิดคริมของอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนนี้อาจเนื่องมาจากเวย์โปรตีนช่วยให้อนุภาคน้ำมันในอิมัลชันที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์มีขนาดเล็กลง (Onwulata and Huth, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun and Gunasekaran (2009) พบว่าการเพิ่มปริมาณของ WPI จากความเข้มข้นร้อยละ 0.2 (w/w) เป็นร้อยละ 2 (w/w) ในอิมัลชันของน้ำมันปลา menhaden ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กลงและช่วยลดอัตราการเกิดคริมรวมถึงการยับยั้งการเกิดคริมของอิมัลชันได้ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์จะดูดซับเวย์โปรตีนที่บริเวณผิวร่วมได้อย่างรวดเร็ว การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนจะช่วยเพิ่มปริมาณของเวย์โปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมัน (monolayer) นอกจากนี้แล้วเวย์โปรตีนยังสามารถดูดซับบนผิวร่วมในลักษณะหลายชั้น (multilayer) รอบๆ อนุภาคน้ำมันในอิมัลชันทำให้อนุภาคน้ำมันมีประจุลบที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแรงผลักรันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น (Tcholakova *et al.*, 2003) อย่างไรก็ตามเวย์โปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวร่วมในชั้นแรก (first monolayer) เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถผันกลับได้เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พลังงานต่อโมเลกุลของโปรตีนจำนวนมาก แต่โมเลกุลของเวย์โปรตีนที่ดูดซับอยู่ในชั้นอื่นรอบถัดมา อาจเกิดพันธะอย่างอ่อนต่อกันและโดยทั่วไปมักสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Tcholakova *et al.*, 2002) นอกจากนี้เวย์โปรตีนอาจมีอิทธิพลต่อการเกิด flocculation ของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชัน ในระบบอิมัลชันชนิดเข้มข้นการเกิด flocculation จะช่วยเพิ่มความคงตัวต่อการเกิดคริมของอิมัลชัน ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเกิดเป็น โครงสร้างร่างแหที่ช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชัน รวมทั้งเวย์โปรตีนที่ไม่ถูกดูดซับบนผิวของ

อนุภาคน้ำมันมีความสามารถเพิ่มความหนืดหรือช่วยในการก่อเจลให้กับวัสดุภาคต่อเนื่อง ทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ได้ช้าลง จึงช่วยป้องกันการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้ำมันในระบบอิมัลชัน ดังนั้นเวย์โปรตีนจึงอาจช่วยลดโอกาสการเกิดคริมและ coalescence ของอิมัลชันได้ (Onwulata and Huth, 2008)

ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนมีผลต่อความคงตัวต่อการเกิดคริมและค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของอิมัลชันไขมันนมมีค่าลดลง โดยมีค่าเข้าใกล้ค่า pI ของเวย์โปรตีนมากขึ้น ทำให้แนวโน้มประจุลบที่ผิวของอนุภาคน้ำมันมีจำนวนลดลงและส่งผลให้แรงผลักกันทางไฟฟ้า (electrostatic repulsion) ระหว่างอนุภาคน้ำมันลดลงตามไปด้วย ซึ่งอาจมีผลต่อการแยกชั้นคริมของอิมัลชัน แต่จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันไขมันนมมีผลทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวต่อการเกิดคริมเพิ่มขึ้น โดยพบว่าอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีน WPI, WPC และ MWPC ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) และอิมัลชันที่เติม MWPC ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ไม่พบการเกิดแยกชั้นคริมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 วัน ส่วนอิมัลชันที่เติม WPC หรือ WPI ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) สามารถพบการแยกชั้นคริมได้ในวันที่ 4 และ 5 ของระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยมีค่า creaming index เท่ากับร้อยละ 27.7 และ 32.5 ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 4.1) ความคงตัวต่อการเกิดคริมเมื่อความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันเพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากแรงผลักกันเชิงมวล (steric repulsion) ของเวย์โปรตีนที่ดูดซับบนผิวของอนุภาคน้ำมันมีอิทธิพลมากกว่าแรงผลักกันทางไฟฟ้า ซึ่งผลการศึกษาก็ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Surh *et al.* (2006) อย่างไรก็ตามพบว่าอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ไม่พบการแยกชั้นคริมเช่นเดียวกัน อาจเนื่องมาจาก MWPC มีองค์ประกอบของฟอสโฟลิพิดและโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้แก่โบวีนซีรัมอัลบูมิน (Bovine serum albumin) (น้ำหนักโมเลกุล 69 kDa) แลคโตเฟอริน (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 80 kDa) แลคโตโกลบูลิน (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 80 kDa) และอิมมูโนโกลบูลิน (น้ำหนักโมเลกุล 150 kDa) ในสัดส่วนที่สูงกว่า WPI และ WPC (Surh *et al.*, 2006; Onwulata and Huth, 2008) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าฟอสโฟลิพิดสามารถถูกดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันได้เร็วกว่าโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในเวย์โปรตีนในระหว่างขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ ทำให้อนุภาคน้ำมันที่ได้มีขนาดเล็กและเกิดแรงผลักกันระหว่างอนุภาคมากขึ้น (McClements, 2005) หรืออาจเนื่องมาจากฟอสโฟลิพิดและโปรตีนอาจมีปฏิสัมพันธ์ต่อกันที่บริเวณผิวร่วมระหว่างน้ำและน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มความหนาของชั้นรอบๆ

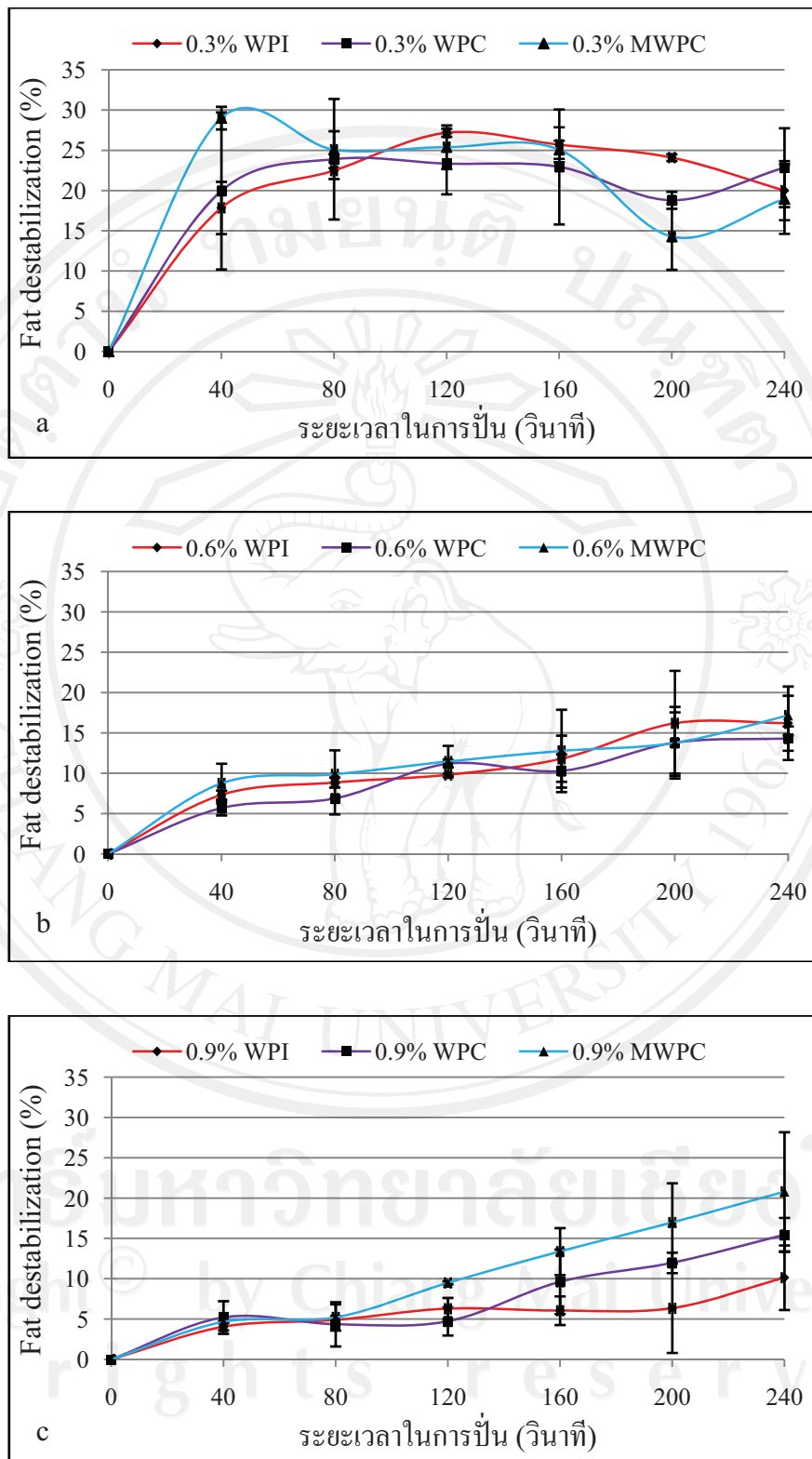
อนุภาคน้ำมันในอิมัลชันและช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวมากขึ้น (Friberg *et al.*, 2004) และอาจเนื่องมาจากโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นทำให้ชั้นโปรตีนที่ถูกดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันมีความหนาเพิ่มขึ้น จึงช่วยเพิ่มความคงตัวต่อการเกิด coalescence ให้กับอิมัลชัน ในระหว่างขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lobo (2002), Lobo and Svereika (2003) และ Surh *et al.* (2005)



