

# นาโนอิมัลชัน

## และการผลิตนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำ Nano-emulsion and nano-emulsification using low-energy method

 **ดร.วารภรณ์ ประเสริฐ (Dr.Waraporn Prasert)**

ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป (Department of Food Processing and Preservation)  
สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร (Institute of Food Research and Product Development)  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นที่รู้จัก น่าสนใจ และเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากขึ้น จึงมีการศึกษาวิจัย พัฒนา และนำไปประยุกต์ในหลายด้าน

นาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมอาหารไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีแบบ top-down หรือ bottom up เช่น การบดให้อาหารหรือวัตถุดิบมีขนาดเล็กลง หรือการสร้างอนุภาคระดับนาโนสเกลขึ้นมาใหม่ก็ตาม ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะต่าง ๆ ของอาหาร เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัส รสชาติ ลักษณะทางประสาทสัมผัส ความคงตัวของสี กลิ่นรส ความคงตัวของอาหารระหว่างการเก็บรักษา เป็นต้น อันนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิต และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่

นาโนอิมัลชันเป็นหนึ่งในนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมสูงมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้ในระบบกักเก็บ (encapsulating system) สารสำคัญต่าง ๆ เช่น nutraceuticals สารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ สารให้สี กลิ่นรส เป็นต้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจำนวนมากของนาโนอิมัลชันจะช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บ เพิ่มความคงตัว ทั้งยังปรับปรุงและเพิ่ม bioavailability ของสารสำคัญที่ถูกกักเก็บอีกด้วย ในบทความนี้ จึงได้นำเสนอภาพรวมเกี่ยวกับนาโน

อิมัลชันและการเตรียมนาโนอิมัลชัน รวมไปถึงตัวอย่างขั้นตอน วิธีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมนาโนอิมัลชัน โดยกระบวนการพลังงานต่ำในอาหารอีกด้วย

### อิมัลชัน (emulsion)

อิมัลชัน (emulsion) หมายถึง ระบบคอลลอยด์ (colloid) ที่ประกอบด้วยของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งปกติไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำกับน้ำมัน โดยของเหลวส่วนหนึ่งแตกตัวเป็นหยดเล็ก ๆ เรียกว่า วัฏภาคภายใน หรือส่วนที่กระจายตัว (internal or dispersed phase) ซึ่งจะ

กระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า วัฏภาคภายนอก (external or continuous phase) หรือส่วนที่ต่อเนื่อง

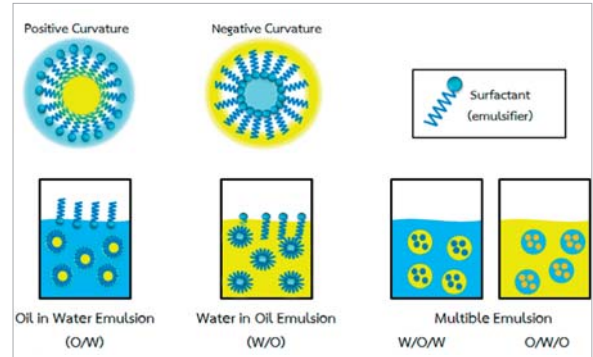
### การแบ่งตามอิมัลชันประเภทของวัฏภาคภายในและภายนอก

การแบ่งประเภทของอิมัลชันโดยใช้วัฏภาคภายในและภายนอกเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1) อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion: O/W) มีน้ำมันเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำเป็น วัฏภาคภายนอก เช่น นม (milk) น้ำสลัด (salad dressing) มายองเนส (mayonnaise) เป็นต้น ข้อสังเกตหรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำ มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) สูงกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำ (water soluble dye)

2) อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion: W/O) มีน้ำเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำมันเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น เนย (butter) มارجารีน (margarine) ไส้กรอก (sausage) เป็นต้น ข้อสังเกตหรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำมัน มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ต่ำกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำมัน (oil soluble dye)

ทั้งนี้ ปัจจุบันยังมีระบบอิมัลชันเชิงซ้อนที่เรียกว่า multiple emulsion ซึ่งอาจเป็นอิมัลชันชนิด O/W/O หรือ W/O/W อิมัลชันประเภทต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ประเภทของอิมัลชัน

### การแบ่งอิมัลชันโดยใช้ขนาดอนุภาคและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นเกณฑ์

เมื่อแบ่งประเภทของอิมัลชันโดยใช้ขนาดอนุภาคและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นเกณฑ์ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ อิมัลชัน นาโนอิมัลชัน และไมโครอิมัลชัน แสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ นาโนอิมัลชันและไมโครอิมัลชันอาจจะเป็นนาโนอิมัลชันและไมโครอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O) หรือน้ำมันในน้ำ (O/W) ก็ได้

ตารางที่ 1 การแบ่งอิมัลชันโดยอาศัยขนาดอนุภาคและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นเกณฑ์

