

ความคงตัวของอิมัลชันอาหารต่อการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็ง

Freeze-Thaw Stability of Food Emulsions

Suwimon Ariyaprakai^{1,*}

Abstract

Many types of foods are oil-in-water emulsions; for example, coconut milk, mayonnaise, cream, salad dressing, and sauce. These foods can be stored at freezing conditions to provide longer shelf life. During the crystallization of oil and water, partial coalescence or coalescence might occur, causing emulsions to lose its stability and separated into oil layers after thawing. A number of research had been investigating on the stability of emulsions prepared by different types of oils and various methods to improve emulsion stability had been found. These included using food emulsifiers that modified fat crystallization, using thick proteins or modified proteins or modified starch as emulsifiers, coating oil droplets with biopolymer membranes, coating oil droplets with solid particles, and the addition of some osmotic solutes or soluble biopolymer in the aqueous phase. This review article explained the emulsion destabilization mechanisms and introduced different food additives that can be applied to improve emulsion stability and increase the quality of frozen food products in the food industry.

Keywords: Freeze thaw process, Emulsion stability, Lipid crystallization, Ice crystallization, Coalescence, Partial coalescence

บทคัดย่อ

อาหารประเภทอิมัลชันน้ำมันในน้ำมีหลากหลายชนิดด้วยกัน อาทิเช่น น้ำกะทิ มายองเนส ครีม สลัดครีม และซอส อาหารดังกล่าวสามารถไปเก็บแช่เยือกแข็งเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษา ระหว่างที่เกิดการตกผลึกของน้ำและตกผลึกน้ำมันอนุภาคน้ำมันอาจเกิดการรวมอนุภาคบางส่วนหรือการรวมอนุภาคทั้งหมด ส่งผลให้อิมัลชันสลายตัวแยกชั้นหลังละลายผลึกหรือนำกลับมาไว้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาความคงตัวของอิมัลชันที่เตรียมจากน้ำมันชนิดต่างๆ และพบวิธีการเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันดังต่อไปนี้ การใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ดัดแปลงการตกผลึกไขมันโดยรอบอนุภาคน้ำมัน, การใช้อิมัลซิไฟเออร์ประเภทโปรตีนหรือโปรตีนดัดแปลงหรือแปดดัดแปลงที่เป็นชั้นหนา, การเคลือบอนุภาคน้ำมันด้วยชั้นโพลิเมอร์ชีวภาพ, การล้อมรอบอนุภาคอนุภาคน้ำมันด้วยอนุภาคของแข็ง, และการเติมตัวถูกละลายออสโมติกหรือโพลิเมอร์ชีวภาพที่ละลายได้ในวัฏภาคน้ำ บทความนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดกลไกการสลายตัวของอิมัลชันและนำเสนอวัตถุดิบแต่งอาหารต่าง ๆ ที่อุตสาหกรรมอาหารสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มความคงตัวอิมัลชันอาหารและเพิ่มคุณภาพอาหารแช่แข็งต่อไป

คำสำคัญ : การแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็ง, ความคงตัวของอิมัลชัน, การตกผลึกไขมัน, การตกผลึกน้ำแข็ง, การรวมอนุภาค, การรวมอนุภาคบางส่วน

¹ Department of Food Biotechnology, School of Biotechnology, Assumption University, Bangkok 10240, Thailand

* Corresponding author, e-mail: suwimona@yahoo.com, tel : +66 2300 4543 ext 3796

1. บทนำ

อิมัลชันอาหารจัดว่าเป็นอาหารที่ไม่คงตัวและแปรเปลี่ยนสภาพได้ง่าย เนื่องจากอิมัลชันเป็นระบบคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวทางอุณหพลศาสตร์ และจะแยกเป็นชั้นน้ำและชั้นน้ำมันในท้ายที่สุด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันขณะที่นำอิมัลชันอาหารผ่านเข้ากระบวนการต่าง ๆ เพื่อควบคุมคุณภาพอาหาร การแช่เยือกแข็งจัดว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร อาหารเมื่อเก็บในที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็งจะสามารถเก็บได้เป็นระยะเวลานานและอาจนานหลายเดือน ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ได้เกือบทั้งหมด เมื่อนำอิมัลชันอาหารไปเก็บแช่เยือกแข็งและนำกลับมาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (หรือที่อุณหภูมิสูงขึ้น) อิมัลชันอาหารอาจสูญเสียความคงตัวได้

2. การเปลี่ยนวัฏภาคในอิมัลชันอาหารระหว่างการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็ง