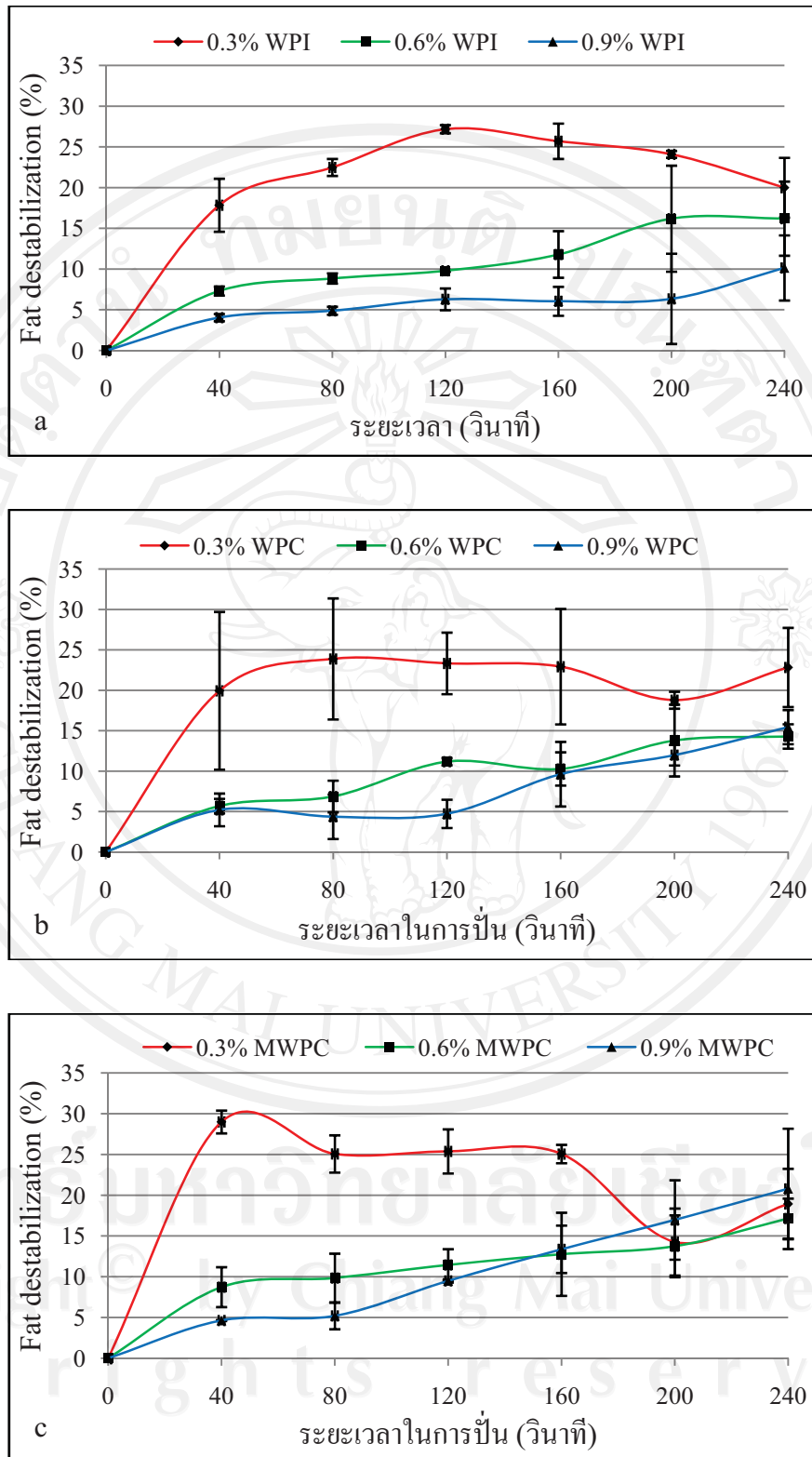
ภาพที่ 4.1 แสดงผลของเวย์โปรตีน WPI, WPC และ MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ต่อค่า Creaming index (ร้อยละ) ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 วัน

4.1.3 Fat destabilization index

ค่า Fat destabilization index เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับการเกิด partial coalescence ของอิมัลชัน การเกิด partial coalescence จะเริ่มขึ้นเมื่อผลึกไขมันบางส่วนภายในอนุภาคน้ำมันทะลุออกไปยังส่วนของของเหลวในอนุภาคน้ำมันอื่นๆ และเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันเพียงบางส่วน โดยอนุภาคน้ำมันจะยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้ทั้งนี้เพื่อลดพื้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมันที่จะสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำและในบางครั้งอาจเกิดการเชื่อมต่อกันเป็น โครงสร้างร่างแหซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันภายในอิมัลชันได้ดียิ่งขึ้นและอนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวกันบางส่วนนี้ทำให้เกิดโครงสร้างล้อมรอบเซลล์อากาศซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อการผลิตไอศกรีม ทำให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้มีความคงตัวและมีเนื้อสัมผัสที่ดี (McClements, 2005) ซึ่งผลของชนิดและความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization ของอิมัลชันไขมันนมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 4.2 และ 4.3



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของชนิดของเวย์โปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3, 0.6 และ 0.9 (w/w) ต่อค่า fat destabilization (ร้อยละ) ของอิมัลชันไขมันนมในระหว่างการปั่นแข็งที่ระยะเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของเวย์โปรตีน WPI, WPC และ MWPC ต่อค่า fat destabilization (ร้อยละ) ของอิมัลชันไขมันนมในระหว่างการปั่นแข็งที่ระยะเวลาต่างๆ

จากภาพที่ 4.2 พบว่าอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) (ภาพที่ 4.2b และ 4.2c) มีลักษณะการเกิด fat destabilization เมื่อได้รับแรงเฉือนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือค่าร้อยละ fat destabilization จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาในการปั่นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเติมเวย์โปรตีนในอิมัลชันร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) ทำให้ชั้นของเวย์โปรตีนที่เคลือบบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันมีลักษณะหลายชั้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาให้กับชั้นของเวย์โปรตีนที่เคลือบ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลานานในการปั่นเพื่อให้ผลึกไขมันบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคน้ำมันทะลุออกไปยังส่วนของของเหลวในอนุภาคน้ำมันอื่นๆ และเกิดการรวมตัวกันบางส่วนขึ้น เห็นได้จากช่วงระยะเวลาในการปั่นระหว่าง 0-80 วินาที อิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) มีค่าร้อยละ fat destabilization ในระดับต่ำ โดยที่เวลา 80 วินาที ของการปั่น อิมัลชันมีค่า fat destabilization เท่ากับร้อยละ 8.53 และ 4.82 ตามลำดับ ส่วนอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) (ภาพที่ 4.2a) ค่าร้อยละ fat destabilization จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการปั่น โดยที่เวลา 80 วินาที ของการปั่น อิมัลชันมีค่า fat destabilization เท่ากับร้อยละ 23.82 และมีค่าร้อยละ fat destabilization ค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะเวลา 80-160 วินาทีของการปั่น ซึ่งแสดงถึงอิมัลชันมีการเกิด partial coalescence ที่ดี อย่างไรก็ตามพบว่าค่าร้อยละ fat destabilization ของอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีแนวโน้มลดลงหลังระยะเวลา 160 วินาทีของการปั่น ซึ่งอาจเกิดจากการได้รับแรงเฉือนเป็นเวลานานเกินไป ทำให้โครงสร้าง partial coalescence เกิดการเสถียรภาพขึ้น หรือการได้รับความเย็นนานเกินไปทำให้อนุภาคน้ำมันมีสถานะเป็นของแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งขัดขวางการรวมกันบางส่วนระหว่างอนุภาคน้ำมัน

จากภาพที่ 4.3a-c พบว่าชนิดของเวย์โปรตีนในอิมัลชันมีผลต่อค่าร้อยละ fat destabilization เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเวย์โปรตีนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ให้อิมัลชันที่มีค่าร้อยละ fat destabilization สูงสุด รองลงมาคือความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลของชนิดและระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization (ร้อยละ) ของอิมัลชันในระหว่างการปั่นแข็ง

ชนิดของเวย์โปรตีน	ระดับความเข้มข้น (% w/w)	fat destabilization (ร้อยละ)
WPI	0.3	19.61 ^b ±8.99
	0.6	9.92 ^a ±5.68
	0.9	5.44 ^a ±3.85
WPC	0.3	18.82 ^b ±9.25
	0.6	8.87 ^a ±5.11
	0.9	7.34 ^a ±5.34
MWPC	0.3	19.68 ^b ±9.77
	0.6	8.87 ^a ±5.65
	0.9	10.08 ^a ±7.58

หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกัน ในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ผลของชนิดของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization (ร้อยละ) ของอิมัลชันในระหว่างการปั่นแข็ง

ชนิดของเวย์โปรตีน	fat destabilization ^{ns} (ร้อยละ)
WPI	11.66±8.77
WPC	11.68±8.42
MWPC	13.43±8.87

หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงในแต่ละชนิดของเวย์โปรตีนเป็นค่าที่เฉลี่ยจากความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.3 0.6 และ 0.9 (w/w)
2) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
3) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization (ร้อยละ) ของอิมัลชัน ในระหว่างการปั่นแข็ง

ระดับความเข้มข้น (% w/w)	fat destabilization (ร้อยละ)
0.3	19.37 ^c ±9.12
0.6	9.78 ^b ±5.45
0.9	7.62 ^a ±5.97

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงในแต่ละระดับความเข้มข้นเป็นค่าที่เฉลี่ยจากเวย์โปรตีน 3 ชนิด คือ WPI, WPC และ MWPC
 2) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 3) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ผลของชนิดและความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization ของอิมัลชัน แสดงดังตารางที่ 4.4-4.6 พบว่า ชนิดและความเข้มข้นของเวย์โปรตีนไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่า fat destabilization ของอิมัลชัน ชนิดของเวย์โปรตีนมีผลต่อค่า fat destabilization ของอิมัลชัน ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.5) โดยอิมัลชันที่เติม MWPC มีค่า fat destabilization เฉลี่ยสูงสุดคือร้อยละ 13.43 รองลงมาคืออิมัลชันที่เติม WPC มีค่า fat destabilization เท่ากับร้อยละ 11.68 และอิมัลชันที่เติม WPI มีค่า fat destabilization ต่ำสุดคือร้อยละ 11.66 ขณะที่ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนมีผลต่อค่า fat destabilization ของอิมัลชันแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนทำให้ค่า fat destabilization ของอิมัลชันมีค่าลดลง (ตารางที่ 4.6) โดยอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) มีค่า fat destabilization เฉลี่ยสูงสุดคือร้อยละ 19.37 รองลงมาคืออิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.6 (w/w) มีค่า fat destabilization เท่ากับร้อยละ 9.78 และอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (w/w) มีค่า fat destabilization ต่ำสุดคือร้อยละ 7.62 ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Segall and Goff (1999) ที่เปรียบเทียบค่า fat destabilization ของอิมัลชันน้ำมันเนยที่เติม skim milk powder (ความเข้มข้นร้อยละ 0.2-0.7 w/w), whey protein hydrolysate (ความเข้มข้นร้อยละ 1.6-2.1 w/w), whey protein isolate (ความเข้มข้นร้อยละ 0.2-0.7 w/w) และ sodium caseinate (ความเข้มข้นร้อยละ 0.2-0.7 w/w) โดยอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนไอโซเลตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ให้อิมัลชันที่มีความคงตัวในสถานะหยุดนิ่ง และมีค่า fat destabilization สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ ที่สูงกว่าหรืออิมัลชันที่เติมโปรตีนชนิดอื่น การที่ค่า fat destabilization ของอิมัลชัน