ประเภท	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	Thermodynamic stability	ลักษณะปรากฏ
อิมัลชัน	>200-500	Metastable	ขุ่นขาว
นาโนอิมัลชัน	< 200-500	Metastable	ใส/ขุ่นคล้ายนม
ไมโครอิมัลชัน	< 100	Stable	ใส

ที่มา: ดัดแปลงจาก Komaiko and McClements (2016)

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ทั้งอิมัลชันและนาโนอิมัลชันต่างก็มีคุณสมบัติ metastable ซึ่งหมายถึง อิมัลชันทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่จะสูญเสียความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาได้ โดยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การเกาะกลุ่มของอนุภาค การรวมกลุ่มของอนุภาค การหลอมรวมของหยดน้ำมัน หรือการเกิด Ostwald ripening เป็นต้น เมื่อการเกาะกลุ่ม การรวมตัว หรือการหลอมรวมของอนุภาคกระจายตัว เช่น ไขมันในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ เกิดขึ้นมากและมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดการลอยตัวของไขมันสู่ผิวด้านบนและเกิดการแยกชั้นของน้ำมันในที่สุด (McClements, 2015)

ทั้งนาโนอิมัลชันและไมโครอิมัลชันต่างก็มีอนุภาคขนาดเล็กจึงทำให้มีความเสถียรสูง และยังมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะปรากฏที่ใสหรือขุ่นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีในการนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารหรือเครื่องดื่มต่าง ๆ เนื่องจากจะไม่ไปรบกวนลักษณะปรากฏเดิมของอาหารหรือเครื่องดื่มนั้น ๆ อย่างไรก็ตามด้วยขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันของนาโนอิมัลชันและไมโครอิมัลชัน จึงเป็นเหตุให้เกิดความสับสนระหว่างนาโนอิมัลชันและไมโครอิมัลชันอยู่เสมอ สิ่งสำคัญที่ใช้ระบุความแตกต่างของอิมัลชันทั้งสองชนิด คือ คุณสมบัติ

ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังที่กล่าวมาแล้ว กล่าวคือ ไมโครอิมัลชันมีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในขณะที่นาโนอิมัลชันมีคุณสมบัติแบบ metastable ทั้งนี้ในทางปฏิบัติจึงสามารถแบ่งอิมัลชันทั้งสองประเภทนี้ได้โดยพิจารณาจากความเสถียรในระยะยาว ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และรูปร่างของแต่ละอนุภาค โดยหากเป็นไมโครอิมัลชันจะมีลักษณะของกราฟกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ อนุภาคอาจจะมีรูปร่างทรงกลมหรือไม่กลมก็ได้ และมีความเสถียรระยะยาว ในขณะที่นาโนอิมัลชันอาจจะมีการกระจายตัวที่แคบหรือกว้างก็ได้ รูปร่างทรงกลมแต่มีแนวโน้มจะสูญเสียความเสถียรในระยะยาวได้ ทั้งนี้ นาโนอิมัลชันมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากกว่าไมโครอิมัลชัน เนื่องจากการเตรียมนาโนอิมัลชันใช้ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์น้อยกว่าการเตรียมไมโครอิมัลชัน ปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้นาโนอิมัลชันทั้งในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง อาหาร และเคมี (Solans and Solè, 2012) ในระบบกักเก็บ อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจำนวนมากนี้ จะช่วยยืดระยะเวลาความคงตัว ทั้งยังปรับปรุงและเพิ่ม bioavailability ของสารสำคัญที่ถูกกักเก็บอีกด้วย (Silva *et al.*, 2012)

### นาโนอิมัลชัน (nano-emulsion)

นาโนอิมัลชัน คือ อิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 20 ถึง 200-500 นาโนเมตร เป็นระบบที่ไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamically unstable system) มีลักษณะปรากฏที่โปร่งแสงหรือโปร่งใสอันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้ไม่เกิดการกระเจิงของแสง ทั้งนี้ลักษณะปรากฏของนาโนอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค โดยหากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตรจะมีลักษณะขุ่นคล้ายนม (milky-like) และอนุภาคที่มีขนาดเล็กนี้ยังส่งผลให้นาโนอิมัลชันมีความเสถียรทาง kinetic (kinetic stability) เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบ Brownian movement ของอนุภาคขนาดเล็ก ๆ นี้มีอิทธิพลมากกว่าแรงโน้มถ่วง (Gohtani and Prasert, 2014; Solans *et al.*, 2005; Wakisaka *et al.*, 2014)