ระหว่างการแช่เยือกแข็งนั้นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิในตู้หรือห้องแช่เยือกแข็งจะอยู่ที่ประมาณ -20 องศาเซลเซียส หรืออาจมีอุณหภูมิต่ำถึง -30 องศาเซลเซียส หรือ -40 องศาเซลเซียส แล้วแต่ว่าชนิดของตู้หรือห้องแช่เยือกแข็ง เมื่อนำอิมัลชันอาหารไปแช่ในตู้หรือห้องแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของอิมัลชันอาหารจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนต่ำถึงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เมื่ออุณหภูมิอิมัลชันอาหารลดต่ำลงถึงอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำและของไขมัน น้ำและน้ำมันในอิมัลชันอาหารจะตกผลึกปกติน้ำและน้ำมันจะตกผลึกไม่พร้อมกัน ทั้งนี้การตกผลึกไขมันจะเกิดขึ้นในอนุภาคทรงกลมหรือในวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) และการตกผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นในวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase)

เนื่องจากน้ำในอิมัลชันอาหารไม่ใช่บริสุทธิ์จึงตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเริ่มตกผลึกขึ้นกับชนิดและปริมาณของตัวถูกละลายที่ผสมในน้ำ ส่วนอุณหภูมิการตกผลึกไขมันนั้นขึ้นอยู่กัชนิดของน้ำมัน น้ำมันบางชนิดอาจมีอุณหภูมิเยือกแข็งสูงกว่าน้ำจึงเริ่มตกผลึกไขมันก่อนเกิดผลึกน้ำแข็ง น้ำมันบางชนิดอาจมีอุณหภูมิเยือกแข็งต่ำกว่าน้ำจึงเริ่มตกผลึกไขมันหลังเกิดผลึกน้ำแข็ง ในบางกรณีน้ำมันอาจไม่แข็งเป็นผลึกคืออยู่ในสถานะของเหลวตลอดการแช่เยือกแข็ง ถ้าอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำมันต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในตู้หรือห้องแช่เยือกแข็ง

เมื่อนำอิมัลชันอาหารกลับมาไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ความร้อนจะถ่ายโอนจากสิ่งแวดล้อมไปสู่อิมัลชันอาหาร ทำให้อิมัลชันอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับจนถึงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ผลึกน้ำแข็งและผลึกไขมันจะละลายกลายเป็นของเหลวอีกครั้ง โดยกลับกันคือผลึกไขมันจะละลายก่อนผลึกน้ำแข็งในกรณีที่น้ำมันมีอุณหภูมิเยือกแข็ง (หรือจุดหลอมเหลว) ต่ำกว่าอุณหภูมิเยือกแข็งน้ำ และผลึกน้ำแข็งจะละลายก่อนผลึกไขมันในกรณีที่น้ำมันมีอุณหภูมิเยือกแข็งต่ำกว่าอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำมัน

3. กลไกการสลายตัวของอิมัลชันระหว่างการแช่เยือกแข็ง

การสลายตัวของอิมัลชันมักจะเกิดขึ้นระหว่างการตกผลึกไขมันหรือการตกผลึกน้ำแข็ง เพราะระหว่างการตกผลึกไขมันและการตกผลึกน้ำแข็งทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการรวมอนุภาคบางส่วนและเกิดการรวมอนุภาคทั้งหมด (Figure 1)

การรวมอนุภาคบางส่วน (partial coalescence) เกิดขึ้นระหว่างที่ผลึกไขมันกำลังก่อตัวในอนุภาคน้ำมันและน้ำมันในอนุภาคน้ำมันยังไม่แข็งตัวเป็นของแข็งทั้งหมด โมเลกุลผลึกไขมันที่อยู่พื้นผิวโดยรอบอนุภาคน้ำมันจากอนุภาคหนึ่งแทงทะลุไปสู่อนุภาคน้ำมันอีกอนุภาคหนึ่งที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคน้ำมันสองอนุภาคหรือหลายอนุภาคเข้าด้วยกัน อนุภาคน้ำมันเกาะติดกันเป็นโครงข่าย เมื่อไขมันละลายโครงข่ายอนุภาคน้ำมันจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

การรวมอนุภาคทั้งหมด (coalescence) เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคน้ำมันอยู่ในสถานะของเหลว อาจเกิดขึ้นหลังจากการรวมอนุภาคบางส่วนดังกล่าวข้างต้น หรืออาจเกิดในกรณีที่อนุภาคน้ำมันยังอยู่ในสถานะของเหลวและน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งก่อน โดยระหว่างที่ผลึกน้ำแข็งกำลังก่อตัวและมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นนั้น ผลึกน้ำแข็งบีบอัดอนุภาคน้ำมันที่เป็นของเหลวหลายอนุภาคเข้าด้วยกัน ทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

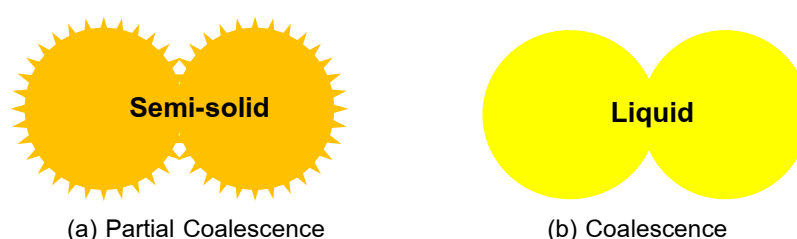


Figure 1 Partial coalescence and coalescence in emulsions during the freeze-thaw process.