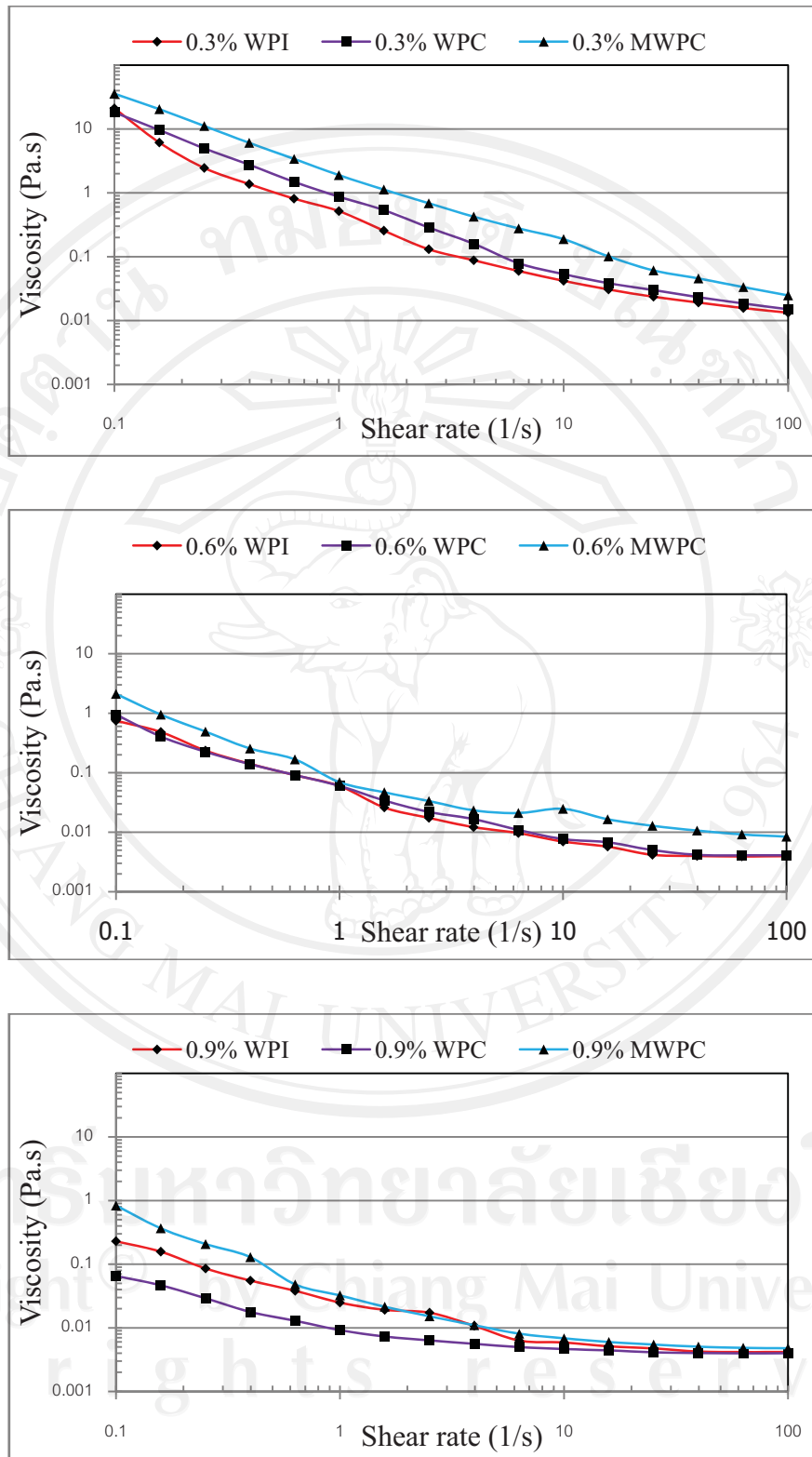
มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันที่พบในการศึกษาในครั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันส่งผลให้ชั้นของโปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันมีความหนาเพิ่มขึ้นจึงช่วยเพิ่มแรงผลักกันระหว่างอนุภาคน้ำมัน โดยเฉพาะแรงผลักกันเชิงมวลทำให้การรวมกันบางส่วนของอนุภาคน้ำมันเกิดได้ยากขึ้น (Agboola and Dalgleish, 1996) นอกจากนี้เวย์โปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันจะช่วยให้ผิวร่วมมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นจึงช่วยต้านการผิดรูปของอนุภาคน้ำมัน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันจึงช่วยลดโอกาสในการสัมผัส การเกิด coalescence และการเกิด partial coalescence ของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันได้ (Onwulata and Huth, 2008)

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อค่า fat destabilization และความคงตัวต่อการเกิดครีมของอิมัลชันพบว่า ความเข้มข้นของเวย์โปรตีนมีผลต่อค่า fat destabilization และความคงตัวต่อการเกิดครีมของอิมัลชันในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนจะทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวต่อการเกิดครีมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงผลักกันเชิงมวลระหว่างอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันมีอิทธิพลมากกว่าแรงผลักกันทางไฟฟ้า แต่แรงผลักกันเชิงมวลที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้ค่า fat destabilization ของอิมัลชันเมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างการปั่นมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ให้อิมัลชันที่มีความคงตัวในสถานะหยุดนิ่งและสามารถเกิด partial coalescence ได้ดีเมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างการปั่น โดยไม่เกิดการแยกชั้นครีมตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วันและมีค่า fat destabilization ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนชนิดอื่น และที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) อิมัลชันที่เติม MWPC ให้ค่า fat destabilization สูงสุดคือร้อยละ 19.68 อาจเนื่องมาจาก MWPC มีองค์ประกอบของฟอสโฟลิพิดในสัดส่วนที่สูงกว่า WPI และ WPC ซึ่งอิมัลชันของไขมันนมที่ประกอบด้วยฟอสโฟลิพิดจะช่วยลดความคงตัวของชั้นผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันเมื่อได้รับอิทธิพลจากแรงเฉือนภายนอกโดยฟอสโฟลิพิดจะเข้าไปแทนที่โปรตีนเดิมที่ดูดซับบริเวณผิวร่วมทำให้เกิดโครงสร้างเป็นชั้นบางๆ ล้อมรอบอนุภาคน้ำมัน ซึ่งช่วยส่งเสริมการเกิด partial coalescence ของอิมัลชัน (McClements, 2005) ดังนั้นอิมัลชันที่เติม MWPC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในวัฏภาคอิมัลชันในการผลิตไอศกรีมโดยกระบวนการสองวัฏภาคในลำดับต่อไป เนื่องจากอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวในสถานะหยุดนิ่งและสามารถเกิด partial coalescence ได้ดีเมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างการปั่น

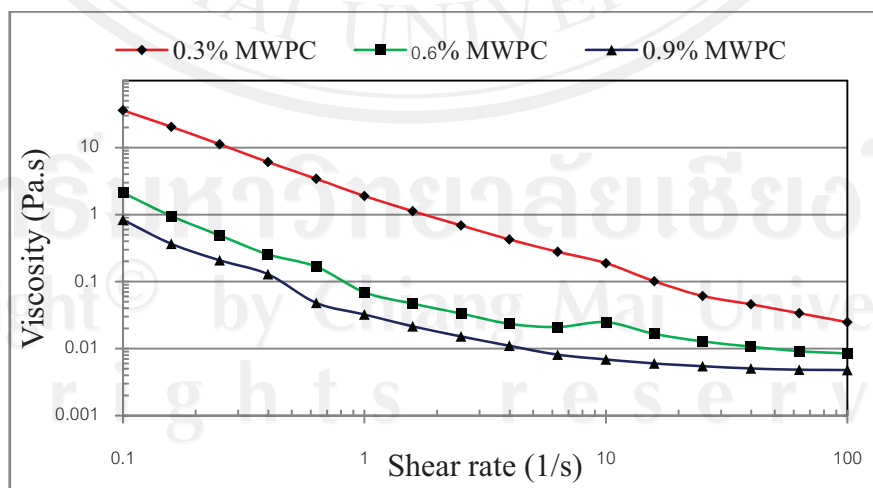
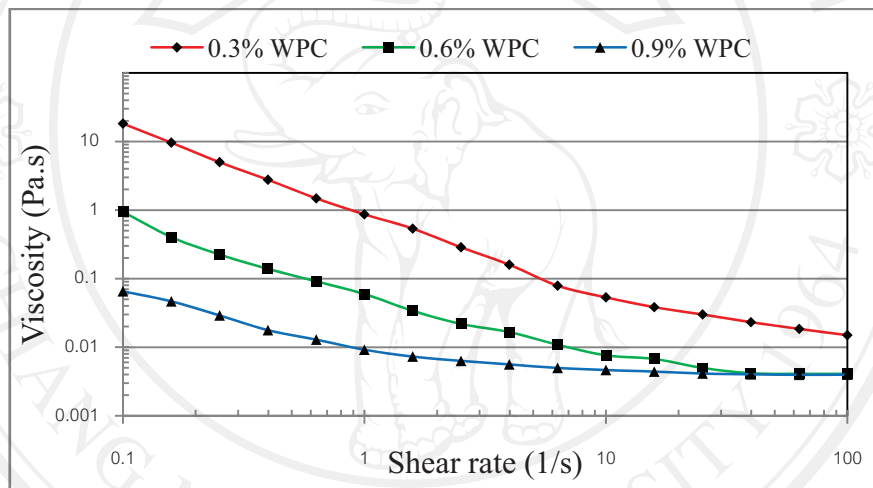
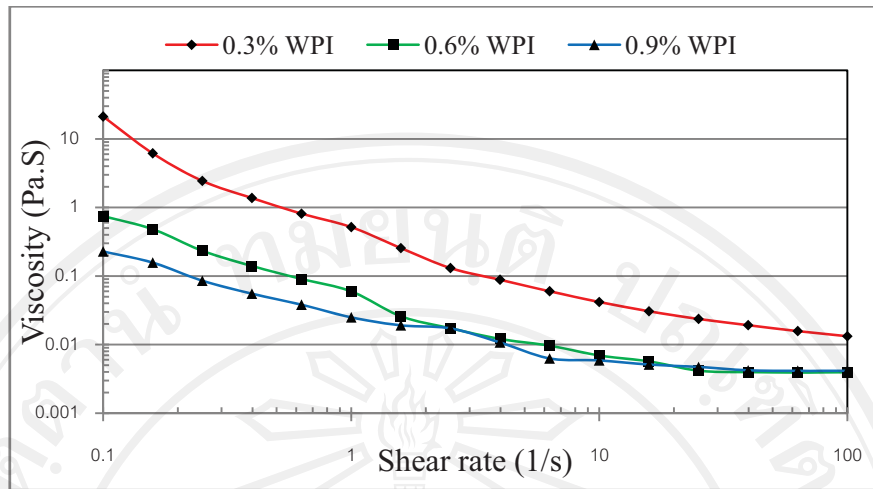
4.1.4 สมบัติทางรีโอโลยีของอิมัลชัน

