# การเพิ่มความคงตัวของนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยต่อการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่ง

**สุวิมล อริยประกาย***
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ รามคำแหง 24 หัวหมาก กรุงเทพฯ 10240

* *Corresponding Author: suwimona@yahoo.com*
*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางอาหาร คณะเทคโนโลยีชีวภาพ*

**ข้อมูลบทความ**

**ประวัติบทความ :**
รับเพื่อพิจารณา : 13 พฤศจิกายน 2561
แก้ไข : 3 พฤศจิกายน 2562
ตอบรับ : 21 พฤศจิกายน 2562

**คำสำคัญ :**
น้ำมันหอมระเหย / นาโนอิมัลชัน / ความคงตัวอิมัลชัน / ออสวอล์ดไรเพนนิ่ง

**บทคัดย่อ**

ในการประยุกต์ใช้นาโนอิมัลชันเพื่อกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม ฟิล์มเคลือบถนอมอาหาร และผลิตภัณฑ์ล้างผักผลไม้ พบข้อจำกัดเรื่องความไม่คงตัวของนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยจากปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่ง ทั้งนี้ น้ำมันจะเคลื่อนตัวโดยการแพร่จากอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กไปสู่อนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ ทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยของนาโนอิมัลชันเพิ่มขึ้นตามเวลา อัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันหอมระเหยและชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้เป็นตัวทำอิมัลชัน บทความนี้เสนอวิธีในการป้องกันและลดอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยโดยการผสมน้ำมันไตรกลีเซอไรด์หรือเอสเตอร์กัมในน้ำมันหอมระเหย และการเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นหนา มีความแข็งแรง หรือมีการจัดเรียงโมเลกุลหนาแน่นบริเวณผิวรอบอนุภาคน้ำมัน เนื้อหาในบทความนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยให้มีความคงตัวได้นานยิ่งขึ้น

# Enhancing Stability of Essential Oil Nanoemulsions against Ostwald Ripening

**Suwimon Ariyaprakai***

Assumption University, Ramkhumhaeng 24, Hua Mak, Bangkok 10240

* *Corresponding Author: suwimona@yahoo.com*
*Assistant Professor, Department of Food Biotechnology, Faculty of Biotechnology.*

Article Info

**Article History:**
Received: November 13, 2018
Revised: November 3, 2019
Accepted: November 21, 2019

**Keywords:**
Essential Oils /
Nanoemulsions /
Emulsion Stability /
Ostwald Ripening

Abstract

Nanoemulsions containing essential oils can be used in foods, beverages, edible films or coatings as well as in fruit and vegetable washing solutions. However, applications of essential oil nanoemulsions are still limited due to instability of emulsions by Ostwald ripening phenomenon. Oil would transfer from small to larger droplets, causing average oil droplet sizes of emulsions to increase over time. Ostwald ripening rate depends on types of essential oils and of emulsifiers that are used as stabilizers. This review article suggests different methods to inhibit and reduce Ostwald ripening in essential oil nanoemulsions, including mixing triglyceride oils or ester gums with essential oils and coating oil droplets with thick emulsifiers, elastic membranes or densely packed interfacial layers. The knowledge provided can be used for development of essential oil nanoemulsion products with long-term stability

## 1. บทนำ

น้ำมันหอมระเหยสกัดได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น กลีบดอก ใบ ผล เปลือกผล เมล็ด เปลือกไม้ แก่นไม้ และราก น้ำมันหอมระเหยประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กระเหยจำนวนมาก อาจมากกว่า 100 ชนิดผสมกันในสัดส่วนต่างๆ สารเหล่านี้มากกว่า 80% เป็นสารประเภทเทอร์พีนอยด์ ได้แก่ โมโนเทอร์พีนที่มีคาร์บอน 10 หน่วย และเซสควิเทอร์พีนที่มีคาร์บอน 15 หน่วย มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือวงแหวนจำนวน 1 ถึง 3 วงต่ออยู่ในรูปไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน ฟีนอล อีเทอร์ หรือ เอสเทอร์ และมีสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่เทอร์พีนอยด์ผสมอยู่ด้วย [1]

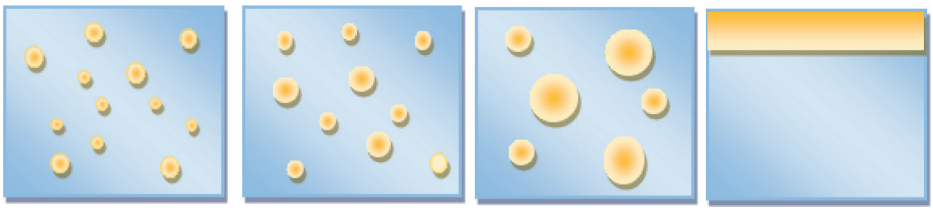
น้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ มีกลิ่นหอมและกลิ่นรสที่เฉพาะตัว ตั้งแต่อดีตกาลได้นำน้ำมันหอมระเหยมาใช้ประโยชน์ในการแต่งกลิ่นรสอาหาร สารในน้ำมันหอมระเหยบางชนิดมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ สารบางชนิดมีสมบัติเป็นสมุนไพรและมีประโยชน์ต่อผู้บริโภค สารบางชนิดมีฤทธิ์ต้านจุลชีพจำพวกแบคทีเรียและรา น้ำมันหอมระเหยจึงนำมาใช้ถนอมอาหาร ตัวอย่างน้ำมันหอมระเหยที่นิยมใช้ได้แก่ น้ำมันจากพืชตระกูลส้ม น้ำมันสะระแหน่ น้ำมันไทม์ น้ำมันตะไคร้หอม น้ำมันกานพลู น้ำมันอบเชย น้ำมันยูคาลิปตัส น้ำมันยี่หร่า และน้ำมันโหระพา เป็นต้น