4. องค์ประกอบที่มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน

4.1 น้ำมัน

น้ำมันที่นิยมใช้ในการประกอบอิมัลชันอาหารได้แก่น้ำมันพืชชนิดต่างๆ น้ำมันแต่ละชนิดประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์หลายชนิดและประกอบด้วยทั้งกรดไขมันไม่อิ่มตัวและกรดไขมันอิ่มตัว ทำให้น้ำมันมีคุณสมบัติเยือกแข็งเป็นช่วงที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ช่วงอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำมันปาล์ม, น้ำมันปาล์มเคลเนล, โคคาบัตเตอร์, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันมะกอก, น้ำมันข้าวโพด, น้ำมันเมล็ดทานตะวัน, และน้ำมันถั่วเหลือง คือ 33 ถึง 40 องศาเซลเซียส, 24 ถึง 26 องศาเซลเซียส, 31 ถึง 35 องศาเซลเซียส, 23 ถึง 26 องศาเซลเซียส, -3 ถึง 0 องศาเซลเซียส, -10 ถึง -12 องศาเซลเซียส, -26 ถึง -18 องศาเซลเซียส, และ -20 ถึง -23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

นอกจากอิมัลชันอาหารประกอบด้วยน้ำมันชนิดต่างๆ แล้วยังประกอบด้วยน้ำมันในปริมาณที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น น้ำกะทิประกอบด้วยน้ำมันมะพร้าว ~35% โดยน้ำหนัก, มายองเนสประกอบด้วยน้ำมันพืช ~65% โดยน้ำหนัก, และสลัดครีมประกอบด้วยน้ำมันพืชประมาณ ~30% โดยน้ำหนัก โดยปกติแล้วอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันในปริมาณสูงจะมีความไม่คงตัวสูง เนื่องจากอนุภาคน้ำมัน

จำนวนมากในอิมัลชันถูกบีบอัดและมีความเค้นสูงระหว่างการก่อตัวของผลึกน้ำแข็ง ทำให้ง่ายต่อการเกิดการรวมอนุภาคบางส่วนหรือการรวมอนุภาคทั้งหมด (Ghosh and Coupland, 2008; Vanapalli *et al.*, 2002)

น้ำมันแต่ละชนิดเมื่อตกผลึกจะมีขนาดผลึก รูปทรงผลึก (morphorism) และการเรียงรูปผลึก (polymorphism) ที่แตกต่างกัน เช่น มีผลึกขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เป็นผลึกรูปทรงเข็ม (needles) หรือรูปทรงกลม (spherulite) มีการเรียงรูปผลึกแบบ α , β หรือ β' ซึ่งการรวมอนุภาคบางส่วนและความคงตัวของอิมัลชันขึ้นอยู่กับลักษณะของผลึกไขมันดังกล่าว รวมทั้งขึ้นกับปริมาณผลึกไขมัน และตำแหน่งของผลึกไขมันในอนุภาคน้ำมัน

Ishibashi *et al.* (2016) ศึกษาความคงตัวของอิมัลชันมายองเนสที่เตรียมจากน้ำมันคาโนล่าและน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าอิมัลชันที่เตรียมจากน้ำมันสองชนิดกันมีความคงตัวไม่เท่ากันเมื่อเก็บที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็งต่าง ๆ น้ำมันน้ำมันคาโนล่าและน้ำมันถั่วเหลืองมีองค์ประกอบกรดไขมันที่ต่างกัน ทำให้มีรูปแบบการตกผลึกที่แตกต่างกัน Magnusson *et al.* (2011) ศึกษาเปรียบเทียบความคงตัวของอิมัลชันมายองเนสที่เตรียมจากน้ำมันชนิดต่าง ๆ และพบว่าอิมัลชันที่เตรียมจากน้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายกลาง น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ที่ประกอบด้วยกรดไขมันโอเลอิกปริมาณสูง และน้ำมันเรพซีด สลายตัวง่ายกว่าอิมัลชันที่เตรียมจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันข้าวโพด และน้ำมันถั่วเหลือง เพราะอิมัลชันกลุ่มแรกมีปริมาณกรดไขมันที่อิ่มตัวหนึ่งตำแหน่งสูง มีปริมาณผลึกไขมันมากและมีขนาดผลึกใหญ่ ทั้งนี้ นอกจากความคงตัวของอิมัลชันจะขึ้นกับชนิดน้ำมันแล้วยังขึ้นอยู่กับอัตราการลดอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วย