สมบัติทางกายภาพเคมีของอิมัลชันมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะด้านเนื้อสัมผัสและคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Dalgleish, 2006) ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดที่อยู่ในรูปของอิมัลชันนิยมใช้โปรตีนนมทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากโปรตีนนมมีสมบัติเป็นโมเลกุลสองขั้ว ตามธรรมชาติ มีความสามารถในการดูดซับบนผิวร่วมระหว่างอนุภาคน้ำมันและน้ำ ช่วยลดแรงตึงผิวลดลงและช่วยให้อนุภาคน้ำมันมีสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ที่ดี ซึ่งช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชัน (Dickinson, 1999) อย่างไรก็ตามชนิดและองค์ประกอบต่างๆ ของโปรตีนนมมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และรูปแบบการรวมกลุ่มกันของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชัน (Agboola and Dalgleish, 1995; Dickinson and Golding, 1997; Euston and Hirst, 2000)

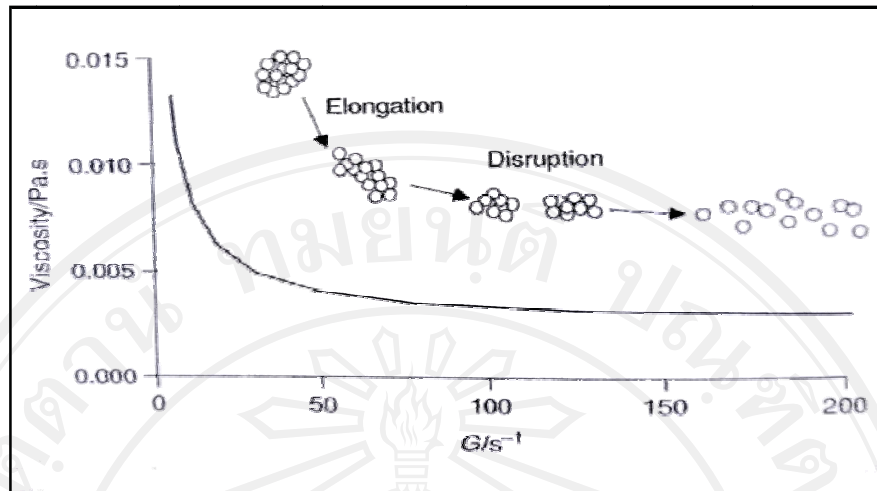
ผลของชนิดและความเข้มข้นของเวย์โปรตีนต่อความหนืดปรากฏของอิมัลชันไขมันนมภายใต้อัตราเฉือนระหว่าง 0.1-100 (1/s) แสดงดังภาพที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าตัวอย่างอิมัลชันทุกสิ่งทดลองแสดงพฤติกรรมของไหลแบบ non-Newtonian shear-thinning คือความหนืดปรากฏของอิมัลชันจะมีค่าลดลงเมื่อได้รับอัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kulmyrzaev *et al.* (2000), Ibanoglu (2002), Singh *et al.* (2003), Boutin *et al.* (2007), Sun *et al.* (2007), Manoi and Rizvi (2009) และ Sun and Gunasekaran (2009) ซึ่งอิมัลชันที่มีพฤติกรรมของไหลแบบ non-Newtonian shear-thinning จะมีความสัมพันธ์กับการเกิด flocculation ของอิมัลชัน โดยการเกิด flocculation จะทำให้อิมัลชันมีความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาตรโดยรวมของอนุภาคน้ำมันที่เกิด flocculation มีค่ามากกว่าปริมาตรโดยรวมของอนุภาคน้ำมันในแต่ละอนุภาคที่กระจายอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง (Quemada and Berli, 2002) เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน (shear rate) ให้กับอิมัลชันที่เกิด flocculation จะทำให้ความหนืดปรากฏของอิมัลชันมีค่าลดลงซึ่งอาจเกิดจาก 2 สาเหตุคือ ประการแรกอิมัลชันที่เกิด flocculation เกิดการผิดรูปและจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับแรงเฉือน ซึ่งจะลดความสามารถในการต้านการไหลของอิมัลชัน และประการที่สองอิมัลชันที่เกิด flocculation จะแตกออกจากกันเมื่อได้รับแรงเฉือน ซึ่งทำให้ปริมาตรโดยรวมของอนุภาคน้ำมันที่เกิด flocculation มีค่าลดลง (แสดงดังภาพที่ 4.6) (Bujannenez and Dickinson, 1994; Bower *et al.*, 1997; Bower *et al.*, 1999) ในขณะที่อิมัลชันที่ไม่เกิด flocculation การเพิ่มอัตราเฉือนจะไม่มีอิทธิพลต่อความหนืดปรากฏของอิมัลชัน (Demetriades *et al.*, 1997) ในระบบอิมัลชันชนิดเข้มข้นการเกิด flocculation จะช่วยให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวต่อการเกิดครีมเพิ่มขึ้น (McClements, 2005)



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบผลของชนิดของเวย์โปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3, 0.6 และ 0.9 (w/w) ต่อค่าความหนืดปรากฏ (Pa.s) ของอิมัลชันไขมันนมภายใต้อัตราเฉือนระหว่าง 0.1-100 (1/s)



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของเวย์โปรตีน WPI WPC และ MWPC ต่อค่าความหนืดปรากฏ (Pa.s) ของอิมัลชันไขมันนภายใต้อัตราเฉือนระหว่าง 0.1-100 (1/s)



ภาพที่ 4.6 การแตกออกของอนุภาคน้ำมันที่เกิด flocculation เมื่อได้รับอัตราเฉือนเพิ่มขึ้น
ที่มา : McClements, 2005

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าชนิดของเวย์โปรตีนมีผลต่อค่าความหนืดปรากฏของอิมัลชัน เมื่อได้รับอัตราเฉือนระหว่าง 0.1-100 (1/s) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ขณะที่ระดับความเข้มข้นของเวย์โปรตีนในอิมัลชันมีอิทธิพลต่อค่าความหนืดปรากฏของอิมัลชัน โดยพบว่าอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ให้อิมัลชันที่มีค่าความหนืดปรากฏสูงสุด ($p \leq 0.05$) ส่วนอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.6 และ 0.9 (w/w) มีผลต่อค่าความหนืดปรากฏของอิมัลชันไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) การเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนส่งผลให้ค่าความหนืดปรากฏของอิมัลชันมีแนวโน้มต่ำลง แสดงถึงการเกิด flocculation ของอิมัลชันมีจำนวนลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มความเข้มข้นของเวย์โปรตีนทำให้ชั้นโปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันมีความหนาเพิ่มขึ้นจึงทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดแรงผลักเชิงมวลระหว่างอนุภาคน้ำมันสูงกว่าแรงดึงดูด เช่น van der waals, depletion และ hydrophobic ส่งผลให้เกิด flocculation ระหว่างอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันเกิดได้ยากขึ้น ขณะเดียวกันอิมัลชันที่เติมเวย์โปรตีนความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) เวย์โปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันจะเกิดเป็นชั้นบางๆ ทำให้แรงผลักรันเชิงมวลมีอิทธิพลน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำมัน โดยเฉพาะแรงดึงดูดที่เกิดจาก hydrophobic interaction ซึ่งเป็นผลมาจากการเสถียรภาพของพื้นผิวและการเสถียรภาพของโปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมัน โดยเฉพาะการเกิดเสถียรภาพของโปรตีนชนิดกลม (globular proteins) ที่เกิดจากการได้รับความร้อนมากกว่า 70 องศาเซลเซียสจะทำให้ชั้นผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันแสดงสมบัติไม่มีขั้วเพิ่มมากขึ้นและเกิดพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ระหว่างหมู่ซัลไฮดริล (sulfhydryl group) ของกรดอะมิโนที่เป็น

องค์ประกอบในโมเลกุลของโปรตีน ซึ่งช่วยเพิ่มแรงดึงดูดกันระหว่างอนุภาคน้ำมันในอิมัลชัน จนทำให้เกิด flocculation ของอิมัลชันในที่สุด (McClements *et al.*, 1993; Hunt and Dalglish, 1995, Demetriades *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2002a, b)

4.2 ผลของเวย์โปรตีนต่อสมบัติของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค

การวิเคราะห์สมบัติของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคซึ่งประกอบด้วย วัฏภาคของอิมัลชันและวัฏภาคของสารละลาย โดยวัฏภาคของอิมัลชันประกอบด้วยไขมันนม ร้อยละ 25 (w/w) น้ำร้อยละ 74.7 (w/w) และเวย์โปรตีนเข้มข้นที่ปรับแต่งคุณค่าทางโภชนาการ ร้อยละ 0.3 (w/w) ซึ่งได้จากการคัดเลือกโดยพิจารณาสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันไขมันนมดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1 โดยเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้กับไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์ ได้ผลจากการศึกษาดังนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

1. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ไอศกรีม ทั้ง 3 สูตรการผลิตมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด สูงสุดคือ 34.17 องศาบริกซ์ รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีปริมาณ ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดเท่ากับ 31.22 องศาบริกซ์ และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป ที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดต่ำสุดคือ 30.39 องศาบริกซ์ เนื่องจากไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีส่วนผสมของเวย์โปรตีนร้อยละ 0.3 (w/w) ในวัฏภาคของอิมัลชัน ซึ่งเวย์โปรตีนเป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในน้ำ ดังนั้นการเติม เวย์โปรตีนจึงทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธี ทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดต่ำสุด อาจเนื่องมาจากการไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ในส่วนผสมจะทำให้หน้าที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายในไอศกรีมเหลว มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธี ทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.7 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดและความหนืดปรากฏของไอศกรีมเหลว

กระบวนการผลิต ไอศกรีม	การเติม อิมัลซิไฟเออร์ สังเคราะห์	ปริมาณของแข็งที่ละลาย ได้ในน้ำทั้งหมด (องศาบริกซ์)	ความหนืดปรากฏ (เซนติพอยส์)
ไอศกรีมที่ผลิตโดย กระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	34.17 ^c ±0.35	267.27 ^a ±13.40
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	31.22 ^b ±0.27	262.93 ^a ±9.26
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	30.39 ^a ±0.56	580.12 ^b ±15.56

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
- 3) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันร้อยละ 25 (w/w)

2. ความหนืดปรากฏ

ความหนืดปรากฏของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดปรากฏไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 267.27 และ 262.93 เซนติพอยส์ ตามลำดับ ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดปรากฏสูงสุดคือ 580.12 เซนติพอยส์ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากภายหลังขั้นตอนการโฮโมจิไนซ์ อนุภาคน้ำมันในไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์เกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มแรงต้านต่อการไหล จึงส่งผลให้ความหนืดของไอศกรีมเหลวที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้น