ปัจจุบันมีนวัตกรรมกักเก็บน้ำมันหอมระเหยหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งคือการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในนาโนอิมัลชัน นาโนอิมัลชันประกอบด้วยอนุภาคน้ำมันหอมระเหยที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรกระจายในวัฏภาคน้ำ เมื่อนำนาโนอิมัลชันประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มหรือผลิตภัณฑ์ถนอมอาหารต่างๆ พบว่ามีข้อดีคือ นาโนอิมัลชันผสมรวมในผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสมได้ดี นาโนอิมัลชันกระจายแขวนลอยในวัฏภาคน้ำดีกว่าอิมัลชันที่ประกอบด้วยอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ มีการปลดปล่อยสารระเหยแบบควบคุม ลดอัตราการระเหยของสารระเหย ลดอันตรกิริยาระหว่างน้ำมันหอมระเหยกับองค์ประกอบในอาหารอื่นๆ ลดกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยบางชนิดที่มีกลิ่นแรง

สำหรับนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยที่มีขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยระดับ 200 นาโนเมตร จะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีต้องการความขุ่น สำหรับนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยที่มีขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยระดับต่ำกว่า 100 นาโนเมตร จะมีลักษณะโปร่งแสง เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใสโปร่งแสง [2] นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีใช้พลังงานสูงโดยการนำส่วนผสมที่ประกอบด้วยน้ำมันหอมระเหย-น้ำ-และ-สารอิมัลซิไฟเออร์ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันโดยใช้เครื่องปั่นผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยความดันสูงหรือใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง และนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีใช้พลังงานต่ำ อาทิเช่น วิธีการเกิดอิมัลชันได้เองหรือวิธีเฟสผกผันโดยการนำส่วนผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยและสารอิมัลซิไฟเออร์เติมในน้ำ หรือนำน้ำเติมในส่วนผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยและสารอิมัลซิไฟเออร์ระหว่างการกวนผสม [3, 4]

การประยุกต์ใช้นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยพบปัญหาเรื่องอิมัลชันไม่คงตัวทางกายภาพจากปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่ง โดยพบน้ำมันลอยแยกชั้นเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้ไม่นาน (รูปที่ 1) ในบทความนี้ได้อธิบายถึงกลไกและสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยระบุถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่ง และใช้ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้องในการอธิบาย นอกจากนี้ได้รวบรวมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการป้องกันและลดอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย โดยมุ่งเน้นให้สามารถนำวิธีที่เสนอแนะไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย

ในช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชัน โดยการศึกษาในช่วงแรกศึกษาโดยใช้น้ำมันประเภทอัลเคน อาทิเช่น น้ำมันเดคเคน น้ำมันโดเดคเคน ซึ่งเป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ [5-7] และได้มีการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคน้ำมันระหว่างเกิดปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่ง [8, 9] ต่อมาในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีการศึกษาปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยนั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาร่วมกับการศึกษาประสิทธิภาพในการต้านจุลชีพของนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย [10-14]




**รูปที่ 1** Ostwald ripening in essential oil nanoemulsions. Nanoemulsions become coarsen over time by oil diffusing from small to larger oil droplets. (a) Initial nanoemulsions. (b) and (c) Nanoemulsions after increasing in storage time. (d) Oil phase separation at the final state.

## 2. ปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย

ปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งเกิดขึ้นในอิมัลชันที่ประกอบด้วยอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดต่างๆ อนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กจะมีผิวโค้งและความดันลาปลาซสูงกว่าอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ จากผลของเคลวิน (Kelvin effect) ทำให้บริเวณใกล้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กมีค่าการละลายน้ำมันที่สูงกว่าบริเวณใกล้อนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ น้ำมันจึงเคลื่อนตัวโดยการแพร่ (diffusion) ผ่านวัฏภาคน้ำจากบริเวณใกล้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กไปรวมในอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กจะหมดไปและอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่มีขนาดเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยของอิมัลชันจึงเพิ่มขึ้นตามเวลา [15, 16] การที่อนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการแยกชั้นครีมเร็ว อนุภาคน้ำมันมีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำมันแยกชั้นในท้ายที่สุด

## 3. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย

จากทฤษฎีของ Liftshitz-Slyozov-Wagner (LSW theory) [17, 18] อัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชัน ($\omega$) คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยยกกำลังสามกับเวลา ดังแสดงในสมการที่ [1]

$$\omega = \frac{d\bar{r}^3}{dt} = \frac{8}{9}\left(\frac{\gamma v}{RT}\right)C_\infty D \qquad [1]$$