4.2 อิมัลชันไฟเออร์

สารอิมัลชันไฟเออร์ที่อยู่โดยรอบอนุภาคน้ำมันเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ควบคุมความคงตัวของอิมัลชัน มีงานวิจัยพบว่าสารอิมัลชันไฟเออร์ประเภทสารลดแรงตึงผิวโมเลกุลเล็กบางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือขนาดของผลึกไขมันได้ Sakamoto *et al.* (2004) พบว่าการเติมอิมัลชันไฟเออร์ประเภทโพลีกลีเซอรอลเอสเทอร์มีส่วนเร่งการตกผลึกของน้ำมันปาล์มส่วนกลาง โดยโพลีกลีเซอรอลเอสเทอร์อาจทำหน้าที่เป็นแม่แบบในการเกิดผลึกนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ที่บริเวณโดยรอบอนุภาคน้ำมัน Ariyaprakai *et al.* (2013) และ Ariyaprakai และ Tananuwong (2015) พบว่าสารอิมัลชันไฟเออร์ประเภทซูโครสโมโนเอสเทอร์มีผลอิทธิพลต่อการตกผลึกของน้ำมันมะพร้าวโดยรอบอนุภาคน้ำมัน ทำให้สามารถลดการรวมอนุภาคบางส่วนในอิมัลชันน้ำกะทิและในอิมัลชันน้ำมันมะพร้าว การใช้ซูโครสโมโนเอสเทอร์เป็นอิมัลชันไฟเออร์มีส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันได้

มีงานวิจัยพบว่าอิมัลชันที่ใช้โปรตีนเป็นอิมัลชันไฟเออร์มีความคงที่ดีกว่าอิมัลชันที่ใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทโมเลกุลเล็กจำพวกทวิน หรือ โซเดียมโดดีซิลซัลเฟต ทั้งนี้เนื่องจากชั้นโปรตีนมีความหนาที่มากกว่าจึงทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในอิมัลชันระหว่างการเกิดผลึกไขมันและการเกิดผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวโมเลกุลเล็ก Thanasukarn *et al.* (2004) พบว่าเมื่อแช่เยือกแข็งอิมัลชันน้ำมันปาล์มไฮโดรจีเนตจนถึงอุณหภูมิที่น้ำมันตกผลึก อิมัลชันที่ใช้ทวิน 20 เป็นอิมัลชันไฟเออร์สลายตัว แต่อิมัลชันที่ใช้โปรตีนเวย์ไอโซเลตและอิมัลชันที่ใช้โปรตีนเคซีนเป็นอิมัลชันไฟเออร์คงตัว แต่อย่างไรก็ดีเมื่อลดอุณหภูมิจนกระทั่งทั้งน้ำและน้ำมันตกผลึก ทั้งอิมัลชันที่ใช้ทวิน 20, โปรตีนเวย์ไอโซเลต, และ

โปรตีนเคซีนสลายตัวจากการขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง Palanuwech และ Coupland (2003) พบว่า อิมัลชันไขมันเคลือบขนมหวานหรือโคคาบัตเตอร์สลายตัวเมื่อใช้ทวิน 20 หรือ โซเดียมโดดีซิลซัลเฟต หรือ โดดีซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ แต่อิมัลชันที่ใช้โปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ไอโซเลตมีความคงตัวมากกว่า โดยอิมัลชันที่ใช้โปรตีนเคซีนมีความคงตัวมากกว่าอิมัลชันที่ใช้โปรตีนเวย์ไอโซเลตเนื่องจากชั้นโปรตีนเคซีนหนากว่าชั้นโปรตีนเวย์ไอโซเลตทำให้ป้องกันการรวมอนุภาคบางส่วนได้ดีกว่า

มีงานวิจัยพบว่าโปรตีนที่ผ่านความร้อนสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้ดีขึ้น Zhu *et al.* (2017) พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองและโปรตีนเวย์หลังผ่านการให้ความร้อนจะทำหน้าที่อิมัลซิไฟเออร์ระหว่างการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าโปรตีนถั่วเหลืองหรือโปรตีนเวย์ที่ไม่ได้ผ่านความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองและโปรตีนเวย์ที่ผ่านความร้อนจะรวมกลุ่มกันอยู่ในรูปอนุภาคนาโนล้อมรอบอนุภาคน้ำมัน และอาจเป็นไปได้ด้วยว่าโปรตีนหลังผ่านความร้อนเปลี่ยนสภาพโครงข่ายเจลทำให้ป้องกันการอนุภาคน้ำมันเข้าใกล้กันได้ดีขึ้น เช่นเดียวกัน Palazolo *et al.* (2011) ศึกษาความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองสองชนิดเป็นอิมัลซิไฟเออร์ คือโปรตีนถั่วเหลืองที่ไม่ได้ผ่านความร้อนและโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อน และพบว่าอิมัลชันที่ใช้น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนจนโปรตีนเสื่อมสภาพธรรมชาติมีความคงตัวมากกว่า

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่าโปรตีนดัดแปลงต่อพันธะกับโพลีแซคคาไรด์มีความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันได้ดีขึ้น ตัวอย่างโปรตีนดัดแปลงที่ใช้ได้แก่ โซเดียมเคซีนตอพันธะกับมอลโตสเดสทรานใช้ในการเตรียมอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลือง (O'Regan and Mulvihill, 2010) และโปรตีนถั่วเหลืองตอพันธะกับเดสแทรนใช้ในการเตรียมอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลือง (Zhang *et al.*, 2017)

แป้งดัดแปลงสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้เช่นเดียวกัน Donsi *et al.* (2011) พบว่าอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันที่มีไฮโดรคาร์บอนสาย C10 ผสมกับ C8 และใช้แป้งดัดแปลงซัคซินิลเลตเตทแวกซีแมซเป็นอิมัลซิไฟเออร์มีความคงตัวที่ดีกว่าอิมัลชันที่ใช้เลซิทีนเป็นอิมัลซิไฟเออร์ แป้งดัดแปลงมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายยาวช่วยเพิ่มความหนาของชั้นอิมัลซิไฟเออร์ Marefati *et al.* (2013) พบว่าเมื่อน้ำมันไมกัลโอล 812 (Miglyol 812) และน้ำมันเชียนัท (shea nut oil) ในการเตรียมอิมัลชัน และล้อมรอบอนุภาคน้ำมันด้วยเม็ดแป้งดัดแปลงควิโนว-ออกทินิกวซซินิกแอนไฮไดรด์ (Octenyl succinic anhydride modified quinoa starch) ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งได้ดีเพราะว่าอนุภาคเม็ดแป้งมีความแข็งและเม็ดแป้งเป็นชั้นกันที่หนา

4.3 ชั้นเคลือบโพลีเมอร์ชีวภาพ

อิมัลชันอาจเตรียมได้โดยเคลือบชั้นอิมัลซิไฟเออร์ด้วยชั้นโพลีเมอร์จำพวกโพลีแซคคาไรด์เพื่อทำให้กักเก็บน้ำมันได้ดีขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาพบอิมัลชันทุติยภูมิหรืออิมัลชันตติยภูมิที่ประกอบด้วยชั้นเมมเบรนโพลีเมอร์ชีวภาพหนึ่งหรือสองชั้นมีความคงตัวต่อการหลังการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งดีกว่าอิมัลชันปฐมภูมิที่ประกอบด้วยอิมัลซิไฟเออร์เพียงชั้นเดียว ชั้นเมมเบรนที่หนาหลายชั้นทำให้ผลึกน้ำแข็งและผลึกไขมันแทงทะลุได้ยากกว่าชั้นอิมัลซิไฟเออร์เพียงชั้นเดียวจึงสามารถป้องกันการรวมอนุภาคบางส่วนและการรวมอนุภาคทั้งหมด ตัวอย่างอิมัลชันแบบเมมเบรนหลายชั้นที่มีความคงตัวที่ดี ได้แก่ อิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ประกอบด้วยชั้นโซเดียมโดดีซิลซัลเฟตเคลือบด้วยชั้น

โคโตแซนและชั้นเพคติน (Aoki *et al.*, 2005), อิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ประกอบด้วยชั้นทวิน 20 เคลือบด้วยชั้นโคโตแซนโมเลกุลสายกลางหรือสายยาว (Mun *et al.*, 2006), และ อิมัลชันน้ำมันปาล์มไฮโดรจีเนตที่ประกอบด้วยชั้นโซเดียมโคติซิลลล์เฟตเคลือบด้วยชั้นโคโตแซนและชั้นแพคติน (Thanasukarn *et al.*, 2006b)

4.4 ตัวถูกละลายในวัฏภาคน้ำ

การเติมน้ำตาลในวัฏภาคน้ำมีส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันด้วยเหตุผลหลายประการ เหตุผลหลักคือน้ำตาลเป็นตัวถูกละลายออสโมติกที่ลดอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำทำให้น้ำแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ผลึกน้ำแข็งในอิมัลชันน้ำแข็งมีปริมาณลดลง ปริมาณน้ำที่ไม่แข็งตัวที่อยู่บริเวณรอบอนุภาคน้ำมันมีมากขึ้น การที่ปริมาณผลึกน้ำแข็งลดลงช่วยลดการบีบอัดอนุภาคน้ำมันระหว่างผลึกน้ำแข็งขยายปริมาตรและลดการแทงทะลุของผลึกน้ำแข็งเข้าไปในชั้นเมมเบรนโดยรอบอนุภาคน้ำมัน นอกจากนี้ น้ำตาลอาจมีผลต่อขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง การเติมน้ำตาลมีส่วนช่วยเพิ่มความหนืดในวัฏภาคน้ำทำให้ลดการชนกันระหว่างอนุภาคน้ำมัน ในกรณีที่เติมน้ำตาลในอิมัลชันที่ใช้โปรตีนเป็นอิมัลซิไฟเออร์ น้ำตาลอาจมีผลต่อโครงสร้างของโปรตีน ช่วยเพิ่มการอุม้ตัวของโปรตีน ช่วยป้องกันโปรตีนเสื่อมสภาพธรรมชาติในสภาวะที่เย็นจัด และมีผลช่วยลดอัตราการเกาะระหว่างอนุภาคโปรตีน

Cornacchia และ Roos (2011) พบว่าเมื่อเติมซูโครสในวัฏภาคน้ำสามารถช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันปาล์มเคลเนลไฮโดรจีเนตที่ใช้โปรตีนเวย์หรือโปรตีนเคซีนเนตเป็นอิมัลซิไฟเออร์ Thanasukarn *et al.* (2004) พบว่าการเติมซูโครสเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันปาล์มไฮโดรจีเนตที่ใช้โปรตีนเวย์เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ทั้งในกรณีน้ำมันตกผลึกอย่างเดียว หรือในกรณีทั้งน้ำและน้ำมันตกผลึก Thanasukarn *et al.* (2006a) พบว่าการเติมซูโครสเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันปาล์มไฮโดรจีเนตที่ใช้โปรตีนเวย์ได้ดีกว่าอิมัลชันที่ใช้ทวิน 20

นอกจากซูโครสแล้วน้ำตาลชนิดอื่นๆ สามารถเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันเช่นกัน Ghosh *et al.* (2006) พบว่าการเติมซูโครส มอลโตส กลูโคส ฟรักโทส และ คอร์นไซรัป สามารถช่วยลดปริมาณน้ำแข็ง เพิ่มปริมาณน้ำไม่แข็งตัวและเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันเฮกซะดีเคนที่ใช้โซเดียมเคซีนเนตเป็นอิมัลซิไฟเออร์ Ogawa *et al.* (2003) พบว่าการเติมซูโครสหรือซอร์บิทอลเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันทุติยภูมิ น้ำมันข้าวโพดที่ประกอบด้วยชั้นเลซิทีนเคลือบด้วยชั้นโคโตแซน Klinkesorn *et al.* (2005) พบว่าการเติมคอร์นไซรัปเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันทวนาที่ประกอบด้วยชั้นเลซิทีนเคลือบด้วยชั้นโคโตแซน

มีงานวิจัยที่ใช้สารอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาล อาทิเช่น ใช้สารประเภทโพลีเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดนิวเคลียสน้ำแข็ง มีสมบัติลดอุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำ และเพิ่มความหนืดในวัฏภาคน้ำ Donsi *et al.* (2011) พบว่าการเติมโพลีเอทิลีนไกลคอลมีส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันที่มีไฮโดรคาร์บอนสาย C10 ผสมกับ C8 และใช้เลซิทีนเป็นอิมัลซิไฟเออร์ แต่อย่างไรก็ดีไม่ช่วยเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันที่ใช้แป้งดัดแปลงเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ทั้งนี้โพลีเอทิลีนไกลคอลอาจมีผลต่อการยึดเกาะของแป้งดัดแปลงที่ระหว่างพื้นผิวน้ำและน้ำมันเพราะโพลีเอทิลีนไกลคอลสามารถทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวร่วม ดังนั้นการใช้สารโพลีเอทิลีนไกลคอลต้องคำนึงถึงชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ด้วย