3. การขึ้นฟู

ค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 82.13 และ 90.48 ตามลำดับ ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูต่ำสุด โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 47.85 ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4.8 ค่าการขึ้นฟูและอัตราการขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

กระบวนการผลิต ไอศกรีม	การเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์	การขึ้นฟู (ร้อยละ)	อัตราการขึ้นฟู (ร้อยละต่อนาที)
ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	82.13 ^a ±6.96	2.66 ^b ±0.45
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	90.48 ^a ±12.12	2.52 ^b ±0.21
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	47.85 ^b ±2.05	1.51 ^a ±0.16

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$)
 3) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w)

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดปรากฏของไอศกรีมเหลวและค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมพบว่า เมื่อความหนืดของ ไอศกรีมเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้การขึ้นฟูของ ไอศกรีมมีแนวโน้มลดลง เห็นได้จาก ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดปรากฏสูงสุด (ตารางที่ 4.7) แต่ให้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูต่ำสุด อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดปรากฏสูงเกินไปจึงทำให้การเติมอากาศในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมทำได้ยากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากไอศกรีมเหลวมีความหนืดต่ำเกินไปอาจทำให้ฟิวรั่มของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมเกิดการแตกออกและเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว

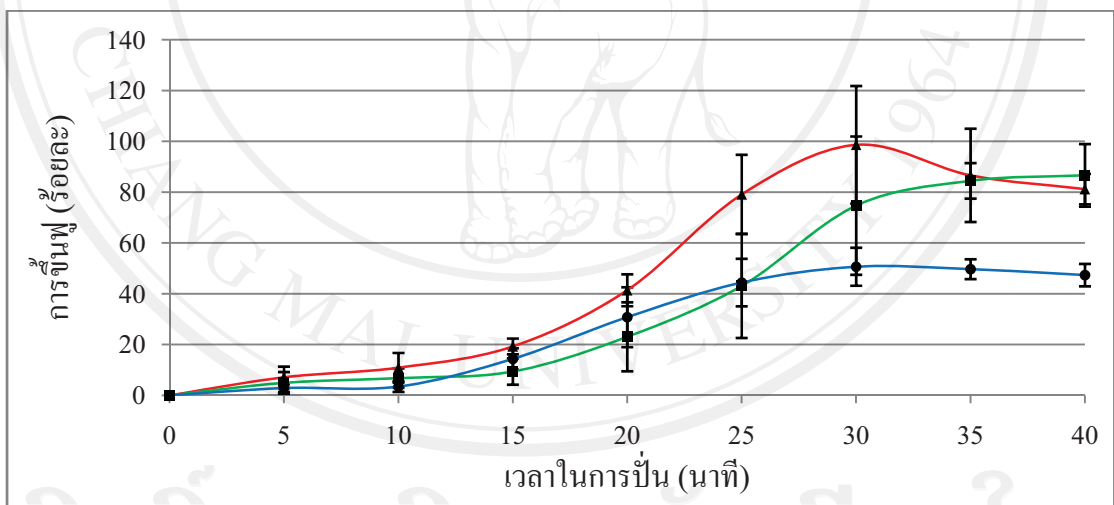
จึงทำให้ค่าการขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมต่ำลง ได้เช่นเดียวกัน (Clarke, 2004) ดังนั้นความหนืดของไอศกรีมเหลวจึงต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูสูง

นอกจากความหนืดของไอศกรีมเหลวแล้วปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมคือการขยายตัวของโฟม (foam expansion) และความคงตัวของ โฟมที่เกิดขึ้น (foam liquid stability) (Clarke, 2004) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูสูงสุด ซึ่งแสดงถึงฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่น ไอศกรีมมีความคงตัวที่ดี อาจเนื่องมาจากในระหว่างการบ่มไอศกรีม อิมัลซิไฟเออร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวซึ่งมีความไว (surface active compound) ในการดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมันสูงกว่าโปรตีนเคซีนซึ่งเป็น โปรตีนหลักในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยอิมัลซิไฟเออร์จะเข้าไปแทนที่โปรตีนที่ดูดซับบนผิวร่วมของอนุภาคน้ำมัน เกิดเป็นเยื่อบางๆ ซึ่งช่วยให้อนุภาคน้ำมันสามารถเกิด partial coalescence หรือ fat destabilization เกิดเป็น โครงสร้างร่างแหล้อมรอบฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่น ส่งผลให้ฟองอากาศที่ได้มีความคงตัวต่อการรวมตัวกันเพิ่มขึ้น ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีระดับการเกิด fat destabilization ต่ำกว่า จึงทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมไม่คงตัว เกิดการยุบ หรือการรวมตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไอศกรีมที่ได้มีค่าการขึ้นฟูต่ำ ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goff and Jordan (1989) ที่เปรียบเทียบการเกิด fat destabilization ของไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์และไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์พบว่า ไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ อนุภาคน้ำมันจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของของเหลวที่ไม่แข็งตัวและมีปริมาณการเกิด fat destabilization ในระดับต่ำกว่าไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์

จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าการขึ้นฟูต่ำกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์แต่ยังคงมีค่าการขึ้นฟูสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 82.13 90.48 และ 47.85 ตามลำดับ ซึ่งค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Segall and Goff (2002) ที่เปรียบเทียบค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค (ประกอบด้วยเวย์โปรตีนไอโซเลตความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/w) ในวัฏภาคของอิมัลชัน) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยใช้น้ำมันเนย (butter oil) เป็นแหล่งของไขมัน โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 72 90 และ 48 ตามลำดับ

4. อัตราการขึ้นฟู

เนื่องจากการเกิด partial coalescence หรือ fat destabilization มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับการขึ้นฟูของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้การวิเคราะห์อัตราการขึ้นฟูแทนการวัดค่า fat destabilization เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และรวดเร็ว โดยอัตราการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีอัตราการขึ้นฟูสูงสุดคือร้อยละ 2.66 ต่อนาที รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ โดยมีอัตราการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 2.52 ต่อนาที และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีอัตราการขึ้นฟูต่ำสุดคือร้อยละ 1.51 ต่อนาที อย่างไรก็ตาม ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปมีอัตราการขึ้นฟูไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p\leq 0.05$)



ภาพที่ 4.7 การขึ้นฟูของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค (▲) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (■) และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (●) ในระหว่างการปั่นไอศกรีมเป็นเวลา 40 นาที

จากภาพที่ 4.7 พบว่าการขึ้นฟูของไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตเริ่มขึ้นฟูภายหลังจากการปั่นไอศกรีมเป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นพบว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าการขึ้นฟูสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ตลอดระยะเวลาในการปั่นไอศกรีม

ในช่วงระยะเวลา 0-30 นาทีของการปั่นไอศกรีม ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าการขึ้นฟูสูงกว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และมีค่าการขึ้นฟูสูงสุดที่เวลา 30 นาทีของการปั่นไอศกรีม โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 98.64 ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูร้อยละ 74.69 และ 50.63 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามภายหลังจากที่เวลา 30 นาทีของการปั่น ไอศกรีมพบว่าค่าการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีแนวโน้มลดลง ส่วน ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ยังคงมีค่าการขึ้นฟูเพิ่มขึ้นจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาในการปั่นไอศกรีม และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการปั่น ไอศกรีมพบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูสูงสุดคือร้อยละ 86.64 รองลงมาคือ ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค โดยมีค่าการขึ้นฟูเท่ากับร้อยละ 81.20 และ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูต่ำสุดคือร้อยละ 47.33

5. อัตราการละลาย

สมบัติด้านการละลายเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยเฉพาะคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งโครงสร้างที่เกาะกลุ่มหรือการเกิด fat destabilization มีบทบาทสำคัญซึ่งส่งผลต่อลักษณะการละลายของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Pelan *et al.*, 1997; Bolliger *et al.*, 2000) จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีอัตราการละลายสูงสุดคือร้อยละ 1.43 ของน้ำหนักที่หายไปต่อนาที รองลงมาคือ ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีอัตราการละลายเท่ากับร้อยละ 1.28 ของน้ำหนักที่หายไปต่อนาที และ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีอัตราการละลายต่ำสุดคือร้อยละ 1.06 ของน้ำหนักที่หายไปต่อนาที (ตารางที่ 4.9) จะเห็นได้ว่าอัตราการละลายมีความสัมพันธ์กับค่าการขึ้นฟูของไอศกรีม โดยไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูสูงจะมีอัตราการละลายต่ำ เห็นได้จากไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูสูงสุดคือร้อยละ 90.48 มีอัตราการละลายต่ำสุด ในทางตรงกันข้าม ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าการขึ้นฟูต่ำสุดคือร้อยละ 47.85 มีอัตราการละลายสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของไอศกรีมสามารถคงรูปได้ด้วยเกิดการเกิด partial coalescence หรือ fat destabilization ของน้ำมันซึ่งเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหล้อมรอบฟองอากาศและมีผลึกน้ำแข็งกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของของเหลวที่ไม่แข็งตัว โดยโครงสร้างของไอศกรีมดังกล่าวจะช่วยชะลอและรักษารูปร่างของไอศกรีมในระหว่างการละลาย (Marshall and Arbuckle, 1996) ซึ่งผลจากการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sofjan and Hartel (2004) พบว่าไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูร้อยละ 80

มีอัตราการละลายสูงกว่าไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูร้อยละ 100 และ 120 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจาก ระดับของ fat destabilization ที่เกิดขึ้นในระหว่างการปั่นไอศกรีม อย่างไรก็ตามจากการศึกษาใน ครั้งนี้พบว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์และไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการ สองวัฏภาคมีอัตราการละลายต่ำกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์และไอศกรีมที่ผลิตโดย กระบวนการสองวัฏภาคมีค่าการขึ้นฟูสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ โดยปริมาณอากาศในไอศกรีมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเป็นฉนวนมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก อากาศทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ได้จึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนช้าลง (หทัยทิพย์, 2552)

ตารางที่ 4.9 อัตราการละลายและความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

กระบวนการผลิต ไอศกรีม	การเติม อิมัลซิไฟเออร์ สังเคราะห์	อัตราการละลาย (ร้อยละของน้ำหนัก ที่หายไปต่ออนาที)	ความแน่นเนื้อ (กรัม, gram force)
ไอศกรีมที่ผลิตโดย กระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	1.28 ^b ±0.06	1412.86 ^a ±389.38
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	1.06 ^a ±0.21	1269.90 ^a ±208.30
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	1.43 ^c ±0.09	2375.29 ^b ±289.76

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
 3) ไอศกรีมที่ผลิต โดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w)