### การผลิตนาโนอิมัลชัน (nano-emulsification)

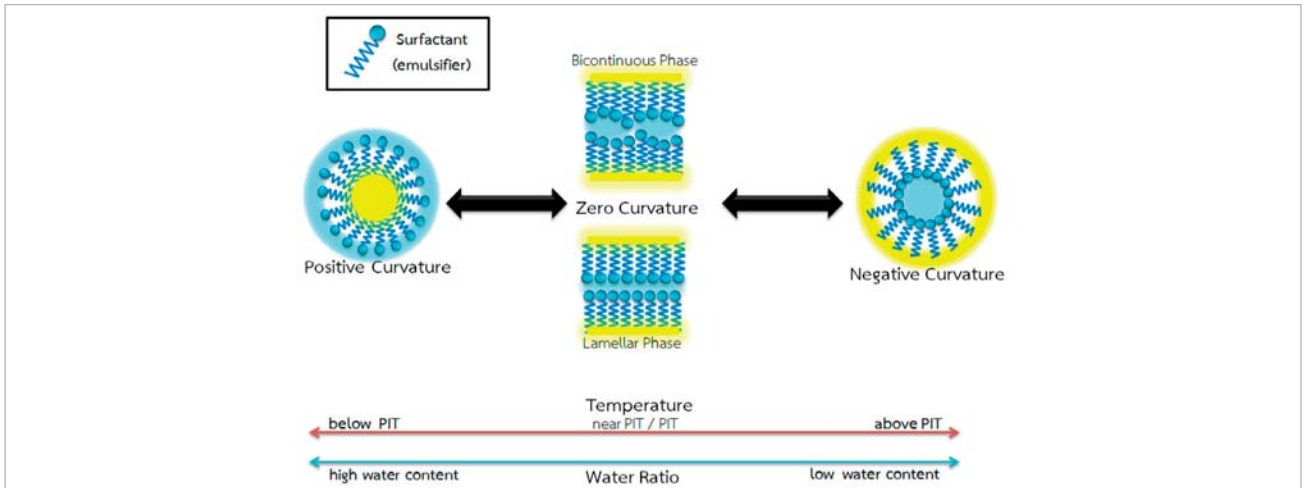
ในการผลิตนาโนอิมัลชันซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ นี้ ต้องการพลังงานเพื่อให้เกิดการแตกตัวหรือการสร้างอนุภาคขนาดเล็กขึ้นมาได้ในระบบของอิมัลชัน แหล่งพลังงานนี้อาจจะมาจากพลังงานกลจากเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบพลังงานสูง (high-energy method) เช่น การใช้ไฮโมจิโนซ์เซอร์แบบความดันสูง การใช้เครื่องอัลตราโซนิก เครื่องปั่นความเร็วสูง เป็นต้น หรือใช้จากพลังงานเคมีของสารหรือส่วนผสมประกอบในระบบที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างของอิมัลซิไฟเออร์ระหว่างกระบวนการผลิต เรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า กระบวนการผลิตแบบพลังงานต่ำ (low-energy method) (Usón *et al.*, 2004; Sharma *et al.*, 2010)

ทั้งนี้ขนาดอนุภาคของนาโนอิมัลชันที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบพลังงานสูงจะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่ได้จากเครื่องมือที่ใช้ ในขณะที่ขนาดอนุภาคของนาโนอิมัลชันที่ผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบพลังงานต่ำจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบระหว่างกระบวนการผลิตหรือการเปลี่ยนแปลงวิถุภาคของอิมัลซิไฟเออร์เป็นสำคัญ (García-Celma *et al.*, 2016)

### การผลิตนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำ (low-energy nano-emulsification method)

วิธีการผลิตนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ

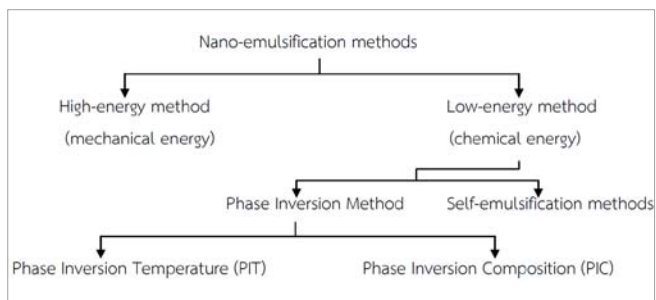
- 1) การผลิตแบบ spontaneous emulsification method ซึ่งจะอาศัยหลักการแพร่ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงวิถุภาคระหว่างกระบวนการผลิต
- 2) การผลิตแบบการเปลี่ยนแปลงวิถุภาค (phase inversion method) วิธีการนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงวิถุภาคหรือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิไฟเออร์ระหว่างกระบวนการผลิต โดยเปลี่ยนความโค้งของโครงสร้างของอิมัลซิไฟเออร์จากลบเป็นบวก ทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) หรือในทางกลับกัน หากเปลี่ยนความโค้งของโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิไฟเออร์จากบวกเป็นลบ จะทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความโค้งของโครงสร้างของอิมัลชันไฟเออร์ระหว่างกระบวนการสร้างนาโนอิมัลชันแบบการเปลี่ยนแปลงวิภาค (phase inversion method)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงวิภาคนี้ พลังงานเคมีภายใน จะถูกปลดปล่อยออกมาและถูกนำไปใช้ในการสร้างอนุภาค ขนาดเล็กของนาโนอิมัลชัน การสร้างนาโนอิมัลชันโดยวิธี เปลี่ยนแปลงวิภาคนี้ สามารถแบ่งได้อีก 2 วิธีย่อย คือ วิธีที่ การเปลี่ยนแปลงวิภาคเกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิโดยควบคุมให้อุณหภูมิของสารคั่งที่ เรียกว่า Phase Inversion Temperature (PIT) และวิธีที่การ เปลี่ยนแปลงวิภาคเกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ ประกอบของสารโดยควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า Phase Inversion Composition (PIC)