โดย $\bar{r}$ = รัศมีของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่คำนวณจากจำนวนอนุภาค, $t$ = เวลา, $C_\infty$ = ค่าการละลายของน้ำมันในวัฏภาคน้ำ, $v$ = ปริมาตรโมล่าร์ของน้ำมัน, $D$ = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมันในวัฏภาคน้ำ, $\gamma$= ค่าแรงตึงระหว่างผิว, $R$ = ค่าคงที่ของก๊าซ, และ $T$ = อุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยทฤษฎีดังกล่าวมีเงื่อนไขว่านาโนอิมัลชันมีความเข้มข้นอนุภาคน้ำมันเจือจางและอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำมันกำหนดโดยการแพร่ของโมเลกุลน้ำมัน (molecular diffusion controlling) [19]

อัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันเป็นหลัก น้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดประกอบด้วยสารองค์ประกอบต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลและความมีขั้วแตกต่างกัน ทำให้มีความสามารถในการละลายในวัฏภาคน้ำได้ไม่เท่ากัน จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า นาโนอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันชนิดที่มีความสามารถในการละลายในวัฏภาคน้ำได้ดีหรือมีค่าการละลายน้ำมันสูงจะมีอัตราการเกิดออสวอล์ดไร-เพนนิ่งเร็วกว่านาโนอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันชนิดที่มีความสามารถในการละลายในวัฏภาคน้ำได้ต่ำ [20]

อัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ อิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดมีสมบัติระหว่างผิวที่แตกต่างกัน ทั้งความสามารถในการยึดเกาะระหว่างผิวและความสามารถในการลดแรงตึงระหว่างผิว จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า นาโนอิมัลชันจะมีอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งช้าในกรณีที่ค่าลดแรงตึงระหว่างผิวต่ำ อิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลและขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน โครงสร้างชั้นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความหนาและความแข็งแรงจะทำให้มีความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ของน้ำมันและมีผลลด

อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำมันระหว่างอนุภาคน้ำมัน [8, 9] ลักษณะโครงสร้างของอิมัลซิไฟเออร์จึงมีผลต่ออัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย

ความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์มีผลต่ออัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งได้เช่นเดียวกัน ในกรณีที่ใช้อิมัลซิไฟเออร์ขนาดโมเลกุลเล็กในปริมาณมากและรวมตัวเป็นไมเซลล์ในวัฏภาคน้ำ ไมเซลล์อาจส่งผลเร่งอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ มีผลต่ออัตราการออสวอล์ดไรเพนนิ่งแตกต่างกัน [21-27] อาทิเช่น Henry และคณะ [26] พบว่า ทวีนไมเซลล์มีผลเร่งอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันน้ำมันเดคเคนมากกว่าซูโครสเอสเตอร์ไมเซลล์และบริจไมเซลล์ Ariyaprakai และ Dungan [21] พบว่า ทวีนไมเซลล์ โซเดียมโดดิซิลซัลเฟตไมเซลล์ เอทิลีนออกไซด์โดดิซิลอีเทอร์ไมเซลล์ และ บริจไมเซลล์มีผลต่ออัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันน้ำมันเดคเคนแตกต่างกัน

อย่างไรก็ดีเนื่องจากน้ำมันหอมระเหยเป็นน้ำมันธรรมชาติที่ประกอบด้วยสารองค์ประกอบหลากหลายชนิดที่ละลายในวัฏภาคน้ำได้ การเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยจึงซับซ้อนกว่าในนาโนอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมันประเภทอัลเคนที่เป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ชนิดเดี่ยว และการคำนวณอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยจึงทำได้ยากกว่า [6, 26]

## 4. วิธีการป้องกันหรือลดอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย

### 4.1 วิธีผสมน้ำมันไตรกลีเซอไรด์กับน้ำมันหอมระเหย

การนำน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ น้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายโซ่ขนาดยาว (อาทิเช่น น้ำมันข้าวโพด น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง) หรือน้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายโซ่ขนาดกลาง (อาทิเช่น น้ำมันที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีคาร์บอน 8 หน่วย และ 10 หน่วย) ผสมกับน้ำมันหอมระเหยสามารถป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยได้ เมื่อนำน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ผสมกับน้ำมันหอมระเหย น้ำมันทั้งสองชนิดจะผสมอยู่ในอนุภาคขนาดต่างๆ เท่าๆ กัน ในกรณีที่น้ำมันหอมระเหยเคลื่อนที่จากอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กไปรวมในอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่จะทำให้น้ำมันไตรกลีเซอไรด์ซึ่งไม่ละลายน้ำเหลืออยู่แต่ในอนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดไม่สมดุลส่วนประกอบ (compositional imbalance) ซึ่งตามหลักเอนโทรปีการผสม (entropy of mixing effect) ปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งจะไม่เกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันไตรกลีเซอไรด์และน้ำมันหอมระเหย [20, 28] ตัวอย่างเช่น Ziani และคณะ [13] ผสมน้ำมันข้าวโพดกับน้ำมันไทม์ในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 75: 25 ในการป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่ง และ Chang และคณะ [12] ผสมน้ำมันข้าวโพดกับน้ำมันไทม์ในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 60 : 40 และผสมน้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายกลางกับน้ำมันไทม์ในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 50 : 50

ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้เตรียมอิมัลชันมีผลต่อสัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันไตรกลีเซอไรด์กับน้ำมันหอมระเหยเช่นกัน Li และคณะ [11] ผสมน้ำมันถั่วกับน้ำมันยูจีนอลในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 20 : 80 และมากกว่าหรือเท่ากับ 10 : 90 ในการเตรียมนาโนอิมัลชันที่ใช้โซเดียมโดดิซิลซัลเฟต และทวีน 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ คาดว่าสัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันไตรกลีเซอไรด์กับน้ำมันหอมระเหยที่ใช้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติการลดแรงตึงผิวของอิมัลซิไฟเออร์ Chang และคณะ [10] ผสมน้ำมันข้าวโพดกับน้ำมันไทม์ในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 60 : 40 และมากกว่าหรือเท่ากับ 30 : 70 ในการเตรียมนาโนอิมัลชันที่ใช้ทวีน 80 และทวีน 80 ผสมกับลอริก-แอลจิเนต เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ตามลำดับ Han และคณะ [27] ผสมน้ำมันข้าวโพดกับน้ำมันส้มในสัดส่วนตั้งแต่ 5 : 95 ถึง 20 : 80 ในการเตรียมอิมัลชันที่ใช้พอลิออกซีเอทิลีนอัลคิล-อีเทอร์ชนิดต่างๆ เป็นอิมัลซิไฟเออร์ สัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันข้าวโพดและน้ำมันส้มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของพอลิออกซีเอทิลีนอัลคิลอีเทอร์ที่ใช้ ทั้งนี้คาดว่าขึ้นอยู่กับชั้นความหนาและความหนาแน่นของอิมัลซิไฟเออร์ที่เรียงตัวบริเวณรอบอนุภาคน้ำมัน และขนาดส่วนหัวและส่วนหางของสารอิมัลซิไฟเออร์

นอกจากนี้บทความนี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อการประยุกต์ใช้ดังนี้ เนื่องจากน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ ล้วนมีความสามารถในการละลายในวัฏภาคน้ำต่ำ จึงสามารถเลือกใช้ชนิดน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ตามความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ และมีข้อเสนอแนะว่าก่อนการประยุกต์ใช้อาจทำการทดสอบแปร

สัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันไตรกลีเซอไรด์และน้ำมันหอมระเหยเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมก่อน โดยดัชนีที่ใช้ในการตรวจสอบคือค่าขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ย เมื่อใช้สัดส่วนผสมระหว่างน้ำมันไตรกลีเซอไรด์กับน้ำมันหอมระเหยที่พอเหมาะขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยจะคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ

### 4.2 วิธีผสมเอสเทอร์กัมกับน้ำมันหอมระเหย

เอสเทอร์กัมเป็นสารที่เติมเพื่อเพิ่มน้ำหนักให้กับน้ำมันหอมระเหยเพื่อป้องกันการแยกชั้นครีมในผลิตภัณฑ์อิมัลชันน้ำมันหอมระเหย Lim และคณะ [29] ผสมเอสเทอร์กัมและน้ำมันส้มในสัดส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 9:91 โดยพบว่านอกจากเอสเทอร์กัมจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มน้ำหนักแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันน้ำมันส้มที่ใช้สตาร์ชดัดแปรเป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้อีกด้วย การผสมเอสเทอร์กัมซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ในน้ำมันหอมระเหยจะทำให้เกิดผลตามหลักเอนโทรปีการผสมเช่นเดียวกับการผสมน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันหอมระเหย เนื่องจากเอสเทอร์กัมเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ

### 4.3 วิธีเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่

การใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นชั้นหนารอบอนุภาคน้ำมันสามารถลดอัตราการออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย Wu และคณะ [14] ใช้อิมัลซิไฟเออร์ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์สกัดจากถั่วเหลืองที่ละลายน้ำได้ในสัดส่วนผสมระหว่างอิมัลซิไฟเออร์และน้ำมันหอมระเหยมากกว่าหรือเท่ากับ 5:1 พบว่าป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันน้ำมันไทม์ตลอดระยะเวลาการเก็บ 60 วัน อิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวมีโครงสร้างคล้ายเพกทินต่อกับเพปไทด์และมีลักษณะเป็นชั้นหนา

### 4.4 วิธีเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดที่มีโครงสร้างส่วนหัวที่ชอบน้ำขนาดเล็ก

การใช้อิมัลซิไฟเออร์ประเภทที่มีส่วนหัวที่ชอบน้ำขนาดเล็กจะทำให้อิมัลซิไฟเออร์มีการจัดเรียงตัวโมเลกุลหนาแน่นบริเวณรอบอนุภาคน้ำมันและมีจำนวนโมเลกุลอิมัลซิไฟเออร์ต่อพื้นที่ผิวสูง Han และคณะ [27] ศึกษาการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอิมัลชันน้ำมันส้มโดยใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่มีส่วนหัวที่ชอบน้ำประเภทพอลิออกซีเอทิลีนขนาดสายยาวต่างๆ กัน เมื่อใช้พอลิออกซีเอทิลีน-10-สเตียริลอีเทอร์ และพอลิออกซีเอทิลีน-20-สเตียริลอีเทอร์ พบว่าเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในอัตราที่ช้ากว่าเมื่อใช้พอลิออกซีเอทิลีน-100-สเตียริลอีเทอร์ เนื่องจากพอลิออกซีเอทิลีน-10-สเตียริลอีเทอร์ และพอลิออกซีเอทิลีน-20-สเตียริลอีเทอร์ ประกอบด้วยส่วนหัวที่ชอบน้ำกลุ่มพอลิออกซีเอทิลีนจำนวน 10 หน่วย และ 20 หน่วยตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าพอลิออกซีเอทิลีน-100-สเตียริลอีเทอร์ที่ประกอบด้วยส่วนหัวที่ชอบน้ำจำนวน 100 หน่วย

### 4.5 วิธีเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดผสม

การใช้อิมัลซิไฟเออร์ผสมมากกว่าหนึ่งชนิดสามารถดัดแปรความสามารถในการยึดเกาะที่ผิว ค่าแรงตึงระหว่างผิว ความหนาแน่นโมเลกุลระหว่างผิว และความหนาและความแข็งแรงของชั้นอิมัลซิไฟเออร์ ทั้งนี้สมบัติของอิมัลซิไฟเออร์ผสมขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่นำมาผสม อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ผสมอาจเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าหรือไม่มีก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้อิมัลซิไฟเออร์ประเภทสารพอลิเมอร์ชีวภาพ อิมัลซิไฟเออร์ที่มีค่าสมดุลความชอบน้ำและชอบน้ำมัน (Hydrophillic - Lipophillic Balance, HLB) ต่างๆ หรืออิมัลซิไฟเออร์ที่มีโครงสร้างส่วนหัวที่ชอบน้ำขนาดต่างๆ ในบางกรณีอิมัลซิไฟเออร์ผสมเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลต่อกันก่อให้เกิดเป็นชั้นอิมัลซิไฟเออร์เชิงซ้อนที่ลดการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งได้ดี [28, 30-33]

Barradas และคณะ [34] ใช้อิมัลซิไฟเออร์ผสมระหว่างทวีน 20 และสแปน 20 ในสัดส่วน 1 : 3 โดยใช้สัดส่วนระหว่างน้ำมันและอิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสม พบว่าป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งและการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันยี่หร่าตลอดระยะเวลาการเก็บ 3 เดือน การใช้อิมัลซิไฟเออร์ผสมระหว่างทวีน 20 และสแปน 80 ที่มีค่า HLB ต่างกัน คาดว่ามีผลช่วยลดค่าแรงตึงระหว่างผิวและเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานของชั้นอิมัลซิไฟเออร์จากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความชอบน้ำและชอบน้ำมันที่ต่างกัน Guerra-Rosas และคณะ [35] ใช้ทวีน 80 ร่วมกับเพกทินที่มีเมทอคซิลสูงในการเตรียมนาโนอิมัลชัน พบว่าป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันตะไคร้หอมและนาโน-

อิมัลชันน้ำมันแมนดารินตลอดระยะเวลาการเก็บ 56 วัน แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันโอรีกาโนและนาโนอิมัลชันน้ำมันไทม์ ทั้งนี้การยึดเกาะของเพกทินซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบบนอนุภาคน้ำมันขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันหอมระเหย

### 4.6 วิธีเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดเมมเบรนหลายชั้น

นาโนอิมัลชันหอมระเหยเตรียมได้โดยใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดเมมเบรนหลายชั้นโดยเคลือบอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าด้วยชั้นสารพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทโปรตีนหรือพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้าม จำนวนชั้นสารพอลิเมอร์ชีวภาพอาจเพิ่มเป็นหลายชั้นโดยใช้สารพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดต่างๆ ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามเคลือบซ้ำ ชั้นเมมเบรนหลายชั้นที่ห่อหุ้มรอบอนุภาคน้ำมันมีความหนาและแข็งแรงทำให้ต้านการหดและขยายขนาดของอนุภาคน้ำมัน [36] และลดการเคลื่อนที่ของน้ำมันระหว่างอนุภาคน้ำมัน [37] Ariyaprakai และ Qi [38] ใช้อิมัลซิไฟเออร์ซิเทรม (Citrem) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพเจลาตินที่มีประจุไฟฟ้าบวกในการเตรียมอิมัลชันน้ำมันส้ม พบว่าอิมัลชันทุติยภูมิหรืออิมัลซิไฟเออร์ชนิดเมมเบรนหลายชั้นที่เตรียมได้มีความคงตัวต่อการเกิดออสวอล์ด-ไรเพนนิ่งดีกว่าอิมัลชันปฐมภูมิที่ไม่ได้เคลือบด้วยชั้นเจลาติน

## 5. การประยุกต์ใช้นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยในผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ

นาโนอิมัลชันน้ำมันพืชตะกูลส้มนิยมนำมาใส่ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มประเภทน้ำผลไม้เพื่อให้กลิ่นรสเข้มข้นตามธรรมชาติของผลไม้ ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มทั่วไปประกอบด้วยปริมาณน้ำมันหอมระเหย < 0.1 % [39, 40] นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยนำมาใส่ในฟิลม์ถนอมอาหาร โดยนำมาผสมในสารพอลิเมอร์ชีวภาพและขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม การที่อนุภาคน้ำมันหอมระเหยมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรทำให้กระจายตัวในฟิล์มได้ดี สามารถผสมน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณมากกว่าเมื่อไม่ได้อยู่ในรูปนาโนอิมัลชัน การมีส่วนผสมที่เป็นน้ำมันในฟิลม์ทำให้ลดอัตราการระเหยของน้ำจากฟิล์มได้ เมื่อนำฟิล์มถนอมอาหารไปใช้ห่อหุ้มอาหารจำพวกผักและผลไม้ อาทิเช่น แอปเปิล ลูกพลัม ถั่ว แครอท ผักบร็อกโคลี ผักสลัด รวมทั้ง ไส้กรอก ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และชีส จึงช่วยป้องกันการระเหยของน้ำออกจากอาหาร นอกจากนี้น้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ มีกลิ่นหอม จึงเหมาะแก่การใช้กับฟิล์มถนอมอาหารแบบบริโภคได้ [2,41] นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยใช้ถนอมอาหารได้โดยการพ่นเคลือบอาหารโดยตรง อาทิเช่น พ่นบนเนื้อสัตว์หรือเนื้อปลา หรือฉีดใส่ในไส้กรอกหรือในแตง หรือผสมโดยตรงในผลิตภัณฑ์นมหรือน้ำผลไม้ หรือผสมในผลิตภัณฑ์ล้างผักผลไม้ ในผลิตภัณฑ์ถนอมอาหารทั่วไปประกอบด้วยปริมาณน้ำมันหอมระเหยตั้งแต่ ~ 1 - 20 % ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดในการต้านจุลชีพแต่ละประเภท และตามความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการถนอมอาหารประเภทต่างๆ [2]

## 6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ความไม่คงตัวของนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยเกิดจากปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งเนื่องจากน้ำมันหอมระเหยมีสารองค์ประกอบเป็นสารโมเลกุลเล็กและละลายน้ำได้บางส่วน ปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งสามารถป้องกันได้โดยวิธีผสมน้ำมันไตรกลีเซอไรด์หรือผสมเอสเทอร์กัมที่ไม่ละลายน้ำกับน้ำมันหอมระเหยในสัดส่วนตั้งแต่ 5% ถึง 75% (ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันหอมระเหยและชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้) วิธีนี้ประยุกต์ใช้ได้ง่ายเนื่องจากน้ำมันไตรกลีเซอไรด์หาได้ทั่วไป นอกจากนี้ปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งสามารถทำให้เกิดในอัตราที่ช้าลงได้โดยวิธีการเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสม อาทิเช่น อิมัลซิไฟเออร์ชนิดโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ อิมัลซิไฟเออร์ชนิดมีโครงสร้างส่วนหัวที่ชอบน้ำขนาดเล็ก อิมัลซิไฟเออร์ชนิดผสม และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดเมมเบรนหลายชั้น ทั้งนี้ในการเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ต้องคำนึงถึงชนิดของน้ำมันหอมระเหยที่ใช้ด้วย เพราะอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งขึ้นอยู่กับทั้งโครงสร้างของสารองค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยและโครงสร้างของสารอิมัลซิไฟเออร์

ปกติแล้วนาโนอิมัลชันเริ่มต้นประกอบด้วยอนุภาคน้ำมันขนาดเล็ก จึงมีความคงตัวต่อการแยกชั้นครีมได้ดี แต่เมื่อเกิดปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยจะทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่งผลให้อิมัลชันเกิดการแยกชั้นครีมเร็วขึ้น และกลไกการสลายตัวอิมัลชันอื่นๆ ได้แก่ การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคน้ำมัน และ

การรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันมีโอกาสเกิดมากขึ้นตามมา ดังนั้นปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งจัดว่าเป็นกลไกหลักที่นำไปสู่การสลายตัวของนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหย [15] การป้องกันหรือลดอัตราการเกิดออสวอล์ดไรเพนนิ่งในนาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยจึงมีความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนมีพืชหลากหลายชนิดที่ผลิตน้ำมันหอมระเหย ทำให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนอิมัลชันน้ำมันหอมระเหยที่มีกลิ่นหอมต่างๆ ได้หลากหลาย จึงเสนอให้มีการทำวิจัยต่อยอดโดยนำวิธีป้องกันและลดปรากฏการณ์ออสวอล์ดไรเพนนิ่งที่เสนอแนะในบทความนี้ไปพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม ฟิล์มถนอมอาหาร และผลิตภัณฑ์ล้างผักผลไม้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวอิมัลชันสูง มีคุณภาพที่ดีขึ้น และมีอายุการเก็บได้นานขึ้น อนุภาคน้ำมันหอมระเหยคงขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเป็นระยะเวลานาน และอนุภาคน้ำมันมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคน้ำ ทั้งนี้อาจนำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากพืชหลากชนิดในประเทศไทยมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นหอมหรือกลิ่นรสใหม่ได้ต่อไป

## 7. เอกสารอ้างอิง


1. Asbahani, A.E., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E.H.A., Casabianca, H., Mousadik, A.E., Hartmann, D., Jilale, A., Renaud, F.N.R. and Elaissari, A., 2015, "Essential Oils: From Extraction to Encapsulation," *International Journal of Pharmaceutics*, 483 (1–2), pp. 220-243.

2. Donsì, F. and Ferrari, G., 2016, "Essential Oil Nanoemulsions as Antimicrobial Agents in Food," *Journal of Biotechnology*, 233, pp. 106-120.

3. McClements, D.J. and Rao, J., 2011, "Food-Grade Nanoemulsions: Formulation, Fabrication, Properties, Performance, Biological Fate, and Potential Toxicity," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51 (4), pp. 285-330.

4. Ariyaprakai, S., 2017, "Nanoemulsion Production by Simple and Low Energy Method," *Food and Applied Bioscience Journal*, 5 (3), pp. 155-164.

5. Acedo-Carrillo, J.I., Rosas-Durazo, A., Herrera-Urbina, R., Rinaudo, M., Goycoolea, F.M. and Valdez, M.A., 2006, "Zeta Potential and Drop Growth of Oil in Water Emulsions Stabilized with Mesquite Gum," *Carbohydrate Polymers,* 65 (3), pp. 327-336.

6. Henry, J.V.L., Fryer, P.J., Frith, W.J. and Norton, I.T., 2010, "The Influence of Phospholipids and Food Proteins on the Size and Stability of Model Sub-micron Emulsions," *Food Hydrocolloids*, 24 (1), pp. 66-71.

7. Georgieva, D., Schmitt, V., Leal-Calderon, F. and Langevin, D., 2009, "On the Possible Role of Surface Elasticity in Emulsion Stability," *Langmuir*, 25 (10), pp. 5565-5573.

8. Meinders, M.B.J. and van Vliet, T., 2004, "The Role of Interfacial Rheological Properties On Ostwald Ripening in Emulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, 108–109, pp. 119-126.

9. Meinders, M.B.J., Kloek, W. and van Vliet, T., 2001, "Effect of Surface Elasticity on Ostwald Ripening in Emulsions," *Langmuir*, 17 (13), pp. 3923-3929.

10. Chang, Y., McLandsborough, L. and McClements, D.J., 2015, "Fabrication, Stability and Efficacy of Dual-Component Antimicrobial Nanoemulsions: Essential Oil (Thyme Oil) and Cationic Surfactant (Lauric Arginate)," *Food Chemistry,* 172, pp. 298-304.

11. Li, W., Chen, H., He, Z., Han, C., Liu, S. and Li, Y., 2015, "Influence of Surfactant and Oil Composition on the Stability and Antibacterial Activity of Eugenol Nanoemulsions," *LWT - Food Science and Technology,* 62 (1, Part 1), pp. 39-47.

12. Chang, Y., McLandsborough, L. and McClements, D.J., 2012, "Physical Properties and Antimicrobial Efficacy of Thyme Oil Nanoemulsions: Influence of Ripening Inhibitors," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (48), pp. 12056-63.

13. Ziani, K., Chang, Y., McLandsborough, L. and McClements, D.J., 2011, "Influence of Surfactant Charge on Antimicrobial Efficacy of Surfactant-stabilized Thyme

Oil Nanoemulsions," *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 59 (11), pp. 6247-55.

14. Wu, J.-E., Lin, J. and Zhong, Q., 2014, "Physical and Antimicrobial Characteristics of Thyme Oil Emulsified with Soluble Soybean Polysaccharide," *Food Hydrocolloids*, 39, pp. 144-150.

15. Tadros, T., Izquierdo, P., Esquena, J. and Solans, C., 2004, "Formation and Stability of Nano-emulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, 108–109, pp. 303-318.

16. Solans, C., Izquierdo, P., Nolla, J., Azemar, N. and Garcia-Celma, M.J., 2005, "Nano-emulsions," *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 10 (3–4), pp. 102-110.

17. Lifshitz, I.M. and Slyozov, V.V., 1961, "The Kinetics of Precipitation from Supersaturated Solid Solutions," *Journal of Physics and Chemistry of Solids,* 19 (1), pp. 35-50.

18. Wagner, C., 1961, "Theorie der Alterung von Niederschlägen durch Umlösen (Ostwald-Reifung)," *Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 65 (7-8), pp. 581-591.

19. De Smet, Y., Danino, D., Deriemaeker, L., Talmon, Y. and Finsy, R., 2000, "Ostwald Ripening in the Transient Regime: A Cryo-TEM Study," *Langmuir,* 16 (3), pp. 961-967.

20. Wooster, T.J., Golding, M. and Sanguansri, P., 2008, "Impact of Oil Type on Nanoemulsion Formation and Ostwald Ripening Stability," *Langmuir,* 24 (22), pp. 12758-12765.

21. Ariyaprakai, S. and Dungan, S.R., 2010, "Influence of Surfactant Structure on the Contribution of Micelles to Ostwald Ripening in Oil-in-water Emulsions," *Journal of Colloid and Interface Science,* 343 (1), pp. 102-108.

22. De Smet, Y., Deriemaeker, L., and Finsy, R., 1999, "Ostwald Ripening of Alkane Emulsions in the Presence of Surfactant Micelles," *Langmuir*, 15 (20), pp. 6745-6754.