6. เนื้อสัมผัสด้านความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อ (firmness) หรือความแข็ง (hardness) ของไอศกรีมเป็นการวิเคราะห์ ความสามารถในการต้านการเสียสภาพโดยการวัดแรงกดสูงสุดของไอศกรีมภายในระยะทางที่ กำหนด ซึ่งความแน่นเนื้อของไอศกรีมมีความสัมพันธ์กับ โครงสร้างระดับจุลภาคและส่งผลต่อ คุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม (Clarke, 2004) ผลการวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อของ

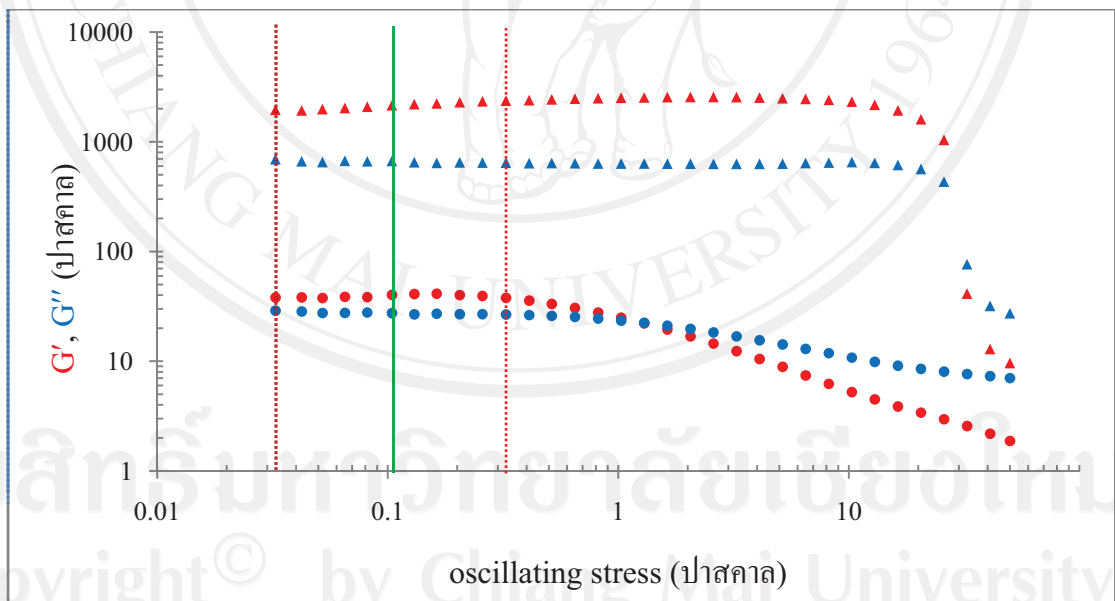
ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ มีค่าความแน่นเนื้อสูงสุดคือ 2375.29 กรัม ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคซึ่งมีค่าความแน่นเนื้อ ไม่แตกต่างกับไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ โดยมีค่าเท่ากับ 1412.86 และ 1269.90 กรัม ตามลำดับ ($p > 0.05$) จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าการขึ้นฟูและความแน่นเนื้อของไอศกรีมมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์และไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าการขึ้นฟูสูง เมื่อวัดแรงกดสูงสุดที่ทำให้ไอศกรีมเกิดการเสียสภาพพบว่าใช้แรงกดต่ำกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งมีค่าการขึ้นฟูต่ำสุด อาจเนื่องจากไอศกรีมที่มีการเติมอากาศปริมาณมากจะช่วยให้ไอศกรีมที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่ม ถ้าหากไอศกรีมมีปริมาณการเติมอากาศไม่เพียงพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสแข็งคล้ายกับน้ำแข็ง ดังนั้น ไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูสูงจึงให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่า ไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูต่ำ จึงมีแรงต้านแรงกดต่ำกว่าไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sofjan and Hartel (2004), กิ่งนาง (2552) และหทัยทิพย์ (2552) นอกจากนี้แล้วอากาศที่แทรกอยู่ใน ไอศกรีมยังมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเรียบเนียน ลดการแยกตัวของผลึกน้ำแข็ง และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะปรากฏที่ดี

7. สมบัติทางรีโอโลยี

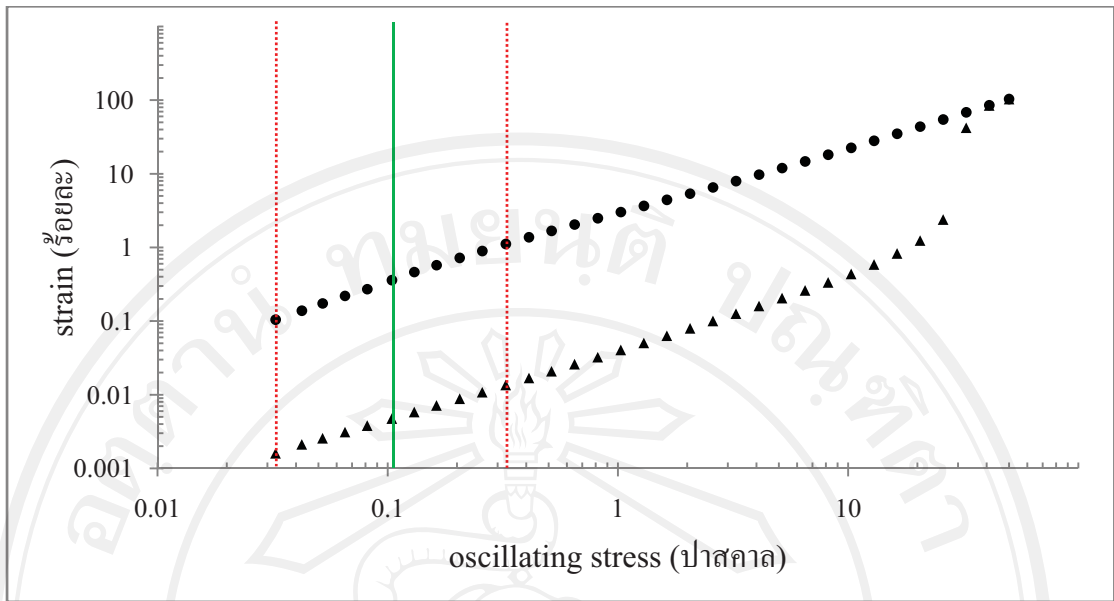
การทดสอบพฤติกรรมทางวิสโคอิลาสติกของวัสดุมีหลายวิธี เช่น การทดสอบการพักความเค้น (stress relaxation) โดยกำหนดให้มีอัตราการผิดรูปคงที่แล้วทำการวัดค่าความเค้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป การทดสอบการคืบ (creep test) โดยการกำหนดให้แรงคงที่แก่วัสดุแล้วทำการวัดอัตราการผิดรูป และการทดสอบแบบสั่น (oscillation testing) โดยกำหนดให้อัตราการผิดรูปคงที่แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของการสั่นหรือตามเวลาของการสั่นหรืออุณหภูมิในการสั่น ในทำนองเดียวกันอาจกำหนดให้ความเค้นคงที่แล้ววัดอัตราการผิดรูปได้เช่นเดียวกัน ถ้าเป็นการกำหนดให้อัตราการผิดรูปคงที่การตอบสนองของความเค้นจะมีความต่างเฟสกับการผิดรูปเป็นมุม 0-90 องศา การทดสอบแบบสั่นเป็นการศึกษาสมบัติการไหลหนืดและความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีความสะดวกและมีความไวมากกว่าการทดสอบการพักความเค้นและการทดสอบการคืบ จึงได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของวัสดุพอลิเมอร์ และยังสามารถอธิบายโครงสร้างระดับโมเลกุล (molecular structure) ของวัสดุได้

คืออีกด้วย (กึ่งนาง, 2552; หทัยทิพย์, 2552) ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงใช้การทดสอบแบบสั่นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

การวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของไอศกรีมในการศึกษาครั้งนี้เริ่มจากทดสอบหาความเค้นที่เหมาะสมด้วยวิธี stress sweep step ของตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุดและตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุดเพื่อใช้ในการทำนายช่วง Linear Viscoelastic Region (LVR) ที่แสดงสมบัติวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (linear viscoelastic) โดยแสดงค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus, G') โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus, G'') และร้อยละการผิดรูป (% strain) โดยกำหนดความถี่ (frequency) ในการทดสอบคงที่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์ แปรผันช่วงความเค้นสั่น (oscillating stress) ระหว่าง 0.03259-50 ปาสคาล โดยใช้หัววัดชนิด plate and plate geometry ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร กำหนดค่า Gap เท่ากับ 3000 ไมโครเมตร และควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างไอศกรีมขณะทดสอบที่ -5 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษาที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.8 และ 4.9



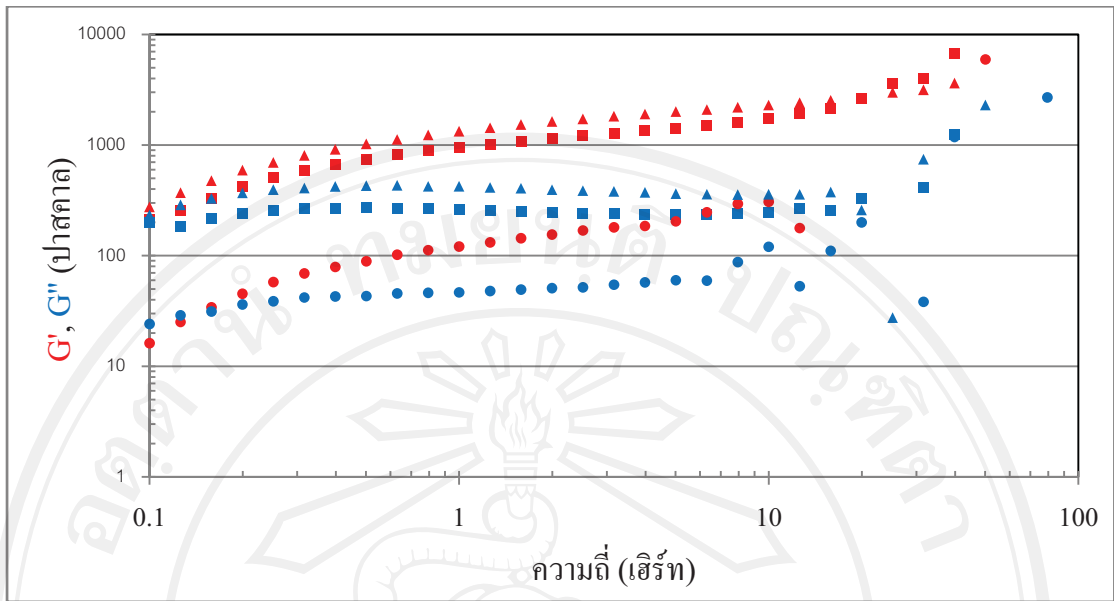
ภาพที่ 4.8 ค่า G' และค่า G'' ของไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุด (●, ●) และไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุด (▲, ▲)