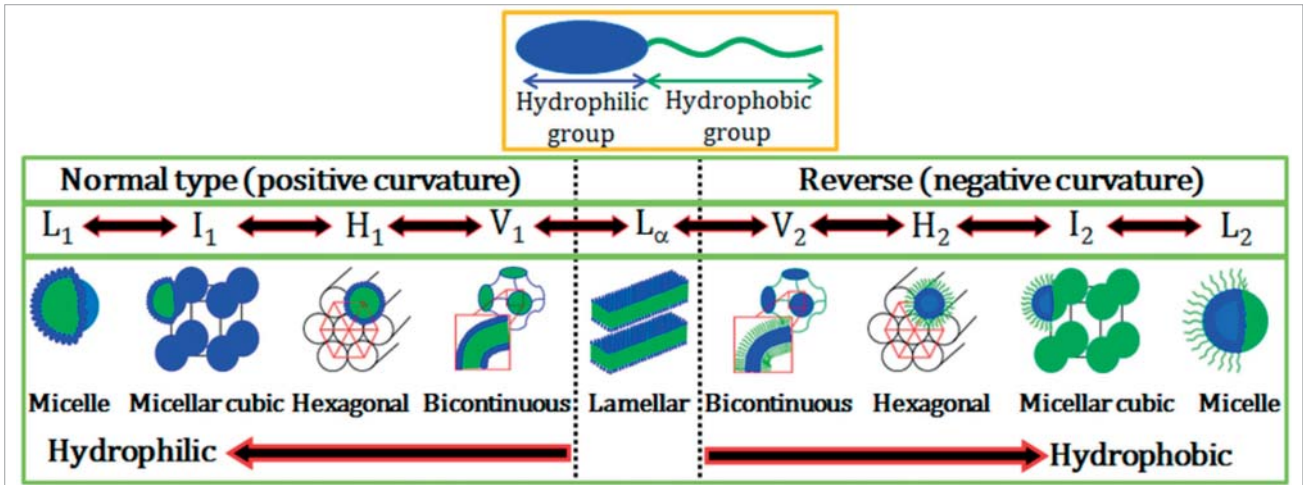
ภาพรวมของการวิธีการเตรียมนาโนอิมัลชัน สามารถสรุป ได้ดังแผนผัง (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แผนผังแสดงการผลิตนาโนอิมัลชันแบบต่าง ๆ

โดยทั่วไปอิมัลชันไฟเออร์ที่ใช้ในการผลิตนาโนอิมัลชันโดย กระบวนการแบบพลังงานต่ำเป็นสารลดแรงตึงผิวกลุ่มที่ไม่มี ประจุ non-ionic surfactant เช่น polyoxyethylene sorbitan fatty acid esters (Tweens®) polyglycerol polyricinoleate (PGPR) sorbitan monostearate (Span®) เป็นต้น