4.5 สารโพลิเมอร์ชีวภาพในวัฏภาคน้ำ

การเติมโพลิแซคคาไรด์บางชนิดในวัฏภาคน้ำสามารถช่วยเพิ่มความคงตัวอิมัลชันเช่นกัน ทั้งนี้เพราะโครงสร้างโพลิแซคคาไรด์ที่ยาวทำให้เกิดช่วยผลักระหว่างอนุภาคน้ำมันออกจากกัน อีกทั้งให้สมบัติหลายประการเช่นเดียวกับการเติมน้ำตาล เช่น ช่วยลดจุดเยือกแข็งของน้ำแข็ง มีผลต่อการก่อกำเนิดและการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง ช่วยเพิ่มความหนืดในวัฏภาคน้ำที่ไม่แข็งตัว ช่วยการอุ้มน้ำของชั้นอิมัลซิไฟเออร์โปรตีนและป้องกันโปรตีนเสื่อมสภาพธรรมชาติเมื่อโดนความเย็นจัด Xu *et al.* (2016) พบว่าการเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในวัฏภาคน้ำทำให้อิมัลชันน้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายกลางผสมเคอร์คูมินที่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองไฮโดรไลเซตเป็นอิมัลซิไฟเออร์มีความคงตัวมากขึ้น Degner *et al.* (2013) พบว่าการเติมแซนแทนกัมเพิ่มความหนืดและสร้างโครงสร้างเครือข่ายในวัฏภาคต่อเนื่อง และมีผลต่อการก่อผลึกน้ำแข็งโดยสามารถยับยั้งการเติบโตของน้ำแข็งในอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลือง Mun *et al.* (2008) พบว่าการเติมมอลโตสเดสทรีนในวัฏภาคน้ำช่วยเพิ่มความคงตัวอิมัลชันทุยภูมิน้ำมันข้าวโพดที่ประกอบด้วยชั้นเบต้าแลคโตโกลบูลินและเคลือบด้วยชั้นเพคตินหรือชั้นคาราจีแนน

นอกจากโพลิแซคคาไรด์แล้วโปรตีนจัดว่าเป็นสารโพลิเมอร์ชีวภาพที่ละลายน้ำได้ดี Ghosh *et al.* (2006) พบว่าการเติมโซเดียมเคซีนเนตในวัฏภาคน้ำสามารถเพิ่มความคงตัวอิมัลชันน้ำมันเฮกซะดีเคนที่ใช้โซเดียมเคซีนเนตเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เพราะโปรตีนในวัฏภาคน้ำเพิ่มความหนืด หรือสร้างเจลในวัฏภาคน้ำ และโปรตีนในวัฏภาคน้ำทำหน้าที่เป็นตัวกันและผลึกอนุภาคน้ำมันไม่ให้รวมตัวกัน

5. บทสรุป

การแช่เยือกแข็งอิมัลชันอาหารส่งผลให้อิมัลชันสลายตัวได้ง่ายเพราะอนุภาคน้ำมันเกิดการบีบอัดเข้าด้วยกันระหว่างการเกิดผลึกไขมันและผลึกน้ำแข็ง ทำให้อนุภาคน้ำมันเกิดการรวมอนุภาคบางส่วนหรือการรวมอนุภาคทั้งหมด การเพิ่มความคงตัวอิมัลชันอาจทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ (i) การใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่เปลี่ยนลักษณะผลึกไขมันโดยรอบอนุภาคน้ำมันและลดการเกิดรวมอนุภาคบางส่วน (เช่น ใช้ซูโครสโมโนเอสเทอร์) (ii) การใช้วัสดุที่มีความหนาเป็นผนังล้อมรอบอนุภาคน้ำมันทำให้ป้องกันการแทงทะลุของผลึกน้ำแข็งและผลึกไขมัน ตัวอย่างเช่น ใช้โปรตีนหรือโปรตีนดัดแปลง (เช่น โปรตีนเคซีน, โซเดียมเคซีนเนตต่อพันธะกับมอลโตสเดสทรีน, โปรตีนถั่วเหลืองต่อพันธะกับเดสทรีน), แป้งดัดแปลง (เช่น แป้งดัดแปลงแวกซ์แมช), อนุภาคของแข็ง (เช่น อนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองผ่านความร้อน, อนุภาคโปรตีนเวย์ผ่านความร้อน, อนุภาคเม็ดแป้งดัดแปลงควิโนว) และ อิมัลซิไฟเออร์เคลือบด้วยชั้นโพลิเมอร์ชีวภาพ (เช่น ชั้นไคโตแซน, ชั้นเพคติน) (iii) การลดปริมาณผลึกน้ำแข็งในอิมัลชันโดยการเติมตัวถูกละลายออสโมติกในวัฏภาคน้ำ (เช่น เติมน้ำตาล, โพลีเอทิลีนไกลคอล) (iv) การเพิ่มความหนืดหรือผลึกอนุภาคน้ำมันออกจากกันโดยการเติมโพลิเมอร์ชีวภาพที่ละลายได้ในวัฏภาคน้ำ (เช่น เติมนไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส, แซนแทนกัม, มอลโตเดสทรีน, โปรตีนเคซีน)

Reference

- Aoki, T., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2005. Influence of environmental stresses on stability of O/W emulsions containing droplets stabilized by multilayered membranes produced by a layer-by-layer electrostatic deposition technique. *Food Hydrocolloids*. 19(2): 209–220.
- Ariyaprakai, S., Tanachote, L. and Pradipasena, P. 2013. Interfacial and emulsifying properties of sucrose ester in coconut milk emulsions in comparison with Tween. *Food Hydrocolloids*. 30: 358–367.
- Ariyaprakai, S. and Tananuwong, K. 2015. Freeze–thaw stability of edible oil-in-water emulsions stabilized by sucrose esters and Tweens. *Journal of Food Engineering*. 152: 57–64.
- Cornacchia, L. and Roos, Y.H. 2011. Lipid and water crystallization in protein-stabilised oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 25(7): 1726–1736.
- Degner, B.M., Olson, K.M., Rose, D., Schlegel, V., Hutkins, R. and McClements, D.J. 2013. Influence of freezing rate variation on the microstructure and physicochemical properties of food emulsions. *Journal of Food Engineering*. 119(2): 244–253.
- Donsì, F., Wang, Y. and Huang, Q. 2011. Freeze–thaw stability of lecithin and modified starch-based nanoemulsions. *Food Hydrocolloids*. 25(5): 1327–1336.
- Ghosh, S. and Coupland, J. N. 2008. Factors affecting the freeze-thaw stability of emulsions. *Food Hydrocolloids*. 22(1): 105–111.
- Ghosh, S., Cramp, G.L. and Coupland, J.N. 2006. Effect of aqueous composition on the freeze-thaw stability of emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 272(1–2): 82–88.
- Ishibashi, C., Hondoh, H. and Ueno, S. 2016. Influence of morphology and polymorphic transformation of fat crystals on the freeze-thaw stability of mayonnaise-type oil-in-water emulsions. *Food Research International*. 89 Part 1: 604–613.
- Klinkesorn, U., Sophanodora, P., Chinachoti, P., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2005. Encapsulation of emulsified tuna oil in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. *Food Hydrocolloids*. 19(6): 1044–1053.
- Magnusson, E., Rosén, C. and Nilsson, L. 2011. Freeze–thaw stability of mayonnaise type oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 25(4): 707–715.
- Marefati, A., Rayner, M., Timgren, A., Dejmek, P. and Sjöö, M. 2013. Freezing and freeze-drying of Pickering emulsions stabilized by starch granules. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 436: 512–520.

- Mun, S., Cho, Y., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2008. Utilization of polysaccharide coatings to improve freeze-thaw and freeze-dry stability of protein-coated lipid droplets. *Journal of Food Engineering*. 86(4): 508–518.
- Mun, S., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2006. Effect of molecular weight and degree of deacetylation of chitosan on the formation of oil-in-water emulsions stabilized by surfactant-chitosan membranes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 296(2): 581–590.
- O'Regan, J. and Mulvihill, D. M. 2010. Heat stability and freeze–thaw stability of oil-in-water emulsions stabilised by sodium caseinate–maltodextrin conjugates. *Food Chemistry*. 119(1): 182–190.
- Ogawa, S., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2003. Influence of environmental conditions on the stability of oil in water emulsions containing droplets stabilized by lecithin-chitosan membranes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51(8): 5522–5527.
- Palanuwech, J. and Coupland, J.N. 2003. Effect of surfactant type on the stability of oil-in-water emulsions to dispersed phase crystallization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 223(1–3): 251–262.
- Palazolo, G.G., Sobral, P.A. and Wagner, J.R. 2011. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions prepared with native and thermally-denatured soybean isolates. *Food Hydrocolloids*. 25(3): 398–409.
- Sakamoto, M., Ohba, A., Kuriyama, J., Maruo, K., Ueno, S. and Sato, K. 2004. Influences of fatty acid moiety and esterification of polyglycerol fatty acid esters on the crystallization of palm mid fraction in oil-in-water emulsion. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 37(1–2): 27–33.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. and McClements, D.J. 2004. Influence of emulsifier type on freeze-thaw stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 18(6): 1033–1043.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. and McClements, D.J. 2006a. Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by a nonionic surfactant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54(10): 3591–3597.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. and McClements, D.J. 2006b. Utilization of layer-by-layer interfacial deposition technique to improve freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions. *Food Research International*. 39(6): 721–729.

- Vanapalli, S.A., Palanuwech, J. and Coupland, J.N. 2002. Stability of emulsions to dispersed phase crystallization: effect of oil type, dispersed phase volume fraction, and cooling rate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 204(1–3): 227–237.
- Xu, D., Zhang, J., Cao, Y., Wang, J. and Xiao, J. 2016. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion. *LWT - Food Science and Technology*. 66: 590–597.
- Zhang, Z., Wang, X., Yu, J., Chen, S., Ge, H. and Jiang, L. 2017. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions stabilized by soy protein isolate-dextran conjugates. *LWT - Food Science and Technology*. 78: 241–249.
- Zhu, X.-F., Zhang, N., Lin, W.-F. and Tang, C.-H. 2017. Freeze-thaw stability of pickering emulsions stabilized by soy and whey protein particles. *Food Hydrocolloids*. 69: 173–184.