ภาพที่ 4.9 ค่าร้อยละการผิดรูปของไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุด (●) และไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุด (▲)

จากภาพที่ 4.8 ตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุดและตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุดแสดงสมบัติวิสโคอิลาสติกเชิงเส้นร่วมกันในช่วงความเค้นสั้นระหว่าง 0.03259-0.3259 ปาสคาล โดยตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุดมีร้อยละการผิดรูปอยู่ระหว่าง 0.1048-1.1177 ส่วนตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุดมีร้อยละการผิดรูปอยู่ระหว่าง 0.0016-0.0136 (ภาพที่ 4.9) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงคัดเลือกค่าความเค้นสั้นที่ 0.1043 ปาสคาล ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยมีร้อยละการผิดรูปของตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งสูงสุดและตัวอย่างไอศกรีมที่มีความแข็งต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 0.3607 และ 0.0058 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ด้วยวิธี frequency sweep step ที่ความถี่ระหว่าง 0.1-100 เฮิรตซ์ ในลำดับต่อไป

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยพิจารณาจากค่า G' , G'' , loss tangent ($\tan \delta$) และค่าความหนืดเชิงซ้อน (η^*) ของไอศกรีมโดยเลือกวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแสดงดังภาพที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ตารางที่ 4.10 และ 4.11



ภาพที่ 4.10 ค่า G' และค่า G'' ของไฮดรเจลที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค (▲, ▲) ไฮดรเจลที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติม (■, ■) และไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (●, ●)

ค่า G' แสดงถึงพลังงานที่สะสมไว้เพื่อใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมและยังแสดงถึงพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-body like behaviour) ของตัวอย่างไฮดรเจลที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับไฮดรเจลที่ผ่านการแช่แข็งอย่างสมบูรณ์ น้ำทั้งหมดจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ตัวอย่างไฮดรเจลมีค่า G' และสัดส่วนของของแข็งสูงสุด ส่วนค่า G'' แสดงถึงพฤติกรรมของไหลหนืด (viscous fluid) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่สูญหายไปในระหว่างการผิดรูป ในของไหลที่ไม่มีความยืดหยุ่นพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการผิดรูปจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่สำหรับในไฮดรเจลค่า G'' จะทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลง จึงช่วยเพิ่มสัดส่วนของน้ำแข็งและช่วยให้ไฮดรเจลมีความหนืดเชิงซ้อนเพิ่มขึ้น (Wildmoser *et al.*, 2004) จากภาพที่ 4.10 พบว่า ค่า G' ของไฮดรเจลที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไฮดรเจลที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าสูงกว่าค่า G'' ในทุกๆ ความถี่ ส่วนไฮดรเจลที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า G' ต่ำกว่าค่า G'' ในช่วงความถี่ระดับต่ำ แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นไฮดรเจลที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์กลับมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' เช่นเดียวกับไฮดรเจลที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไฮดรเจลที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า G' และค่า G'' ของตัวอย่างไฮดรเจลทั้ง 3 สูตรการผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นน้ำแข็งหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในไฮดรเจล (Granger *et al.*, 2005) อย่างไรก็ตามตัวอย่างไฮดรเจลทั้ง 3 สูตรการผลิตจะเริ่มเสียสภาพเมื่อความถี่สูงกว่า 10 เฮิรตซ์ อาจเนื่องมาจากผลึก

น้ำแข็งเกิดการละลายหรือโครงสร้างอื่นๆ เช่น ฟองอากาศ โครงสร้างของไขมัน โปรตีน หรือสารให้ความคงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกทำลายจากการได้รับความถี่ที่สูงเกินไป (หทัยทิพย์, 2552)

ตารางที่ 4.10 ค่า G' และค่า G'' ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิซท์

กระบวนการผลิต ไอศกรีม	การเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์	G' (ปาสคาล)	G'' (ปาสคาล)
ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	1332.18 ^c ±501.07	423.23 ^c ±165.53
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	956.28 ^b ±391.97	262.23 ^b ±116.14
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	121.08 ^a ±53.37	46.60 ^a ±13.22

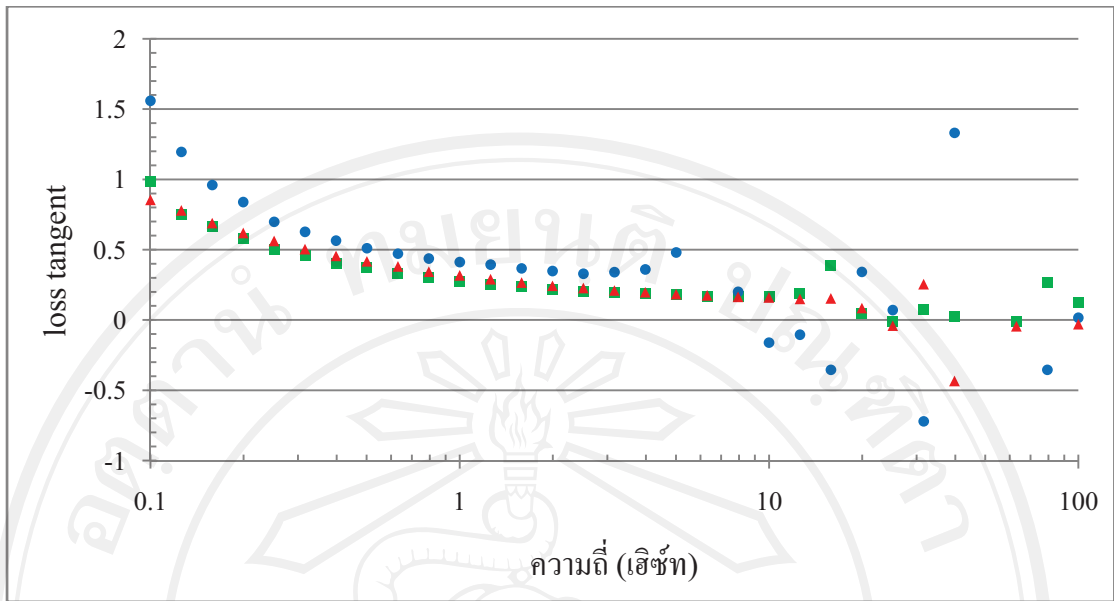
- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
- 3) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w)

ค่า G' ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิซท์ แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า ค่า G' ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าสูงสุดคือ 1332.18 ปาสคาล รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีค่าเท่ากับ 956.28 ปาสคาล และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า G' ต่ำสุดคือ 121.08 ปาสคาล ซึ่งหมายความว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่น (elastic solid) สูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ตามลำดับ ในกรณีของไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์พบว่าค่า G' มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าความแน่นเนื้อหรือค่าความแข็งที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส โดยไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความแน่นเนื้อสูงสุดแต่มีค่า G' ต่ำสุด อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีระดับการเกิด fat destabilization ต่ำ ซึ่งการเกิด fat destabilization ในระหว่าง

การปั่นไอศกรีมมีผลต่อความยืดหยุ่นของไอศกรีมที่ได้ โดยไอศกรีมที่มีระดับการเกิด fat destabilization สูงจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความความยืดหยุ่นสูงตามไปด้วย (Adapa *et al.*, 2000) ในขณะที่ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ค่า G' ที่สูงกว่าเนื่องจากการเกิด fat destabilization ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีลักษณะเป็นของแข็งแต่ไม่ยืดหยุ่น (แข็งแต่เปราะ) ส่วนไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีลักษณะเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น

ค่า G'' ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิซท์ แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่า G'' มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า G' คือไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่า G'' สูงสุดคือ 423.23 ปาสคาล รองลงมาคือ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีค่าเท่ากับ 262.23 ปาสคาล และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า G'' ต่ำสุดคือ 46.60 ปาสคาล ซึ่งแสดงว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีสมบัติเป็นของไหลชั้นหนืด (viscous fluid) สูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' (แสดงดังภาพที่ 4.10) ดังนั้น ไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตจึงมีสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่นสูงกว่าของไหลชั้นหนืด โดยแสดงพฤติกรรมคล้ายการเกิดเจล (gel-like behaviour)

ค่า loss tangent เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนของ G'' ต่อ G' โดยค่า loss tangent จะแปรผันตามความถี่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า loss tangent จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแก้ว (grassy state) สู่อสถานะยาง (rubbery state) หรือจากสถานะยางสู่สถานะแก้วก็ได้ (อรุณี, 2548) ค่า loss tangent ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ค่า loss tangent ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค (▲) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติม (■) และไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (●)

จากภาพที่ 4.11 พบว่า ค่า loss tangent ของไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า loss tangent คือ G'' ต่อ G' การที่ค่า loss tangent ของไอศกรีมมีค่าลดลง นั้นแสดงว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีสมบัติการเป็นของแข็งยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเพิ่มความถี่จะช่วยเพิ่มผลึกน้ำแข็งตัวน้ำ (ice crystal nuclei) ดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงช่วยเพิ่มปริมาณน้ำแข็งในไอศกรีม ส่งผลให้ไอศกรีมมีค่า G' เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า loss tangent ที่ได้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า G' ที่แสดงดังภาพที่ 4.10 อย่างไรก็ตามในช่วงความถี่ต่ำคือระหว่าง 0.1-0.1259 เฮิรตซ์ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงสมบัติการเป็นของไหลข้นหนืดมากกว่าสมบัติการเป็นของแข็งยืดหยุ่น โดยมีค่า loss tangent สูงกว่า 1 ในขณะที่ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงสมบัติเป็นของแข็งยืดหยุ่นมากกว่าสมบัติการเป็นของไหลข้นหนืด ซึ่งมีค่า loss tangent ต่ำกว่า 1 แสดงว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะของไหลข้นหนืดไปสู่สถานะของแข็งยืดหยุ่น นอกจากนี้พบว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า loss tangent สูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคและไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ในทุกค่าของความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติม

อิมัลซิไฟเออร์มีสมบัติการเป็นของแข็งยืดหยุ่นต่ำกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ตามลำดับ