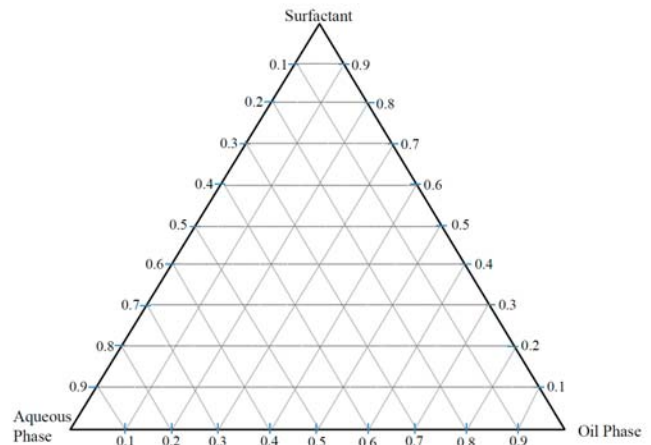
ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึง ผิวหรืออิมัลชันไฟเออร์ต่ำ ๆ โมโนเมอร์ (สารลดแรงตึง ผิวหรืออิมัลชันไฟเออร์โมเลกุลเดี่ยว) จะกระจายตัวอยู่ ในน้ำ และจะพยายามจัดเรียงตัวเองเป็นแถวเดี่ยว บริเวณผิวหน้าของของเหลวหรือน้ำ หรือบริเวณผิว ระหว่างน้ำและน้ำมัน ทำให้แรงตึงผิวของของเหลวมี ค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณหรือความเข้มข้นของสารลด แรงตึงผิวหรืออิมัลชันไฟเออร์จนสูงกว่าความเข้มข้น วิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration: CMC) จะส่งผลให้พื้นที่สำหรับการจัดเรียงตัว ของสารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลชันไฟเออร์บริเวณผิวหน้า หรือรอยต่อของน้ำและน้ำมันจะเหลือน้อยลง โมโนเมอร์ อยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น แรงส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydro- phobic effect) จะเป็นแรงผลักดันที่สำคัญทำให้สาร ลดแรงตึงผิวหรืออิมัลชันไฟเออร์พยายามจัดเรียงตัวเอง ใหม่โดยการหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากันเพื่อให้เกิด ความเสถียรหรือให้ระบบมีพลังงานต่ำที่สุด เกิดเป็น การจัดเรียงตัวหรือการเกาะกลุ่มอย่างมีแบบแผน รูปแบบต่าง ๆ เช่น ไมเซลล์ทรงกลม ชั้นบางผิวโค้ง (vesicles) ชั้นบางผิวเรียบ (lamella) เฮกซะโกนอล คิวบิก หรือรีเวิร์สไมเซลล์ ดังตัวอย่าง รูปที่ 4 ซึ่งการ จัดเรียงตัวแบบต่าง ๆ นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อ ความเข้มข้นของอิมัลชันไฟเออร์ สัดส่วนของ องค์ประกอบ pH ไอออนหรืออุณหภูมิของระบบ เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวแบบต่าง ๆ  
ที่มา: Hill *et al.* (2014)

ผลจากการศึกษาก่อนหน้านี้นี้พบว่า เส้นทางการผลิตที่แตกต่างกันส่งผลให้อิมัลชันที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบเดียวกันมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละเส้นทางการผลิตเกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบหลักที่ต่างกันส่งผลให้ระหว่างการผลิตอิมัลชันเกิดวิฤภาคหรือรูปแบบการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ที่ต่างกัน ดังนั้นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อขนาดอนุภาคและการกระจายของอนุภาคก็คือ โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตนั่นเอง (Gutiérrez *et al.*, 2008; Prasert and Gohtani, 2016a, b)

ด้วยเหตุนี้ ในการศึกษาวิจัยการเตรียมนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำ จึงต้องมีการศึกษารูปแบบการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต โดยเครื่องมือสำคัญที่นำมาใช้ในการศึกษาทดลองการเตรียม นาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำคือ phase diagram ซึ่งมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ละมุมของสามเหลี่ยมเป็นตัวแทน 100% (w/w) ขององค์ประกอบหลัก 3 ชนิดของระบบอิมัลชัน คือ น้ำหรือของเหลวที่ละลายน้ำได้ ส่วนของน้ำมัน และส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ ในขณะที่แต่ละจุดภายในสามเหลี่ยมจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบต่างกัน แต่ทุกจุดผลรวมขององค์ประกอบเป็น 100% เสมอ (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 Phase diagram เมื่อ 3 องค์ประกอบหลักคือ น้ำหรือส่วนที่ละลายน้ำได้ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวหรือ อิมัลซิไฟเออร์

แนวทางในการศึกษาการผลิตนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

### 1. การบ่งชี้ลักษณะการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อสร้าง phase diagram

การศึกษาเพื่อบ่งชี้ลักษณะการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ในระบบของอิมัลชันเมื่อมีสัดส่วนของน้ำหรือสารละลาย/น้ำมัน/อิมัลซิไฟเออร์ ต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิคงที่นี้ ส่วนผสมหลักทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ น้ำหรือสารละลาย น้ำมัน และอิมัลซิไฟเออร์ ณ จุดต่าง ๆ ใน phase diagram จะถูกเตรียมขึ้นมาโดยการชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนแล้วผสมให้เข้ากันในขวดแก้วขนาดเล็กและปิดฝาให้สนิท เก็บตัวอย่างเหล่านี้

ไว้ที่ระดับอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาอย่างน้อย 2 สัปดาห์ จากนั้นนำไปประเมินเพื่อบ่งชี้ลักษณะการจัดเรียงตัวของอิมัลชันไฟเออร์โดยใช้วิธีการตรวจสอบและเครื่องมืออุปกรณ์หลายชนิดร่วมกัน เช่น การประเมินลักษณะปรากฏ เครื่อง Small Angle X-ray Scattering (SAXS) เครื่องวัดความหนืด เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ การย้อมสี และการประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงโพลาไรซ์ เป็นต้น เมื่อประมวลผลเพื่อระบุลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของอิมัลชันไฟเออร์ของทุก ๆ ตัวอย่างที่มีสัดส่วนของน้ำหรือสารละลาย/น้ำมัน/อิมัลชันไฟเออร์ต่าง ๆ ได้แล้ว จะทำให้สามารถสร้าง phase diagram ของระบบนั้น ๆ ณ อุณหภูมิคงที่ขึ้นมาได้

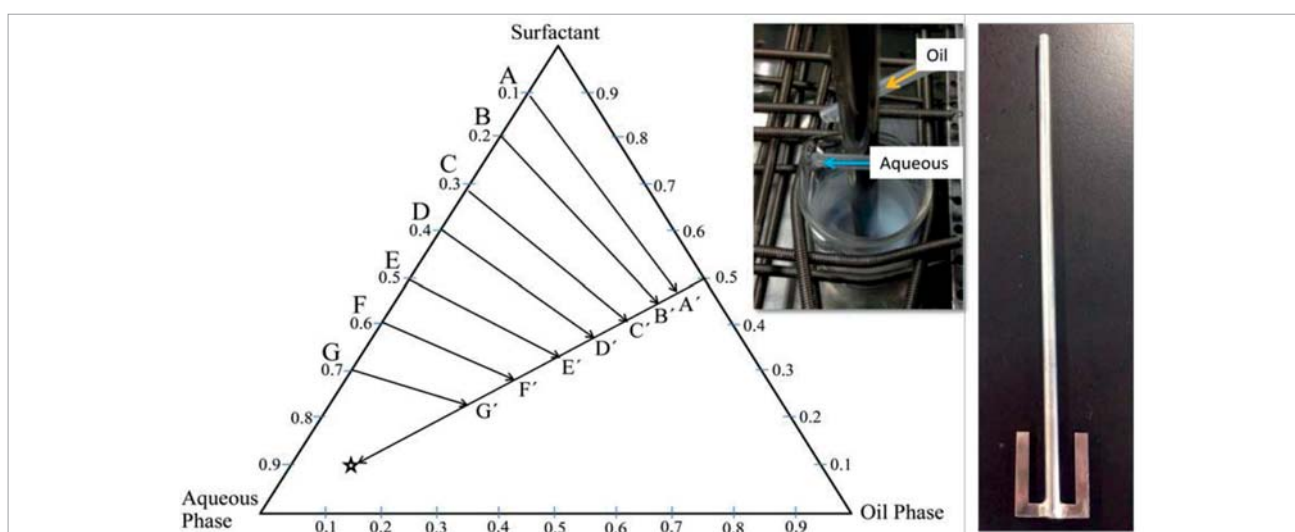
## 2. การสร้างอิมัลชันด้วยเส้นทางการเตรียมที่ต่างกัน และการตรวจวัดขนาดอนุภาคของอิมัลชันที่สร้างขึ้น

ตัวอย่างงานวิจัยเพื่อศึกษาการสร้างอิมัลชัน เช่น Prasert and Gohtani (2016a, b) ได้ทดลองผลิตอิมัลชันโดยใช้ส่วนผสมที่สามารถรับประทานได้ทั้งหมด เส้นทางการเตรียมแสดงดังลูกศรที่ปรากฏใน phase diagram (รูปที่ 6) วิธีการโดยสังเขป เริ่มจากผสมน้ำหรือสารละลายและอิมัลชันไฟเออร์ตามอัตราส่วน (จุด A-G) จากนั้นเติมน้ำมันพืชแบบหยด จนมีอัตราส่วนของน้ำหรือสารละลาย:อิมัลชันไฟเออร์:น้ำมันพืชเท่ากับอัตราส่วนของ จุด A'-G' ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำหรือสารละลายจนอัตราส่วนสุดท้ายของอิมัลชันมีค่าเท่ากับ 0.8:0.1:0.1 (รูปดาวใน phase diagram) ตลอดกระบวนการผลิตมีการกวนสม่ำเสมอโดยใช้ความเร็วรอบคงที่ในช่วง 250-

500 rpm จากนั้นนำอิมัลชันที่สร้างโดยเส้นทาง A – G ไปวัดขนาดอนุภาค ผลการศึกษาพบว่า สามารถเตรียมอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 นาโนเมตรได้ในระบบของสารละลายน้ำตาล/Tween80 หรือ Tween40/น้ำมันพืช เมื่อเตรียมที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) หรือเมื่อเตรียมในระบบของน้ำ/Tween80/น้ำมันพืช ณ อุณหภูมิ 40 °C

ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อประมวลผลและวิเคราะห์ผลให้นำผลการศึกษาทั้ง 2 ส่วน ได้แก่ รูปแบบการเรียงตัวของอิมัลชันไฟเออร์ เส้นทางการผลิต และขนาดอนุภาคของอิมัลชันที่เตรียมได้ มาเปรียบเทียบกัน จะทำให้ทราบถึงผลของโครงสร้างแต่ละชนิดต่อขนาดอนุภาคของอิมัลชันที่สร้างได้

จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างแบบ bicontinuous phase หรือ sponge phase ( $L_3$ ) และ lamellar phase ( $L_a$ ) ส่งผลให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กและมีกราฟการกระจายของอนุภาคตัวที่แคบ สามารถสร้างนาโนอิมัลชันได้ ในขณะที่โครงสร้างแบบ micellar cubic phase ( $I_1$ ) และ hexagonal liquid crystalline phase ( $H_1$ ) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความหนืดสูง ส่งผลให้เกิดการสร้างอนุภาคขนาดใหญ่ มีหลายขนาด และมีกราฟการกระจายตัวที่กว้าง ทำให้ไม่สามารถสร้างนาโนอิมัลชันตามที่ต้องการได้เพียงอิมัลชัน นอกจากนี้ โครงสร้างแบบ  $I_1$  และ  $H_1$  ยังส่งผลให้ไม่สามารถสร้างอิมัลชันได้เลยในบางระบบ (Bilbao-Sáinz *et al.*,



รูปที่ 6 เส้นทางการผลิตนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

2010; Solans and Solè, 2012; García-Celma *et al.*, 2016; Miyanoshita *et al.*, 2011; Ikeda *et al.*, 2013; Wakisaka *et al.*, 2014; Prasert and Gohtani, 2016a, b)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชนิดของโครงสร้างการจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ นั้นมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะของนาโนอิมัลชัน ไม่ว่าจะเป็นขนาดอนุภาค ลักษณะปรากฏ หรือความเสถียรของนาโนอิมัลชัน ข้อมูลจาก phase diagram จึงเป็นสิ่งสำคัญในการช่วยคัดเลือกเส้นทางการผลิตที่เหมาะสม คือ ทำให้สามารถเลือกเส้นทางการผลิตที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่เอื้อต่อการผลิต และยังสามารถหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่ไม่เอื้อต่อการผลิตได้ด้วย เพื่อให้ได้นาโนอิมัลชันที่มีอนุภาคขนาดเล็กและมีความเสถียรระหว่างการเก็บรักษา

นอกจากขนาดอนุภาคของไขมันในนาโนอิมัลชันที่เตรียมโดยวิธีการพลังงานต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดหรือรูปแบบการจัดเรียงตัวของอิมัลซิไฟเออร์ระหว่างกระบวนการผลิตเป็นสำคัญแล้ว ปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดของน้ำมัน ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ รวมถึงส่วนประกอบอื่นๆ ในระบบของอิมัลชันยังมีบทบาทต่อขนาดอนุภาคและความเสถียรของอิมัลชันอีกด้วย Komaike and McClements (2016) ได้รวบรวมข้อมูลงานวิจัยการผลิตนาโนอิมัลชันที่รับประทานได้โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงวิภาค สามารถสรุปได้คือ ชนิดของน้ำมันที่ใช้ประกอบด้วย Acetem น้ำมันออริกาน น้ำมันอบเชย น้ำมันดอกแคโนลา น้ำมันเรปซิด น้ำมันทานตะวัน น้ำมันข้าวโพด น้ำมันมะกอก น้ำมันเลมอน น้ำมันถั่ว และน้ำมันไตรกลีเซอไรด์สายกลาง (MCT) เป็นต้น ในขณะที่งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ Tween® เป็นอิมัลซิไฟเออร์ รวมถึง propylene glycol, sucrose monopalmitate และ Q-natural® จากการศึกษาของ Ostertag *et al.* (2012) พบว่าชนิดของน้ำมัน ชนิดความเข้มข้น และตำแหน่งของสารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิไฟเออร์ มีผลต่อขนาดอนุภาคของอิมัลชัน กล่าวคือ ขนาดอนุภาคของอิมัลชันที่เตรียมโดย MCT < น้ำมันหอมระเหย (น้ำมันส้ม และ เมล่อน) < ไตรกลีเซอไรด์สายยาว (น้ำมันมะกอก น้ำมัน

เมล็ดองุ่น น้ำมันงา น้ำมันถั่ว และน้ำมันดอกแคโนลา) ในขณะที่ชนิดของสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อขนาดอนุภาค คือ Tween80 < Tween20 < Tween85 และอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวต่อน้ำมันที่เพิ่มส่งผลให้สามารถผลิตนาโนอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 160 นาโนเมตร นอกจากนี้การผสมสารลดแรงตึงผิวกับน้ำมันก่อน จะให้นาโนอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าระบบที่ผสมสารตึงผิวกับน้ำ ในขณะที่ Li *et al.* (2013) พบว่า การเติมน้ำมันมะกอกซึ่งเป็นน้ำมันที่มีไตรกลีเซอไรด์สายยาวลงใน d-limonene ทำให้เพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันและ/หรือนาโนอิมัลชันได้ จากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชนิดของน้ำมันเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อขนาดอนุภาคและความคงตัวของนาโนอิมัลชัน

จากหลักการและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสร้างนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการแบบพลังงานต่ำที่ได้นำเสนอในข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการดังกล่าวมีประโยชน์และข้อดีหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เป็นวิธีการที่ทำให้สามารถผลิตนาโนอิมัลชันจากส่วนประกอบที่เป็นอาหารได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือเฉพาะที่มีความซับซ้อนและราคาแพง ดังตัวอย่างอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 6 อุปกรณ์ที่จำเป็นมีเพียงเครื่องปั่น (stirrer) พร้อมใบพัดและ peristaltic pump สำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันและของเหลวเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การสร้างนาโนอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำนี้ยังมีข้อจำกัดและรายละเอียดต่าง ๆ มากมาย ทั้งส่วนมากยังเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมอาหาร จึงต้องมีการศึกษาทดลองเพิ่มเติมต่อไป

**คำสำคัญ :** อิมัลชัน นาโนอิมัลชัน การผลิตอิมัลชันโดยกระบวนการพลังงานต่ำ รับประทานได้

**Keywords :** emulsion, nano-emulsion, low-energy emulsification method, edible

## เอกสารอ้างอิง

- Bilbao-Sáinz C, Avena-Bustillos RJ, Wood DF, Williams TG and McHugh TH. 2010. Nanoemulsions prepared by a low-energy emulsification method applied to edible films. *J Agri Food Chem.* 58(22): 11932–11938.
- García-Celma MJ, Homs M, Morales D and Solans C. 2016. Nano-emulsions for pharmaceutical applications. In: M. Sánchez-Domínguez and C. Rodríguez-Abreu eds., *Nanocolloids: A meeting point for scientists and technologists.* p. 365-388.
- Gohtani S and Prasert W. 2014. Nano-emulsions; Emulsification using low energy methods. *Japan J Food Eng.* 15(3):119–130.
- Gutiérrez JM, González C, Maestro A, Solè I, Pey CM and Nolla J. 2008. Nano-emulsions: New applications and optimization of their preparation. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 13: 245–251.
- Hill PJ, Shrestha LK, Ishihara S, Ji Q and Ariga K. 2014. Self-assembly: From amphiphiles to chromophores and beyond. *Molecules* 19(6): 8589-8609.
- Ikeda S, Miyanoshita M and Gohtani S. 2013. Effects of sugars on the formation of nanometer-sized droplets of vegetable oil by an isothermal low-energy emulsification method. *J Food Sci.* 78(7): E1017–E1021.
- Komaiko JS and McClements DJ. 2016. Formation of Food-grade nanoemulsions using low-energy preparation methods: A review of available methods. *Comprehensive Rev Food Sci Food Safety.* 15(2): 331-352.
- Li Y, Zhang Z, Yuan Q, Liang H and Vriesekoop F. 2013. Process optimization and stability of D-limonene nanoemulsions prepared by catastrophic phase inversion method. *J Food Eng.* 119: 419-424.
- McClements DJ. 2015. *Food emulsions: principles, practices, and techniques.* 3rd ed. Washington, DC: CRC Press INC.
- Miyanoshita M, Hashida C, Ikeda S and Gohtani S. 2011. Development of low-energy methods for preparing food nano-emulsions. *J Oleo Sci.* 60 (7): 355–362.
- Ostertag F, Weiss J and McClements DJ. 2012. Low-energy formation of edible nanoemulsions: factors influencing droplet size produced by emulsion phase inversion. *J Colloid Interface Sci.* 388(1): 95-102.
- Prasert W and Gohtani S. 2016(a). Effect of sucrose on phase behavior in water/polyoxyethylene sorbitan fatty acid ester (Tween®)/vegetable oil systems and food nano-emulsification using low-energy methods. *J Food Eng.* 168: 119-128.
- Prasert W and Gohtani S. 2016(b). Effect of temperature on low-energy nano-emulsification and phase behavior in water/polyoxyethylene sorbitan fatty acid ester (Tween®)/vegetable oil systems. *J Food Eng.* 180: 101-109.



- Sharma N, Bansal M, Visht S, Sharma PK and Kulkarni GT. 2010. Nanoemulsion: A new concept of delivery system. *Chronicles of Young Scientists* 1(2): 2–6.
- Silva HD, Cerqueira MÂ and Vicente AA. 2012. Nanoemulsions for food applications: Development and characterization. *Food Bioprocess Technol Inter J.* 5: 854–867.
- Solans C, Izquierdo P, Nolla J, Azemar N and Garcia-Celma M.J. 2005. Nano-emulsions. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 10: 102-110.
- Solans C and Solè I. 2012. Nano-emulsions: Formation by low-energy methods. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 17: 246–254.
- Usón N, Garcia MJ and Solans C. 2004. Formation of water-in-oil (W/O) nano-emulsions in a water/mixed non-ionic surfactant/oil systems prepared by a low-energy emulsification method. *Colloids Surf A: Physicochemical Eng Aspects.* 250(1-3): 415–421.
- Wakisaka S, Nakanishi M and Gohtani S. 2014. Phase behavior and formation of O/W nano-emulsion in vegetable oil/mixture of polyglycerol polyricinoleate and polyglycerin fatty acid ester/water systems. *J Oleo Sci.* 63(3): 229–237.