23. Djerdjev, A.M. and Beattie, J.K., 2008, "Enhancement of Ostwald Ripening by Depletion Flocculation," *Langmuir,* 24 (15), pp. 7711-7717.

24. Weiss, J., Canceliere, C. and McClements, D.J., 2000, "Mass Transport Phenomena in Oil-in-Water Emulsions Containing Surfactant Micelles: Ostwald Ripening," *Langmuir*, 16 (17), pp. 6833-6838.

25. Nguyen Hoang, T.K., La, V.B., Deriemaeker, L. and Finsy, R., 2002, "Ostwald Ripening of Alkane in Water Emulsions Stabilized by Polyoxyethylene (20) Sorbitan Monolaurate," *Langmuir*, 18 (5), pp. 1485-1489.

26. Henry, J.V.L., Fryer, P.J., Frith, W.J. and Norton, I.T., 2009, "Emulsification Mechanism and Storage Instabilities of Hydrocarbon-in-water Sub-micron Emulsions Stabilised with Tweens (20 and 80), Brij 96v and Sucrose Monoesters," *Journal of Colloid and Interface Science*, 338 (1), pp. 201-206.

27. Han, S.W., Song, H.Y., Moon, T.W. and Choi, S.J., 2018, "Influence of Emulsion Interfacial Membrane Characteristics on Ostwald Ripening in a Model Emulsion," *Food Chemistry*, 242, pp. 91-97.

28. Delmas, T., Piraux, H., Couffin, A.-C., Texier, I., Vinet, F., Poulin, P., Cates, M.E. and Bibette, J., 2011, "How To Prepare and Stabilize Very Small Nanoemulsions," *Langmuir*, 27 (5), pp. 1683-1692.

29. Lim, S.S., Baik, M.Y., Decker, E.A., Henson, L., Michael Popplewell, L., McClements, D.J. and Choi, S.J., 2011, "Stabilization of Orange Oil-in-water Emulsions: A New Role for Ester Gum as an Ostwald Ripening Inhibitor," *Food Chemistry*, 128 (4), pp. 1023-1028.

30. McClements, D.J. and Jafari, S.M., 2018, "Improving Emulsion Formation, Stability and Perfor-

mance Using Mixed Emulsifiers: A Review," *Advances in Colloid and Interface Science*, 251, pp. 55-79.

31. Galindo-Alvarez, J., Le, K.-A., Sadtler, V., Marchal, P., Perrin, P., Tribet, C., Marie, E. and Durand, A., 2011, "Enhanced Stability of Nanoemulsions Using Mixtures of Non-ionic Surfactant and Amphiphilic Polyelectrolyte," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 389 (1), pp. 237-245.

32. Chebil, A., Desbrières, J., Nouvel, C., Six, J.L. and Durand, A., 2013, "Ostwald Ripening of Nanoemulsions Stopped by Combined Interfacial Adsorptions of Molecular and Macromolecular Nonionic Stabilizers," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 425, pp. 24-30.

33. Xin, X., Zhang, H., Xu, G., Tan, Y., Zhang, J. and Lv, X., 2013, "Influence of CTAB and SDS on the Properties of Oil-in-water Nano-emulsion with Paraffin and Span 20/Tween 20," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 418, pp. 60-67.

34. Barradas, T.N., de Campos, V.E.B., Senna, J.P., Coutinho, C.d.S.C., Tebaldi, B.S., Silva, K.G.d.H.e. and Mansur, C.R.E., 2015, "Development and Characterization of Promising O/W Nanoemulsions Containing Sweet Fennel Essential Oil and Non-ionic Sufactants," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 480, pp. 214-221.

35. Guerra-Rosas, M.I., Morales-Castro, J., Ochoa-Martínez, L.A., Salvia-Trujillo, L. and Martín-Belloso, O., 2016, "Long-term Stability of Food-grade Nanoemulsions from High Methoxyl Pectin Containing Essential Oils," *Food Hydrocolloids*, 52, pp. 438-446.

36. Mun, S. and McClements, D.J., 2006, "Influence of Interfacial Characteristics on Ostwald Ripening in Hydrocarbon Oil-in-Water Emulsions," *Langmuir*, 22 (4), pp. 1551-1554.

37. Zeeb, B., Gibis, M., Fischer, L. and Weiss, J., 2012, "Influence of Interfacial Properties on Ostwald Ripening in Crosslinked Multilayered Oil-in-water Emulsions," *Journal of Colloid and Interface Science,* 387 (1), pp. 65-73.

38. Ariyaprakai, S. and Qi, W.J., 2013, "Stability of Orange Oil-in-Water Emulsion Prepared by Multilayer Membranes," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (2), pp. 171-183.

39. Piorkowski, D.T. and McClements, D.J., 2014, "Beverage Emulsions: Recent Developments in Formulation, Production, and Applications," *Food Hydrocolloids*, 42 (Part 1), pp. 5-41.

40. Maswal, M. and Dar, A.A., 2014, "Formulation Challenges in Encapsulation and Delivery of Citral for Improved Food Quality," *Food Hydrocolloids*, 37, pp. 182-195.

41. Galus, S. and Kadzińska, J., 2015, "Food Applications of Emulsion-based Edible Films and Coatings," *Trends in Food Science and Technology,* 45 (2), pp. 273-283.