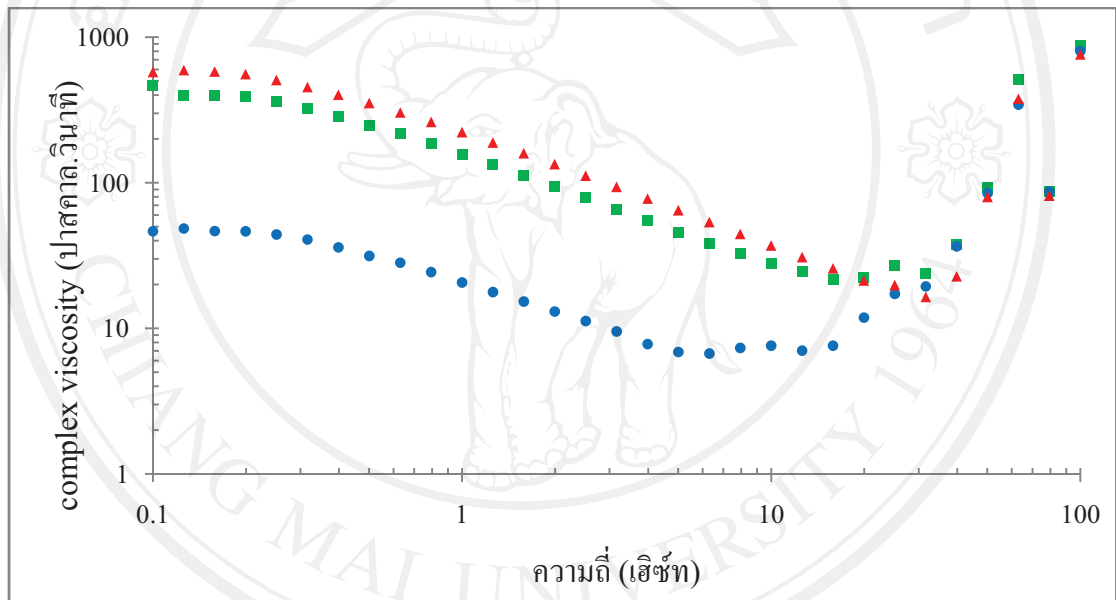
ตารางที่ 4.11 ค่า loss tangent ($\tan \delta$) และค่าความหนืดเชิงซ้อน (η^*) ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิรต์

กระบวนการผลิต ไอศกรีม	การเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์	$\tan \delta$	η^* (ปาสคาล.วินาที)
ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	$0.32^b \pm 0.02$	$222.46^c \pm 83.93$
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	$0.25^a \pm 0.07$	$157.84^b \pm 64.98$
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	$0.41^c \pm 0.08$	$20.68^a \pm 8.66$

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกัน ในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
- 3) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w)

ค่า loss tangent ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิรต์ แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า loss tangent สูงสุดคือ 0.41 รองลงมาคือ ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคโดยมีค่าเท่ากับ 0.32 และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่า loss tangent ต่ำสุดคือ 0.25 จากผลการวิเคราะห์ค่า loss tangent พบว่า ไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีค่า loss tangent ต่ำกว่า 1 แสดงว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีลักษณะเป็นของแข็งยืดหยุ่นมากกว่าของไหลชั้นหนืด ซึ่งการที่ไอศกรีมมีค่า G' สูง ในขณะที่มีค่า loss tangent ต่ำแสดงถึงการมีโครงสร้างที่ดีของไอศกรีม (Granger *et al.*, 2005) ดังนั้น ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์จึงมีโครงสร้างที่ดีกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ

ความหนืด (viscosity) คือความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหลเมื่อมีแรงมากระทำ ของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ แต่ของไหลที่มีส่วนผสมของสารหลายชนิดจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดเพียงค่าเดียว ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงวิเคราะห์ค่าความหนืดเชิงซ้อน (η^*) ของไอศกรีมเพื่อใช้ในการอธิบายสมบัติทางรีโอโลยีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ซึ่งค่าความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ค่าความหนืดเชิงซ้อน (η^*) ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค (\blacktriangle) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติม (\blacksquare) และไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (\bullet)

จากภาพที่ 4.12 พบว่าค่าความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมาจากค่าความหนืดเชิงซ้อนแปรผันตรงกับค่า G' และค่า G'' แต่แปรผกผันกับความเร็วเชิงมุม โดยแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 ดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงทำให้ค่าความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมมีค่าลดลง ที่ความถี่ระดับต่ำโครงสร้างของไอศกรีมจะเกิดการเชื่อมต่อกันหรือเกิดการแยกจากกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ในช่วงนี้ความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมจะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ได้รับ ไอศกรีมจะแสดงลักษณะเด่นของของไหลข้นหนืดโดยพบว่าค่า G' มีค่า

สูงกว่าค่า G' แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นไอศกรีมจะแสดงลักษณะของของแข็งยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนในไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ภาพที่ 4.10) อย่างไรก็ตามค่าความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากที่ความถี่สูงมีเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างของไอศกรีมเกิดการเชื่อมต่อกัน เกิดการคลายพันธะที่เชื่อมต่อกัน หรือทำให้โครงสร้างแยกจากกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งแสดงว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีพันธะที่เชื่อมต่อกันอย่างอ่อนๆ (อรุณี, 2548)

$$\eta^* = \sqrt{(G'/\omega)^2 + (G''/\omega)^2} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

เมื่อ η^* คือ ความหนืดเชิงซ้อน, G' คือ ค่าโมดูลัสสะสม, G'' คือ ค่าโมดูลัสสูญเสีย และ ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการสั่น

นอกจากนี้ยังพบว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค มีค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ ตลอดทุกช่วงความถี่ระหว่าง 0.1-10 เฮิซท์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ไอศกรีมยังไม่เกิดการเสียสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับค่า G' และค่า G'' ที่ได้ โดยไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่า G' และค่า G'' สูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.10)

ค่าความหนืดเชิงซ้อนของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ความถี่ 1 เฮิซท์ แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงสุดคือ 222.46 ปาสคาล.วินาที รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีค่าเท่ากับ 157.84 ปาสคาล.วินาที และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดเชิงซ้อนต่ำสุดคือ 20.68 ปาสคาล.วินาที ดังนั้นไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคจึงมีความสามารถต้านทานการไหลสูงสุด รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ

4.2.2 สมบัติทางเคมี

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณไขมัน และปริมาณโปรตีนของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์

กระบวนการผลิตไอศกรีม	การเติมอิมัลซิไฟเออร์สังเคราะห์	ค่าความเป็นกรดต่าง	ไขมัน ^{ns} (ร้อยละ)	โปรตีน ^{ns} (ร้อยละ)
ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค	ไม่เติม	6.75 ^a ±0.01	8.65±0.76	1.67±0.54
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	เติม	6.80 ^c ±0.02	9.49±1.24	1.42±0.08
ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไป	ไม่เติม	6.77 ^b ±0.01	9.38±1.11	1.27±0.12

- หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ยกเว้นโปรตีนซึ่งแสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 1 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
- 3) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)
- 4) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันนมร้อยละ 25 (w/w)

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่าสูงสุดคือ 6.80 รองลงมาคือ ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีค่าเท่ากับ 6.77 และไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุดคือ 6.75 ทั้งนี้การที่ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุดอาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่ผลิตโดย

กระบวนการสองวัฏภาคมีส่วนผสมของเวย์โปรตีนซึ่งมีสมบัติเป็นกรดเล็กน้อย ดังนั้นการเติมเวย์โปรตีนในส่วนผสมจึงทำให้ไอศกรีมเหลวที่ได้มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงตามไปด้วย

2. ปริมาณไขมัน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไขมันของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีปริมาณไขมันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีปริมาณไขมันสูงสุดคือร้อยละ 9.49 รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีปริมาณไขมันเท่ากับร้อยละ 9.38 และไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีปริมาณไขมันต่ำสุดคือร้อยละ 8.65 จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไขมันจะเห็นได้ว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีปริมาณไขมันค่าต่ำกว่าปริมาณไขมันที่คำนวณไว้ในส่วนผสม (ร้อยละ 10) ซึ่งอาจเป็นเกิดจากการสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการผลิต หรือเกิดจากขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ทำการสกัดไขมันได้ไม่สมบูรณ์พอ

3. ปริมาณโปรตีน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่าไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีปริมาณโปรตีนสูงสุดคือร้อยละ 1.671 รองลงมาคือไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยมีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 1.417 และไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีปริมาณโปรตีนต่ำสุดคือร้อยละ 1.269 จะเห็นได้ว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีปริมาณโปรตีนสูงสุด อาจเนื่องมาจากไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีส่วนผสมของเวย์โปรตีนร้อยละ 0.3 (w/w) ในวัฏภาคอิมัลชัน ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณโปรตีนให้กับส่วนผสมทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น

4.2.3 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์โดยวิธี Hedonic scale จากผู้ทดสอบชิม 50 คน

ลักษณะทางประสาทสัมผัส*	กระบวนการผลิต		
	ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค	ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์	ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์
สีที่ปรากฏ ^{ns}	7.76±0.92	7.78±0.95	7.92±0.75
รสหวาน	7.40 ^b ±1.07	7.26 ^{ab} ±1.12	6.98 ^a ±1.25
ความเรียบเนียน	7.10 ^a ±1.04	7.46 ^b ±0.97	6.92 ^a ±0.97
การละลายในปาก	7.16 ^{ab} ±0.89	7.40 ^b ±0.95	7.02 ^a ±0.89
การยอมรับรวม	7.42 ^{ab} ±0.99	7.56 ^b ±0.91	7.10 ^a ±0.79

- หมายเหตุ : 1) * 1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด
 2) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
 3) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)
 4) ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคประกอบด้วยเวย์โปรตีนที่ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 0.3 (w/w) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในวัฏภาคของอิมัลชันที่ประกอบด้วยไขมันร้อยละ 25 (w/w)

คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านต่างๆ ของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่า ไอศกรีมทั้ง 3 สูตรการผลิตมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสีที่ปรากฏไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านความเรียบเนียนสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาค ($p \leq 0.05$) แต่มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านการละลายในปาก และการยอมรับรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวัฏภาคมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านรสหวาน

สูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ($p \leq 0.05$) และพบว่า คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านความเรียบเนียน การละลายในปาก และการยอมรับรวมของไอศกรีมที่ผลิตโดยกระบวนการสองวิภูภาคมีค่าสูงกว่าไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์แต่อย่างไรก็ตามคะแนนที่ได้นี้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.13 พบว่าคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านความเรียบเนียนและการยอมรับรวมของไอศกรีมที่ผลิตโดยวิธีทั่วไปที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.46 และ 7.56 ตามลำดับ ซึ่งมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสต่ำกว่าไอศกรีมสูตรควบคุมในงานวิจัยของ จุฑารัตน์ (2549) ที่มีส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมประกอบด้วยไขมันนมจากวิปป์ครีมร้อยละ 9 (w/w) น้ำตาลทรายร้อยละ 12 (w/w) หางนมผงร้อยละ 11 (w/w) สารคงตัวทางการค้า (PALSGAAR® 5924) ร้อยละ 0.5 (w/w) และน้ำ โดยมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านความเรียบเนียนและการยอมรับรวมเท่ากับ 8.10 และ 8.10 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมและผู้ทดสอบชิมที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน