



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส
ของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน

Effect of Chitosan on Stability, Microstructure and Rheological Property of Tuna Oil
Emulsion Stabilized by Lecithin

นามผู้วิจัย นางสาวสุภัทชนม์ คล่องดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อุทัย กลิ่นเกษร, ประ.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนະบุลย์ สัจจานันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแสนของ
อิมัลชันน้ำมันปลาพูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน

Effect of Chitosan on Stability, Microstructure and Rheological Property
of Tuna Oil Emulsion Stabilized by Lecithin

โดย

นางสาวสุกัญชนม์ คล่องดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุภัทชนม์ คล่องศรี 2553: ผลของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้าน
วิทยากระแสน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทิน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อุทัย กลิ่นเกษร, ประ.ด. 131 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลของไคโตซานต่อคุณสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่
ให้คงตัวด้วยเลซิทิน โดยเตรียมอิมัลชันปฐมภูมิที่มีน้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 15 และเลซิทินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
จากนั้นนำอิมัลชันที่ได้มาเติมสารละลายไคโตซานขนาดโมเลกุลต่างๆ (120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโล
ดาลตัน) เพื่อเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิที่มีน้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 5 เลซิทินร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดย
น้ำหนัก ศึกษาผลของความเข้มข้น และขนาดโมเลกุลไคโตซานต่อคุณสมบัติของอิมัลชัน โดยการวัดค่าประจุที่
พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน ขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแสน้ำมัน
อิมัลชัน ผลการทดลองพบว่าค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิเปลี่ยนจากประจุลบเป็นบวก
เมื่อมีการเติมไคโตซาน เนื่องจากโมเลกุลไคโตซานถูกดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยประจุลบ
ของเลซิทินด้วยแรงทางประจุ ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด
คอนโฟคอลเลเซอร์ การเติมไคโตซานร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้อิมัลชันทุติยภูมิที่ไม่คงตัวต่อการแยกชั้น
เมื่อความเข้มข้นของไคโตซานมีค่าเพิ่มขึ้น อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน
โดยมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลประมาณ 1 ในขณะที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก อิมัลชันมี
พฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning ที่ทุกขนาดโมเลกุลของไคโตซาน การศึกษาผลของการให้ความร้อน (30-
90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที) การแช่แข็ง (-18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง) การเติมโซเดียมคลอไรด์ (ความ
เข้มข้นร้อยละ 0-1000 มิลลิโมลาร์) และการปรับพีเอช (pH 3-8) ต่อความคงตัว และคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชัน
ทุติยภูมิ พบว่าการปรับค่าพีเอช และการเติมโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน โดยค่า
ประจุบนพื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอช และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ อิมัลชันทุติย
ภูมิมีความคงตัวต่อการแยกชั้นและการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันในระหว่างการให้ความร้อน แต่ไม่มีความ
คงตัวต่อการแยกชั้นหลังจากผ่านการแช่แข็ง ในสภาวะที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูง และค่าพีเอชสูงกว่า
7 และมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ shear thinning อิมัลชันทุติยภูมิของน้ำมันปลาทูน่า สามารถนำไปประยุกต์
ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยเลือกใช้ให้เหมาะสมกับ
ผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เพื่อให้ได้คุณลักษณะตามต้องการ

Supakchon Klongdee 2010: Effect of Chitosan on Stability, Microstructure and Rheological Property of Tuna Oil Emulsion Stabilized by Lecithin. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Ms.Utai Klinkesorn, Ph.D. 131 pages.

The purpose of these experiments was to determine the influence of chitosan on stability, physical and rheological properties of lecithin-stabilized tuna oil emulsion. A lecithin-stabilized emulsion (primary emulsion) was prepared by homogenizing 15 wt% tuna oil and 3 wt% lecithin in acetate buffer (pH 3). Chitosan solutions with different molecular weights (low molecular weight (LMW); 120 ± 98 kDa, medium molecular weight (MMW); 250 ± 60 kDa and high molecular weight (HMW); 342.5 ± 45 kDa) were added to produce secondary emulsions with final composition of 5 wt% tuna oil, 1 wt% lecithin and 0-0.25 wt% chitosan. The effects of chitosan concentrations and molecular weights on the properties of emulsion were investigated by evaluating the electrical charge (ζ -potential), particle size, microstructure and rheological property of emulsion. The ζ -potential of lecithin stabilized droplets in the emulsion changed from negative to positive when chitosan was added to the emulsion. This result suggests that cationic chitosan adsorbed on the surfaces of the anionic lecithin-stabilized lipid droplets, which is consistent with microstructure from confocal laser scanning microscopy. All emulsions were stable to droplet aggregation, with the exception of 0.05 wt% chitosan. The emulsion viscosity increased when chitosan concentration was increased. All emulsions showed Newtonian flow, with the flow behavior index was approximately 1. However, the shear thinning behavior was observed for emulsion containing 0.05 wt% chitosan. The stability and properties of secondary emulsion to thermal processing (30-90 °C for 30 min), freeze-thaw cycling (-18 °C for 22 h/25 °C for 2 h), high NaCl concentration (0-1000 mM) and pH (3-8) were determined. The ζ -potential of the droplets decreased when the pH and salt concentration was increased. The secondary emulsions had good stability to droplet aggregation during thermal processing but they were unstable to freeze-thaw cycling, high NaCl concentration and high pH (pH 7 and 8) and these unstable emulsions showed shear thinning behavior. Utilization of tuna oil multilayer emulsion which proper condition could lead to the creation of food products with novel characteristics or improved nutritional quality.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อุทัย กลิ่นเกษร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน ค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอบพระคุณ รศ.ดร.มานพ สุพรรณธริกา ผู้ทรงคุณวุฒิ และ ผศ.ดร.ชนะบุญ สัจจาอนันตกุล ประธานในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย ที่ให้คำปรึกษาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ พร้อมข้อเสนอแนะในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรม สั่งสอนให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์มากมาย อีกทั้งบุคลากรของภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารที่คอยอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานทั่วไป รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องสมุดที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอบคุณบริษัท เมทโรหัม สยาม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์

ขอบคุณพี่นก พี่กอล์ฟ พี่ดาว พี่จ้อยส์ และพี่ๆ ห้อง 2413 และห้อง 2314 ที่ให้คำแนะนำที่ดีในการค้นคว้าวิจัย ขอบคุณเพื่อนๆ ปริญญาโททุกคน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้แอร์ พี่ศศิ พี่แนน ยิ้ม แอน นก บอม กวาง กุ้ง ดุ้ย พี่จูน น้องเตย น้องนุ้ย และน้องหญิง ที่คอยช่วยเหลือ อยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจให้ และเพื่อนรินทร์ที่ถึงแม้จะอยู่ไกลแต่ส่งกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ ห่วงใย สนับสนุน และเข้าใจในตัวลูกเสมอมา ขอบใจน้องโอ (โต้) น้องหวาน และสมาชิกในครอบครัวที่ทำให้กำลังใจ ขอบคุณสำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุภัทชนม์ กล่องดี

พฤษภาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ในอิมัลชันปฏิกิริยาและทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาด ต่างๆ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	108
ภาคผนวก ข ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน	119
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าประจุที่พื้นผิว และสมบัติด้านวิทยากระแสน้ำของ สารละลายไคโตซาน	125
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าดัชนีพฤติกรรมกรไหล สัมประสิทธิ์ความขุ่นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสีใจตามสมการของ Power Law	127
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตัวอย่างอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้โดยทั่วไปในอาหารอิมัลชัน	15
2 ตัวอย่างอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้น	25
3 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานความเข้มข้นและโมเลกุลขนาดต่างๆ	58
4 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดต่างๆ ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 30-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	66
5 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดต่างๆ (120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโล ดาลตัน) ที่ผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง	74
6 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดต่างๆ (120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโล ดาลตัน) ที่ระดับความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์	82
7 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืดและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันน้ำมันปฐมภูมิ(ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดต่างๆ (120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโลดาลตัน) ที่ค่าพีเอช 3-8	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และ ทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดย น้ำหนัก	109
ก2 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก	110
ก3 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และ ทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการให้ความร้อน 25-90 องศาเซลเซียส	111
ก4 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการให้ความ ร้อน 25-90 องศาเซลเซียส หลังผ่านการให้ความร้อน 25-90 องศาเซลเซียส	112
ก5 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และ ทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ก่อนและหลังผ่านการแช่แข็ง (ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)	113
ก6 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ก่อนและหลังผ่านการแช่แข็ง (ที่อุณหภูมิ -18 องศา เซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก7 ค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และ หุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิ โมลาร์	115
ก8 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และหุติยภูมิที่ ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์	116
ก9 ค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และ หุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่พีเอช 3-8	117
ก10 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และหุติยภูมิที่ ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่พีเอช 3-8	118
ค1 ค่าประจุที่พื้นผิวและสมบัติด้านวิทยากระแสนของสารละลายโคโคซานโมเลกุล ขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ละลาย ในอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่พีเอช 3 ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก	126
ง1 ค่าความเค้นเฉือน อัตราการเฉือน ลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตรา การเฉือนของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก	129

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ปริมาณกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิกและกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (ร้อยละต่อกรดไขมันทั้งหมด) ของผลพลอยได้ของน้ำมันปลาในสายพันธุ์ออสเตรเลียเปรียบเทียบกับน้ำมันปลาที่นำเข้า	4
2 โครงสร้างทางเคมีของกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (eicosapentaenoic acid: EPA)	5
3 โครงสร้างทางเคมีของกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (docosahexaenoic acid: DHA)	6
4 โครงสร้างของ <i>sn</i> -glycero-3-phosphate	17
5 ฟอสโฟลิพิดชนิดต่างๆ ที่เกิดจาก glycerol-phospholipid จับกับส่วน Z หมู่มากๆ	17
6 โครงสร้างทางเคมีของไลโดซาน	19
7 ภาพจำลองอิมัลชันเชิงเดี่ยวชนิดน้ำมันในน้ำ (ก) และชนิดน้ำในน้ำมัน (ข)	22
8 ภาพจำลองอิมัลชันเชิงซ้อน ชนิด W/O/W (ก) และชนิด O/W/O (ข)	22
9 การนำเทคนิค LBL มาใช้ในการสร้างอิมัลชันน้ำมันในน้ำ (O/W)	24
10 การสูญเสียความคงตัวของอิมัลชัน (อิมัลชันที่คงตัว (ก) flocculation (ข) coalescence (ค) creaming (ง) breaking (จ) และ sedimentation (ฉ))	29
11 ผลของความแรงไอออนต่อความหนาของชั้นผิวสัมผัสและการจัดเรียงตัวของโพลีอิเล็กโทรไลต์	33
12 โครงสร้างของอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน	36
13 ลักษณะพฤติกรรมการไหล	38
14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดและลักษณะโครงสร้างของอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่ม เมื่อเพิ่มอัตราการเจือปนให้กับอิมัลชัน	40
15 ผลของขนาดโมเลกุล และความเข้มข้นไลโดซานต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไลโดซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	50
16 ผลของขนาดโมเลกุล และความเข้มข้นไลโดซานต่อขนาดอนุภาคในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไลโดซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
17	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และอิมัลชัน ทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดกลาง (250 ± 60 kDa) ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก (ข)	53
18	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไค- โตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (ร้อยละ 0.05-0.25 โดยน้ำหนัก	54
19	ลักษณะปรากฏ และการแยกชั้นของอิมัลชันที่เตรียมโดยใช้ไคโตซานโมเลกุลขนาด เล็ก (ก) กลาง (ข) และใหญ่ (ค) ที่ความเข้มข้นไคโตซานต่างๆ หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง	55
20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเลื่อนของอิมัลชันทุติย- ภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานความเข้มข้น ร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก และโมเลกุล ขนาดเล็ก (ก) กลาง (ข) และใหญ่ (ค)	57
21	ผลของการให้ความร้อน (25-90 องศาเซลเซียส) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยด น้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	60
22	ผลของการให้ความร้อน (25-90 องศาเซลเซียส) ต่อขนาดอนุภาคหยดน้ำมันใน อิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุล ขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	60
23	ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 30-90 องศา เซลเซียส นาน 30 นาที และเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
24	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแตกต่างกัน: 25 (ก) 30 (ข) และ 45 องศาเซลเซียส (ค)	62
25	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแตกต่างกัน: 60 (ก) 75 (ข) และ 90 องศาเซลเซียส (ค)	63
26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเหือนของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ผ่านการให้ความร้อน ที่ 25-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	65
27	ผลของการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วย โคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	68
28	ผลของการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง) ต่อขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	69
29	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ทั้งก่อนและหลังการแช่แข็ง	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
30	ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) (เลซิทีนร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) หลังจากผ่านการแช่แข็งและทำละลาย และเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง	72
31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการไหลของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) (เลซิทีนร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ก่อนผ่านการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)	73
32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการไหลของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)	73
33	ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (0-1000 มิลลิโมลาร์) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	76
34	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (0-1000 มิลลิโมลาร์) ต่อขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	76
35	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-200 มิลลิโมลาร์	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอิมัลชัน ปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ 300-1000 มิลลิโมลาร์	78
37 ลักษณะปรากฏและการแยกชั้นของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วย ไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ความเข้มข้นของโซเดียม- คลอไรด์ที่ 0-1000 มิลลิโมลาร์ หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง	79
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเลื่อนของอิมัลชันปฐุม ภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และ ใหญ่ (ง) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์	81
39 ผลของการปรับค่าพีเอช (3-8) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดย่น้ำมันในอิมัลชัน ปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	85
40 ผลของการปรับพีเอช (3-8) ต่อขนาดอนุภาคหยดย่น้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติม ไคโต-ซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)	85
41 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอิมัลชัน ปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ค่าพีเอช 3-5	87
42 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอิมัลชัน ปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ค่าพีเอช 6-8	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
43	ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ค่าพีเอช 3-8 หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเหวี่ยงของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ค่าพีเอช 3-8
ภาพผนวกที่	
ข1	การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน (120 ±98 kDa: ก) กลาง (250±60 kDa: ข) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ค) ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก
ข2	การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาด(120 ±98 kDa: ข) กลาง (250±60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ง) ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส
ข3	การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาดขนาดเล็ก (120 ±98 kDa) กลาง (250±60 kDa) และใหญ่ (342.5±45 kDa) ที่ก่อน (ก) และหลัง (ข) ผ่านการแช่แข็ง
ข4	การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาด(120 ±98 kDa: ข) กลาง (250±60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ง) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์
ข5	การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาด(120 ±98 kDa: ข) กลาง (250±60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ง) ที่พีเอช 3-8

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตราการเฉือน	128
ง2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตราการเฉือนของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก	130

ผลของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส ของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ช่วยให้คงตัวด้วยเลซิธิน

Effect of Chitosan on Stability, Microstructure and Rheological Property of Tuna Oil Emulsion Stabilized by Lecithin

คำนำ

น้ำมันปลาคือแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัวโอเมก้า-3 ที่สำคัญ โดยมีกรดไอโคซา-เพนตะอีโนอิก (eicosapentaenoic acid: EPA) 70 มิลลิกรัม และกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (docosahexaenoic acid: DHA) 250 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำมันปลา (ไชยรัตน์, 2552) เป็นองค์ประกอบสำคัญ กรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญในด้านการทำงานของระบบสมองและระบบประสาท อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและความดันเลือดสูง (สมพงษ์, 2538; Sizer and Whitney 2006; Shahidi, 2008) ดังนั้นจึงได้มีความสนใจนำน้ำมันปลามาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและมูลค่าของผลิตภัณฑ์อาหารนั้น อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันปลามารับใช้โดยตรงนั้นยังมีข้อจำกัดในด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันปลา ซึ่งส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการและการยอมรับของผู้บริโภค (Angelo, 1992) การนำเทคนิคการผลิตอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสหลายชั้น (multilayer emulsion) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหยดนํ้ามันในระบบอิมัลชันได้ (Klinkesorn, 2005b) และยังสามารถรักษาความคงตัวของระบบอิมัลชันเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ (การให้ความร้อน การแช่แข็ง การปรับพีเอช) ระหว่างกระบวนการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา และการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ (McClements, 2005)

เทคนิคการผลิตอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสหลายชั้นเป็นการเพิ่มชั้นผิวสัมผัสที่ห่อหุ้มหยดนํ้ามัน โดยใช้แรงทางประจุเป็นตัวช่วยในการห่อหุ้ม โดยเติมอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) หรือโพลีอิเล็กโตรไลต์ (polyelectrolyte) ที่มีประจุตรงข้ามกับอิมัลซิฟายเออร์ที่ห่อหุ้มหยดนํ้ามันทำให้เกิดแรงดึงดูดทางประจุเพิ่มชั้นผิวสัมผัสที่ห่อหุ้มหยดนํ้ามัน (Guzey and McClements, 2006a) อย่างไรก็ตามการเติมอิมัลซิฟายเออร์หรือโพลีอิเล็กโตรไลต์ย่อมส่งผลต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติด้านวิทยากระแส (rheological property) ของระบบอิมัลชัน ซึ่งมีความสำคัญต่อลักษณะปรากฏ ลักษณะทางประสาทสัมผัส และสมบัติต่างๆ ด้วยเหตุนี้จึงศึกษาผลของขนาดโมเลกุลและ

ความเข้มข้นของไคโตซาน (โพลีอิเล็กโทรไลต์) ที่นำมาผลิตอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติด้านวิทยากระแส (ความหนืดและพฤติกรรมการไหล) ของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำการกวนด้วยเลซิทีน เพื่อให้เกิดความเข้าใจและนำไปประยุกต์ต่อในระดับอุตสาหกรรมได้



วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์รวม

ศึกษาผลของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติด้านวิทยากระแสของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ช่วยให้คงตัวด้วยเลซิทีน

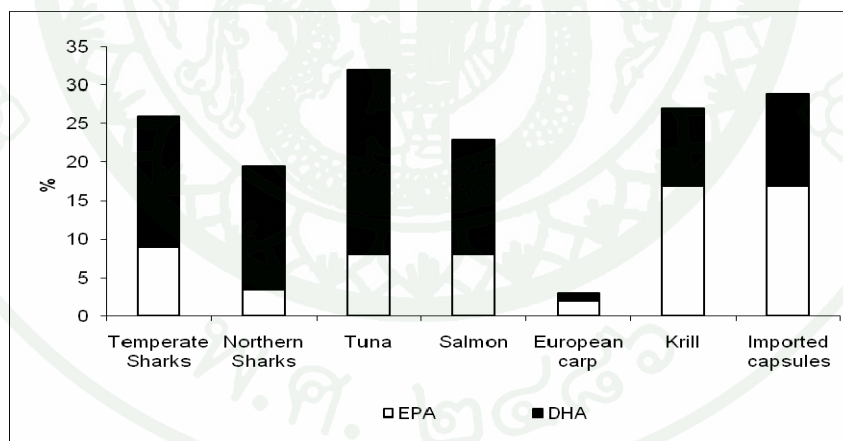
วัตถุประสงค์หลัก

1. ศึกษาผลของขนาดโมเลกุลและความเข้มข้นของไคโตซานต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแสของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ช่วยให้คงตัวด้วยเลซิทีน
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อน การแช่แข็ง การเติมโซเดียมคลอไรด์ และการปรับค่าพีเอชต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแสของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ช่วยให้คงตัวด้วยเลซิทีน และเลซิทีน-ไคโตซาน

การตรวจเอกสาร

1. น้ำมันปลาทูน่า

น้ำมันปลาทูน่าเป็นแหล่งสำคัญของกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่งกลุ่มโอเมก้า 3 ซึ่งได้แก่ กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (eicosapentaenoic acid; EPA; 20:5 n-3) และกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (docosahexaenoic acid; DHA; 22:6 n-3) เป็นส่วนประกอบหลัก น้ำมันปลาทูน่านั้นมีปริมาณกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกเป็นสามเท่าของกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (ภาพที่ 1) โดยกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก มีคุณสมบัติในการลดระดับไตรกลีเซอไรด์ในเลือด พร้อมทั้งป้องกันการอุดตันของหลอดเลือด และยังป้องกันการเกาะตัวของเกล็ดเลือด ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของโรคสมองขาดเลือด และโรคที่เกี่ยวข้องกับกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือด (ไชยรัตน์, 2551) ส่วนกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกนั้น เป็นส่วนประกอบของสมองและจอประสาทตาที่สำคัญมาก นอกจากนั้นกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกยังเป็นส่วนประกอบของเยื่อเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจอีกด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ากรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกมีความจำเป็นในด้านพัฒนาการของสมอง และระบบประสาทของร่างกายทั้งในเด็กและในผู้ใหญ่ (Kinsella, 1987; Sizer and Whitney, 2006; Shahidi, 2008)



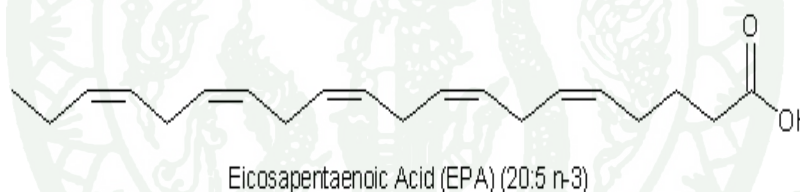
ภาพที่ 1 ปริมาณกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก และกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (ร้อยละต่อกรดไขมันทั้งหมด) ของผลพลอยได้ของน้ำมันปลาในสายพันธุ์ออสเตรเลียเปรียบเทียบกับน้ำมันปลาที่นำเข้า

ที่มา: ดัดแปลงจาก Nichols *et al.* (2004)

1.1 องค์ประกอบสำคัญในน้ำมันปลาทูน่าที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ

1.1.1 กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (Eicosapentaenoic acid: EPA)

กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่งสายยาว มีโครงสร้างทางเคมีคือ กรดคาร์บอกซิลิกที่มีคาร์บอนอะตอม 20 อะตอมและมีพันธะคู่ 5 พันธะ พันธะคู่แรกอยู่ที่ตำแหน่งคาร์บอนที่สามนับจากปลายเมทิลของกรดไขมัน กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิกเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ มีผลต่อการสื่อสารสัญญาณประสาท ในปัจจุบันมีการเติมกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิกลงไปเป็นส่วนประกอบของอาหารเสริม เพื่อช่วยลดระดับไตรกลีเซอไรด์ เพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลิน เพิ่มระดับ HDL (high density lipoprotein) ซึ่งเป็นไขมันชนิดดี ลดการแข็งตัวของเกล็ดเลือด ในทางด้านอาการซึมเศร้า มีการใช้กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิกเป็นส่วนประกอบ มีผลลดความรู้สึกผิด ความนับถือตนเองต่ำ นอนไม่หลับ และซึมเศร้า (Volkman *et al.*, 1989; Meletis and Barker, 2004)



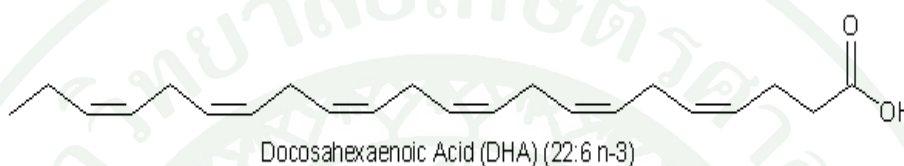
ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (eicosapentaenoic acid: EPA)

ที่มา: คัดแปลงจาก Volkman *et al.* (1989)

1.1.2 กรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (docosahexaenoic acid: DHA)

กรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่งสายยาว มีโครงสร้างทางเคมีคือ กรดคาร์บอกซิลิกที่มีคาร์บอนอะตอม 22 อะตอม และมีพันธะคู่ 6 พันธะ พันธะคู่แรกอยู่ที่ตำแหน่งคาร์บอนที่สามนับจากปลายเมทิลของกรดไขมัน เป็นส่วนประกอบสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์สมองส่วนสีเทา (Meharban *et al.*, 2005) มีความสำคัญต่อการทำงานของสมอง ระบบประสาทช่วยให้เซลล์มีความไวต่อการรับสัญญาณประสาท กรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกมีคุณค่าและความสำคัญต่อคนทุกวัย ในช่วงตั้งครรภ์ทารกจะได้รับกรดโดโคซาเฮกซะอีโน-

อีกผ่านทางรก เพื่อช่วยเพิ่มน้ำหนักตัว และลดความเสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด และเมื่อถึงระยะที่สมองเจริญเติบโตสูงสุด (3 เดือนก่อนและหลังคลอด) ทารกจะมีความต้องการกรดโคโคซาเฮกซะอีโนอิกในปริมาณสูงที่สุด วัยทำงานมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคซึมเศร้า ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่เป็นสาเหตุให้เกิดโรคคือ การที่ปริมาณกรดโคโคซาเฮกซะอีโนอิกในสมองมีปริมาณลดต่ำกว่าปกติ ในวัยสูงอายุกรดโคโคซาเฮกซะอีโนอิกช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) ซึ่งเป็นโรคที่เกิดจากความเสื่อมสลายของเซลล์สมอง (Haag, 2003)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของกรดโคโคซาเฮกซะอีโนอิก (docosahexaenoic acid: DHA)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Volkman *et al.* (1989)

1.2 ปฏิกริยาออกซิเดชัน

ปฏิกริยาออกซิเดชันเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดการเสื่อมเสียของน้ำมัน คุณค่าทางโภชนาการลดลง และเกิดกลิ่นเหม็นหืนขึ้น Morales *et al.* (1997) รายงานการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบสารระเหยของน้ำมันมะกอกในระหว่างการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน เมื่อน้ำมันมะกอกเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน ผลการวิเคราะห์สารระเหยไม่พบกลุ่มของอัลดีไฮด์ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (C_6 aldehyde) แอลกอฮอล์ (alcohols) และเอสเทอร์ (esters) ที่แสดงกลิ่นรสผลไม้ในสารระเหย แต่พบอัลดีไฮด์ที่แสดงกลิ่นเหม็นหืนจำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค

1.2.1 กลไกการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน

การเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอิสระหรือที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในลิพิด (lipid) หรืออาหารที่มีลิพิด ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างต่อเนื่องเมื่อลิพิดหรืออาหารสัมผัสกับออกซิเจน อัตราเร็วของปฏิกริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปฏิกริยาต่อเนื่องของ

อนุมูลอิสระ (free-radical chain reaction) ซึ่งมีการเกิดได้เป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก (initiation) เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ ขั้นตอนที่ 2 (propagation) เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ ส่วนขั้นตอนที่ 3 (termination) เป็นปฏิกิริยาสุดท้ายที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระ (non-radical products) (นิธิยา, 2548; Angelo, 1992)

ปฏิกิริยาเริ่มต้นของออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะทำให้เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) โดยไฮโดรคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ



และออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่เกิดเป็น diradical ดังนี้



หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระกับออกซิเจนต่อเนื่องไป ได้เป็นอนุมูลเพอร์ออกซี (ROO[·]) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และอนุมูลไฮโดรคาร์บอน (R[·])



อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนต่อไป และเมื่อใดที่อนุมูลอิสระมาทำปฏิกิริยากันเองจะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาจะหยุดลง เมื่อไม่มีอนุมูลอิสระเหลือสำหรับทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนแล้ว หากยังมีออกซิเจนมากพอก็จะเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 1 (initiation reaction) เพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระได้ใหม่

ปฏิกิริยาเริ่มต้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานในการทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน ปริมาณพลังงานที่ใช้ประมาณ 35 กิโลแคลอรีหรือ 146 กิโลจูลต่อโมล และยังต้องใช้พลังงานอีกจำนวนหนึ่งซึ่งน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ในการเติมออกซิเจนเข้าไปที่พันธะคู่ เพื่อให้เกิดเป็น diradical อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ใช้จะลดน้อยลงในภาวะที่มีโลหะ เอนไซม์ หรือแสง ซึ่งช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (นิธิยา, 2548; Angelo, 1992; McClements and Decker, 2007)

1.2.2 วิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและน้ำมันในระบบอิมัลชันให้มีความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน

1.2.2.1 น้ำมัน

ก. การทำไฮโดรจิเนชัน

นำน้ำมันมาทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันเพียงบางส่วน เพื่อลดจำนวนพันธะคู่ให้น้อยลง จะช่วยให้น้ำมันมีโอกาสเกิดออกซิเดชันได้น้อยลงด้วย โดยการเพิ่มไฮโดรเจนให้กับโมเลกุล เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว คือมีพันธะคู่ที่อะตอมของคาร์บอน โดยอะตอมของไฮโดรเจนจะเข้าไปทำพันธะกับอะตอมของคาร์บอนจนเกิดพันธะเดี่ยว (นิธิยา, 2548; McClements and Decker, 2007)

ข. การกำจัดอากาศ

เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้น การใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปทดแทนอากาศบริเวณที่ว่างในภาชนะบรรจุเหนือ น้ำมันหรือผลิตภัณฑ์อาหารจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้น้อยลงด้วย

ค. การเติมสารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันสามารถช่วยหยุดยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ (free radical chain reaction) ได้ สารต้านออกซิเดชันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไวกว่ากรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว โดยสารต้านออกซิเดชันจะให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ ทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเกิดออกซิเดชันได้ช้าลง

ง. การเติมตัวคีเลต (Chelating agents)

สารประกอบพวกกรดซิตริก กรดฟอสฟอริก และกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระแอะซีติก (ethylene diamine tetra acetic acid: EDTA) ซึ่งทำปฏิกิริยากับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น เหล็กหรือทองแดง ดังนั้นการกำจัดโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ช้าลง

จ. ป้องกันไม่ให้ถูกแสง

แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดัวหนึ่งของปฏิกิริยาออกซิเดชันเช่นเดียวกัน จึงช่วยเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระในไขมันและน้ำมันได้ ดังนั้นการบรรจุน้ำมันในภาชนะที่ทึบแสง โดยเฉพาะช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลตจะชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (นิธิยา, 2548)

1.2.2.2 น้ำมันในระบบอิมัลชัน

วัฏภาคน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบหลักของระบบอิมัลชันสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เช่นเดียวกัน อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน ปริมาณออกซิเจน สารต้านออกซิเดชัน คุณสมบัติของพื้นที่ผิวสัมผัส (interfacial) และคุณสมบัติของอนุภาคหยดนํ้ามัน (McClements and Decker, 2000) ค่าประจุทางไฟฟ้า (electrical charge) ของพื้นที่ผิวสัมผัสมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชัน ซึ่งค่าประจุของพื้นที่ผิวสัมผัสและอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิฟายเออร์ที่นำมาใช้ จากรายงานการศึกษาของ Mancuso *et al.* (1999) พบว่าอิมัลชันน้ำมันปลาแซลมอน (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) ที่ทำให้คงตัวด้วยอิมัลซิฟายเออร์ต่างชนิดกัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่างกัน โดยอิมัลชันน้ำมันปลาแซลมอนที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate; SDS) ที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ประจุลบ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าอิมัลชันน้ำมันปลาแซลมอนที่ทำให้คงตัวด้วย Tween 20 (ไม่มีประจุ) และ DTAB (dodecyltrimethylammonium bromide) (อิมัลซิฟายเออร์ประจุบวก) เนื่องจากประจุลบของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตดึงดูดอนุมูลโลหะซึ่งมีประจุบวกให้เคลื่อนที่เข้าใกล้หยดนํ้ามัน ทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากวิธีการข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว (การเติมสารต้านออกซิเดชัน และการเติมตัวเคลือบ) สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันในระบบอิมัลชันได้ (Frankel *et al.*, 1994; Huang *et al.*, 1994; Alamed *et al.*, 2006) แต่ยังมีอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้คือการเพิ่มชั้นผิวสัมผัสของอิมัลซิฟายเออร์ให้แก่หยดน้ำมัน ซึ่งความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นและชนิดของอิมัลซิฟายเออร์หรือโพลีอเล็กโตรไลต์ที่ใช้มีผลชะลอการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันในระบบอิมัลชัน จากงานวิจัยของ Guzey and McClements (2006a) พบว่า อิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-โคโคซาน มีความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีกว่าอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ชะลอการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันระหว่างอนุภาคลิพิดและน้ำมันในอิมัลชัน ซึ่งอนุภาคลิพิดเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน และหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-โคโคซาน ซึ่งมีประจุเป็นบวกที่พื้นผิวสัมผัส (โคโคซานมีประจุเป็นบวก) และอนุภาคลิพิด (Fe^{2+}) มีประจุเป็นลบเหมือนกัน ดังนั้นจึงมีแรงผลักระหว่างประจุ อนุภาคลิพิดจึงเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำมันได้ยากกว่าหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียวที่มีประจุเป็นลบ อนุภาคลิพิดสามารถดูดซับที่พื้นผิวสัมผัสได้เมื่อมีการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน ส่งผลให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน

2. ระบบอิมัลชัน (Emulsion)

อิมัลชันเป็นคอลลอยด์ประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดจากของเหลว 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ตัวทำอิมัลชันหรืออิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) เป็นตัวผสมให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน อิมัลชันที่เกิดขึ้นถ้ามองด้วยตาเปล่าจะเห็นลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันแต่ถ้ามองด้วยกล้องจุลทรรศน์ก็จะเห็นเป็น 2 วัฏภาค คือ เห็นเป็นหยดเล็กๆ ของของเหลวชนิดหนึ่งที่เรียกว่า วัฏภาคภายใน หรือวัฏภาคกระจายตัว (internal or dispersed phase) ซึ่งกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า วัฏภาคภายนอก หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (external or continuous phase) โดยทั่วไปขนาดของวัฏภาคกระจายตัว อาจมีขนาดต่างๆ กัน ตั้งแต่ขนาดที่เล็กกว่า 0.05 ไมครอน จนถึง 25 ไมครอน ซึ่งขนาดอนุภาคของวัฏภาคกระจายตัว มีผลต่อการกระเจิงของแสงได้ต่างกัน ส่งผลให้อิมัลชันมีลักษณะปรากฏแตกต่างกัน (McClements, 2005)

2.1 องค์ประกอบที่สำคัญในระบบอิมัลชัน

2.1.1 น้ำมันและไขมัน

น้ำมันและไขมันเป็นลิพิดประเภทหนึ่ง ซึ่งลิพิดเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดที่ไม่มีขั้วหรือนอนโพลาร์ (nonpolar) เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ และชนิดที่มีขั้วหรือโพลาร์ (polar) เล็กน้อย เช่น แอลกอฮอล์ และอะซิโตน ยกเว้นกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายในน้ำได้ (นิธิยา, 2548; McClements and Decker, 2007)

น้ำมันและไขมันมีบทบาทสำคัญด้านคุณค่าทางโภชนาการ การผลิต และสมบัติทางเคมีกายภาพของอาหารในระบบอิมัลชัน เป็นแหล่งพลังงานและสารอาหารที่จำเป็น แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันและไขมันบางชนิด เช่น คอเลสเตอรอล ไขมันอิ่มตัว กรดไขมันชนิดทรานส์ (trans fatty acids) ส่งผลต่อการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคอ้วน โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน และมะเร็ง (Bhathena, 2000; Bruckner, 2000; Glauret, 2000; McClements, 2005) ด้วยเหตุนี้ในอุตสาหกรรมอาหารจึงมีแนวโน้มลดปริมาณน้ำมันและไขมันส่วนที่เกิดผลเสียต่อสุขภาพในผลิตภัณฑ์อาหารลง แต่เพิ่มปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีคุณประโยชน์ด้านการพัฒนาสมอง การป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด (Simopoulos, 1990; Sizer and Whitney 2006) แต่ปัญหาสำคัญของอาหารที่มีน้ำมันและไขมันเป็นส่วนประกอบคือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดกลิ่นหืน (Angelo, 1992) ดังนั้น จึงมีการคิดค้นวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันและไขมันส่วนที่ต้องการให้คงอยู่ และลดส่วนที่ไม่ต้องการในอาหารอิมัลชัน

ชนิดและความเข้มข้นของลิพิดมีผลอย่างมากต่อกลิ่นรสของอาหารอิมัลชัน ลิพิดมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างกระบวนการผลิต การเก็บรักษา และการนำไปใช้ ซึ่งส่งผลต่อกลิ่นรสทั้งที่พึงประสงค์และไม่พึงประสงค์ (Coupland and McClements, 1996) วิทยาคมน้ำมันในระบบอิมัลชันมีความสำคัญต่อกลิ่นรส เนื่องจากวิทยาคมน้ำมันนี้ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายองค์ประกอบที่สำคัญในอาหาร อาทิเช่น วิตามินที่ละลายได้ในน้ำมัน สารต้านออกซิเดชัน สารกันบูด และน้ำมันหอมระเหย (essential oil) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ให้กลิ่นรสในอาหาร (McClements, 2005) ลักษณะปรากฏและคุณสมบัติวิทยากระแส (rheology) ของอาหารอิมัลชันนั้นเป็นผลมาจากวิทยาคมน้ำมันและวิทยาคมน้ำ ขึ้นอยู่กับอนุภาคของวิทยาคมน้ำจะกระจายตัวอยู่ในวิทยาคมน้ำมัน โดยปกติอาหารอิมัลชันมีลักษณะปรากฏที่ทึบแสงและข้น เนื่องจากการกระเจิงของแสงเมื่อกระทบกับ

อนุภาค ดังนั้นสีและความขุ่นจึงขึ้นกับปริมาณน้ำมันและไขมันที่มีอยู่ในอิมัลชัน (Chantrapornchai, 1998) ในด้านคุณสมบัติวิทยาการกระจายของอาหารอิมัลชันส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณน้ำมันและไขมันที่เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคหยดนํ้ามันในอาหารอิมัลชันเพิ่มขึ้น (McClements, 2005) ยกตัวอย่างเช่น ครีม มายองเนส และน้ำสลัด เป็นต้น

2.1.2 น้ำ

น้ำมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพโดยรวม (bulk physicochemical properties) และสมบัติทางประสาทสัมผัสของระบบอิมัลชันในอาหาร สมบัติเชิงโครงสร้าง และเชิงโมเลกุลที่มีความเฉพาะตัวของน้ำจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการละลาย การจัดเรียง และการเข้าทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบอื่นๆ ที่มีอยู่ในระบบอิมัลชัน (McClements, 2005) โครงสร้างของน้ำในหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมไฮโดรเจน 2 อะตอม เชื่อมต่อกับด้วยพันธะโคเวเลนต์อยู่กับหนึ่งอะตอมออกซิเจน อะตอมของออกซิเจนจะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) สูงและดึงอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนเข้าหาตัวมันเอง ทำให้เกิดประจุบวกบางส่วน (partial positive charge) บนแต่ละอะตอมไฮโดรเจน และประจุลบบางส่วน (partial negative charge) บนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) ของอะตอมออกซิเจน การจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของประจุบนโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน 4 พันธะ กับโมเลกุลอีก 4 โมเลกุลที่อยู่ใกล้ (นิธิยา, 2545; McClements, 2005; Reid and Fennema, 2008)

พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำจะเปลี่ยนไป เมื่อมีการละลายของเกลือหรือโมเลกุลของสารที่มีขั้ว และ/หรือมีหมู่ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic group) นอกจากนั้นในปฏิกิริยาไฮเดรชันของน้ำกับไอออนประจุบวก (cation) หรือไอออนประจุลบ (anion) จะแตกต่างกัน คือ ปลายด้านที่เป็นประจุลบ (negative end) ในโมเลกุลของน้ำจะหันเข้าหาไอออนประจุบวก ขณะที่ปลายด้านที่เป็นประจุบวก (positive end) ในโมเลกุลของน้ำจะหันเข้าหาไอออนประจุลบ เมื่อมีการละลายของเกลือจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrical attraction) ที่อยู่บนโมเลกุลของน้ำกับโซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งจะมากกว่าแรงยึดกันระหว่าง Na^+ และ Cl^- ดังนั้นปลายด้านที่เป็นประจุบวกของโมเลกุลน้ำจะดึงด้านประจุลบออกจากโมเลกุลของเกลือ ขณะที่ปลายด้านประจุลบของโมเลกุลน้ำจะดึงด้านประจุบวกออกจากโมเลกุลของเกลือ ทำให้แรงยึดพันธะ (bonding force) ระหว่าง Na^+ และ Cl^- ถูกทำลาย ไอออนทั้งสองจึงถูกดึงออกจากกันให้กระจายตัว และถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ (นิธิยา, 2545; Kotz *et al.*, 2006) นอกเหนือจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนแล้ว

โมเลกุลน้ำยังสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลที่มีขั้วอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์ เบส โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต โดยความแข็งแรงของพันธะขึ้นกับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี และการจัดตัวของโมเลกุลให้และรับประจุ (McClements, 2005) ด้วยความสามารถของโมเลกุลน้ำในการเข้าทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่น (ความมีขั้วและประจุไอออน) ทำให้มีผลต่อลักษณะคุณสมบัติของระบบอิมัลชันในอาหาร

2.1.3 อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) และสเตบิไลเซอร์ (stabilizer)

อิมัลซิฟายเออร์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีความสามารถในการลดระดับบนพื้นผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ และยังป้องกันการรวมกลุ่มกันของหยดน้ำมันในอิมัลชัน ได้แก่ การเกาะกลุ่มกัน (flocculation) และ/หรือ การหลอมรวมกัน (coalescence) อิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวโมเลกุลขนาดเล็ก ไบโอโพลิเมอร์ที่มีขั้วและไม่มีขั้วในตัวเอง และวัตถุดิบที่มีสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบ ซึ่งความสามารถในการสร้างอิมัลชัน และทำให้อิมัลชันคงตัวอยู่ได้ขึ้นอยู่กับโมเลกุลและคุณลักษณะด้านเคมีกายภาพของอิมัลซิฟายเออร์ คุณสมบัติของอิมัลซิฟายเออร์ในอุดมคติคือ สามารถลดระดับที่พื้นผิวระหว่างน้ำมันและน้ำได้อย่างรวดเร็ว ลดแรงตึงผิวได้มากพอ และป้องกันการสูญเสียความคงตัวภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ในกระบวนการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา และการนำไปใช้ (McClements, 2005) ตัวอย่างอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้โดยทั่วไปในอาหารอิมัลชัน แสดงในตารางที่ 1

ส่วนสเตบิไลเซอร์นั้นไม่จัดเป็นอิมัลซิฟายเออร์ เนื่องจากโมเลกุลไม่ได้ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ชอบน้ำมัน (lipophilic) แต่มีบทบาทสำคัญในการช่วยให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่คงตัว (firmer) โดยเพิ่มความหนืด และช่วยในการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์อาหาร (Lindsey, 2007)

2.1.3.1 เลซิทีน (lecithin)

เลซิทีนเป็นอีกหนึ่งอิมัลซิฟายเออร์ที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเลซิทีนเป็นสารประกอบของไขมันและฟอสฟอรัส เรียกว่า ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) มีสารสำคัญคือ ฟอสฟาติดีลโคลีน (phosphatidyl choline) ฟอสฟาติดีลเอทานอลามีน (phosphatidyl ethanolamine) ฟอสฟาติดีลโนซิทอล (phosphatidyl inositol) และกรดฟอสฟาติก (phosphatidic acid) ในเลซิทีนมี glycerol-phospholipid เป็นองค์ประกอบสำคัญทั้งในเชิงปริมาณ

และหน้าที่ โดย glycerol-phospholipid ได้จาก *sn*-glycerol-3-phosphate ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 4 ถ้าส่วนของ X และ Y เป็นกรดไขมัน หมายถึง diacyl-glycerophospholipids แต่ถ้ามีกรดไขมันเพียงตัวเดียว และส่วนของ X หรือ Y เป็นอะตอมไฮโดรเจน ก็จะหมายถึง mono-acyl-glycerophospholipids หรือ lyso-phospholipids ส่วน Z ที่จับกับหมู่ฟอสเฟตที่แตกต่างกันทำให้เกิด glycerol-phospholipid ชนิดต่างๆ ขึ้น (ภาพที่ 5) โดยส่วน Z อาจเป็นอะมิโนแอลกอฮอล์ (เช่น โคลีน เอทานอลามีน) แอลกอฮอล์ที่มีขั้ว (เช่น อินซิทอล กลีเซอรอล) หรือ กรดอะมิโนที่มีหมู่โซ่ข้างเป็นหมู่ไฮดรอกซิล เช่น เซอรีน; (serine) (Bueschelberger, 2004) และด้วยหมู่ของฟอสเฟตในสายของเลซิทีน ทำให้เลซิทีนมีค่า pK_a ต่ำกว่า 2 (Shchipunov, 2002)

เลซิทีนพบมากทั้งในไข่แดง นม สมอ ดับ ไค ถั่วเปลือกแข็ง ปลา กล้วยพืช น้ำมันพืช และสัตว์ต่างๆ ซึ่งในแต่ละแหล่งก็มีปริมาณเลซิทีนแตกต่างกัน ในไข่แดงมีเลซิทีนประมาณร้อยละ 6 - 8 ถั่วเหลืองมีเลซิทีนประมาณร้อยละ 1.1 - 3.2 ในข้าวโพดมีร้อยละ 1.0 - 2.4 แต่เดิมในการผลิตเลซิทีนเพื่อการค้าจะผลิตจากไข่แดงเนื่องจากมีปริมาณสูง แต่มีปัญหาที่สำคัญคือ มีต้นทุนการผลิตสูง ภายหลังพบว่าสามารถผลิตเลซิทีนได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันถั่วเหลือง ทำให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และเลซิทีนที่ได้จากถั่วเหลืองมีคุณภาพดีกว่าเลซิทีนจากไข่แดง เนื่องจากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง ดังนั้นเลซิทีนที่สกัดจากถั่วเหลืองจึงเป็นที่นิยมเพิ่มขึ้น เลซิทีนที่สกัดแยกออกจากน้ำมันถั่วเหลืองที่อยู่ในรูปของเหลว จะมีส่วนประกอบของไขมันประเภทไตรกลีเซอไรด์สูงถึงร้อยละ 37 และมีโคลีนอยู่ร้อยละ 15 ส่วนเลซิทีนที่อยู่ในรูปผงมีโคลีนสูงถึงร้อยละ 23 และมีไตรกลีเซอไรด์ร้อยละ 3 คุณภาพของเลซิทีนที่ดีจะต้องมีสารประกอบอื่นๆ เช่น น้ำมัน คาร์โบไฮเดรต ปะปนมาในปริมาณน้อย แต่ต้องมีส่วนประกอบของฟอสโฟลิพิดในปริมาณสูงโดยเฉพาะฟอสฟาติดิลโคลีน เลซิทีนที่สกัดได้จะมีสีแตกต่างกัน ตั้งแต่สีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ถ้าต้องการเลซิทีนสีอ่อนอาจใช้สารเคมี เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ช่วยในการฟอกสีให้ได้สีตามต้องการ (วิภาวรรณ , 2549)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้โดยทั่วไปในอาหารอิมัลชัน

Chemical Name	Abbreviation	EU Number	U.S. FDA	ADI (mg/kg)	Solubility	HLB Number
Ionic						
Lecithin		E 322	184.1400	NL	Oil/water	8
Sodium stearoyl lactylate	SSL	E481	172.846	0-20	Water	22
Calcium stearoyl lactylate	CSL	E482	172.844	0-20	Oil	5.1
Nonionic						
Sorbitan monostearate	SMS	E 491	172.842	0-25	Water	4.7
Sorbitan tristearate	STS	E 492	-	0-15	Oil	2.1
Polyoxyethylene (20) sorbitan monostearate	Polysorbate 60	E 435	172.836	0-25	Water	14.9

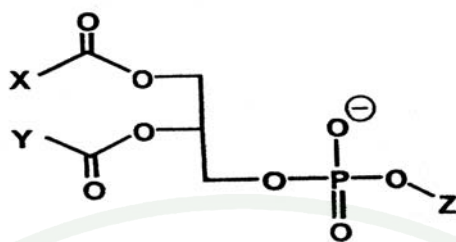
ตารางที่ 1 (ต่อ)

Chemical Name	Abbreviation	EU Number	U.S. FDA	ADI (mg/kg)	Solubility	HLB Number
Nonionic						
Polyoxyethylene (20) sorbitan tristearate	Polysorbate 65	E 436	172.838	0-25	Water	11
Polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate	Polysorbate 80	E 433	172.840	0-25	Water	15.0

หมายเหตุ ADI = acceptable daily intake

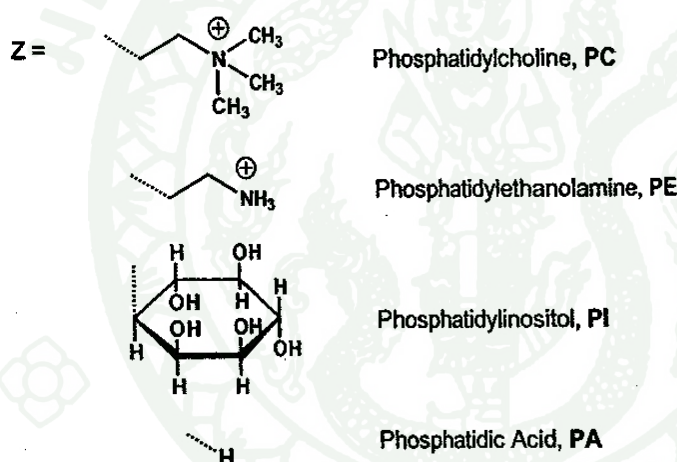
NL = not limited

ที่มา: McClements (2005)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของ *sn*-glycerol-3-phosphate

ที่มา : Bueschelberger (2004)



ภาพที่ 5 ฟอสโฟลิพิดชนิดต่างๆ ที่เกิดจาก glycerol-phospholipid จับกับส่วน Z หมู่ต่างๆ

ที่มา : Bueschelberger (2004)

เลซิทินที่มีในธรรมชาติเป็นแหล่งของโคลีน (choline) ซึ่งเป็นสารสำคัญที่จัดอยู่ในกลุ่มวิตามินบี โดยส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปฟอสฟาติดีลโคลีนหรือโคลีนอิสระ โคลีนมีความจำเป็นต่อร่างกายหลายอย่างคือ เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เยื่อหุ้มสมอง กล้ามเนื้อ เซลล์ประสาท รวมทั้งไลโปโปรตีน (lipoprotein) เป็นสารตั้งต้นในการสร้างอะเซทิลโคลีน (acetylcholine) ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่ใช้ในการส่งกระแสประสาทของสมอง รวมทั้งเป็นสารที่ให้กับกลุ่มเมทิลแก่สารอื่น (Miller, 2002) และกรดไขมันจำเป็น คือ กรดลิโนเลอิก (linoleic) และกรด

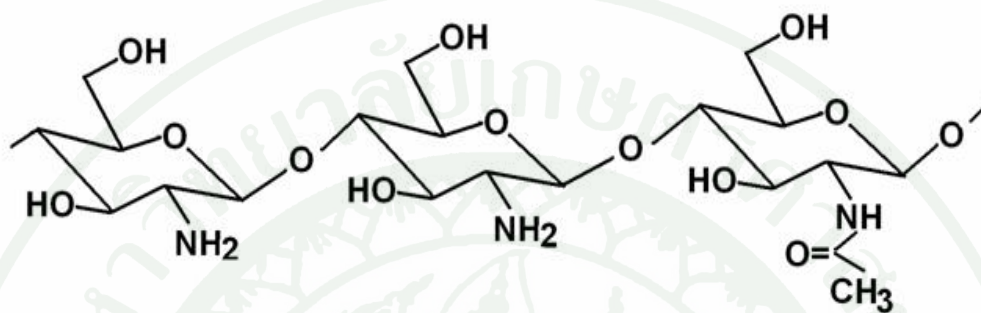
ลิโนเลนิก (linolenic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์ได้ ต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น จึงจัดเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยกรดลิโนเลนิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (polyunsaturated fatty acid) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่สองตำแหน่ง กรดลิโนเลนิกเป็นกรดไขมันในกลุ่มโอเมก้า-6 ซึ่งมีพันธะคู่แรกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 นับจากปลายหมู่เมทิล เป็นสารตั้งต้นในการสร้างฮอร์โมนและไขมันที่จำเป็นในร่างกาย จำเป็นต่อการทำงานของผนังเซลล์ เมแทบอลิซึมของคอเลสเตอรอล และเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โปรستاแกลนดิน ส่วนกรดไลโนเลนิกมีพันธะคู่สามตำแหน่ง พันธะคู่แรกอยู่ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จากปลายเมทิล มีประโยชน์ในด้านช่วยลดระดับไตรกลีเซอไรด์ ช่วยเพิ่มระดับการไหลเวียนเลือดและลดความดันโลหิต เสริมสร้างความจำ บำรุงสมอง และสายตา (นิธิยา, 2548; Boyle and Long, 2007)

เลซิธินสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์ได้ เนื่องจากในโมเลกุลของเลซิธินมีส่วนที่เป็นกรดไขมันสายยาวซึ่งมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก คือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และส่วนที่เป็นหมู่ฟอสเฟตซึ่งต่ออยู่กับเบสหรือพอลิแอลกอฮอล์ (polyol) มีคุณสมบัติไฮโดรฟิลิก คือส่วนที่ชอบน้ำ ในการกำหนดลักษณะของอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์นั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของฟอสฟาไทด์ 3 ชนิด คือ ฟอสฟาติดีลโคลีน ฟอสฟาติดีลเอทานอลามีน และฟอสฟาติดีลอินซิทอล ซึ่งในการนำไปใช้อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ เลซิธินที่เป็นอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์ที่ดีนั้นต้องมีสัดส่วนปริมาณฟอสฟาติดีลโคลีนมากที่สุด รองลงมาเป็นฟอสฟาติดีลเอทานอลามีน และมีฟอสฟาติดีลอินซิทอลน้อยที่สุด สำหรับเลซิธินที่เหมาะสมกับการนำไปใช้อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันนั้นต้องมีสัดส่วนปริมาณฟอสฟาติดีลอินซิทอลมากที่สุด รองลงมาเป็นฟอสฟาติดีลเอทานอลามีน และฟอสฟาติดีลโคลีนน้อยที่สุด (นิธิยา, 2548; Ansell and Spanner, 1982)

2.1.3.1 ไคโตซานหรือไคโตแซน (chitosan)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการนำหมู่อะซิติลออกทำให้ได้สายพอลิเมอร์ 2-amino-2-deoxy- β -D-glucopyranose ซึ่งไคโตซานมีการนำไปใช้ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และชีวเวชศาสตร์ทางการแพทย์ (biomedical) ในอุตสาหกรรมการผลิตไคโตซานนั้น ใช้กระบวนการย่อยทางเคมีในการย่อยไคตินให้กลายเป็นไคโตซาน โดยไคตินนั้นได้จากเปลือกของสัตว์เปลือกแข็ง (crustaceans) เช่น กุ้ง กั้ง และปู เป็นต้น ซึ่งเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลและไคตินมีอยู่ในผนังเซลล์ของพวกเห็ดรา (Fungi) บางชนิด เช่น *Aspergillus* และ *Mucor* (Mun et al., 2006) ในการย่อยทางเคมีของไคตินนั้นสามารถกำหนดขนาด

โมเลกุลของไคโตซานได้ ตั้งแต่ 70 กิโลดาลตัน (kDa) ขึ้นไป และระดับของการกำจัดหมู่อะซิดิล ร้อยละ 50-100 เพื่อให้มีความหลากหลายแตกต่างกันได้ ซึ่งระดับของการกำจัดหมู่อะซิดิลของ ไคตินนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะในการย่อยทางเคมี (Dupuis and LeHoux, 2007)



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

ที่มา: Prajapati (2009)

ในกระบวนการกำจัดหมู่อะซิดิลของไคตินนั้นเป็นการเปิดหมู่อะมิโน (amino groups) ทำให้ไคโตซานมีประจุเป็นบวกในสารละลายที่มีค่าเป็นกรด (พีเอช 3-5) ไคโตซาน ไม่ละลายในน้ำเพราะน้ำมีค่าพีเอชมากกว่า 6.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ทำให้ไคโตซานเกิดการตกตะกอน ขด ม้วนโมเลกุล จึงไม่เกิดการละลาย (Mun *et al.*, 2006)

การนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารนั้นมีความ เกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ คุณค่าทางโภชนาการและการเข้าทำปฏิกิริยา ไคโตซานมี ความสามารถในการจับกับน้ำ ไขมันและสี มีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ (Speiciene *et al.*, 2007) สามารถยับยั้งจุลินทรีย์โดยมีกลไกคือ ประจุบวกของไคโตซานสามารถจับกับเซลล์เมม- เบรินที่มีประจุลบของจุลินทรีย์ได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นของเซลล์ นำไปใช้ เป็นสารกันบูด สารช่วยรักษากลิ่นรส และสารให้ความข้น ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสดหรือผลิตในรูปแบบฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film) สำหรับบรรจุอาหาร (Olivas and Barbosa-Cánovas, 2009)

ผลของไคโตซานต่อระบบอิมัลชัน ในอิมัลซิฟายเออร์ปฐภูมิ ไคโตซานเป็นโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่มีความสามารถทำให้เกิดความคงตัวและกำหนดชนิดของอิมัลชันได้ โดยใช้คุณสมบัติแรงทางประจุและความหนืดทำให้มีสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ ได้มีการนำไคโตซานมาใช้ในการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) โดยไม่มีสารลดแรงตึงผิวตัวอื่นช่วย ซึ่งไคโตซานที่มีระดับของการกำจัดหมู่อะซิติกที่แตกต่างกันถูกนำมาใช้ในการเตรียมอิมัลชันโมเลกุลที่ระดับของการกำจัดหมู่อะซิติกสูงช่วยในการเกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) ส่วนโมเลกุลที่ระดับของการกำจัดหมู่อะซิติกต่ำช่วยในการเกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O) (Schulz *et al.*, 1998; Rodríguez *et al.*, 2001) และอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวมากหลังจากผ่านการให้ความร้อน (100 องศาเซลเซียส) และการแช่แข็ง ขนาดของหยดน้ำมันไม่มีการเปลี่ยนแปลง ไม่เกิดการเกาะกลุ่มและหลอมรวมกันของหยดน้ำมัน (Del Blanco *et al.*, 1999) ส่วนในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ทุติยภูมิ ไคโตซานเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีประจุเป็นบวก มีค่า pK_a 6.3 – 7 จากคุณสมบัตินี้จึงมีการนำไคโตซานมาใช้ในการสร้าง และทำให้คงตัวในระบบอิมัลชัน ซึ่งความเป็นประจุช่วยในการดูดซับบนพื้นผิวและเพิ่มแรงในการเข้าทำปฏิกิริยาทางประจุ การดูดซับที่พื้นผิวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงทางประจุระหว่างไคโตซานและสารลดแรงตึงผิวที่มีค่าประจุตรงกันข้าม จึงทำให้ได้อิมัลชันที่มีผิวสัมผัสหลายชั้น เมื่อมีชั้นผิวไคโตซานห่อหุ้มหยดน้ำมันในอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำทำให้หยดน้ำมันเข้าใกล้กันได้ยากขึ้นชะลอการเสียความคงตัวของอิมัลชัน เนื่องจากการผลักกันระหว่างหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยไคโตซานที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยแรงทางประจุของไคโตซาน (Mun *et al.*, 2006; Ogawa *et al.*, 2003a, 2003b; Guzey and McClements, 2006a)

น้ำหนักโมเลกุลและระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (degree of deacetylation) ของไคโตซานมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และ Tween 20 อิมัลชันทุติยภูมิประกอบด้วยน้ำมันข้าวโพดร้อยละ 3 และไคโตซานร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นไคโตซานต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก) อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกัน และอิมัลชันปฐภูมิที่เตรียมโดย Tween 20 ต้องใช้ความเข้มข้นไคโตซานมากกว่าอิมัลชันปฐภูมิที่เตรียมโดยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เพื่อให้ได้อิมัลชันทุติยภูมิที่คงตัว เนื่องจากแรงทางประจุระหว่างไคโตซานและ Tween 20 มีค่าน้อย ที่ระดับการกำจัดหมู่อะซิติกร้อยละ 40 อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเล็กกว่าและมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมากกว่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติกร้อยละ 77 และ 92 (Mun *et al.*, 2006)

นอกจากนี้ Speiciene *et al.* (2007) พบว่า ความเข้มข้นไคโตซาน (ร้อยละ 0-0.5 โดยน้ำหนัก) มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค การแยกชั้น และความหนืดของอิมัลชัน

น้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed oil) ที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์สกัด (whey protein isolate) โดยอิมัลชัน
 ทุกขุมที่มีความเข้มข้นโคโคซานเพิ่มขึ้นมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันลดลง ความหนืดเพิ่มขึ้น และ
 การแยกชั้นลดลง ซึ่งแสดงถึงความคงตัวที่ดีของอิมัลชัน

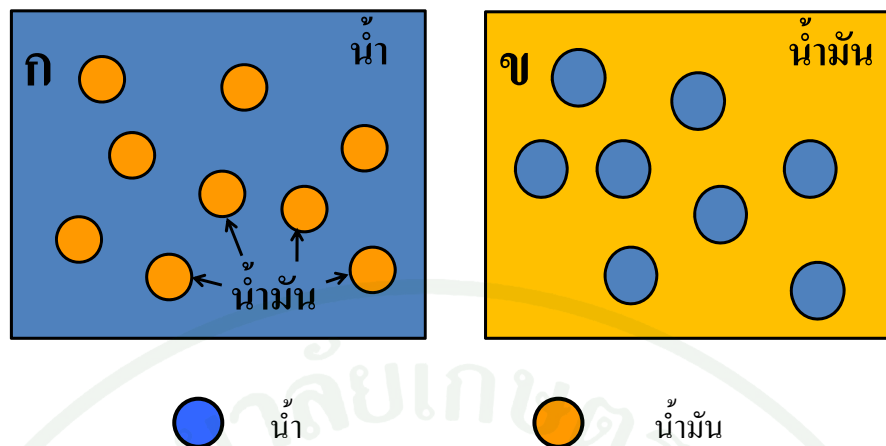
2.2 ชนิดและรูปแบบของอิมัลชัน

2.2.1 อิมัลชันเชิงเดี่ยว (single emulsion)

เป็นอิมัลชันที่ประกอบด้วยวัฏภาคภายในและภายนอกเท่านั้น ได้แก่อิมัลชันชนิด
 น้ำในน้ำมัน (W/O emulsion) อิมัลชันชนิดนี้มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ วัฏภาคภายนอกเป็นน้ำมัน
 (ภาพที่ 7) ตัวอย่างอาหาร ได้แก่ มายองเนส เนย เป็นต้น และอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W
 emulsion) อิมัลชันชนิดนี้กลับกันกับชนิดแรก คือ มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน วัฏภาคภายนอกเป็น
 น้ำ เช่น นม มายองเนส ครีม เป็นต้น (McClements, 2005)

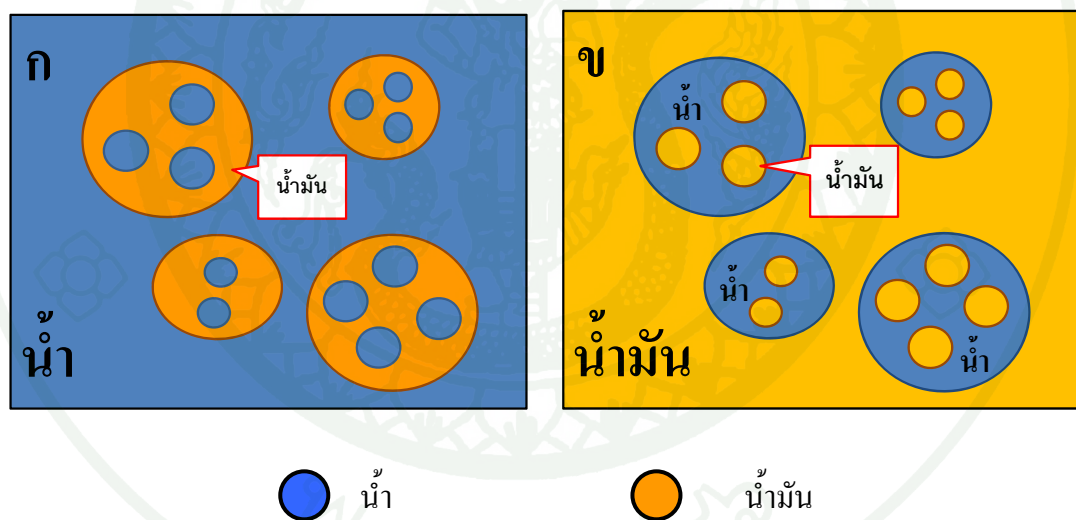
2.2.2 อิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsion)

เป็นอิมัลชันที่มีวัฏภาคภายในซ้อนกันอยู่ ซึ่งเป็นของเหลวต่างชนิดกัน สามารถ
 เรียกได้เป็นอิมัลชันในอิมัลชัน เช่น อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) ซึ่งมีน้ำเป็นวัฏภาค
 ภายนอก แต่วัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน จะมีหยดเล็กๆ ของน้ำกระจายตัวอยู่อีกที (ภาพที่ 8) หรือ ชนิด
 น้ำมันในน้ำในน้ำมัน (O/W/O) โดยน้ำมันเป็นวัฏภาคภายนอก แต่วัฏภาคภายในเป็นน้ำและมีหยด
 เล็กๆ ของหยดน้ำมันกระจายตัวอยู่ (ภาพที่ 8) (McClements, 2005)



ภาพที่ 7 ภาพจำลองอิมัลชันเชิงเดี่ยวชนิดน้ำมันในน้ำ (ก) และชนิดน้ำในน้ำมัน (ข)

ที่มา: คัดแปลงจาก McClements (2005)



ภาพที่ 8 ภาพจำลองอิมัลชันเชิงซ้อน ชนิด W/O/W (ก) และชนิด O/W/O (ข)

ที่มา: คัดแปลงจาก Jansen and Maibach (2001)

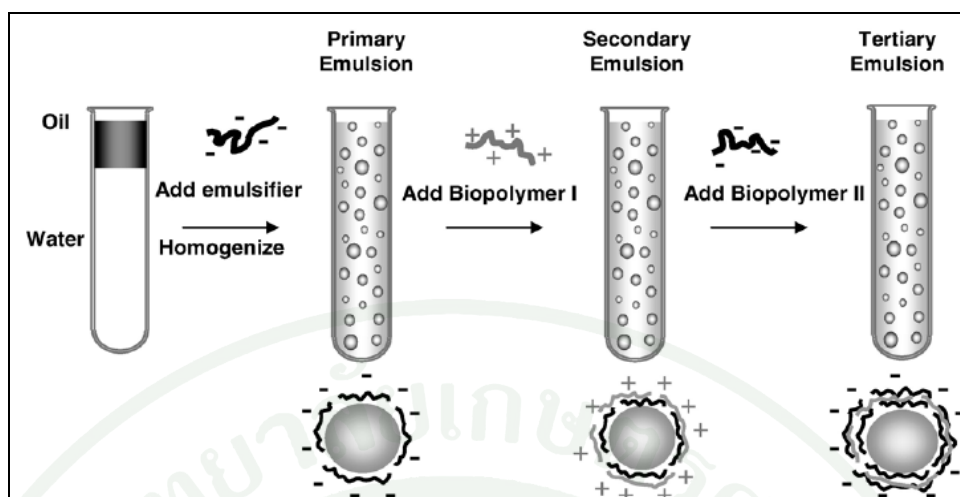
เนื่องจากลักษณะที่ซับซ้อนของอิมัลชันเชิงซ้อนจึงนำมาใช้ในการนำส่งยาในร่างกายมนุษย์ และห่อหุ้มกักเก็บสารสำคัญต่างๆ (Zheng, 2000) เช่น การใช้เทคนิคอิมัลชันชนิดน้ำ

ในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) โดยละลายยาอิพิรูบิซิน (epirubicin) ในวัฏภาคน้ำที่อยู่ภายในวัฏภาคน้ำมันเมล็ดดอกป๊อปปี้ (poppy seed oil) ซึ่งกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคน้ำอีกชั้นหนึ่ง เพื่อใช้รักษาโรคมะเร็งตับปฐมภูมิ (hepatocellular carcinoma) (Higashi and Setoguchi, 2000) หรือ การผลิตอิมัลชันชนิด W/O/W โดยใช้โซเดียมเคซิเนต (sodium caseinate) และมอลโตเด็คซ์ตริน (maltodextrin) ร่วมกันรักษาความคงตัวของอิมัลชัน เพื่อกักเก็บวิตามินบี 12 ซึ่งพบว่าการใช้โซเดียมเคซิเนตและมอลโตเด็คซ์ตรินร่วมกันให้ความคงตัวของอิมัลชัน W/O/W ที่ดีกว่าการใช้โซเดียมเคซิเนตเพียงอย่างเดียว และยังคงรักษาระดับปริมาณวิตามินบี 12 ไว้ได้ เมื่อผ่านการเก็บรักษาที่ 45 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน (O'Regan and Mulvihill, 2009)

2.2.3 อิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้น (multilayer emulsion)

อิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นสามารถเตรียมได้โดยใช้เทคนิค layer-by-layer (LBL) โดยใช้แรงทางประจุในการสร้างชั้นผิวห่อหุ้มหยดนํ้ามัน ในเทคนิคนี้อิมัลชันเริ่มต้นหรืออิมัลชันปฐมภูมิ (primary emulsion) เตรียมได้โดยการนำเฟสของน้ำมัน น้ำ และอิมัลซิฟายเออร์ที่มีประจุบวกหรือลบมาผ่านกระบวนการโฮโมจิไนส์ จากนั้นนำอิมัลชันปฐมภูมิผสมกับสารละลายโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้ในการเตรียมอิมัลชันปฐมภูมิเพื่อสร้างอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสสองชั้นหรืออิมัลชันทุติยภูมิ (secondary emulsion) จากอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสสองชั้นสามารถสร้างอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสสามชั้นหรืออิมัลชันตติยภูมิได้โดยผสมอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสสองชั้นกับสารละลายโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้าม (ภาพที่ 9) (Guzey and McClements, 2006a) ตัวอย่างระบบอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นแสดงในตารางที่ 2

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ทำการเตรียมอิมัลชันน้ำมันในน้ำแบบผิวสัมผัสสองชั้นโดยใช้เลซิทีนและโคโคซานเป็นอิมัลซิฟายเออร์ เนื่องจากเลซิทีนเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่มีตามธรรมชาติ มีความปลอดภัย หาได้ง่าย และมีราคาถูก จึงมีความสนใจนำมาใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ในอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่า แต่เนื่องจากเลซิทีนมีประจุลบทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันในอิมัลชันได้ง่าย ดังนั้นจึงนำโคโคซานซึ่งเป็นโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่ประจุบวกมาผลิตเป็นอิมัลชันผิวสัมผัสสองชั้น เพื่อช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันในอิมัลชัน



ภาพที่ 9 การนำเทคนิค LBL มาใช้ในการสร้างอิมัลชันน้ำมันในน้ำ (O/W)

ที่มา: Guzey and McClements (2006)

Ogawa *et al.* (2003b) ศึกษาการเตรียมอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้น โดยเตรียมอิมัลชันปฐมภูมิจากน้ำมันข้าวโพดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้เลซิthin ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นอิมัลซิฟายเออร์ จากนั้นนำอิมัลชันที่ได้มาเจือจางกับสารละลายไคโตซานที่มีความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0-0.04 โดยน้ำหนัก) เพื่อเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิ ซึ่งมีปริมาณน้ำมันข้าวโพดร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเลซิthin ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งอิมัลชันปฐมภูมิมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน (electrical charge) เป็นค่าลบ เมื่อเติมไคโตซานเพิ่มมากขึ้นค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมีค่าลบน้อยลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเข้มข้นของไคโตซานมีค่าประมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก และมีค่าเป็นบวกเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไคโตซานดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน เมื่อความเข้มข้นของไคโตซานเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งคงที่แสดงว่ามีปริมาณของไคโตซานที่มากพอต่อการดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมัน ทำให้ที่บริเวณพื้นผิวหยดน้ำมันมีประจุเป็นบวก เนื่องจากประจุของไคโตซาน และมีแรงผลักระหว่างประจุที่มากพอที่จะทำให้หยดน้ำมันไม่เข้ามารวมกลุ่มกัน จึงมีความคงตัวที่ดี

ตารางที่ 2 ตัวอย่างระบบอิมัลชันแบบผิวสัมผัสหลายชั้น

ตัวอย่างระบบอิมัลชัน	อิมัลซิฟายเออร์ และ/หรือโพลีอิเล็กโตรไลต์ (ประจุ)		
	ชั้นแรก	ชั้นที่สอง	ชั้นที่สาม
อิมัลชันทุติยภูมิ			
เบทาแลคโตโกลบูลิน (Beta Lactoglobulin)-เพคติน (pectin) ^a	เบทาแลคโตโกลบูลิน (+)	เพคติน (-)	
เลซิทีน-ไคโตซาน ^b	เลซิทีน (-)	ไคโตซาน (+)	
โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate)-ไคโตซาน ^c	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (-)	ไคโตซาน (+)	
อิมัลชันตติยภูมิ			
โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต -ไคโตซาน-เพคติน ^d	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (-)	ไคโตซาน (+)	เพคติน (-)
เลซิทีน-ไคโตซาน-เพคติน ^e	เลซิทีน (-)	ไคโตซาน (+)	เพคติน (-)

ที่มา : ^aGuzey *et al.*, 2004; ^{b,c}Ogawa, 2003a, 2003b, 2004; ^bKlinkesorn *et al.*, 2005a, 2005b; ^dAoki *et al.*, 2005; ^eMun *et al.*, 2006

ปัญหาที่สำคัญในการนำเทคนิค LBL มาใช้ในการเตรียมอิมัลชันแบบผิวสัมผัสหลายชั้น คือ การเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันในระหว่างการเตรียม การรวมกลุ่มของหยดน้ำมันขึ้นกับวิธีการที่ใช้ในการเตรียม สิ่งที่สำคัญในการใช้เทคนิค LBL ในการทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันน้อยหรือหลีกเลี่ยงการรวมกลุ่ม คือ การควบคุมองค์ประกอบของสารละลายและสถานะในการเตรียม ตัวอย่างเช่น ควรให้มีโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เพียงพอที่จะอ้อมตัวบริเวณพื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมัน โมเลกุลของโพลีอิเล็กโตรไลต์ควรดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันอย่างรวดเร็วก่อนที่จะอนุภาคหยดน้ำมันจะเกิดการชนกัน และแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มแล้วควรจะมีแรงเพียงพอที่จะป้องกันการรวมกลุ่มกันของอนุภาคหยดน้ำมัน (Guzey and McClements, 2006a)

2.3 ความคงตัวของระบบอิมัลชัน

ความคงตัวของระบบอิมัลชัน หมายความว่า ความสามารถของระบบอิมัลชันที่จะลดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามระยะเวลา ซึ่งระยะเวลานั้นขึ้นกับธรรมชาติของระบบอิมัลชันในผลิตภัณฑ์นั้นๆ บางผลิตภัณฑ์ต้องการระยะเวลาในการคงตัวเพียงไม่นานแต่ทว่าบางผลิตภัณฑ์ต้องการระยะเวลาในการคงตัวนานเป็นเดือนหรือปี ได้แก่ มายองเนส น้ำสลัด เป็นต้น ดังนั้นการทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง (McClements, 2005)

2.3.1 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน

ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมันเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความคงตัวของระบบอิมัลชัน อนุภาคหยดน้ำมันมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ตลอดเวลาแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางแน่นอน ซึ่งการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนช่วยให้อนุภาคหยดน้ำมันเอาชนะแรงโน้มถ่วงของโลกและกระจายตัวอยู่ในระบบได้ อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะมีแนวโน้มเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วงของโลกมากขึ้น ทำให้เคลื่อนที่แบบบราวเนียนน้อยลง อนุภาคหยดน้ำมันจึงสูญเสียความคงตัว โดยอาจเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน (creaming) หรืออาจตกตะกอนลงด้านล่าง (sedimentation) (McClements, 2005) ซึ่งจากงานวิจัยของ Chanamai and McClements (2000) อิมัลชันของ *n*-Hexadecane (ร้อยละ 20 โดยปริมาตร) ที่ทำให้งวดด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต (7 มิลลิโมลาร์) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคหยดน้ำมันที่เท่ากัน อนุภาคหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ (0.860 ไมโครเมตร) เกิดการแยกชั้นได้เร็วกว่าอนุภาคหยดน้ำมันขนาดเล็ก (0.430 ไมโครเมตร)

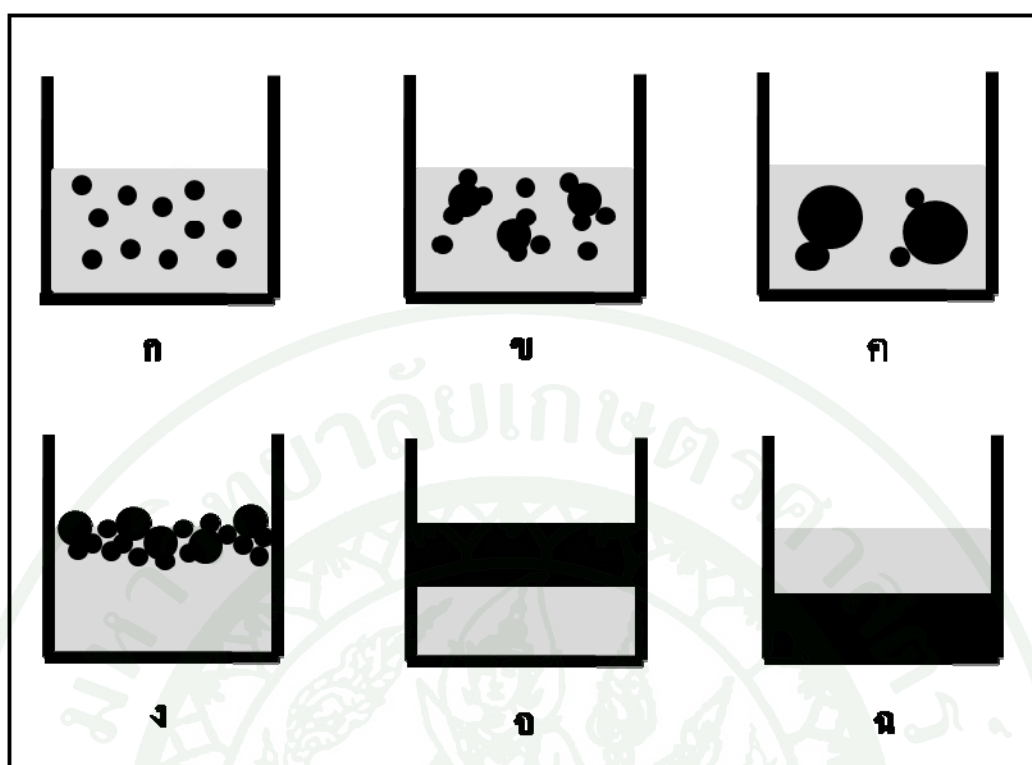
2.3.2 ประจุของอนุภาคหยดน้ำมัน

ค่าประจุทางไฟฟ้าของอนุภาคหยดน้ำมันพิจารณาในหลายลักษณะ อาทิเช่น ความหนาแน่นประจุที่พื้นผิว (surface charge density) หรือปริมาณประจุต่อพื้นที่ผิวสัมผัส และค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน (ζ -potential) ซึ่งก็คือค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสเตอร์น (stern potential) กับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย แสดงถึงค่าประจุที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้สนใจความสำคัญของค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันต่อความคงตัวของอิมัลชัน ประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันสามารถกำหนดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันได้ โดยหากอนุภาคหยดน้ำมันมีประจุที่พื้นผิวอนุภาคเหมือนกัน อนุภาคหยดน้ำมันจะเกิดการผลักกัน และหากมีประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันต่างกัน อนุภาคหยดน้ำมันจะดึงดูดเข้าหากัน อนุภาคหยดน้ำมันในระบบอิมัลชันส่วนใหญ่มีประจุที่พื้นผิวหยดน้ำมันเหมือนกัน เนื่องจากใช้อิมัลซิฟายเออร์เดียวกัน หากมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมากพอ อนุภาคหยดน้ำมันก็จะมีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากแรงผลักทางประจุ พีเอช (pH) และความแรงไอออน (ionic strength) มีผลต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคอย่างมาก โดยหากพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเติมเกลือในระบบอิมัลชัน ประจุของไอออนของเกลือที่แตกตัวจะเข้าไปกั้นขวางอันตรกิริยาทางประจุระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน ทำให้มีแรงผลักไม่เพียงพอต่อการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันและอาจเกิดการแยกชั้นอย่างรวดเร็ว (McClements, 2005)

2.3.3 การสูญเสียความคงตัวของระบบอิมัลชัน

ความคงตัวของระบบอิมัลชันในอาหารมีความซับซ้อน เนื่องจากครอบคลุมปรากฏการณ์ และกลไกต่างๆ มากมาย ขั้นตอนการสูญเสียความคงตัวคือเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค จากนั้นหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกัน เกิดครีม และสุดท้ายเกิดการแยกชั้น ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีกลไกการเกิดที่ต่างกัน (ภาพที่ 10) (Friberg and Larsson, 1997) การแยกชั้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงนั้น เกิดจากความแตกต่างของแรงโน้มถ่วง และความหนาแน่นระหว่างอนุภาคและของเหลวรอบๆ ทำให้อิมัลชันเกิดการแยกออกจากกัน ถ้าอนุภาคตัวถูกกระจายมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวโดยรอบ อนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ซึ่งหมายความว่า การเกิดครีม (Creaming; ภาพที่ 10ง) ในทางตรงกันข้าม ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวโดยรอบ อนุภาคจะเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ซึ่งหมายความว่า เกิดการตกตะกอนที่ด้านล่าง (Sedimentation; ภาพที่ 10ฉ) (McClements, 2005) การแยกชั้นที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงส่งเสริมให้อนุภาคเข้ามาใกล้กันซึ่ง

ส่งผลให้อนุภาคเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาคข้างเคียง หลังจากการชนกันอนุภาคในอิมัลชันเกิดการแยกออกจากกันหรือเกาะกลุ่มกันขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของขนาดแรงดึงดูดและแรงผลักที่เกิดระหว่างอนุภาค การรวมกลุ่มกันของอนุภาคในระบบอิมัลชันของอาหารสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ การเกาะกลุ่มของอนุภาค (Flocculation; ภาพที่ 10ข) และการหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกัน (Coalescence; ภาพที่ 10ค) การเกาะกลุ่มของอนุภาค เกิดจากอนุภาคสองอนุภาคหรือมากกว่านั้นเข้ามาเกาะกลุ่มกันโดยที่ยังคงลักษณะเดิมเฉพาะตัวไว้ได้ ซึ่งมีกลไกการเกิดหลายรูปแบบ เช่น การเกิดการเกาะกลุ่มกันเนื่องจากการเติมอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์ (emulsifying agent) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคมากกว่าหนึ่งอนุภาค อนุภาคจึงเชื่อมต่อกันเป็นสาย (molecular bridges) ซึ่งเป็นการเกิด bridging flocculation และกลไกการเกิดการเกาะกลุ่มกันเนื่องจากการเติมโพลิเมอร์ที่ไม่ดูดซับที่พื้นผิวอนุภาค ทำให้มีปริมาณโพลิเมอร์ในส่วนน้ำมากกว่าต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ผลักดันโมเลกุลน้ำออกจากพื้นผิวอนุภาค ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน เรียกกลไกการเกิดการเกาะกลุ่มกันนี้ว่า depletion flocculation (Smith-Plamer and Pelton, 2006) ในขณะที่การหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันนั้น เกิดจากอนุภาคสองอนุภาคหรือมากกว่านั้นมาหลอมรวมกันกลายเป็นอนุภาคเดียวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (McClements, 2005) การเกาะกลุ่มของอนุภาคและการหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันเร่งอัตราเร็วในการเกิดการแยกชั้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ความคงตัวของอิมัลชันมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ในด้านข้อดีนั้นการสูญเสียความคงตัวของอิมัลชันช่วยสร้างลักษณะเนื้อสัมผัสที่พึงประสงค์ ส่วนข้อเสียคือลดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ได้ลักษณะปรากฏที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เปลี่ยนลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์อาหาร (Coupland and McClements, 2001; McClements, 2005)



ภาพที่ 10 การสูญเสียความคงตัวของอิมัลชัน (อิมัลชันที่คงตัว (ก) flocculation (ข) coalescence (ค) creaming (ง) breaking (จ) และ sedimentation (ฉ))

ที่มา: ดัดแปลงจาก McClements (2005)

3. ผลของสภาวะแวดล้อมต่อคุณสมบัติและความคงตัวของอิมัลชัน

3.1 การให้ความร้อน

อาหารที่เป็นอิมัลชันหลายชนิดผ่านการให้ความร้อนทั้งในระหว่างการผลิต การเก็บรักษาหรือการนำไปใช้ อาทิเช่น การพาสเจอร์ไรส์ สเตอริไรซ์หรือการปรุงสุก ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญในการทำให้ระบบอิมัลชันมีความสามารถต้านทานความร้อนโดยไม่เกิดการแยกชั้นเนื่องจากหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันหรือหลอมรวมตัวกัน อิมัลชันแบบพิวส์มีหลายชั้นสามารถปรับปรุงความคงตัวของอิมัลชันต่อการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงผลักระหว่างอนุภาค (steric repulsion) (Guzey and McClements, 2006a)

ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ศึกษา ผลของการให้ความร้อนที่ 30-90 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน เมื่ออุณหภูมิการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่อิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน-ไลโดซาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้านขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และการแยกชั้น (Ogawa *et al.*, 2003a) ส่วนอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโดซาน และโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโดซาน-เพคติน ไม่เปลี่ยนแปลงขนาดหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และการแยกชั้นของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดทั้งสามชนิด อิมัลชันทั้งหมดยังคงความคงตัวไว้ได้ (Aoki *et al.*, 2005) แต่อิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยเบทาแลคโตโกลบูลิน-เพคติน-ไลโดซาน เมื่อความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 50 องศาเซลเซียส อิมัลชันเกิดการแยกชั้น อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งความร้อนอาจมีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ระหว่างไลโดซานและเพคตินทำให้เกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน (Guzey and McClements, 2006b)

3.2 การแช่แข็ง

อาหารที่เป็นอิมัลชันที่ผ่านการแช่เย็น และการแช่แข็งในระหว่างการเก็บรักษาก่อนนำไปบริโภคในอุตสาหกรรมอาหารมีมากมาย อาทิเช่น ไอศกรีม ขนมหวาน ซอส และผลิตภัณฑ์นมต่างๆ การเก็บรักษาในอุณหภูมิได้นำมาใช้เพื่อช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่พึงประสงค์ อย่างไรก็ตามอิมัลชันก็ไม่คงตัวในสถานะที่ผ่านการแช่เย็น และ/หรือแช่แข็ง และเกิดแยกชั้นทันทีที่ผ่านการให้ความร้อนอีกครั้ง ซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ ข้อแรกน้ำในระบบอิมัลชันเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึก (water crystallization) ทำให้อนุภาคหยดน้ำมันเข้ามาใกล้กันและมีปริมาณน้ำอิสระไม่เพียงพอที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน ซึ่งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันด้วยกัน ข้อที่สอง การเกิดผลึกน้ำแข็ง (ice crystallization) เพิ่มความแรงไอออนให้ระบบอิมัลชัน ข้อที่สาม ผลึกน้ำแข็งอาจแทรกทะลุเข้าไปในหยดน้ำมันและทำให้ชั้นพื้นผิวสัมผัสถูกทำลาย ซึ่งทำให้เกิดการหลอมรวมตัวของหยดน้ำมันได้ และข้อสุดท้าย น้ำมันที่อยู่ด้านในอาจก่อตัวเป็นผลึกแล้วแทงทะลุออกมาได้ ทำให้เกิดการหลอมรวมกันแบบ Partial coalescence (Ogawa *et al.*, 2003a; Aoki *et al.*, 2005; Guzey and McClements, 2006a) ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากในการใช้เทคโนโลยีช่วยรักษาความคงตัวของอิมัลชันที่ผ่านการแช่เย็น แช่แข็งและการทำลาย (Guzey and McClements, 2006a) อิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นสามารถช่วยรักษาความคงตัวของอิมัลชันหลังผ่านการแช่แข็งได้ อาทิเช่น อิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต และโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโดซาน เมื่อผ่านการแช่แข็ง

ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง จำนวน 6 รอบ เกิดการแยกชั้นและขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ผ่านการแช่แข็งและทำละลายรอบแรก ส่วนอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโคซาน-เพคตินนั้น ไม่เกิดการแยกชั้นแม้ผ่านการแช่แข็งและทำละลายถึง 6 รอบ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากชั้นผิวสัมผัสในอิมัลชันตติยภูมิมีความหนามากกว่าอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันมากขึ้น ช่วยป้องกันการเคลื่อนเข้ามาใกล้กันของอนุภาคหยดน้ำมัน และความหนาของชั้นผิวสัมผัสช่วยป้องกันการแทรกทะลุผ่านและทำลายเมื่อเกิดผลึกน้ำแข็งหรือผลึกน้ำมันขึ้น (Aoki *et al.*, 2005) และอิมัลชันน้ำมันปาล์มเมื่อผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยอิมัลชันน้ำมันปาล์มทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต และโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโคซาน มีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้น เกิดการหลอมรวมกันและการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน แต่อิมัลชันน้ำมันปาล์มที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโคเคซิลซัลเฟต-ไลโคซาน-เพคติน นั้นมีความคงตัว ไม่เกิดการแยกชั้น (Parita *et al.*, 2006)

3.3 การปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช)

สารละลายที่เป็นวัฏภาคภายนอกที่ล้อมรอบหยดน้ำมันในอาหารที่เป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำนั้น มีพีเอชที่หลากหลายตั้งแต่กรดจนถึงด่างอ่อนขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอาหาร ในอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างชั้นผิวสัมผัสและสมบัติต่างๆ ทั้งในขั้นตอนการสร้างและหลังจากการสร้างชั้นผิวสัมผัส ค่าพีเอชบ่งชี้ถึงความเป็นประจุและความหนาแน่นของประจุ ในเทคนิค LBL การเลือกช่วงค่าพีเอชต้องพิจารณาจากประจุที่พื้นผิวอนุภาคและโพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ประจุตรงข้ามที่มาดูดซับ โพลีอิเล็กโทรไลต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นกรดอ่อนหรือเบสอ่อน ประจุลบของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดแอนไอออน (anionic) ได้จากกลุ่มซัลเฟต (sulfate) ฟอสเฟต (phosphate) หรือคาร์บอเนต (carbonate) ที่มีค่า pK_a ประมาณ 1-2 และ 4-5 ตามลำดับ ส่วนประจุบวกของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดแคตไอออน (cationic) ได้จากกลุ่มของอะมิโน (amino) หรืออิมิโน (imino) ที่มีค่า pK_a ประมาณ 7-11 การปรับค่าพีเอชมีผลในการควบคุมระดับโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวอนุภาค ตัวอย่างเช่น เพคติน (pectin) ที่มีประจุลบไม่ดูดซับที่พื้นผิวของเบต้าแลกโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) ประจุลบที่ห่อหุ้มหยดน้ำมันที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 เนื่องจากมีแรงผลักระหว่างประจุของโพลีอิเล็กโทรไลต์และอนุภาค แต่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 เพคตินสามารถดูดซับที่พื้นผิวของเบต้าแลกโตโกลบูลินได้ เนื่องจากที่ค่าพีเอชนี้เบต้าแลกโตโกลบูลินมีประจุเป็นบวก ($pH < pK_a$) (Guzey and McClements, 2006b)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นผิวสัมผัสหลายชั้นที่ห่อหุ้มอนุภาคนั้นเกิดขึ้นหากค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถเปลี่ยนอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวอนุภาคและโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่มาดูดซับหรือระหว่างชั้นผิวสัมผัสของอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นหรือระหว่างโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่ถูกดูดซับแล้วและส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ การเปลี่ยนแปลงนี้มีผลต่อความหนา การห่อหุ้มและความสมบูรณ์ของชั้นผิวสัมผัสของอิมัลชัน

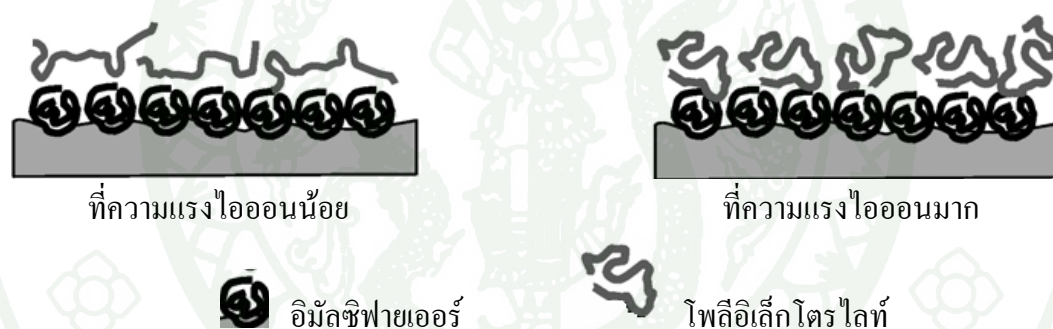
Aoki *et al.* (2005) ศึกษาผลของการปรับค่าพีเอชในช่วง 3-8 ต่อความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่มีผิวสัมผัสสามชั้น โดยอิมัลชันปฐมภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 5 มิลลิโมลาร์) มีประจุเป็นลบที่ทุกค่าพีเอช แต่ปริมาณประจุลบที่พื้นผิวอนุภาคหดยน้ำมันลดลง ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 1 มิลลิโมลาร์ และไคโตซานร้อยละ 0.024 โดยน้ำหนัก) มีประจุเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6 และเปลี่ยนค่าประจุจากบวกเป็นลบที่ค่าพีเอช 7 และ 8 แสดงถึงการหลุดของโมเลกุลไคโตซานที่พื้นผิวอนุภาคเมื่อค่าพีเอชสูงกว่า 6 กลุ่มประจุบวก (NH_3^+) ที่โมเลกุลไคโตซานมีค่า pK_a ประมาณ 6.3-7 ดังนั้นไคโตซานจึงหลุดออกที่ค่าพีเอชประมาณ 7-8 แต่อิมัลชันตติยภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 0.2 มิลลิโมลาร์ ไคโตซานร้อยละ 0.0048 โดยน้ำหนัก และเพคตินร้อยละ 0.040 โดยน้ำหนัก) มีประจุเป็นลบตลอดการปรับค่าพีเอช และเมื่อเพิ่มค่าพีเอช ปริมาณประจุลบที่พื้นผิวอนุภาคหดยน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุจากการเพิ่มขึ้นของประจุลบที่โมเลกุลเพคติน (pK_a ประมาณ 4.5) และการลดลงของประจุบวกของโมเลกุลไคโตซาน (pK_a ประมาณ 6.5) อิมัลชันตติยภูมิไม่เกิดการแยกชั้นตลอดการปรับค่าพีเอช หลังเก็บอิมัลชันไว้นาน 10 วัน

3.4 การเติมเกลือ

ความแรงไอออน (ionic strength) บ่งชี้ถึงความแรงและขอบเขตของอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างภายในและภายนอกของโมเลกุล และมีผลต่อการเกิดโครงสร้างและความหนาของชั้นผิวสัมผัส อันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างโพลีอิเล็กโตรไลต์และอนุภาคจะลดลง เมื่อความแรงของไอออนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมตัวสะสมของเคาน์เตอร์ไอออน (counter-ions) รอบๆ พื้นผิว หมายความว่า การเกิด electrostatic screening ซึ่งจะเกิดมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นและเวเลนซี (valency) ของเคาน์เตอร์ไอออนเพิ่มขึ้น เคาน์เตอร์ไอออนที่มีเวเลนซีหลายตัว (เช่น Ca^{2+} Fe^{2+} Fe^{3+}) มีผลต่อการเกิด electrostatic screening มากกว่าเคาน์เตอร์ไอออนที่มีเวเลนซีเพียงตัวเดียว (เช่น Na^+ Cl^- K^+) ดังนั้นเคาน์เตอร์ไอออนที่มีเวเลนซีหลายตัวความเข้มข้นน้อยสามารถกันขวางประจุได้ดีกว่า

แกนเตอร์ไอออนที่มีเวเลนซ์เพียงตัวเดียว แกนเตอร์ไอออนที่มีเวเลนซ์หลายตัวสามารถดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของโพลีเอเล็กโตรไลต์และเปลี่ยนความหนาแน่นประจุที่พื้นผิว (surface charge density) ได้ (Guzey and McClements, 2006a)

การเติมเกลือระหว่างการเตรียมอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นมีผลต่อส่วนประกอบโครงสร้าง และความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่มาดูดซับ ในอิมัลชันผิวสัมผัสหลายชั้นที่ไม่มีการเติมเกลือ ชั้นของโพลีเอเล็กโตรไลต์ที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวสัมผัสมีแนวโน้มเป็นชั้นที่บางเรียบ ซึ่งอาจเนื่องจากโมเลกุลของโพลีเอเล็กโตรไลต์มีการขยายยืดยาวออก (แรงผลักระหว่างประจุภายในโมเลกุลมาก) เมื่อมีการเติมเกลือ ชั้นของโพลีเอเล็กโตรไลต์มีความหนาแน่นมากขึ้น เนื่องจากโพลีเอเล็กโตรไลต์มีการจัดเรียงตัวกันแน่น (แรงผลักระหว่างประจุภายในโมเลกุลน้อย) (ภาพที่ 11) ด้วยเหตุนี้จำนวนโพลีเอเล็กโตรไลต์ทั้งหมดที่ดูดซับที่พื้นผิวในอิมัลชันที่มีการเติมเกลือจึงมีจำนวนมากกว่าที่ไม่เติมเกลือ (Guzey and McClements, 2006a)



ภาพที่ 11 ผลของความแรงไอออนต่อความหนาของชั้นผิวสัมผัสและการจัดเรียงตัวของโพลีเอเล็กโตรไลต์

ที่มา: Guzey and McClements (2006a)

Ogawa *et al.* (2003a) ศึกษาความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) 0-1000 มิลลิโมลาร์ต่อความคงตัวของอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน-โคโคซาน (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 1 เลซิทีนร้อยละ 0.2 และโคโคซาน 0.036 โดยน้ำหนัก) อิมัลชันปฐมภูมิมีประจุเป็นลบตลอดความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ แต่ปริมาณประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันลดลง และอนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ 3 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากเกิด electrostatic screening และการจับตัวกันของไอออนมีผลลดแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน ส่วนอิมัลชัน

ทุติยภูมิ ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน ที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ต่ำ อิมัลชันทุติยภูมิไม่เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน เนื่องจากชั้นผิวสัมผัสที่หนาของอนุภาคหยดน้ำมัน และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นแคตไอออนที่มีเวเลนซ์หลายตัว มีผลต่ออนุภาคหยดน้ำมันที่มีประจุเป็นลบมากกว่าคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ที่จะจับกับอนุภาคหยดน้ำมัน ประจุบวกในอิมัลชันทุติยภูมิ ดังนั้นอิมัลชันทุติยภูมิจึงมีความคงตัวที่ดีกว่าอิมัลชันปฐมภูมิที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น

Guzey and McClements (2006b) ศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0-500 มิลลิโมลาร์ต่อความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันข้าวโพด พบว่าอิมัลชันปฐมภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 10 และเบทาแลคโตไกลบูลินร้อยละ 0.45 โดยน้ำหนัก) มีค่าประจุเป็นบวกตลอดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ แต่มีปริมาณประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันลดลง เนื่องจากเกิด electrostatic screening ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 5 เบทาแลคโตไกลบูลินร้อยละ 0.225 และ เพคตินร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) และอิมัลชันตติยภูมิ (น้ำมันข้าวโพดร้อยละ 2.5 เบทาแลคโตไกลบูลินร้อยละ 0.1125 เพคตินร้อยละ 0.1 และไคโตซาน 0.15 โดยน้ำหนัก) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์น้อยกว่า 100 มิลลิโมลาร์ อนุภาคหยดน้ำมันมีความคงตัว ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องด้วยชั้นผิวสัมผัสมีความหนาและยังรักษาความคงตัวไว้ได้

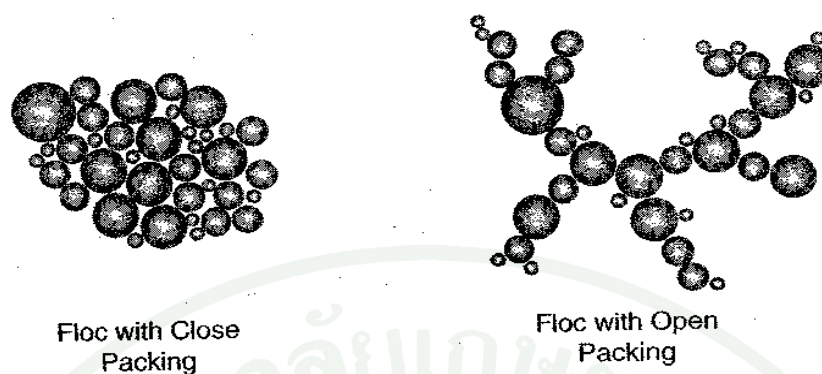
Ogawa *et al.* (2004) ศึกษาการเตรียมอิมัลชันตติยภูมิเลซิติน-ไคโตซาน-เพคติน โดยอิมัลชันประกอบด้วยน้ำมันข้าวโพดร้อยละ 0.5 เลซิตินร้อยละ 0.0078 ไคโตซานร้อยละ 0.02 และเพคติน ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวต่อการแยกชั้น เมื่อผ่านการปรับพีเอชและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (พีเอช 4-8 ที่ไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ และพีเอช 3-8 ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 100 มิลลิโมลาร์)

Guzey and McClements (2006b) ศึกษาการเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิที่ทำให้คงตัวด้วยเบทาแลคโตไกลบูลิน-เพคติน มีน้ำมันข้าวโพดร้อยละ 0.1 เบทาแลคโตไกลบูลินร้อยละ 0.05 และเพคตินร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนประกอบ ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันปฐมภูมิมีค่าเป็นบวกด้วยประจุบวกของเบทาแลคโตไกลบูลินและเปลี่ยนเป็นค่าลบเมื่อเติมเพคตินลงไป แสดงถึงการดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันระหว่างเบทาแลคโตไกลบูลินและเพคติน และทำการศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ก่อนและหลังเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิ อิมัลชันทุติยภูมิที่เติมโซเดียมคลอไรด์หลังจากการเตรียมยังคงรักษาความคงตัวไว้ได้ดีกว่าอิมัลชันทุติยภูมิที่เติมโซเดียมคลอไรด์ก่อนการเตรียมแสดงถึงการห่อหุ้มหยดน้ำมันด้วยโปรตีน-โพลีแซคคาไรด์สามารถ

ปรับปรุงความคงตัวต่อการเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวของหยดน้ำมันเมื่อเพิ่มความเข้มข้น โซเดียม-คลอไรด์

4. โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน

อาหารอิมัลชันมีองค์ประกอบที่หลากหลายและมีความซับซ้อน การทราบถึงโครงสร้างของอิมัลชันทำให้เกิดความเข้าใจในอาหารอิมัลชันมากขึ้น เช่น การเข้าทำปฏิกิริยาของอิมัลซิฟายเออร์ การเกิดการสูญเสียความคงตัวของอิมัลชัน ขนาดของหยดน้ำมัน เป็นต้น โครงสร้างของอาหารอิมัลชันยังมีความเกี่ยวเนื่องกับการรับรู้ทางประสาทสัมผัสต่ออาหารด้วย เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเปรี้ยว เป็นต้น ในอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน ลักษณะโครงสร้างของอิมัลชันมี 2 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบเริ่มต้นจากอนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาชนกันด้วยกลไกต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบบราวเนียน แรงโน้มถ่วงของโลก หรือการตกตะกอน เป็นต้น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มาชนกันและมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมาก โครงสร้างอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันเป็นแบบโครงสร้างเปิด (open structure) อนุภาคเกาะกลุ่มกันเป็นสาย อนุภาคเกาะกลุ่มกันอย่างแน่นในบริเวณที่อนุภาคเคลื่อนที่มาชนกัน ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคใหม่ อีกรูปแบบคือ การเกาะกลุ่มของอนุภาคแบบโครงสร้างปิด (close structure) อนุภาคมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้อย อนุภาคไม่เกาะติดกัน แต่เคลื่อนที่เข้ามาชิดกัน อัดรวมตัวกันแน่น (ภาพที่ 12) ซึ่งสามารถสังเกตได้ผ่านกล้องจุลทรรศน์ โครงสร้างของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันมีผลต่อคุณสมบัติของอิมัลชัน อาทิเช่น คุณสมบัติด้านวิทยากระแสน้ำ ที่ความเข้มข้นเดียวกันอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันมีความหนืดมากกว่าอิมัลชันที่อนุภาคไม่เกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันสามารถกักเก็บส่วนของวัฏภาคต่อเนื่องไว้ภายในได้ ความหนืดของอิมัลชันจึงเพิ่มขึ้น และมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน โดยการเกาะกลุ่มของอนุภาคในอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของหยดน้ำมันน้อย (dilute emulsion) มีอัตราเร็วในการเกิดการแยกชั้นสูง เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน การเกาะกลุ่มของอนุภาคในอิมัลชันที่มีความเข้มข้นของหยดน้ำมันมาก (concentrate emulsion) สามารถชะลอการแยกชั้นได้ เนื่องจากเกิดโครงสร้างสามมิติของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกัน ทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (McClements, 2005)



ภาพที่ 12 โครงสร้างของอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน

ที่มา: McClements (2005)

โครงสร้างระดับจุลภาคของอาหารอิมัลชันส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น หยดน้ำมันในอิมัลชัน สารลดแรงตึงผิว ฟองอากาศและการเกิดการตกตะกอนของโปรตีน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการนำกล้องจุลทรรศน์มาใช้ในการสังเกตโครงสร้างของอิมัลชัน ซึ่งมีการใช้กล้องจุลทรรศน์หลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการศึกษานั้น อิมัลชันสามารถศึกษาได้ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ (confocal laser scanning microscopy) โดยการย้อมสีในส่วนของวัฏภาคภายนอกหรือย้อมสีให้กับสารลดแรงตึงผิว ซึ่งสามารถสังเกตอิมัลชันได้ภาพโครงสร้างที่เป็นสามมิติโดยไม่ต้องทำการตัดแบ่งตัวอย่าง ใช้การสแกนด้วยแสงเลเซอร์ไปที่ตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์ชนิดสแกนด้วยแสงเลเซอร์มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาโครงสร้างของอาหารอิมัลชัน สามารถสังเกตขนาด ความเข้มข้น หยดน้ำมัน การเกิดการแยกชั้นของหยดน้ำมัน และปฏิกริยาระหว่างหยดน้ำมัน (McClements, 2005)

ตัวอย่างงานวิจัยที่นำกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์มาใช้ในอิมัลชัน ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างของอิมัลชันชนิดเจลแบบน้ำมันในน้ำ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นหยดน้ำมันในระดับไมโครเมตรได้ ในอิมัลชันที่มีความคงตัวพบว่ามีความหนาแน่นของหยดน้ำมันที่เล็กและมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน สามารถสังเกตเห็นการเกิดการหลอมรวมของหยดน้ำมันได้ โดยพบหยดน้ำมันขนาดเล็กเคลื่อนที่เข้ามาใกล้และเกาะติดที่ผิวหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ (Chen *et al.*, 2000) และอีกงานวิจัยที่ใช้กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์เพื่อศึกษาลักษณะของอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยไลโซไซม์ (lysozyme) กับน้ำลายที่นำมาผสมกัน โดยใช้สีย้อม Nile red และ Oregon green โดย

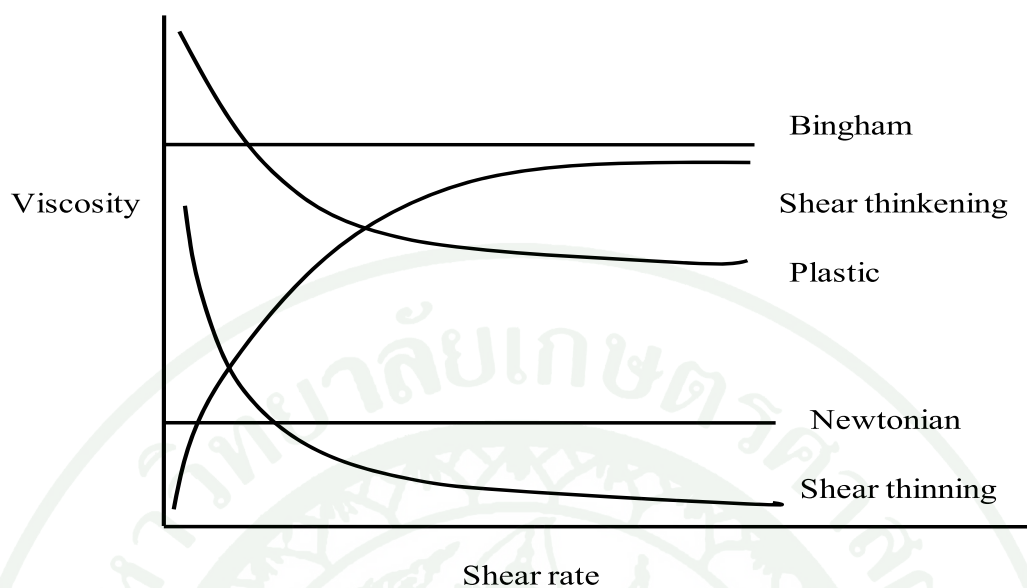
ส่วนภูมิภาคน้ำมันเชื่อมด้วย Nile red ติดสีส้ม ส่วนโปรตีนจากน้ำลายเชื่อมด้วยสี Oregon green ติดสีเหลือง ซึ่งเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์สังเกตโครงสร้างของอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยไลโซไซม์ พบว่าไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมัน และหยดน้ำมันมีขนาดประมาณ 1-5 ไมโครเมตร และเมื่อเติมโปรตีนน้ำลายลงไป พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมันและโปรตีนน้ำลาย ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ (Silletti *et al.*, 2007)

5. คุณสมบัติทางวิทยากระแส

ความรู้เรื่องคุณสมบัติทางวิทยากระแสของอาหารที่เป็นอิมัลชันมีความสำคัญมาก อาทิเช่น ในอาหารอิมัลชันส่วนใหญ่อายุการเก็บรักษานั้นขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางวิทยากระแสของภูมิภาคของส่วนประกอบเป็นสำคัญ เช่น การเกิดการแยกชั้นของอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำจะขึ้นอยู่กับความหนืดของภูมิภาคน้ำเป็นสำคัญ ในเรื่องการรับรู้ทางประสาทสัมผัสก็เกี่ยวเนื่องโดยตรงกับคุณสมบัติทางวิทยากระแส ในด้านการออกแบบกระบวนการผลิตนั้น คุณสมบัติทางวิทยากระแสของวัตถุดิบมีผลต่อทิศทางการไหล ความเร็วในการไหล ซึ่งต้องคำนึงเพื่อใช้ในการออกแบบที่เหมาะสม อาหารอิมัลชันมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและประกอบขึ้นจากหลายส่วนทำให้มีลักษณะทางวิทยากระแสที่หลากหลาย มีตั้งแต่ของไหลที่ความหนืดน้อย (นม และน้ำผลไม้) เจลที่มีความยืดหยุ่น (โยเกิร์ต และขนมหวาน) จนกระทั่งของแข็ง (มาการีนที่แช่เย็น และเนย) (McClements, 2005) ดังนั้นการเข้าใจในพฤติกรรมทางวิทยากระแสจึงมีความสำคัญ วิทยากระแสเป็นวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลของวัตถุดิบ ในการวัดผลทางวิทยากระแสจะเกี่ยวข้องกับการให้แรงแก่ตัวอย่าง และวัดผลจากการไหล และ/หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่าง โดยสามารถแบ่งประเภทลักษณะพฤติกรรมการไหลได้ดังนี้

5.1. นิวโตเนียน (newtonian fluids) ของไหลที่มีความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการกวนหรืออัตราการเฉือน (ภาพที่ 13) ทั้งนี้วัดที่อุณหภูมิคงที่ เช่น น้ำ น้ำมัน เป็นต้น

5.2. นอน-นิวโตเนียน (non-newtonian fluid) การที่เกิดลักษณะการไหลประเภทนี้เป็นเพราะภายในของไหลมีขนาดของอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ซึ่งทำให้ในระหว่างช่วงการไหลเกิดลักษณะไม่ราบรื่น ในการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนมีปัจจัยหลายๆ อย่างที่มีผลต่ออัตราการเฉือน (shear rate) ตัวอย่างอาหารที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ เช่น ซอสมะเขือเทศ มัสตาร์ด มายองเนส ซึ่งในอาหารต่างๆ ไปจะพบว่ามีลักษณะการไหลเป็นแบบนอน-นิวโตเนียนเป็นส่วนใหญ่ ของไหลชนิดนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่



ภาพที่ 13 ลักษณะพฤติกรรมการไหล

ที่มา: ดัดแปลงจาก มณฑล (2548)

5.2.1 time independent non-newtonian fluids

ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้จะขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราการเฉือนแต่จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือนแต่อย่างใด นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

5.2.1.1 pseudoplastic fluids

ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งของไหลนอน-นิวโตเนียนโดยมากมักจะไหลในลักษณะนี้ นอกจากนี้ลักษณะการไหลประเภทนี้ยังมีชื่อเรียกอื่นๆ ว่า shear thinning และของเหลวพาวเวอร์ลอว์ (Power law liquid) (ภาพที่ 13) ตัวอย่างทั่วไปของของไหลประเภทนี้ได้แก่ นม ผลไม้เข้มข้น มายองเนส มัสตาร์ด และซอซผัก

5.2.1.2 dilatant fluids

ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะของการไหลประเภทนี้พบเห็นได้ยากกว่าประเภทซูโดพลาสติก ของไหลใดก็ตามที่พบเห็นได้ในของไหล หรืออาหารลักษณะมีตะกอนของแข็งนอนกัน ยกตัวอย่างเช่น น้ำแป้งข้าวโพด นอกจากนี้ลักษณะของไหลใดก็ตามที่ยังเรียกอีกอย่างได้ว่าลักษณะการไหลแบบ shear thickening (ภาพที่ 13)

5.2.1.3 plastic fluids และ bingham fluid

ของไหลประเภทนี้ที่ค่าแรงเฉือนมีค่าต่ำๆ จะไม่มีการเคลื่อนที่แต่อย่างใด จนกระทั่งค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึงจุดที่แรงเฉือนมีผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ (yield value หรือ ในบางตำราเรียกว่า yield stress) ในของไหลบิงแฮม (bingham fluids) เมื่อออกแรงเฉือนจนถึงจุด yield stress หลังจากนั้นของไหลจะมีพฤติกรรมเหมือนของไหลนิวโตเนียน (ภาพที่ 13) ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ (tomato ketchup) ส่วนของไหลพลาสติกนั้นเมื่อออกแรงจนถึงจุด yield stress ของไหลก็จะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหลซูโดพลาสติก

5.2.2 time dependent non-newtonian fluids

ค่าความหนืดของของไหลประเภทนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นเฉือนและ อัตราการเฉือนแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนด้วย

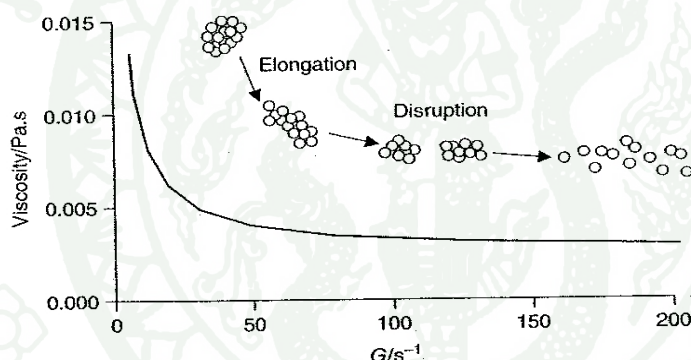
5.2.2.1 thixotropic fluids

ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลา เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลประเภทนี้พบได้น้อย แต่ก็มีพบบ้างในวัสดุประเภทสีทาบ้านและน้ำหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่

5.2.2.2 rheopectic fluids

ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลแบบ rheopectic นี้ค่อนข้างจะพบได้ยาก (มณฑล, 2548)

อิมัลชันส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด shear thinning เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคเมื่อให้แรงเฉือน และการเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค อิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันมีความหนืดสูง เนื่องจากเกิดโครงสร้างที่สามารถกักเก็บพลังงานต่อเนื้อได้ เมื่อให้อัตราการเฉือนอิมัลชันที่เกาะกลุ่มกันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอนุภาคหลุดจากกลุ่ม ทำให้อิมัลชันมีความหนืดลดลง (ภาพที่ 14) (McClements, 2005)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดและลักษณะ โครงสร้างของอิมัลชันที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่ม เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนให้กับอิมัลชัน

ที่มา: McClements (2005)

Logaraj *et al.* (2008) พบว่าอิมัลชันน้ำมันเมล็ดแตงโมและน้ำมันอะโวคาโดที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์เข้มข้น (whey protein concentrate) มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด shear thinning โดยทำการคำนวณตามสมการ Power Law ได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) เท่ากับ 0.59 และ 0.60 ตามลำดับ และเมื่อนำอิมัลชันทั้งสองชนิดเก็บรักษาไว้นาน 60 วัน อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมีค่าเท่าเดิม

Martin-González *et al.* (2009) พบว่าอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่มีความเข้มข้นน้ำมัน 10 กรัม น้ำมันต่อ 100 กรัมอิมัลชัน มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโทเนียน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมัน เป็น 30 กรัม น้ำมันต่อ 100 กรัมอิมัลชัน อิมัลชันมีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโทเนียน ชนิด shear thinning ลักษณะพฤติกรรมการไหลขึ้นกับปริมาณน้ำมันในอิมัลชัน ซึ่งสามารถแสดง พฤติกรรมการไหลทั้งแบบนิวโทเนียนและนอน-นิวโทเนียน



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมี

- 1.1 น้ำมันปลาพุน้ำ (บริษัท ที.ซี.ยูเนี่ยน โกลบอล จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย)
- 1.2 เลซิทินชนิดเหลว (บริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด แล็บ วิลเล่ย์ ประเทศไทย)
- 1.3 ไคโตซาน (Aldrich Chemical Co., St. Louis, MO) โมเลกุลขนาด 120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโลดาลตัน ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล ร้อยละ 75-85
- 1.4 กรดแอซติก (acetic acid; CH_3COOH) (บริษัท แล็บสแกน เอเชีย จำกัด ประเทศไทย)
- 1.5 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) (Univar, Australia)
- 1.6 โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride; NaCl) (Carlo Erba, Rodano, Italy)
- 1.7 โซเดียมแอซิเตท (sodium acetate; CH_3COONa) (BDH Chemicals Ltd, Poole, England)
- 1.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH) (Univar, Australia)
- 1.9 โรดามีนบีไอโซไทโอไซยาเนต (rhodamine B isothiocyanate) (Fluka, Germany)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1 ชุดเครื่องแก้ว
- 2.2 เครื่องชั่งแบบ 2 ตำแหน่ง (ARC 120, OHAUS, USA)
- 2.3 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Model SPB 31, Scale Tech, Germany)
- 2.4 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) (Multistirrer 6, Velp scientifica, Italy)
- 2.5 เครื่องปั่นผสมแบบหยาบ (ultra turrex homogenizer) (IKA-ULTRA-TURRAX® T 25 basic, KIKA®-WERKE GMBH & CO.KG, Germany)
- 2.6 เครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง (high pressure homogenizer) (15MR-8TA, APV Gaulin Inc., Wilmington, MA, USA)
- 2.7 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic disintegrator) (Soniprep 150, Sanyo Gallenkamp PLC, Leicester, UK)
- 2.8 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter) (Orion 5 star, Thermo Fisher scientific Inc., USA)

2.9 กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ (confocal laser scanning microscopy) (Axio Imager and LSM 5 Pascal, Carl Zeiss PTe Ltd, Germany)

2.10 เครื่องวัดขนาดอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาค (zetasizer nano-ZS instruments) (Zen 3600, Malvern Instrument Ltd., Worcestershire, UK)

2.11 เครื่องรีโอมิเตอร์ (rheometer) (Physica MCR 301, Anton Paar, Graz, Austria)

2.12 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) (EYELA, Rikakikai Co. Ltd., Tokyo, Japan)

2.13 ตู้แช่แข็ง (SF-C1497 (GYN), SANYO, Thailand)

2.14 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (BC-249, FROZEN Company, Nonthaburi, Thailand)

2.15 เครื่องผสมสาร (vortex mixer) (VX 100, Labnet International, Inc, USA)

วิธีการ

1. การเตรียมอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีน (อิมัลชันปฐมภูมิ)

อิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่มีน้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเลซิทีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยผสมน้ำมันปลาทูน่ากับเลซิทีน กวนอย่างสม่ำเสมอ 10 นาที จากนั้นเติม แอซิเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ (พีเอช 3) นำของผสมที่ได้มาผ่านเครื่องปั่นผสม แบบหยาบ นาน 5 นาที จะได้อิมัลชันที่มีหยดน้ำมันขนาดใหญ่ จากนั้นนำมาผ่านเครื่องโฮโมจีไนส์ ความดันสูง ที่ความดัน 5000 psi จำนวน 5 รอบ

2. ผลของความเข้มข้น และขนาดโมเลกุลโคโคซานต่อความคงตัวและคุณสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีน

2.1 ผลของความเข้มข้น โคโคซาน

นำอิมัลชันปฐมภูมิตามเตรียมเป็นอิมัลชันทุติยภูมิ (เลซิทีน-โคโคซาน) โดยเจือจางด้วย สารละลายโคโคซานให้มีน้ำมันปลาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ โคโคซานร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 โดยน้ำหนัก กวนของผสมอย่างสม่ำเสมอ 15 นาที ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงที่แอมพลิจูด

(amplitude) 15 ไมครอน เป็นเวลา 2 นาที เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำอิมัลชันทุติยภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส

2.2 ผลของขนาดโมเลกุลของโคโคซาน

นำอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำให้ง่ายด้วยเลซิทีนมาทำการเจือจางด้วยสารละลาย โคโคซานโมเลกุลขนาดต่างๆ (ขนาด 120 ± 98 , 250 ± 60 และ 342.5 ± 45 กิโลดาลตัน) ให้มีส่วนประกอบดังนี้ น้ำมันปลาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโคโคซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก กวนของผสมอย่างสม่ำเสมอ 15 นาที ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 3 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงที่แอมพลิจูด 15 ไมครอน เป็นเวลา 2 นาที เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำอิมัลชันทุติยภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส

3. ผลของสภาวะแวดล้อมต่อความคงตัว และคุณสมบัติของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ

3.1 ผลของการให้ความร้อน

นำตัวอย่างอิมัลชันปฐมภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และอิมัลชันทุติยภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโคโคซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาด 16×160 มิลลิเมตร นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30, 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาทำให้เย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส

3.2 ผลของการแช่แข็ง

นำตัวอย่างอิมัลชันปฐมภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และอิมัลชันทุติยภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโคโคซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอด

ทดลองพลาสติกขนาด 16×100 มิลลิเมตร นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำการละลายที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาค หยदन้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยदन้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยา กระแส

3.3 ผลของการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

นำอิมัลชันปฐมภูมิ (น้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 15 และเลซิตินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) และ ทูดยภูมิ (น้ำมันปลาร้อยละ 10 เลซิตินร้อยละ 2 และไคโตซานร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก) มาเติม สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0, 50, 100, 200, 300, 500, 750 และ 1000 มิลลิโมลาร์ โดยหลังเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กวนของผสมอย่าง สม่ำเสมอ นาน 15 นาที เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำไป วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคหยदन้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยदन้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส

3.4 ผลของการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

ปรับพีเอชของอิมัลชันปฐมภูมิ และทูดยภูมิด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และ/ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (0.01-1 โมลาร์) ปริมาตรของ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และ/หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไม่เกิน 1 มิลลิลิตร เพื่อให้อิมัลชันมีค่าพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคหยदन้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยदन้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส

4. วิธีการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ

4.1 ขนาดของหยदन้ำมัน

นำตัวอย่างอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ต้องการวิเคราะห์มาเจือจางโดยใช้แอซิเตท บัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3) ให้มีความเข้มข้นของหยदन้ำมันร้อยละ 0.05 โดย

น้ำหนัก ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมสาร ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 10 วินาที ทำการวัดโดยใช้โอมัลชันที่เจือจางแล้วปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้ว (DTS-0012 disposable sizing cuvette) ขนาด 45 x 10 x 10 มิลลิเมตร วิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคหยคน้ำมัน โดยใช้หลักการกระเจิงของแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering) ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zetasizer Nano) ซึ่งวัดอัตราความถี่ขึ้น-ลงของแสงที่กระเจิงออกมาเมื่อยิงแสงเลเซอร์ (633 นาโนเมตร) คำนวณโดยใช้สมการสโตกส์และไอสไน์ (Stokes- Einstein equation) ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) ขนาดอนุภาคหยคน้ำมันที่ได้รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ยึดตามค่าความหนาแน่นของขนาดอนุภาค (% intensity) Z-average (Malvern instruments, 2004)

4.2 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยคน้ำมัน

วัดค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคโดยใช้เทคนิค laser doppler velocimetry (LDV) หลักการของเทคนิคนี้คือการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า คำนวณจากการวัดการเคลื่อนที่ทางอิเล็กโทรโฟเรติก (electrophoretic mobility) โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางทฤษฎีตามสมการของเฮนรี (Henry equation) โดยยิงลำแสงเลเซอร์ (He-Ne 633 นาโนเมตร) ให้อยู่ตรงบริเวณ stationary layer ของเซลล์ที่บรรจุตัวอย่าง นำตัวอย่างโอมัลชันน้ำมันปลาที่ผ่านการวิเคราะห์มาเจือจางโดยใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์ ให้มีความเข้มข้นของหยคน้ำมันร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก นำมาบรรจุในเซลล์บรรจุตัวอย่างที่มีลักษณะรูปร่างเป็นคาพิลลารี ใส่ตัวอย่างให้เต็มเซลล์บรรจุตัวอย่าง นำเข้าเครื่องวัดค่าประจุบนผิวอนุภาค (Zetasizer Nano) โดยค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยคน้ำมันสามารถแสดงถึงความคงตัวของระบบโอมัลชันได้ โดยหากอนุภาคนั้นมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคสูงกว่า 30 มิลลิโวลต์ (ทั้งประจุบวกและลบ) อนุภาคนั้นจะมีแรงผลักระหว่างอนุภาคเนื่องจากแรงทางประจุที่มีค่ามากพอ ทำให้เกิดการผลักกันทางประจุของประจุที่เหมือนกัน อนุภาคไม่เคลื่อนมาใกล้กัน ทำให้ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค (Werner *et al.*, 2009)

4.3 โครงสร้างระดับจุลภาค

นำตัวอย่างโอมัลชันที่เจือจางด้วยอะซิเตทบัฟเฟอร์ (อัตราส่วนโอมัลชันต่ออะซิเตทบัฟเฟอร์เท่ากับ 1:3) มาผสมกับสีย้อมสารละลายโรดามีนบีไอโซโรไอโซยานเนต (ร้อยละ 0.01 ในเอทานอล) ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร หยดของผสมลงในสไลด์หลุม ปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ สังเกต

โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์โดยใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 100 เท่า และเลเซอร์ฮีเลียมนีออน (Helium/Neon) ที่ความยาวคลื่น excitation 543 นาโนเมตร และความยาวคลื่น emission 633 นาโนเมตร ทำการปรับความเข้มของแสงเพื่อให้ได้ภาพที่มีความคมชัด และสามารถสังเกตรายละเอียดได้ชัดเจนขึ้น

4.4 คุณสมบัติด้านวิทยากระแส

วัดคุณสมบัติวิทยากระแสของตัวอย่างอิมัลชันด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ชนิดหมุน (rotational rheometer; Physica MCR 301, Anton Paar) การเปลี่ยนความเร็วของการหมุน (spindle rotational speed) หมายถึงการเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนืด นำตัวอย่างอิมัลชันปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกวัดแบบเดี่ยว (single gap-measuring cylinder : CC27) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ cup และ bob เท่ากับ 28.92 และ 26.66 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำการวัดโดยเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) 2-150 วินาที⁻¹ ควบคุมอุณหภูมิระหว่างการวัดที่ 25 ± 0.3 องศาเซลเซียส สังเกตและบันทึกค่าความหนืดและความเค้นเฉือน (shear stress) เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน นำค่าที่ได้มาแทนในสมการ Power Law

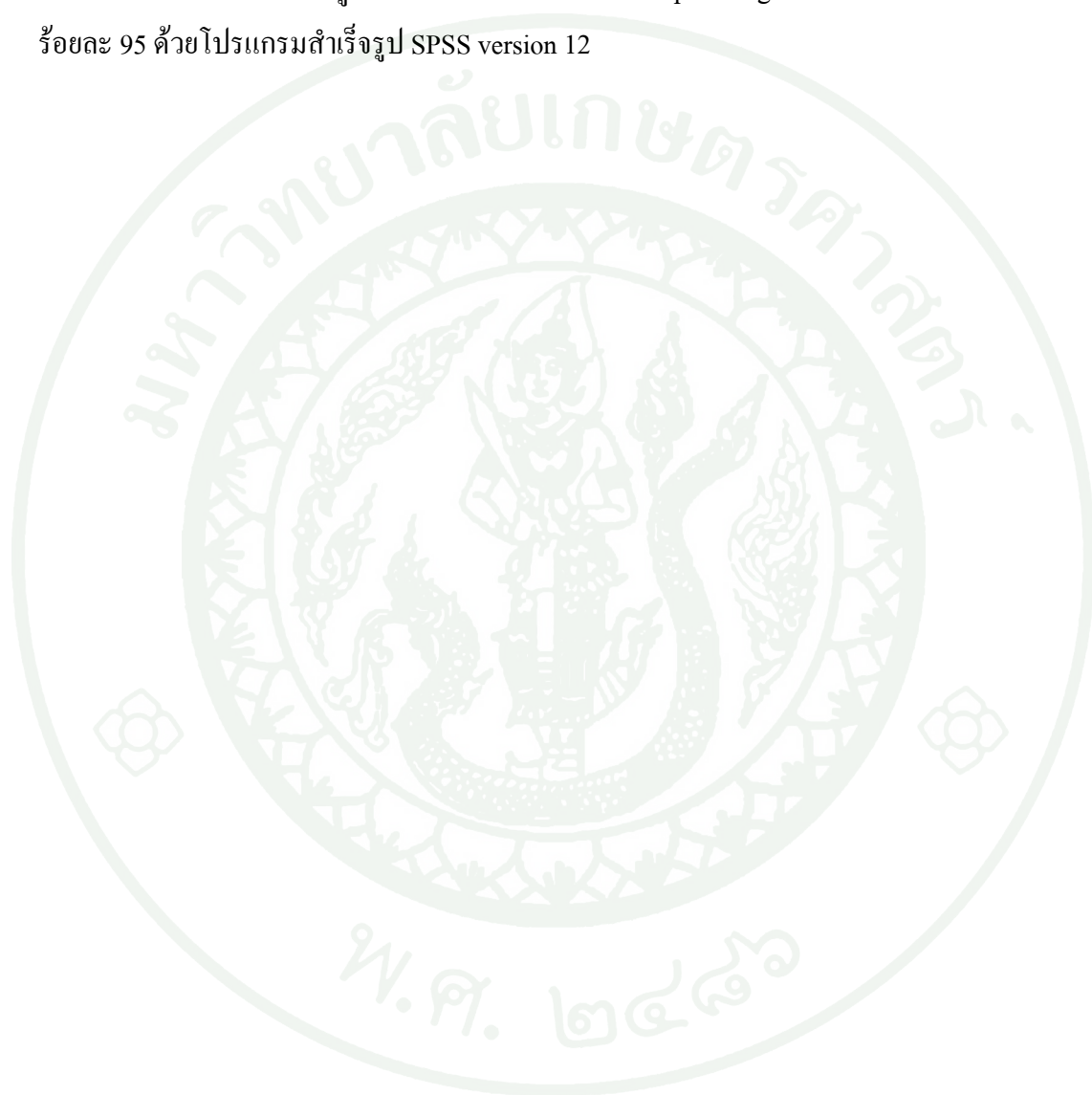
$$\sigma = k (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

โดย σ คือ ความเค้นเฉือน (หน่วยเป็นปาสคาล, Pa)
 $\dot{\gamma}$ คือ อัตราการเฉือน (หน่วยเป็น วินาที⁻¹, s⁻¹)
 n คือ ดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)
 k คือ สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด (consistency index, Pa sⁿ)

ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index , n) สามารถนำมาใช้พิจารณาพฤติกรรมการไหลของอิมัลชัน เมื่อดัชนีพฤติกรรมการไหล มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (newtonian) ดัชนีพฤติกรรมการไหลมีค่าน้อยกว่า 1 มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ชนิด shear thinning และดัชนีพฤติกรรมการไหลมากกว่า 1 มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนชนิด shear thickening ส่วนสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด (consistency index; k) บ่งบอกความหนืดของตัวอย่างที่อัตราการเฉือนที่ 1 วินาที⁻¹ (Rao, 1999)

4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติจากแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Random Design; CRD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 12



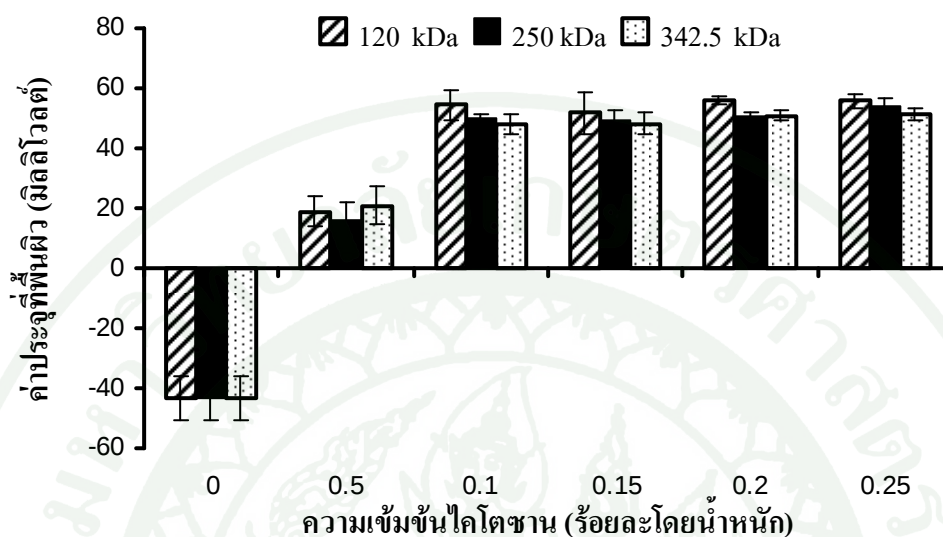
ผลและวิจารณ์

1. ผลของไคโตซานต่อความคงตัว และคุณสมบัติของอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิติน (อิมัลชันปฐมภูมิ)

การทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดโมเลกุล และความเข้มข้นไคโตซานต่อคุณสมบัติของอิมัลชันปฐมภูมิที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิติน โดยใช้ไคโตซานที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (LMW; 120 ± 98 kDa) กลาง (MMW; 250 ± 60 kDa) และใหญ่ (HMW; 342.5 ± 45 kDa) ที่ระดับความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก เมื่อสังเกตค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน อิมัลชันปฐมภูมิจึงมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันเป็นลบ (-43.2 ± 7.27 มิลลิโวลต์) เนื่องจากประจุลบของเลซิตินที่ห่อหุ้มหยดน้ำมัน เมื่อเติมไคโตซานลงในอิมัลชันทำให้ประจุบนผิวอนุภาคหยดน้ำมันเปลี่ยนเป็นบวก และมีแนวโน้มคงที่ที่ระดับความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ($p > 0.05$) (ภาพที่ 15) จากผลแสดงให้เห็นว่าไคโตซาน (pK_a ประมาณ 6.5) มีประจุบวก เนื่องจากการแตกตัวของหมู่เอมีน (Hall, 2009) สามารถดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันที่มีประจุลบในอิมัลชันปฐมภูมิที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิตินด้วยแรงทางประจุ (Ogawa *et al.*, 2003a, 2003b, 2004)

การเติมไคโตซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ในทุกขนาดโมเลกุลไคโตซานมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันประมาณ 20 มิลลิโวลต์ เนื่องจากปริมาณไคโตซานอาจไม่เพียงพอต่อการดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคได้ทั้งหมด (Mun *et al.*, 2005) และอัตราส่วนโดยมวลระหว่างไคโตซานและเลซิตินมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนโดยมวลระหว่างไคโตซานและเลซิตินที่ทำให้ประจุสุทธิของอนุภาคหยดน้ำมันมีค่าเท่ากับศูนย์ (ไคโตซานประมาณ 0.05 กรัมต่อเลซิติน 1 กรัม) (Ogawa *et al.*, 2003b) จึงทำให้มีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคน้อย (ภาพที่ 15) เมื่อเติมปริมาณไคโตซานขนาดโมเลกุลเล็ก กลาง และใหญ่เพิ่มมากขึ้น (มากกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก) ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18.8, 16.2 และ 21.0 มิลลิโวลต์ เป็น 54.6, 49.8 และ 46.9 มิลลิโวลต์ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ ก1) แสดงถึงการดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันของไคโตซานที่ครอบคลุมทั้งหมด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ogawa *et al.* (2003b) ที่มีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันประมาณ 50 มิลลิโวลต์ เมื่ออัตราส่วนโดยมวลไคโตซาน 0.1 กรัมต่อเลซิติน 1 กรัม และมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไคโตซานในอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิติน-ไคโตซาน และเมื่อสังเกตถึงค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาดโมเลกุลต่างๆ ที่ความเข้มข้นไคโตซานเดียวกัน

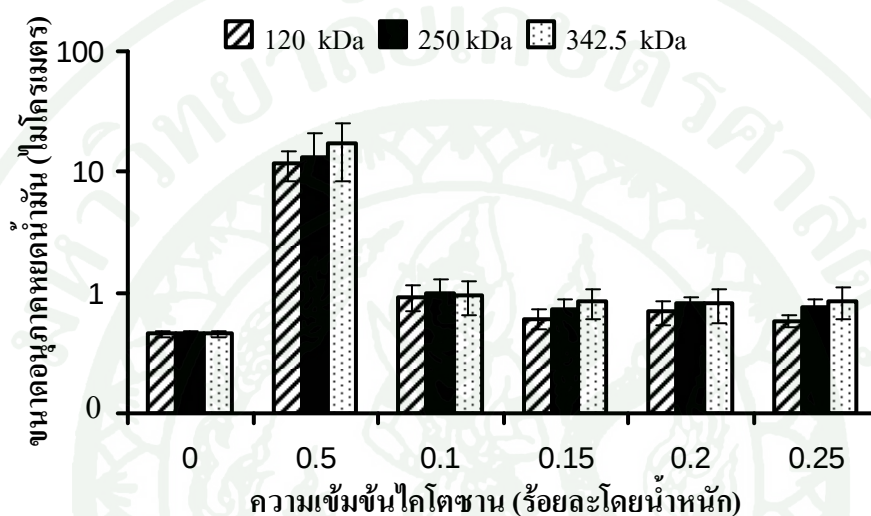
ไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็กมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมากกว่าไคโตซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mun *et al.* (2006)



ภาพที่ 15 ผลของขนาดโมเลกุล และความเข้มข้นไคโตซานต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

อนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิมีขนาด 0.454 ± 0.025 ไมโครเมตร (ตารางผนวกที่ ก2) เมื่อเติมไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.630, 0.770 และ 0.840 ไมโครเมตร ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ประมาณ 11.719, 13.257 และ 17.125 ไมโครเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 16) เนื่องจากปริมาณไคโตซานที่ไม่มากพอต่อการดูดซับเพื่อห่อหุ้มพื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันได้ทั้งหมด จึงทำให้มีอนุภาคหยดน้ำมันส่วนที่ไม่มีการดูดซับไคโตซานมีประจุเป็นลบ เมื่ออนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนเข้ามาใกล้กัน ส่วนที่มีประจุลบของอนุภาคหยดน้ำมันอนุภาคหนึ่งเกิดการดึงดูดกันในระหว่างการเตรียมอิมัลชันด้วยแรงทางประจุกับส่วนที่มีประจุบวกของอีกอนุภาคหยดน้ำมันหนึ่ง และเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันแบบ bridging flocculation (Mun *et al.*, 2005) นอกจากนี้ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมีค่าน้อย (ประมาณ 20 มิลลิโวลต์) (ภาพที่ 15) จึงทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันไม่มากพอในการขัดขวางการเคลื่อนเข้ามาใกล้กันของอนุภาคหยดน้ำมัน เมื่อเพิ่ม

ระดับความเข้มข้นไคโตซานอนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดลดลงโดยมีแนวโน้มคงที่ที่ระดับความเข้มข้นไคโตซานตั้งแต่ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ($p>0.05$) เนื่องจากมีปริมาณไคโตซานและความแรงของประจุบวกที่มากเพียงพอ ทำให้เกิดแรงผลักทางประจุระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน สามารถชะลอการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน จึงทำให้อิมัลชันรักษาความคงตัวไว้ได้ (Ogawa *et al.*, 2003b; Mun *et al.*, 2005)

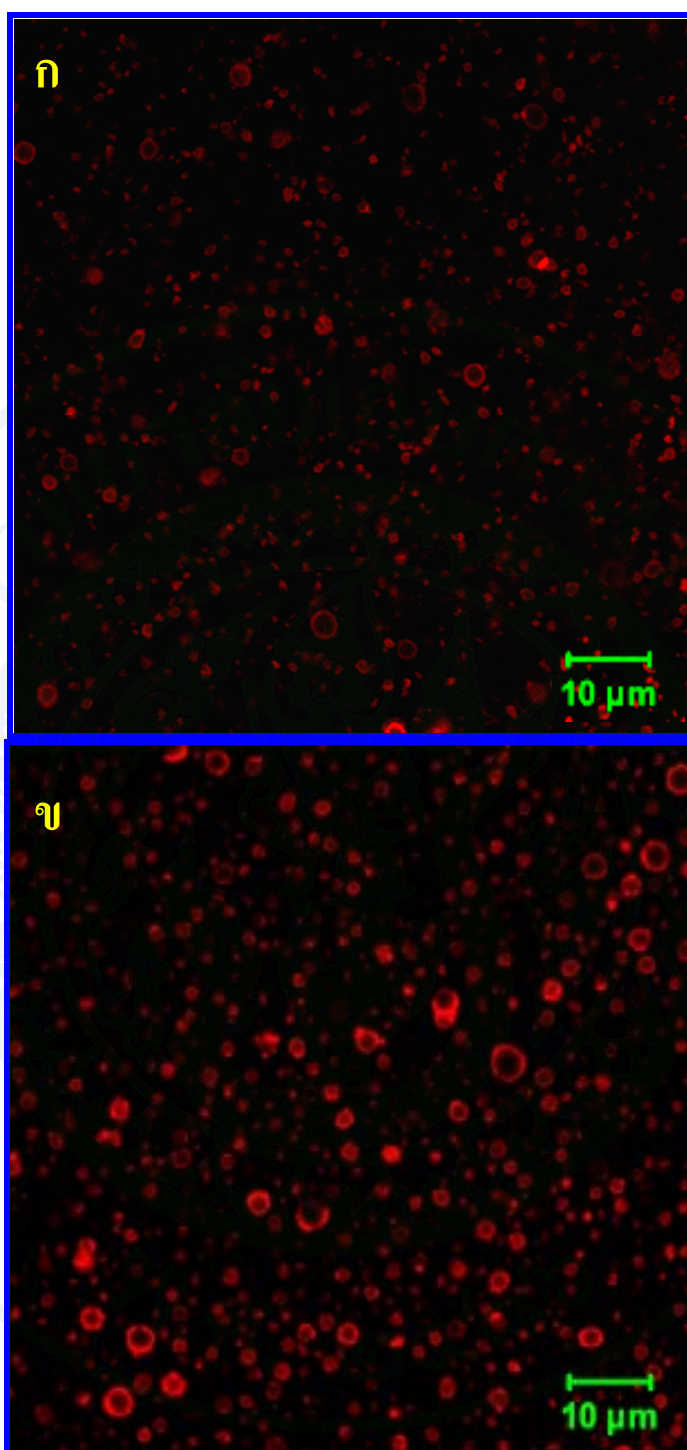


ภาพที่ 16 ผลของขนาดโมเลกุล และความเข้มข้นไคโตซานต่อขนาดอนุภาคในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

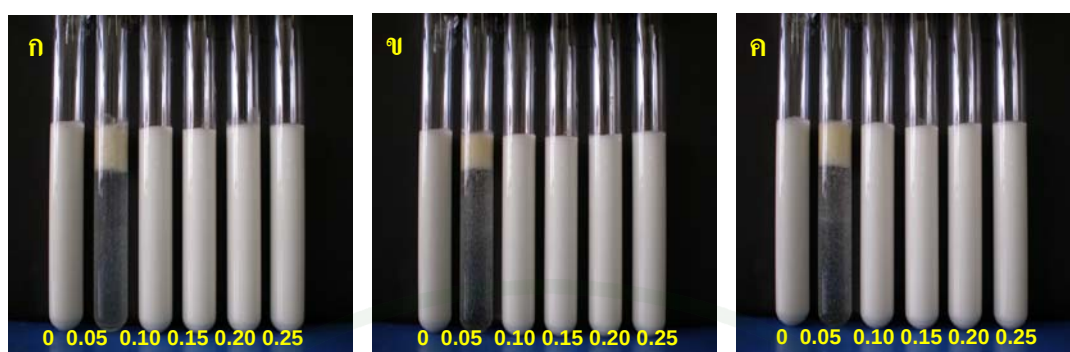
อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็กมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเล็กกว่าไคโตซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน (ความเข้มข้นไคโตซานมากกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) (ภาพที่ 16) อาจเนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็ก ทำให้สามารถเข้าไปดูดซับห่อหุ้มที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันได้ทั้งอนุภาคหยดน้ำมันรวดเร็วกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ (McClements, 2005) ที่อาจเกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลไคโตซาน ทำให้เคลื่อนที่ไปดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันได้ไม่เร็วพอ หยดน้ำมันอาจเกิดการหลอมรวมตัวกันก่อนการดูดซับของไคโตซาน ดังนั้นจึงมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่ใหญ่ และนอกจากนี้วิธีการเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิที่มีการใช้คลื่นเสียงพลังงานสูง (sonication) ในการทำลายการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของขนาดอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันทุติยภูมิที่เตรียมโดยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็กมากกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ (Tang *et al.*, 2003) คลื่นเสียงพลังงานสูง ที่ปล่อย

ออกมาสามารถเข้าไปทำลายตัด หรือแยกโมเลกุลไคโตซานได้ โดยโมเลกุลไคโตซานหนึ่งโมเลกุล อาจดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมากกว่าหนึ่งอนุภาคหยดน้ำมัน ดังนั้นการใช้คลื่นเสียง พลังงานสูงจึงทำให้ไคโตซานมีขนาดโมเลกุลเล็กลง และทำลายการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยด น้ำมัน อนุภาคหยดน้ำมันจึงมีขนาดเล็กลง (Ogawa *et al.*, 2003b) ไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็กอาจ ทำได้ง่ายกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ในระยะเวลาสั้น (2 นาที) เนื่องด้วยขนาดและความยาวของโมเลกุล ไคโตซานที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการวิจัยรายงานว่าการใช้คลื่นเสียงพลังงานสูงมีผลในการลดขนาด โมเลกุลของไคโตซานที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้เร็วกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ (Chen *et al.*, 1997; Tang *et al.*, 2003; Czechowska-Biskup *et al.*, 2005) ด้วยเหตุนี้อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็กจึงมีอนุภาคหยดน้ำมันที่เล็กกว่าไคโตซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ตามลำดับ

เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ พบว่าเลซิทีน และไคโตซานที่มีหมู่เอมีนติดสีย้อมโรดามีนบีไอโซโรไอโซยานตเห็นเป็นสีแดง (Hsieh *et al.*, 2005) ภูมิภาคต่อเนื่องและหยดน้ำมันเป็นสีดำ (ไม่ติดสีย้อม) อนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ มีลักษณะชั้นผิวสัมผัสที่บางเรียบตลอดทั้งอนุภาค (ภาพที่ 17ก) และไม่มีการเกาะกลุ่มกัน ซึ่ง สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน และเมื่อเติมไคโตซานทำให้ชั้นผิวสัมผัสอนุภาคหยดน้ำมันมี ความหนาเพิ่มขึ้น แต่มีลักษณะขรุขระไม่เรียบ (ภาพที่ 17ข) จากค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน แสดงให้เห็นว่าชั้นผิวสัมผัสที่หนาขึ้นเกิดจากไคโตซานที่ดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน เมื่อเพิ่ม ความเข้มข้นไคโตซานความหนาของชั้นผิวสัมผัส และขนาดอนุภาคหยดน้ำมันไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน ยกเว้นที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการรวมตัวกัน และเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 18) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน (ภาพที่ 16) ส่วนไคโตซานที่มีขนาดโมเลกุลต่างกัน ไม่มี ผลต่อลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุติยภูมิ การเติมไคโตซานที่ความเข้มข้นเท่ากัน อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดอนุภาค และความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดกลาง (250 ± 60 kDa) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก (ข)



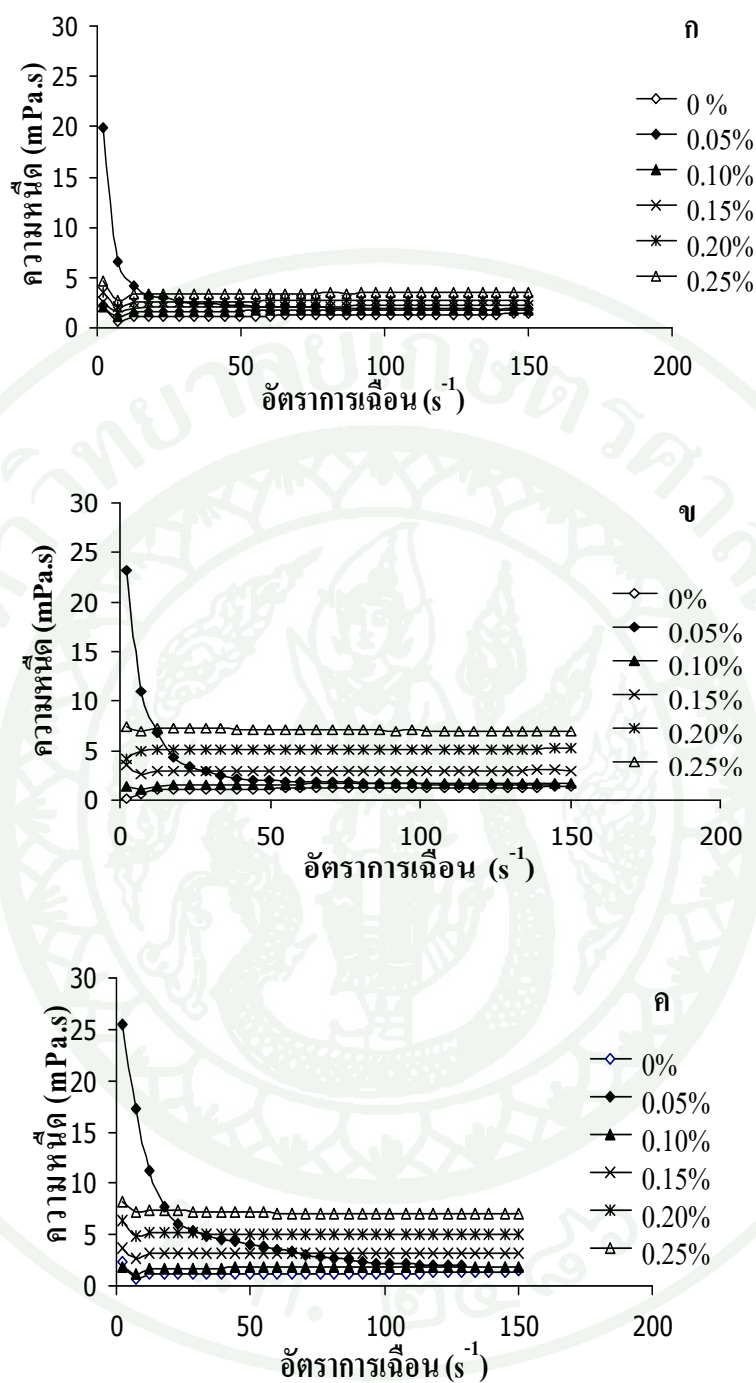
ภาพที่ 19 ลักษณะปรากฏ และการแยกชั้นของอิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ก) กลาง (ข) และใหญ่ (ค) ที่ความเข้มข้นโคโคซานต่างๆ หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏของอิมัลชันทุติยภูมิที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก เกิดการแยกชั้นโดยมีส่วนของเหลวใสอยู่ด้านล่าง ส่วนด้านบนมีลักษณะเป็นครีมสีขาว ออกเหลืองขุ่น (ภาพที่ 19) การแยกชั้นที่เกิดขึ้นในอิมัลชันทุติยภูมิที่เตรียมโดยใช้โคโคซานความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก เกิดจากการที่เติมโคโคซานลงไปปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคได้ทั้งหมด ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ต่างกัน (Mun *et al.*, 2005) อนุภาคหยดน้ำมันจึงเกิดการเกาะกลุ่มกันเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเนื่องจากความต่างของความหนาแน่น จึงเกิดชั้นครีมขึ้นด้านบนของหลอดทดลอง ส่วนอิมัลชันปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่เติมโคโคซานความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก มีความคงตัวต่อการแยกชั้น โดยอิมัลชันมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นนม เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาคดังกล่าวข้างต้น

การศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสนของอิมัลชัน โดยการวัดค่าความหนืดต่ออัตราการเฉือน คำนวณดัชนีพฤติกรรมการไหล และสัมประสิทธิ์ความขึ้นหนืดด้วยสมการ Power law โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโคโคซานมากขึ้น อิมัลชันทุติยภูมิมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ (ภาพที่ 20) สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความขึ้นหนืดซึ่งแสดงถึงความหนืดของอิมัลชันที่อัตราการเฉือน 1 วินาที^{-1} ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นโคโคซานเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3) เนื่องจากความหนืดของสารละลายโคโคซานในวัฏภาคต่อเนื่องที่เพิ่มขึ้น (Desbrieres, 2002) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sovilj and Petrovic' (2006) โดยอิมัลชันน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำให้คงตัวด้วย hydroxypropylmethyl cellulose-โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เมื่อเติมความเข้มข้นของ

hydroxypropylmethyl cellulose และ โซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเพิ่มขึ้น ความหนืดของวุ้นภาคต่อเนื่องเพิ่มขึ้น อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับการเติมมอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin), แซนแทน (xanthan) และเพคติน (Akhtar *et al.*, 2005, 2006) ที่แต่ละระดับความเข้มข้นโคโคซาน ความหนืดมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (2-150 วินาที⁻¹) ซึ่งแสดงว่ามีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Rao, 1999) เนื่องจากอิมัลชันมีปริมาณอนุภาคหยดน้ำมันน้อย (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) จึงจัดเป็นอิมัลชันเจือจาง (diluted emulsion) อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก และไม่เกิดการเกาะกลุ่มกัน มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ (Brownian motion) เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (McClements, 2005) สอดคล้องกับค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลที่คำนวณตามสมการ Power Law มีค่าประมาณ 1 (ตารางที่ 3) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Martin-González, 2009) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจประมาณ 0.990 ซึ่งแสดงว่าสมการนี้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด ความเค้นเฉือน และอัตราการเฉือน ได้ร้อยละ 90 แต่ยกเว้นตัวอย่างอิมัลชันทุติยภูมิที่เติมโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล 0.667, 0.417 และ 0.532 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (Rao, 1999) เนื่องจากว่าอนุภาคหยดน้ำมันเกาะกลุ่มกัน จึงมีความหนืดมากเมื่อให้อัตราการเฉือนในช่วงแรกแต่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนอนุภาคหยดน้ำมันที่เกาะกลุ่มเริ่มหลุดแยกออกจากกัน ทำให้ความหนืดลดลงตามลำดับ (McClements, 2005)

เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดโมเลกุลต่อสมบัติทางวิทยากระแสน พบว่าที่ความเข้มข้นเดียวกัน ตัวอย่างอิมัลชันที่เติมโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็กมีความหนืดน้อยกว่าอิมัลชันที่เติมโคโคซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ ตามลำดับ (ภาพที่ 20 และตารางที่ 3) เนื่องจากสารละลายโคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และการเกิดอันตรกิริยาทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลมากกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้มีความหนืดสูง (Kofuji, 2005; Venugopal, 2009) ซึ่งค่าความหนืดของวุ้นภาคต่อเนื่องจะส่งผลต่อความหนืดของอิมัลชัน เมื่อวุ้นภาคต่อเนื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้น อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (Menon and Wason, 1983)



ภาพที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเฉือนของอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตะซานความเข้มข้น ร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก และโมเลกุลขนาดเล็ก (ก) กลาง (ข) และใหญ่ (ค)

ตารางที่ 3 ค่าความหนืด ดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสีนใจของอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานความเข้มข้นและโมเลกุลขนาดต่างๆ

ขนาดโมเลกุล ไคโตซาน	ความเข้มข้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ดัชนีพฤติกรรม การไหล n	สัมประสิทธิ์การ ตัดสีนใจ R ²	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
ขนาดเล็ก (120 ±98 กิโลดาลตัน)	0.00	1.021±0.06	0.968	0.0011
	0.05	0.667±0.34	0.922	0.0083
	0.10	1.057±0.12	0.983	0.0013
	0.15	1.034±0.08	0.992	0.0019
	0.20	1.009±0.04	0.992	0.0026
	0.25	0.995±0.02	0.994	0.0035
ขนาดกลาง (250±60 กิโลดาลตัน)	0.00	1.021±0.06	0.968	0.0011
	0.05	0.417±0.08	0.969	0.0232
	0.10	1.082±0.01	0.997	0.0012
	0.15	0.997±0.03	0.995	0.0029
	0.20	1.034±0.03	0.998	0.0045
	0.25	0.999±0.04	0.999	0.0074
ขนาดใหญ่ (342.5 ± 45)	0.00	1.021±0.06	0.968	0.0011
	0.05	0.532±0.09	0.915	0.1809
	0.10	1.099±0.16	0.983	0.0012
	0.15	1.007±0.04	0.996	0.0031
	0.20	0.974±0.01	0.997	0.0057
	0.25	0.975±0.01	0.999	0.0078

จากผลขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแส พบว่าการเติมไคโตซานที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ได้อิมัลชันทุติยภูมิที่มีความคงตัวต่อการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน และความคงตัวต่อการแยกชั้น โดยอิมัลชันมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เล็ก (น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร) ค่าประจุพื้นผิวอนุภาคที่มากเพียงพอต่อการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน (มากกว่า 30 มิลลิโวลต์) (Werner

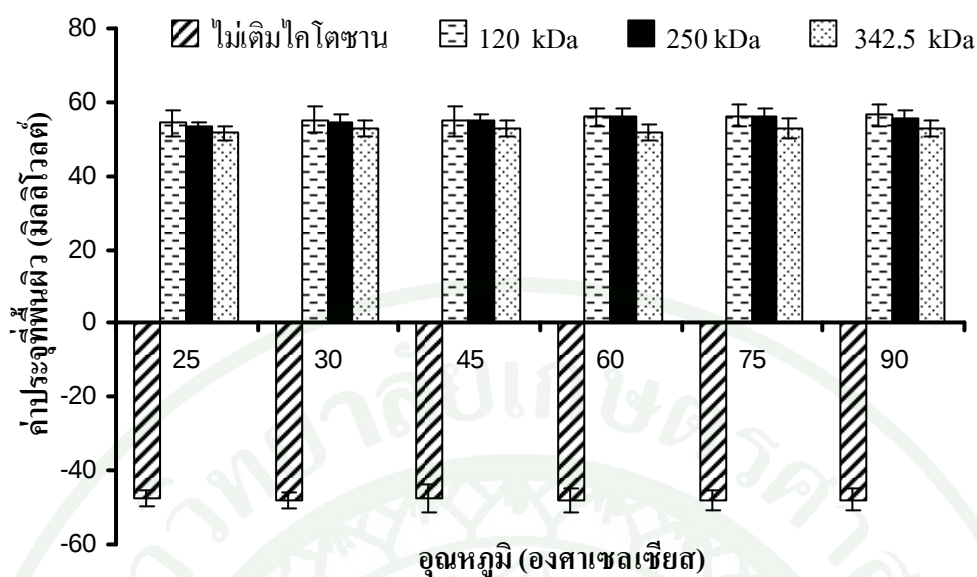
et al., 2009) ดังนั้นในการศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมต่อคุณสมบัติของอิมัลชันทุติยภูมิจึงใช้ ไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้ไคโตซานมีปริมาณมากพอต่อการดูดซับที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันได้ทั่วทั้งอนุภาค และมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคที่มากพอในการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน

2. ผลของสภาวะแวดล้อมต่อความคงตัวและคุณสมบัติของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ

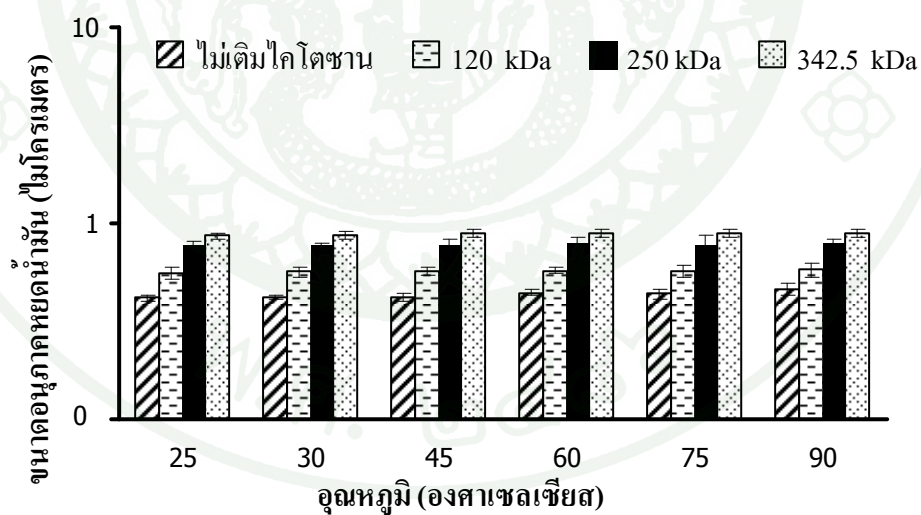
2.1 ผลของการให้ความร้อน

ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ต่อความคงตัว และคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐมภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และทุติยภูมิ (เลซิทีนร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่อิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลง ($p > 0.05$) อิมัลชันปฐมภูมิ และอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ มีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันประมาณ -47.86, 55.48, 55.06 และ 52.44 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 21)

อนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิมิขนาดใหญ่มากขึ้น ($p \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่า 45 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 0.416 ไมโครเมตร (25 องศาเซลเซียส) เป็น 0.464 ไมโครเมตร (90 องศาเซลเซียส) (ภาพที่ 22) ซึ่งอาจเกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อคุณลักษณะของเลซิทีน เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ของหมู่ hydrophilic ในโมเลกุลเลซิทีน ทำให้ความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ลดลง เกิดการเกาะกลุ่มของหยดน้ำมัน และอาจเกิดการหลอมรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมันต่อมา ส่งผลให้หยดน้ำมันมีขนาดใหญ่มากขึ้น (Ogawa *et al.*, 2003a)

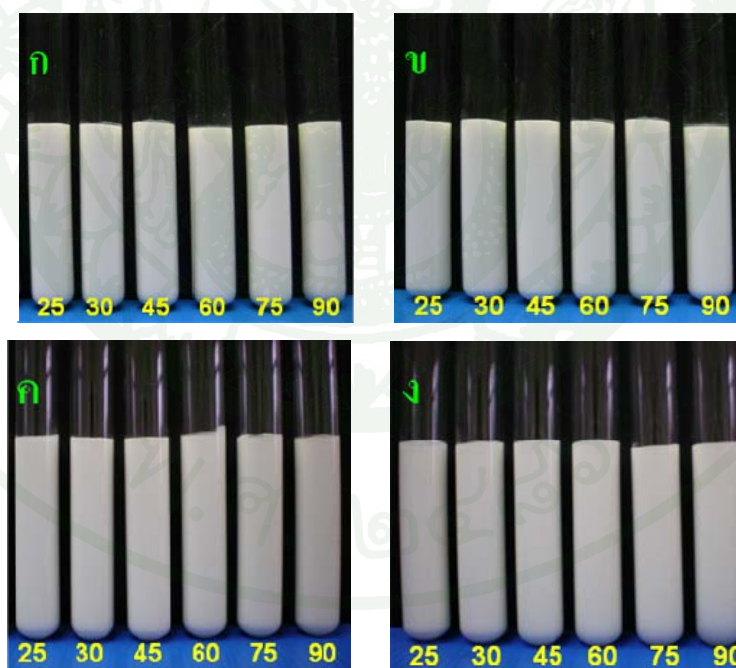


ภาพที่ 21 ผลของการให้ความร้อน (25-90 องศาเซลเซียส) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดนํ้ามันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

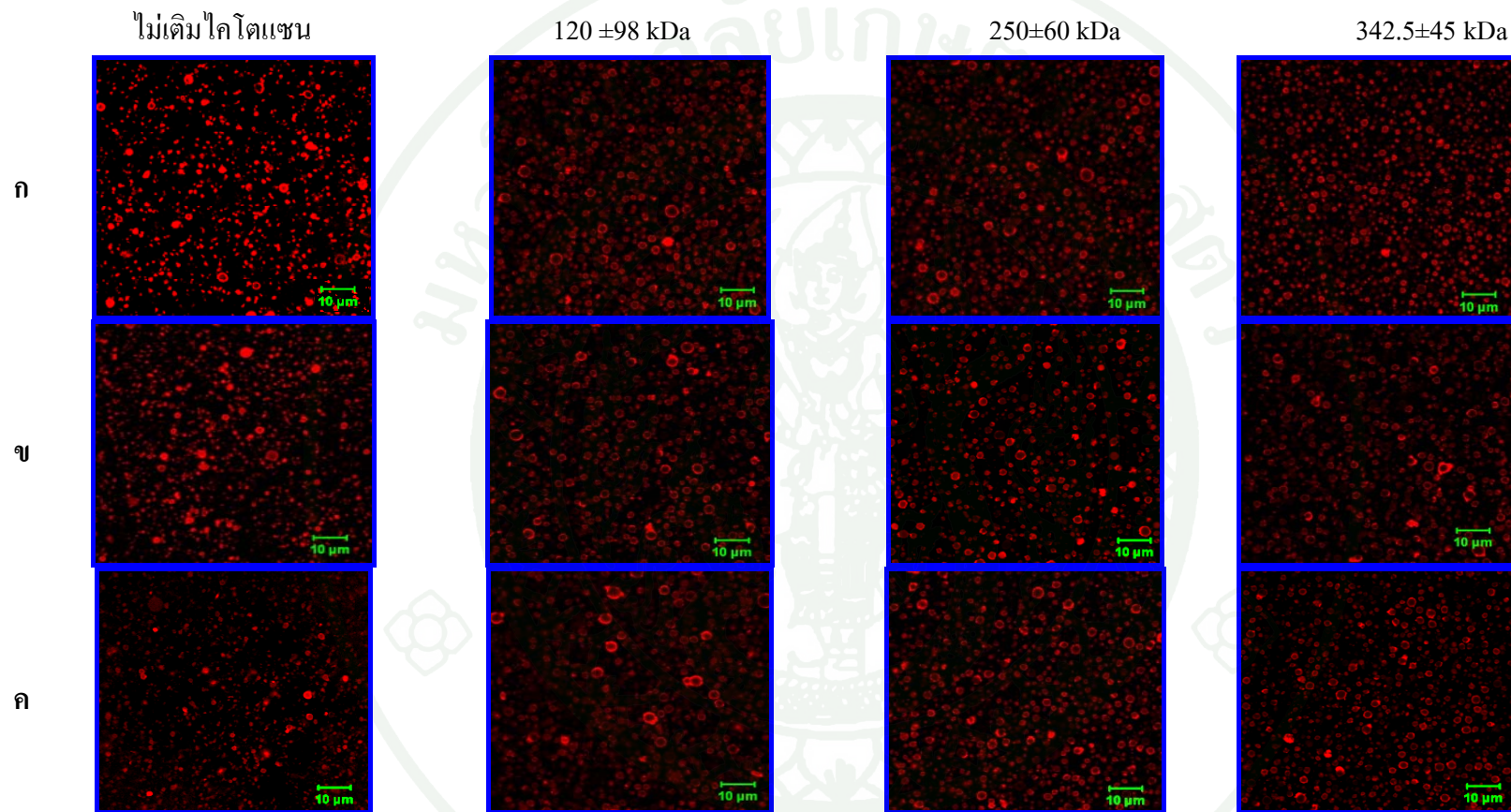


ภาพที่ 22 ผลของการให้ความร้อน (25-90 องศาเซลเซียส) ต่อขนาดอนุภาคหยดนํ้ามันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

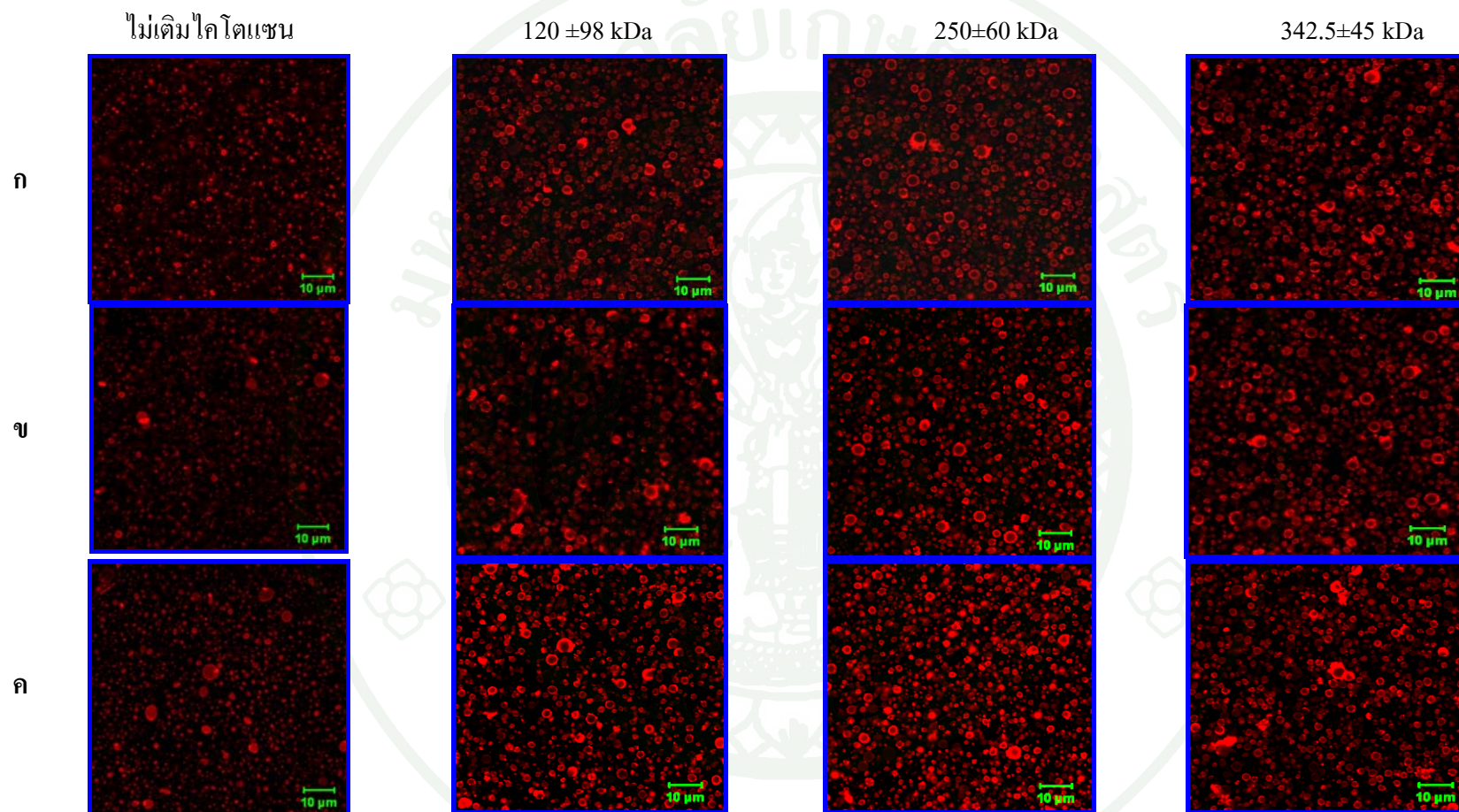
ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิที่ทุกขนาดโมเลกุลโคโคซาน ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันไม่เปลี่ยนแปลง ($p>0.05$) หลังผ่านการให้ความร้อน (ภาพที่ 22) อาจเนื่องจากการห่อหุ้มหยดน้ำมันด้วยโคโคซาน เป็นการป้องกันเลซิติน ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อผ่านการให้ความร้อน และอิมัลชันทุติยภูมิมีแรงผลักทางประจุ (electrostatic repulsion) ระหว่างประจุบวกของอนุภาคหยดน้ำมัน มากกว่าอิมัลชันปฐมภูมิ (ภาพที่ 21) ทำให้มีความคงตัวต่อการเกิดการรวมกลุ่มหยดน้ำมันได้ดีกว่า (Ogawa *et al.*, 2003a) และเมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอล เลเซอร์ (ภาพที่ 24) อิมัลชันทุติยภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนโครงสร้างหลังจากให้ความร้อน อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเท่าเดิม พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันคงมีลักษณะที่ขรุขระ และมีความหนาแน่นเดิม ซึ่งสอดคล้องกับค่าขนาดอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันทุติยภูมิ ส่วนอิมัลชันปฐมภูมิมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน (ภาพที่ 24 และ 25) และอนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดชั้นน้ำมันที่ผิวหน้าอิมัลชันปฐมภูมิหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 23 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 30-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 24 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแตกต่างกัน: 25 (ก) 30 (ข) และ 45 องศาเซลเซียส (ค)

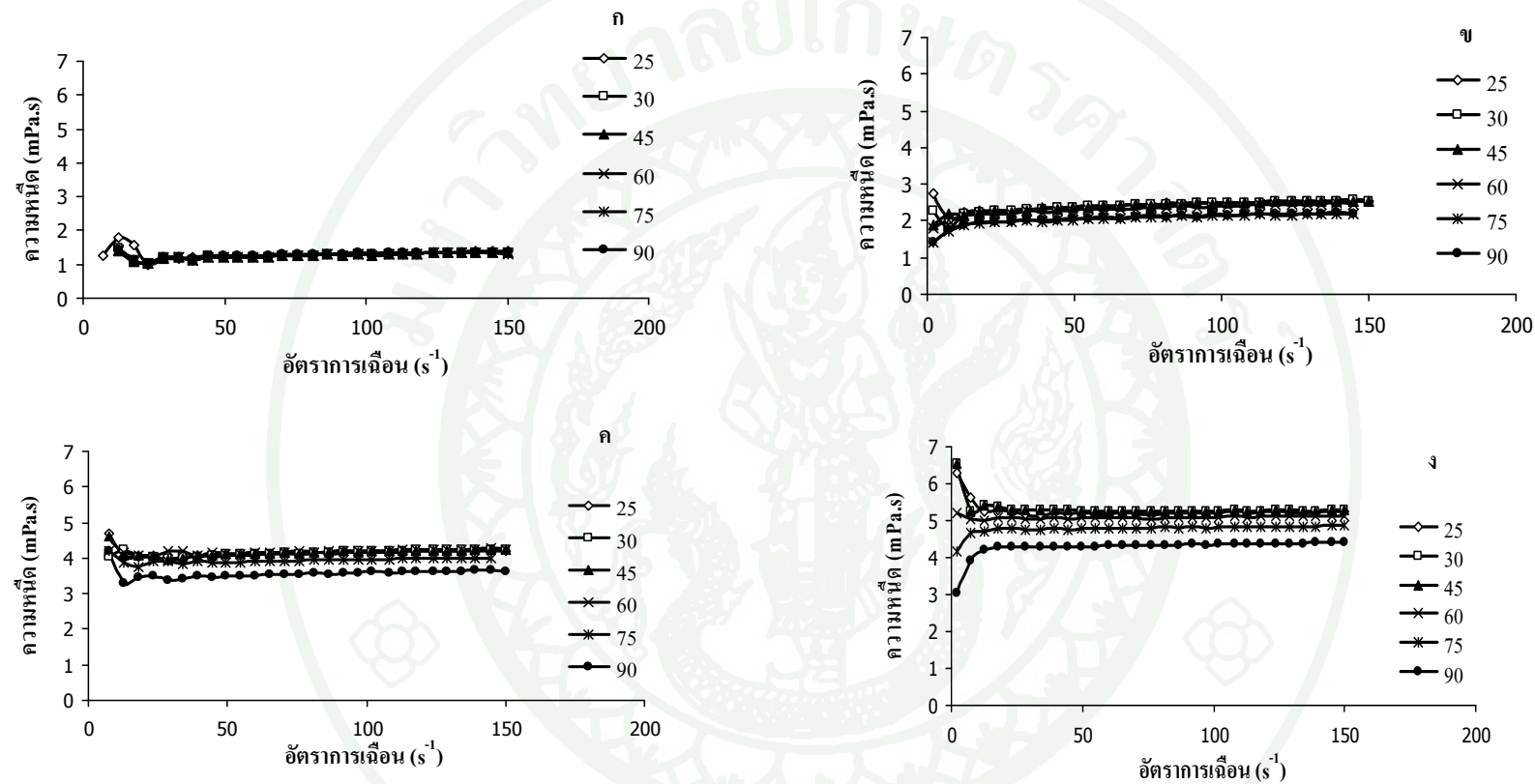


ภาพที่ 25 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และหุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแตกต่างกัน: 60 (ก) 75 (ข) และ 90 องศาเซลเซียส (ค)

เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันปฐมภูมิที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ต่างกัน (25-90 องศาเซลเซียส) ไม่มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน (ภาพที่ 26) หลังให้ความร้อน และอิมัลชันมีความหนืดคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (2-150 วินาที⁻¹) ที่ทุกระดับอุณหภูมิในการให้ความร้อนแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน สอดคล้องกับ ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (ตารางที่ 4) เมื่อสังเกตผลของการให้ความร้อนต่อขนาดอนุภาคหยด น้ำมัน อิมัลชันปฐมภูมิมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงอาจเนื่องจากขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากการหลอมรวมตัวกัน แต่ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก (ประมาณ 0.460 ไมโครเมตร) รวมทั้งจำนวนอนุภาคหยดน้ำมันที่หลอมรวมกันที่กระจายตัวอยู่ในอิมัลชันนั้นมีจำนวนน้อย (ภาพที่ 25) เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนความหนืดจึงคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Pal (2000) ที่รายงานว่าขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันปิโตรเลียม (petroleum oil) ที่เล็กกว่า 0.600 ไมโครเมตร มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน

ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิที่ทุกขนาดโมเลกุล เมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่า 60 องศาเซลเซียส อิมัลชันมีความหนืดลดลง (ภาพที่ 26) อาจเนื่องมาจากความร้อนสูง มีผลต่อพันธะระหว่างโมเลกุลในอิมัลชันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นความหนืดจึงลดลง (Bao, 2000) และเมื่อคำนวณค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลตามสมการ Power Law ได้ค่าประมาณ 1 (ตารางที่ 4) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียนทุกระดับอุณหภูมิในการให้ความร้อน ซึ่งแสดงว่าอิมัลชันมีความคงตัวต่อการเกาะกลุ่ม และคงตัวต่อการแยกชั้น (McClements, 2005) สอดคล้องกับค่าขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

ในการวัดค่าสมบัติด้านวิทยากระแสที่อัตราการเฉือนต่ำ พบว่า กราฟที่ได้มีค่าไม่คงที่มีค่าขึ้นลง เนื่องจากเวลาในการวัดค่าความหนืดแต่ละจุดที่กำหนดให้มีเวลาไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนความเร็วของการหมุนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนอัตราการเฉือน ดังนั้นจึงให้ค่าความหนืดที่แกว่งขึ้นลง จึงตัดค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนต่ำ เพื่อให้กราฟที่ได้มีค่าสม่ำเสมอ



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ผ่านการให้ความร้อน ที่ 25-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจ ของอิมัลชันปฐุมภูมิ และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดต่างๆ ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 25-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

ขนาดโมเลกุลไคโตซาน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ดัชนีพฤติกรรม การไหล n	สัมประสิทธิ์การ ตัดสั่นใจ R ²	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
ไม่เติมไคโตซาน	25	1.032±0.13	0.965	0.0013
	30	1.113±0.01	0.937	0.0008
	45	1.127±0.01	0.996	0.0008
	60	1.106±0.01	0.996	0.0009
	75	1.110±0.01	0.996	0.0008
	90	1.100±0.01	0.966	0.0009
ขนาดเล็ก (120 ±98 กิโลดาลตัน)	25	1.025±0.01	0.997	0.0022
	30	1.056±0.01	0.998	0.0019
	45	1.062±0.01	0.999	0.0019
	60	1.072±0.01	0.999	0.0017
	75	1.105±0.01	0.998	0.0013
	90	1.106±0.01	0.998	0.0013
ขนาดกลาง (250±60 กิโลดาลตัน)	25	1.025±0.01	0.999	0.0037
	30	1.019±0.01	0.998	0.0038
	45	1.023±0.01	0.999	0.0038
	60	1.017±0.01	0.999	0.0039
	75	1.005±0.03	0.998	0.0038
	90	1.035±0.01	0.999	0.0031

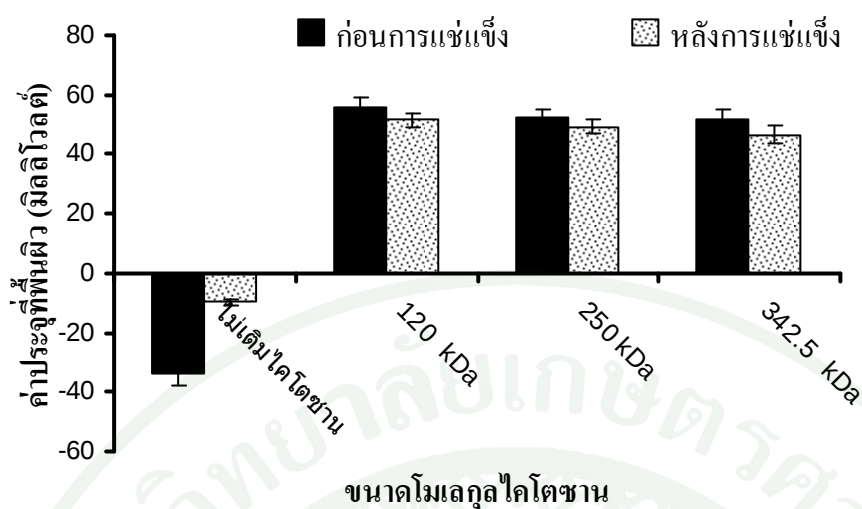
ตารางที่ 4 (ต่อ)

ขนาดโมเลกุล ไคโตซาน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ดัชนีพฤติกรรม การไหล	สัมประสิทธิ์การ ตัดสั่นใจ	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืดข
		n	R ²	K (Pa.s ⁿ)
ขนาดใหญ่ (342.5 ± 45 กิโกลดาลตัน)	25	0.999±0.02	0.999	0.0052
	30	0.978±0.04	0.999	0.0059
	45	0.972±0.02	0.999	0.0059
	60	1.000±0.01	0.999	0.0056
	75	1.011±0.01	1.000	0.0046
	90	1.024±0.01	0.999	0.0039

จากผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อน อิมัลชันทุติยภูมิมีความคงตัวที่ดี ไม่เกิดการแยกชั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ทั้งด้านโครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติด้านวิทยากระแส ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่มีการให้ความร้อนสูง (75-90 องศาเซลเซียส) อาทิเช่น การปรุงให้สุก การแปรรูป การฆ่าเชื้อ (การพาสเจอร์ไรส์) และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (formulation) เป็นต้น

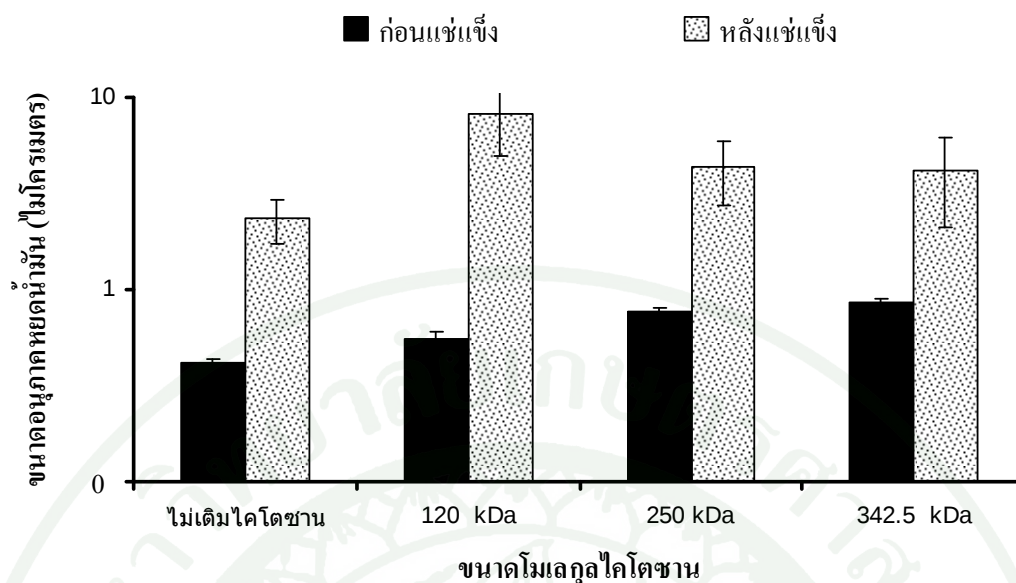
2.2 ผลของการแช่แข็ง

ศึกษาผลของการแช่แข็งต่อความคงตัว และคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐมภูมิ (เลซิตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และทุติยภูมิ (เลซิตินร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) โดยนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง จากนั้นทำละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันปฐมภูมิ และทุติยภูมิมีค่าลดลงหลังจากผ่านการแช่แข็ง ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 27) อาจเนื่องจากเมื่อนำอิมัลชันไปแช่แข็งแล้วนั้น ส่วนของน้ำได้กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ทำให้มีค่าแรงทางไอออนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำบางส่วนในวัฏภาคต่อเนื่องเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ทำให้ปริมาณน้ำในวัฏภาคต่อเนื่องลดลง ความเข้มข้นของไอออนที่ละลายในวัฏภาคต่อเนื่องจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันมีค่าลดลง (Ogawa *et al*, 2003a)



ภาพที่ 27 ผลของการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

เมื่อสังเกตขนาดอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันปฐมภูมิ และทุติยภูมิพบว่า มีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (มากกว่า 2 ไมโครเมตร) (ภาพที่ 28) อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจเป็นได้หลายประการ ประการแรก เมื่อนำอิมัลชันไปแช่แข็งแล้วนั้น ส่วนของน้ำซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง น้ำในวัฏภาคต่อเนื่องที่ไม่เกิดผลึกน้ำแข็งมีปริมาตรลดลง ดังนั้นอนุภาคหยดน้ำมันในวัฏภาคต่อเนื่องจึงเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน และอาจมีปริมาณน้ำอิสระรอบผิวสัมผัสหยดน้ำมันไม่มากพอที่จะป้องกันการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน ทำให้หยดน้ำมันที่เคลื่อนเข้ามาใกล้กันหลอมรวมเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น ประการที่สอง เมื่อเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้น ผลึกน้ำแข็งอาจแทงทะลุเข้าไปในหยดน้ำมัน ซึ่งเป็นการทำลายชั้นผิวสัมผัสของหยดน้ำมันทำให้หยดน้ำมันเกิดการหลอมรวมกันง่ายขึ้น และประการสุดท้าย น้ำมันที่อยู่ด้านในอนุภาคหยดน้ำมันเกิดเป็นผลึก แทงทะลุชั้นผิวสัมผัสของอีกอนุภาคหยดน้ำมัน ทำให้เกิดการหลอมรวมกันแบบ Partial coalescence (Ogawa *et al*, 2003a; Guzey and McClements, 2006a)



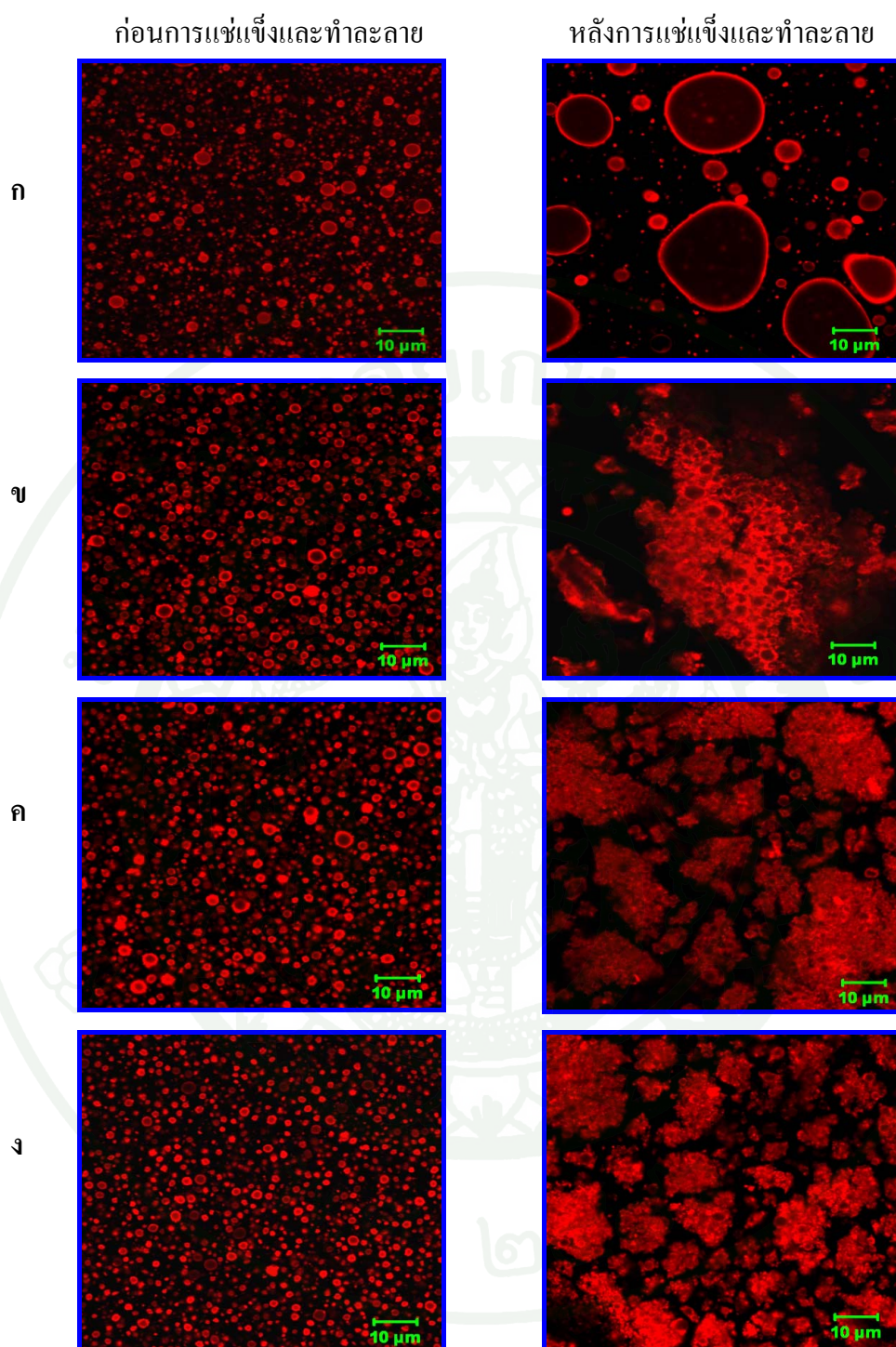
ภาพที่ 28 ผลของการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง) ต่อขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไลโดซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไลโดซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดโมเลกุลไลโดซาน พบว่าขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิหลังผ่านการแช่แข็งมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะไลโดซานโมเลกุลขนาดเล็กมีขนาดเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับไลโดซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ ($p \leq 0.05$) โดยขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเพิ่มจาก 0.557 ไมโครเมตร ก่อนการแช่แข็งเป็น 8.256 ไมโครเมตร หลังการแช่แข็ง (ภาพที่ 28) เนื่องจากในช่วงการแช่แข็ง น้ำในวัฏภาคต่อเนื่องเกิดผลึกน้ำแข็ง ทำให้อนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน ไลโดซานโมเลกุลขนาดเล็กมีความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่อาจไม่มากพอ ผลึกน้ำแข็งสามารถแทงทะลุได้ ทำให้หยดน้ำมันหลอมรวมตัวและเกาะกลุ่มกันได้ง่ายกว่าไลโดซานโมเลกุลขนาดกลาง และใหญ่ (Aoki *et al.*, 2005; Guzey and McClements, 2006)

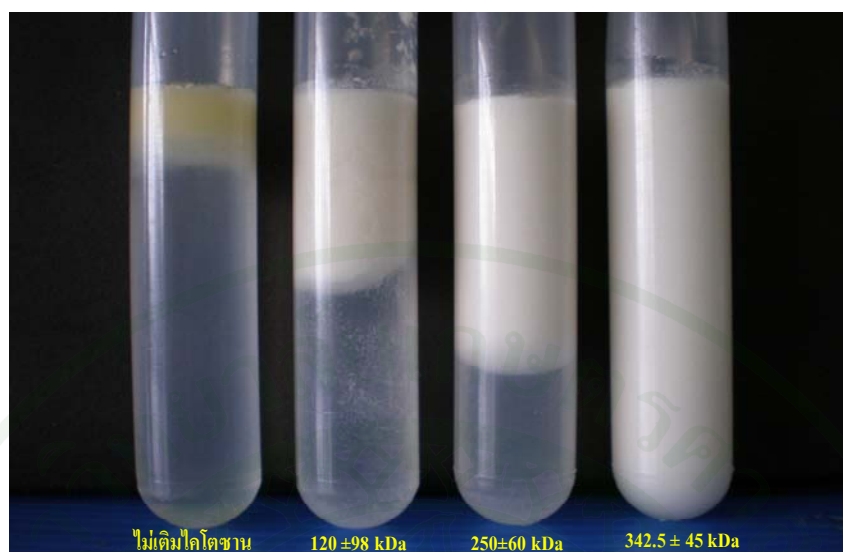
เมื่อสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันปฐุมภูมิด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ หลังผ่านการแช่แข็ง พบว่าอนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคเคลื่อนเข้ามาใกล้ชิดกัน และสังเกตเห็นช่องว่างซึ่งเป็นส่วนวัฏภาคต่อเนื่อง (ส่วนสีดำ) ได้ชัดเจนขึ้น (ภาพที่ 29 ก) แสดงถึงการเกิดการหลอมรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน (coalescence) กลายเป็นอนุภาคหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิอนุภาคหยดน้ำมันเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (flocculation) แต่ยังคงรักษารูปร่างของอนุภาคหยดน้ำมันไว้

ได้ จากผลที่แสดงขนาดอนุภาคหยดน้ำมันนั้น อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ เนื่องจากการวัดขนาดอนุภาคหยดน้ำมันใช้เทคนิคการกระเจิงแสง จึงแสดงผลของกลุ่มอนุภาคหยดน้ำมันที่เกาะกลุ่มกัน (ภาพที่ 29 ข ค และ ง) อนุภาคหยดน้ำมันไม่เกิดการหลอมรวมตัวกันหลังผ่านการแช่แข็ง อาจเนื่องจากความหนาของชั้นผิวสัมผัส ซึ่งป้องกันการปะทะของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านการแช่แข็ง (Aoki, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับภาพการเกิดการหลอมรวมตัวและเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันปาล์มที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-โคโคซาน-เพคติน เมื่อผ่านการแช่แข็ง -40 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และทำละลาย อิมัลชันน้ำมันปาล์มที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ เกิดการหลอมรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน และอิมัลชันน้ำมันปาล์มที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-โคโคซาน และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-โคโคซาน-เพคติน เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยดน้ำมันเช่นเดียวกัน (Thanasukarn *et al.*, 2006)

เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏอิมัลชันปฐมภูมิเกิดการแยกชั้น มีชั้นน้ำมันอยู่ด้านบน และมีของเหลวใสด้านล่าง (ภาพที่ 30) อาจเนื่องจากอิมัลชันสูญเสียความคงตัวแบบอนุภาคหยดน้ำมันเกิดการหลอมรวมตัวกัน เป็นอนุภาคหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยสาเหตุคงอธิบายข้างต้น หยดน้ำมันลอยขึ้นมาด้านบนจึงสังเกตเห็นสีเหลืองของหยดน้ำมัน (McClements, 2002) ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก และกลาง เกิดการแยกชั้นเช่นเดียวกันแต่ชั้นครีมที่เกิดขึ้นมีสีขาว อิมัลชันเกิดการสูญเสียความคงตัวแบบอนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน (McClements, 2005) เมื่อสังเกตจากโครงสร้างระดับจุลภาค (ภาพที่ 29 ข และ ค) แต่อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏไม่เกิดการแยกชั้น อิมัลชันเป็นเนื้อเดียวกัน แต่โครงสร้างระดับจุลภาคนั้น อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน (ภาพที่ 29 ง) อาจเกิดจากความหนืดของอิมัลชัน อนุภาคหยดน้ำมันจึงเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันได้ช้า ทำให้ชะลอการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Vélez *et al.* (2003) เมื่อความเข้มข้นของกัวร์กัม (guar gum) และแซนแทนกัม (xanthan gum) มากกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันน้ำมันดอกทานตะวันที่ทำให้คงตัวด้วย Tween 20 มีอัตราการเกิดการแยกชั้นของอิมัลชันลดลง เนื่องจากกัวร์กัมและแซนแทนกัมทำให้วฏภาคต่อเนื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้น และอาจเกิดจากการขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหยดน้ำมัน ด้วยการจับตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหของโคโคซาน (McClements, 2000; Harnoy, 2003) และอนุภาคหยดน้ำมันที่เกิดการเกาะกลุ่มกันแล้วทำให้ชะลอการเกิดชั้นครีมของอิมัลชัน

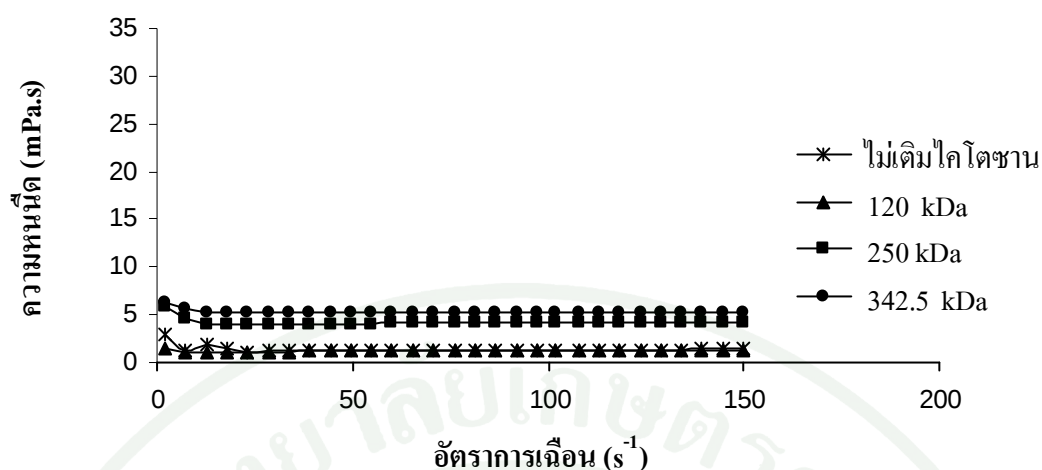


ภาพที่ 29 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน
 ปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และ
 ใหญ่ (ง) (เลขิทินร้อยละ 1 และโคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ทั้งก่อนและหลังการ
 แช่แข็ง

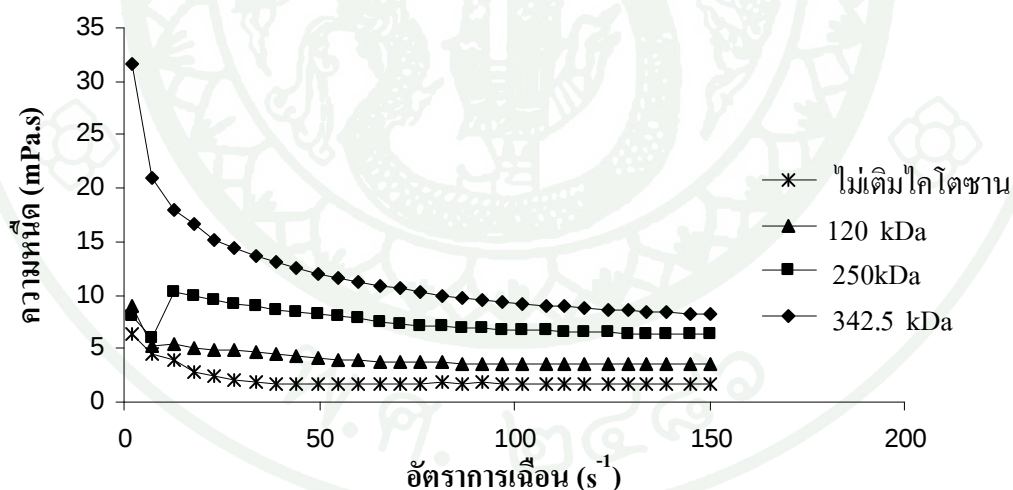


ภาพที่ 30 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) (เลซิตินร้อยละ 1 และโคโคซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) หลังจากผ่านการแช่แข็งและทำละลาย และเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

เมื่อวัดค่าความหนืดต่ออัตราการเฉือน อิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิมีความหนืดเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการแช่แข็ง (ภาพที่ 31 และ 32) อาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน และเมื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิหลังผ่านการแช่แข็ง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนความหนืดมีค่าลดลง (ภาพที่ 32) เนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยดน้ำมัน เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนอนุภาคหยดน้ำมันแยกหรือหลุดออกจากกลุ่มอนุภาคหยดน้ำมันที่เกาะกลุ่ม ความหนืดจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมีค่าประมาณ 0.6-0.8 (ตารางที่ 5) แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่มีความหนืดมากกว่าโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก และกลาง เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของโคโคซานที่มาก ทำให้เกิดการจับเรียงตัวของโมเลกุล และการเกิดอันตรกิริยาทั้งภายในและภายนอกโมเลกุลจึงมีความหนืดสูงในส่วนภูมิภาคต่อเนื่อง ทำให้อิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้นด้วย (Muzzarelli and Muzzarelli, 2007)



ภาพที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ก่อนผ่านการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)



ภาพที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการแช่แข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)

ตารางที่ 5 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ก่อนและหลังผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง

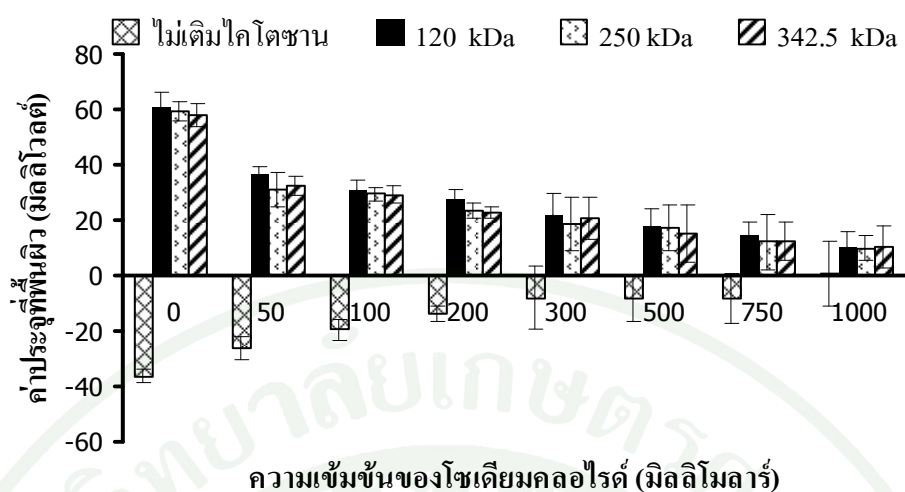
ขนาดโมเลกุล โคโคซาน	การแช่ แข็ง	ดัชนีพฤติกรรม การไหล n	สัมประสิทธิ์ การ ตัดสั่นใจ R^2	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
ไม่เติมโคโคซาน	ก่อน	1.032 ± 0.14	0.965	0.0013
	หลัง	0.799 ± 0.01	0.999	0.0018
ขนาดเล็ก (120 ± 98 กิโลดาลตัน)	ก่อน	1.025 ± 0.01	0.997	0.0022
	หลัง	0.810 ± 0.03	0.997	0.0088
ขนาดกลาง (250 ± 60 กิโลดาลตัน)	ก่อน	1.025 ± 0.01	0.999	0.0037
	หลัง	0.788 ± 0.02	0.999	0.0183
ขนาดใหญ่ (342.5 ± 45 กิโลดาลตัน)	ก่อน	0.999 ± 0.02	0.999	0.0052
	หลัง	0.667 ± 0.03	0.999	0.0437

จากผลของการแช่แข็ง อิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน-โคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่มีความคงตัวต่อการแยกชั้นเมื่อสังเกตจากลักษณะปรากฏ ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหารอิมัลชันแช่แข็งหรืออาหารแช่เย็น จึงควรใช้โคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่ในการเตรียมอิมัลชัน เนื่องจากความหนืดของโคโคซานช่วยชะลอการเกิดการแยกชั้น เมื่อทำละลายอิมัลชันหลังจากผ่านการแช่แข็ง แต่เมื่อสังเกตถึงโครงสร้างระดับจุลภาคแล้วนั้น อนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันเกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น ความเรียบเนียนของเนื้อสัมผัส และความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ควบคู่ไปด้วย

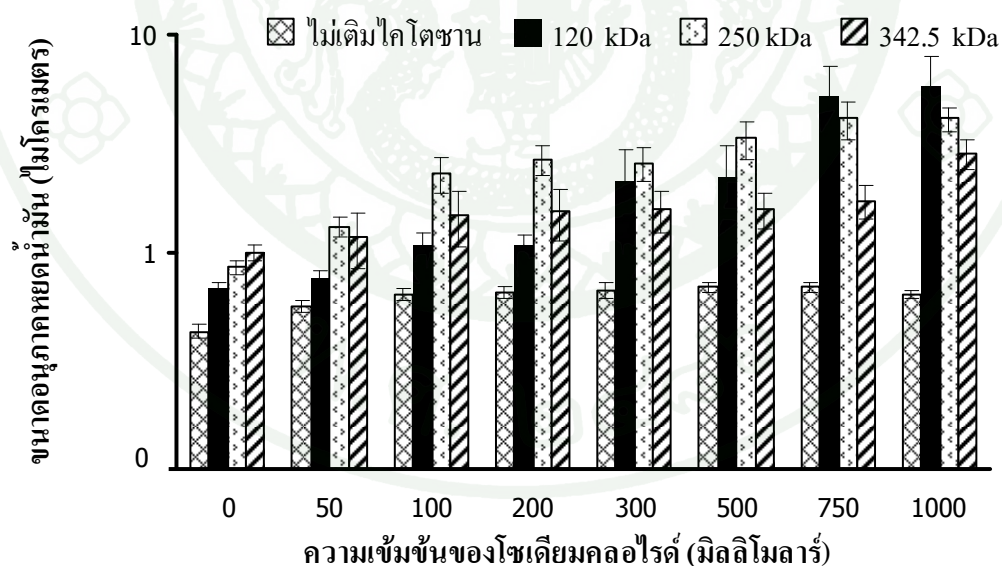
2.3 ผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์

การศึกษาผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0-1000 มิลลิโมลาร์ ต่อความคงตัว และคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐุมภูมิ (เลซิตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และทุติยภูมิ (เลซิตินร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) พบว่าค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ และทุติยภูมิมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (ภาพที่ 33) การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ทำให้ความแรงของไอออนในระบบอิมัลชันเพิ่มขึ้นด้วย มีผลลดแรงผลักทางประจุที่อนุภาคหยดน้ำมันทำต่อกัน เนื่องจากการเข้ามาแทรกของไอออนที่มีประจุตรงข้าม (Na^+ และ Cl^-) ทำให้เกิด electrostatic screening ไอออนที่มีประจุตรงข้าม อาจเข้าไปจับกับเลซิตินหรือไคโตซานด้วยแรงทางประจุ ทำให้ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคลดลง (ภาพที่ 33) เมื่อแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันลดลงความคงตัวของอิมัลชันจึงลดลง อนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนเข้ามาใกล้กัน เกิดการเกาะกลุ่มหรือหลอมรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน (Ogawa, 2003a; Guzey and McClements, 2006b) ซึ่งสังเกตได้จากค่าขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 34)

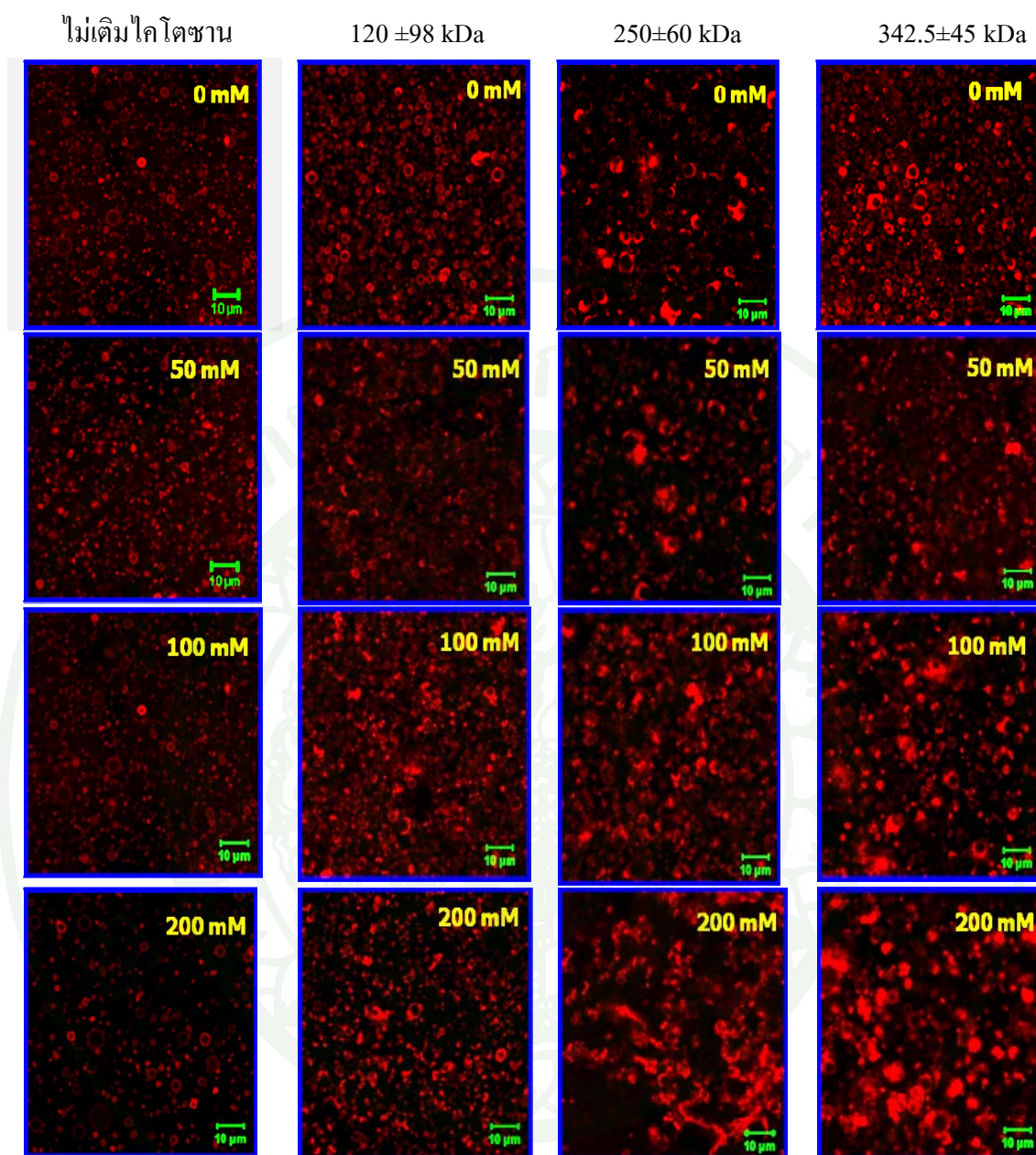
เมื่อสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันปฐุมภูมิ ผ่านกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการหลอมรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน เพราะความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อสมบัติของเลซิติน จึงเกิดการหลอมรวมตัวได้ง่าย (Walstra, 2003; Ogawa *et al.*, 2004)) (ภาพที่ 35 และ 36) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ส่วนอิมัลชันทุติยภูมิ ที่ระดับความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 200 มิลลิโมลาร์ อนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น (มากกว่า 300 มิลลิโมลาร์) อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่ม (bridging flocculation) อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเกิด electrostatic screening (ภาพที่ 36) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เพิ่มขึ้น



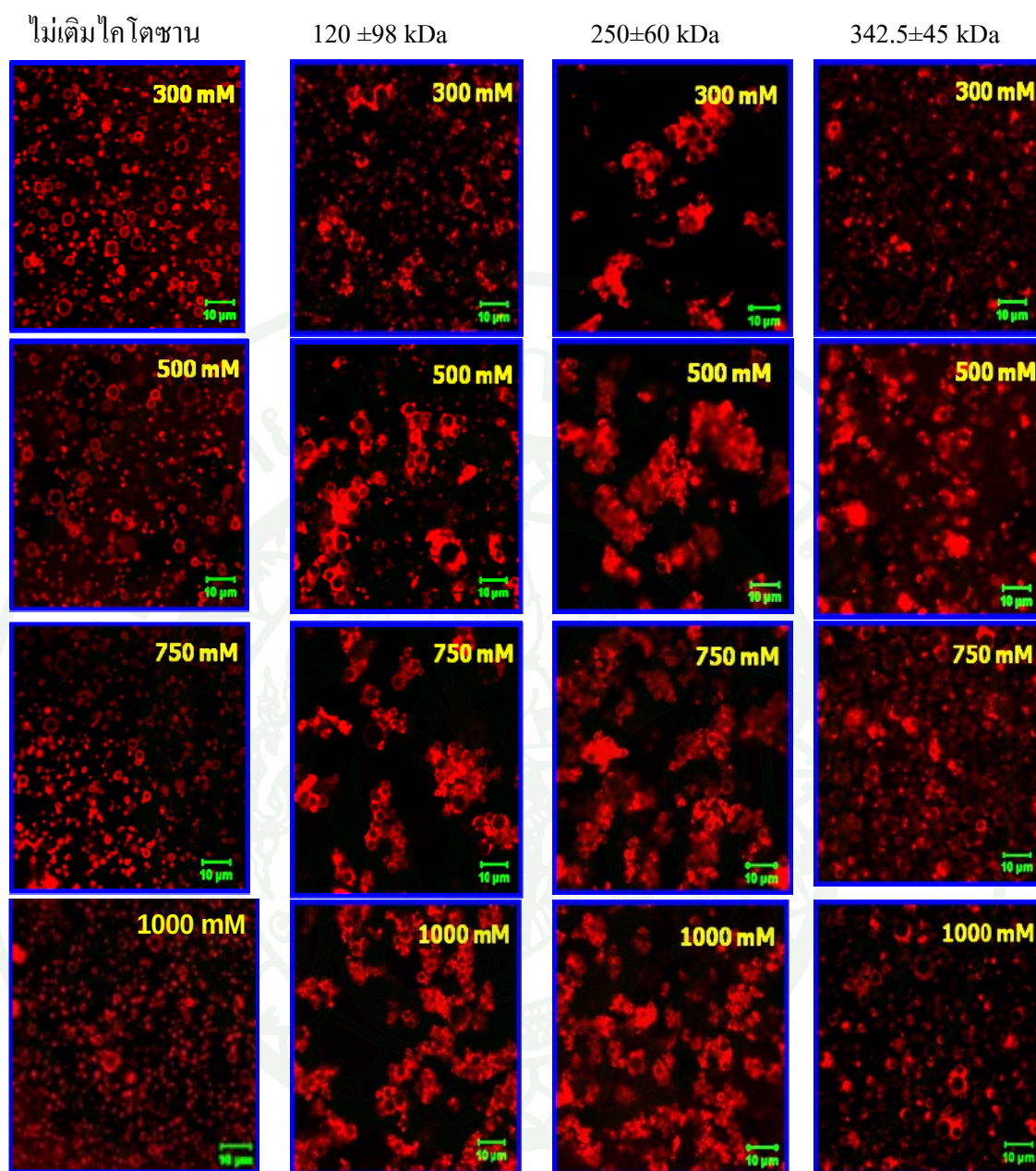
ภาพที่ 33 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (0-1000 มิลลิโมลาร์) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดย่น้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)



ภาพที่ 34 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (0-1000 มิลลิโมลาร์) ต่อขนาดอนุภาคหยดย่น้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

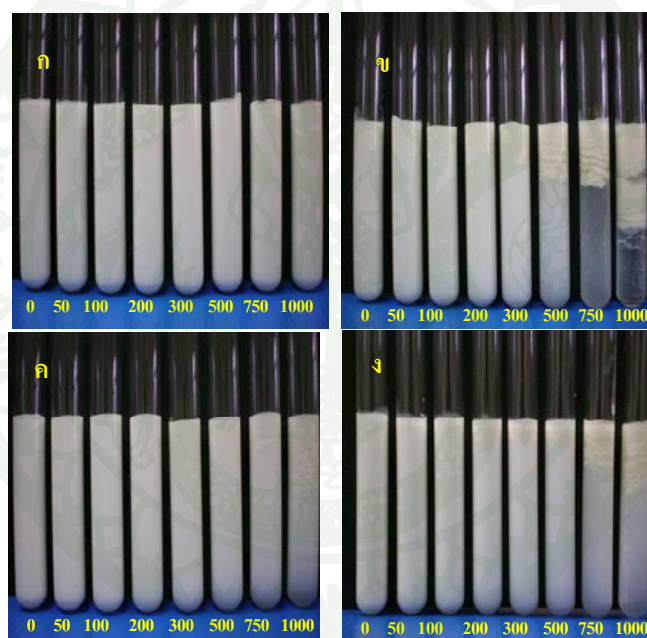


ภาพที่ 35 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอีตชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-200 มิลลิโมลาร์



ภาพที่ 36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอีมีลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 300-1000 มิลลิโมลาร์

อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดใหญ่ ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูง อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้น เคลื่อนเข้ามาใกล้ชิดกัน แต่เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยดน้ำมันเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องจากไคโตซาน โมเลกุลขนาดใหญ่ มีชั้นผิวสัมผัสที่หนา ขัดขวางการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน และความหนืดของวฏภาคต่อเนื่องที่มาก ชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคหยดน้ำมัน การเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูงสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Chuah *et al.* (2008) ที่สังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงส่องผ่าน อิมัลชันน้ำมันถั่วเหลือง (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน-ไคโตซาน อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้น เกิดการเกาะกลุ่มกัน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1000 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากการเกิด electrostatic screening ทำให้ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคหยดน้ำมัน



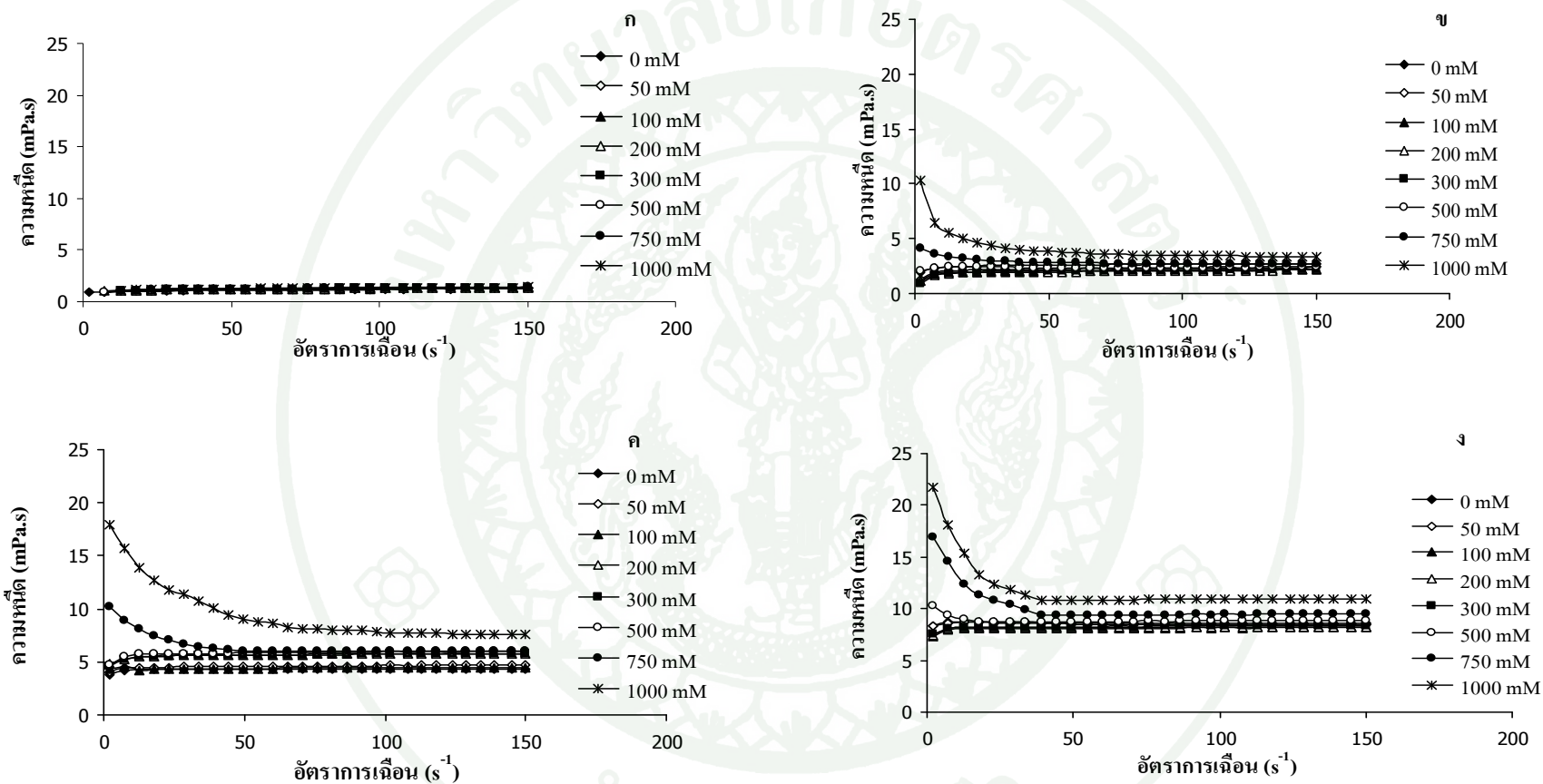
ภาพที่ 37 ลักษณะปรากฏและการแยกชั้นของอิมัลชันปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 0-1000 มิลลิโมลาร์ หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

ลักษณะปรากฏของอิมัลชันทุติยภูมิที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่ำ 0-100 มิลลิโมลาร์ อิมัลชันมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์อิมัลชันเริ่มเกิดการแยกชั้น และชั้นครีมมีความหนามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 37) เพราะเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยด

น้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก เกิดการแยกชั้นอย่างเห็นได้ชัดที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูง

เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสนของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับต่างๆ โดยการวัดค่าความหนืดต่ออัตราการเฉือน พบว่าอิมัลชันปฐมภูมิเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ความหนืดไม่มีการเปลี่ยนแปลง อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน ความหนืดจึงไม่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 38) ซึ่งสอดคล้องกับการไม่เกิดการแยกชั้นของอิมัลชันปฐมภูมิ ส่วนอิมัลชันทุติยภูมินั้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 750 และ 1000 มิลลิโมลาร์ ความหนืดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (2-150 วินาที⁻¹) แสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning ซึ่งแสดงถึงการเกิดการเกาะกลุ่มและรวมตัวกันของอนุภาคหยดน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค เมื่อนำค่าความหนืด ความเค้นเฉือน และอัตราการเฉือน มาคำนวณตามสมการ Power Law ได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลที่สอดคล้อง (ตารางที่ 6) โดยมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลน้อยกว่า 1 (ประมาณ 0.7-0.9) ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อค่าความหนืดของอิมัลชัน จากการศึกษาของ Kulmyrzaev *et al.* (2000) พบว่าอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลือง (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) ที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์สกัด (whey protein isolate) เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือแคลเซียมคลอไรด์อิมัลชันมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น และเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning

จากผลของความเข้มข้นของเกลือต่อสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ พบว่า อิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) มีความคงตัวต่อการแยกชั้นดีกว่าอิมัลชันทุติยภูมิในทุก ระดับความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ โดยมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เล็ก และไม่เกาะกลุ่มกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงการนำไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว อิมัลชันทุติยภูมียังมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่า เนื่องจากอิมัลชันปฐมภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่าอิมัลชันทุติยภูมิในระหว่างการเก็บรักษา (Ogawa *et al.*, 2003a) และจากประกาศของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาที่กำหนดปริมาณโซเดียมที่เติมในผลิตภัณฑ์อาหารคือไม่เกิน 3,300 มิลลิกรัม (ประมาณ 56 มิลลิโมลาร์) (ธารินี, 2538) ซึ่งที่ความเข้มข้นนี้ อิมัลชันทุติยภูมิทุกขนาดโมเลกุลมีความคงตัวที่ดี ไม่เกิดการแยกชั้น ดังนั้นจึงสามารถนำอิมัลชันทุติยภูมิไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้



ภาพที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของอิมัลชันปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 6 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจ ของอิมัลชันปฐภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุล ขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ระดับความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์

ขนาดโมเลกุล โคโคซาน	ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ดัชนีพฤติกรรม การไหล n	สัมประสิทธิ์ การตัดสั่นใจ R^2	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
ไม่เติมโคโคซาน	0	1.103 ± 0.02	0.999	0.0008
	50	1.096 ± 0.03	0.999	0.0008
	100	1.230 ± 0.16	0.980	0.0005
	200	1.208 ± 0.05	0.989	0.0005
	300	1.117 ± 0.02	0.998	0.0008
	500	1.331 ± 0.39	0.939	0.0005
	750	1.218 ± 0.25	0.980	0.0006
	1000	1.173 ± 0.04	0.995	0.0006
ขนาดเล็ก (120 ± 98 กิโลดาลตัน)	0	1.071 ± 0.03	0.999	0.0020
	50	1.105 ± 0.03	0.997	0.0015
	100	1.111 ± 0.04	0.997	0.0013
	200	1.118 ± 0.07	0.995	0.0013
	300	1.139 ± 0.05	0.993	0.0012
	500	1.019 ± 0.03	0.999	0.0022
	750	0.907 ± 0.07	0.999	0.0043
	1000	0.761 ± 0.01	0.994	0.0103

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ขนาดโมเลกุล ไคโตซาน	ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ดัชนีพฤติกรรม การไหล n	สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ R^2	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
ขนาดกลาง (250±60 กิโลดาลตัน)	0	1.019±0.01	0.999	0.0040
	50	1.025±0.01	0.998	0.0041
	100	1.009±0.01	0.999	0.0042
	200	1.032±0.01	0.998	0.0049
	300	1.039±0.01	0.999	0.0047
	500	1.039±0.01	0.999	0.0050
	750	0.877±0.02	0.995	0.0105
	1000	0.763±0.01	0.995	0.0235
ขนาดใหญ่ (342.5 ± 45 กิโลดาลตัน)	0	0.997±0.01	0.999	0.0086
	50	1.000±0.01	0.999	0.0086
	100	1.017±0.01	0.999	0.0075
	200	1.015±0.01	0.999	0.0077
	300	1.017±0.01	0.999	0.0077
	500	0.978±0.01	0.999	0.0097
	750	0.871±0.01	0.995	0.0168
	1000	0.849±0.01	0.992	0.0213

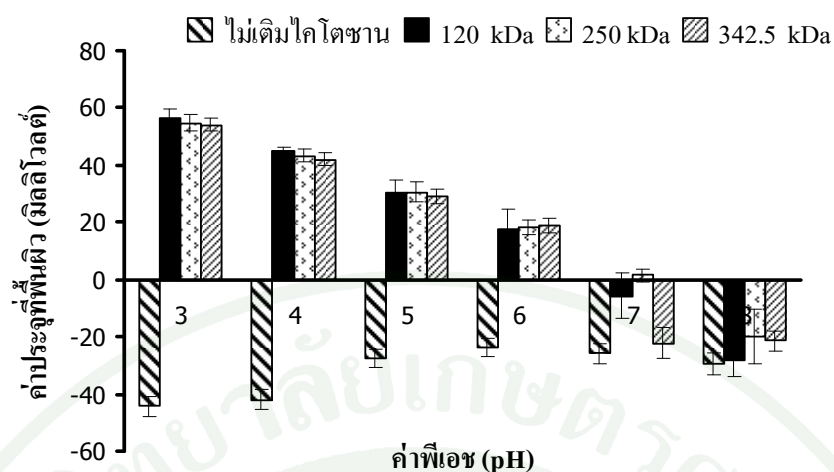
2.4 ผลของการปรับค่าพีเอช

ผลของการปรับค่าพีเอชที่ 3-8 ต่อความคงตัว และคุณสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐมภูมิ (เลซิทินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) และทุดิยภูมิ (เลซิทินร้อยละ 1 และไคโตซานร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิมีค่าเป็นลบในทุกค่าพีเอช (ภาพที่ 39) เนื่องจากค่า pK_a ของหมู่ฟอสเฟตในเลซิทินมีค่าน้อยกว่า 3 (Ogawa, 2004) ดังนั้นเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 3 เลซิทินจึงมีประจุเป็นลบ (pH มากกว่า pK_a) ส่วนอิมัลชันทุดิยภูมิที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7 มีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันเป็นบวก แต่ที่ค่าพีเอช 7 และ 8 อิมัลชันทุดิยภูมิมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคเป็นลบ เนื่องจากค่า pK_a ของไคโตซานมีค่าประมาณ 6.3-7 (Ogawa, 2003b) ดังนั้นที่

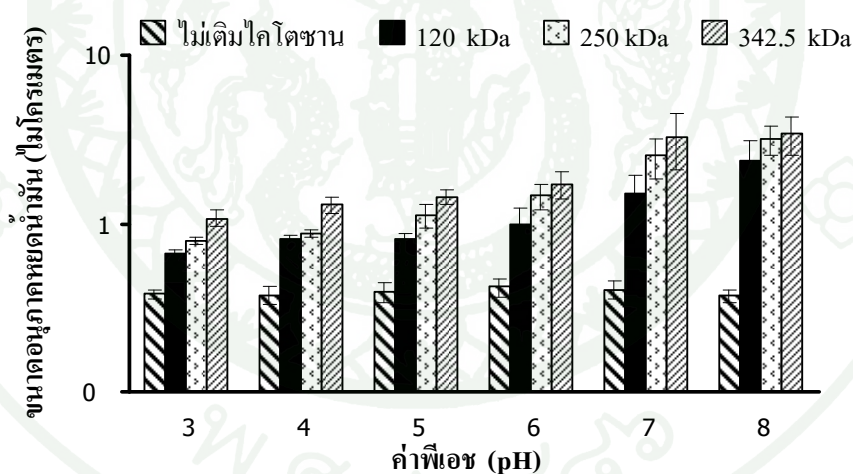
ค่าพีเอชที่มากกว่าค่า pK_a ของไคโตซาน ไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ความแรงประจุบวกลดลง ทำให้แรงดึงดูดระหว่างไคโตซานและเลซิทีนที่พื้นผิวสัมผัสอนุภาคหยดน้ำมันลดลง ดังนั้นไคโตซานจึงหลุดออกจากพื้นผิวสัมผัสอนุภาคหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยเลซิทีน และเมื่อเพิ่มค่าพีเอช เกิดการแตกตัวของไอออนของ Na^+ และ OH^- มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความแรงทางไอออนเพิ่ม และทำให้เกิด electrostatic screening มีผลให้แรงทางประจุระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันลดลง (Guzey and McClements, 2006b)

อย่างไรก็ตาม ที่ค่าพีเอช 7 และ 8 อิมัลชันทุติยภูมิแสดงค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันลดลงมาก และมีค่าประจุทั้งบวกและลบ อาจเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างก่อนการวัดค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน อิมัลชันเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้ในการวัดตัวอย่างอิมัลชันเพื่อนำมาวัดค่าประจุที่พื้นผิว อาจไม่ได้ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคที่แน่ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mun *et al.* (2006) ที่ไม่สามารถหาค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคในอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-ไคโตซานที่ระดับความเข้มข้นไคโตซานที่ทำให้เกิดอิมัลชันเกิดการแยกชั้น และที่ค่าพีเอช 8 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคเป็นลบ แต่เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค อาจเนื่องจากไอออน OH^- จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช เข้าจับกับโมเลกุลไคโตซานประจุบวก ทำให้แสดงค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคเป็นลบ

ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอช ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 40) ส่วนขนาดอนุภาคหยดน้ำมันของอิมัลชันทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอช 7 และ 8 ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเกิด electrostatic screening มีผลให้แรงทางประจุระหว่างอนุภาคหยดน้ำมันลดลง (Guzey and McClements, 2006b) ส่งผลให้อนุภาคหยดน้ำมันเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน และเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยดน้ำมัน (McClements, 2005) และเมื่อ pH มีค่าเข้าใกล้ pK_a หมูอะมิโนในโมเลกุลไคโตซานสูญเสียประจุบวก (NH_3^+ เป็น NH_2) ทำให้โครงสร้างของไคโตซานม้วนหดตัว เกิดการตกตะกอน (Leane *et al.*, 2004; Hong and McClements, 2007) ไคโตซานหลุดออกจากพื้นผิวสัมผัส ทำให้อนุภาคหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต-ไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 7 และ 8 (Aoki *et al.*, 2005)



ภาพที่ 39 ผลของการปรับค่าพีเอช (3-8) ต่อค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)



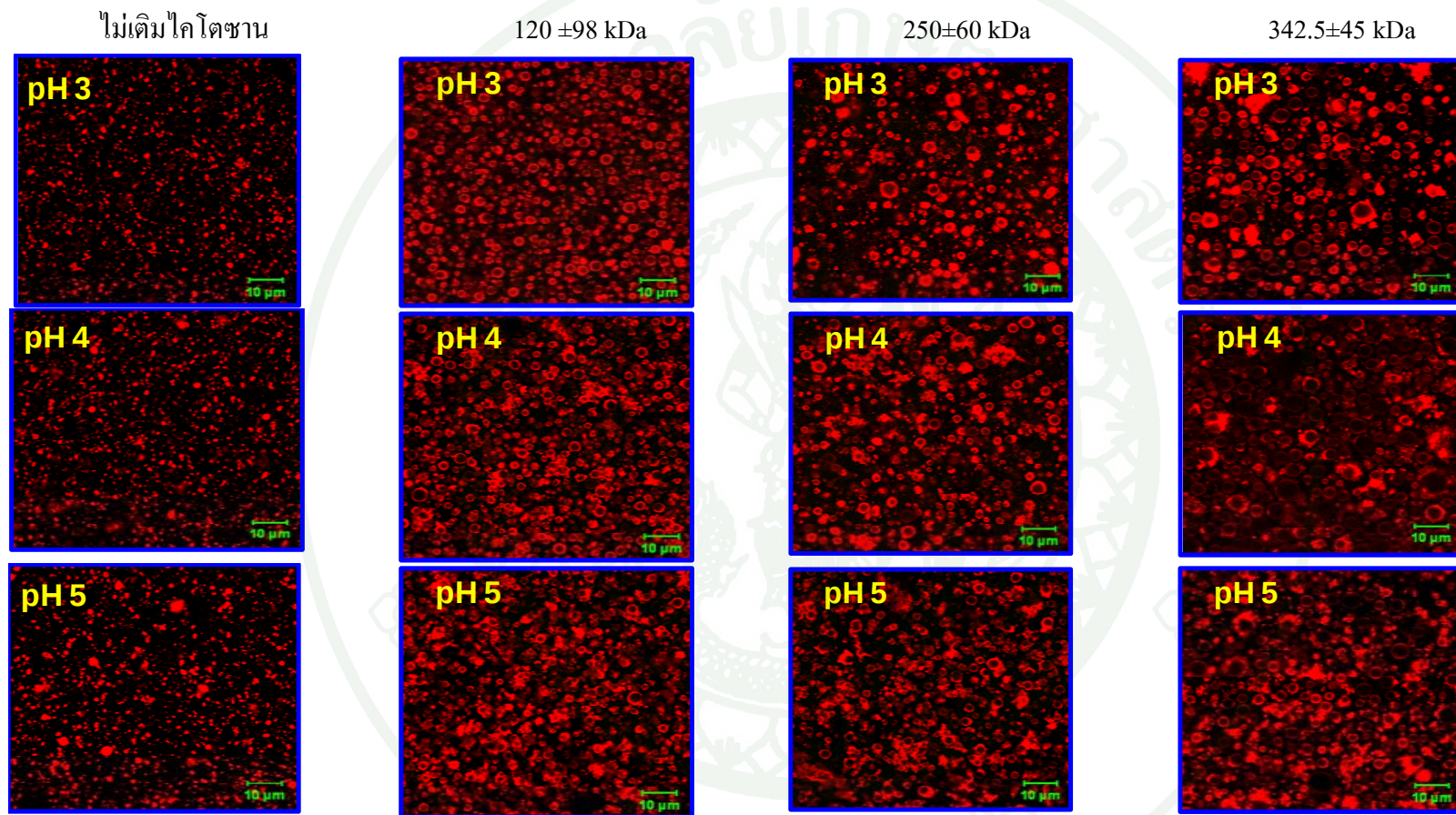
ภาพที่ 40 ผลของการปรับพีเอช (3-8) ต่อขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa)

สำหรับทุกค่าพีเอช อิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดใหญ่มีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่ใหญ่กว่าโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก และกลาง อาจเนื่องจากโครงสร้าง

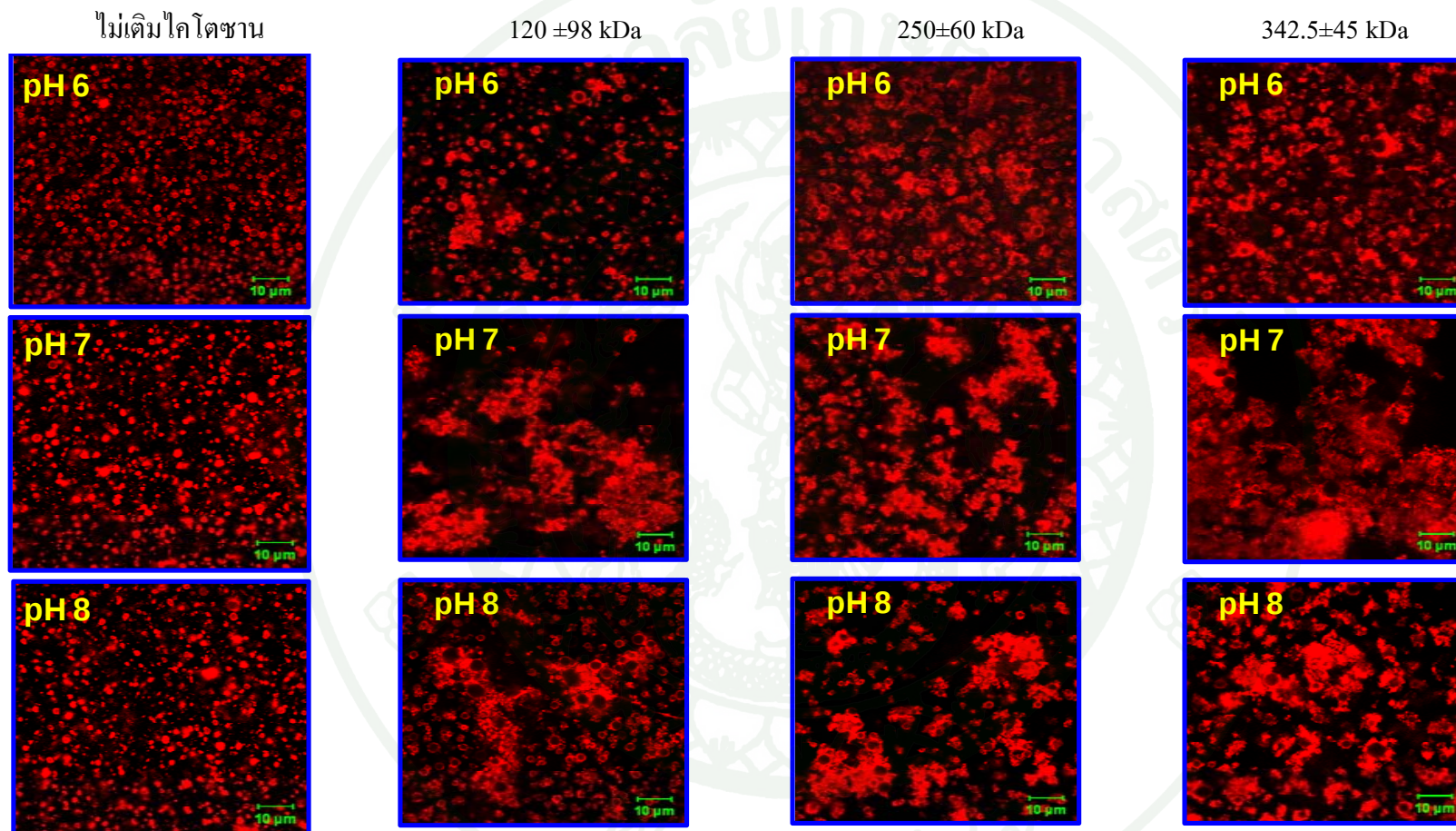
โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการม้วนตัวของโครงสร้างไคโตซาน เกิดการตกตะกอน ชั้นผิวสัมผัสของอนุภาคหยคน้ำมันจึงมีความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคหยคน้ำมันมีขนาดเพิ่มขึ้น

เมื่อสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ อิมัลชันปฐมภูมิไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคหยคน้ำมัน ขนาดอนุภาคหยคน้ำมันไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทุกค่าพีเอช สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยคน้ำมัน (ภาพที่ 41) แต่อิมัลชันทุติยภูมิที่ค่าพีเอชมากกว่า 4 อนุภาคหยคน้ำมันเริ่มเกิดการเกาะกลุ่มกัน มีการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน และที่ค่าพีเอชสูง การเกาะกลุ่มรวมตัวกันของอนุภาคหยคน้ำมันเกิดขึ้นมาก และเห็นได้ชัดเจน (ภาพที่ 42) อิมัลชันสูญเสียความคงตัว การเกาะกลุ่มกันนี้เกิดจากโมเลกุลไคโตซานมีประจุบวกลดลง เนื่องจากค่าพีเอชมีค่าใกล้เคียงค่า pK_a ทำให้แรงดึงดูดระหว่างไคโตซานและพื้นผิวสัมผัสเลชิตินที่ห่อหุ้มหยคน้ำมันลดลง ดังนั้นไคโตซานจึงหลุดจากพื้นผิวสัมผัสอนุภาคหยคน้ำมันทั้งแบบหลุดทั้งโมเลกุล และหลุดเพียงบางส่วนของโมเลกุลไคโตซานจากพื้นผิวสัมผัสอนุภาคหยคน้ำมัน ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของไคโตซานเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยคน้ำมันแบบ bridging flocculation อนุภาคหยคน้ำมันเกาะกลุ่มอยู่ภายใน ซึ่งการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยคน้ำมันสอดคล้องกับค่าขนาดอนุภาคหยคน้ำมันที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 40)

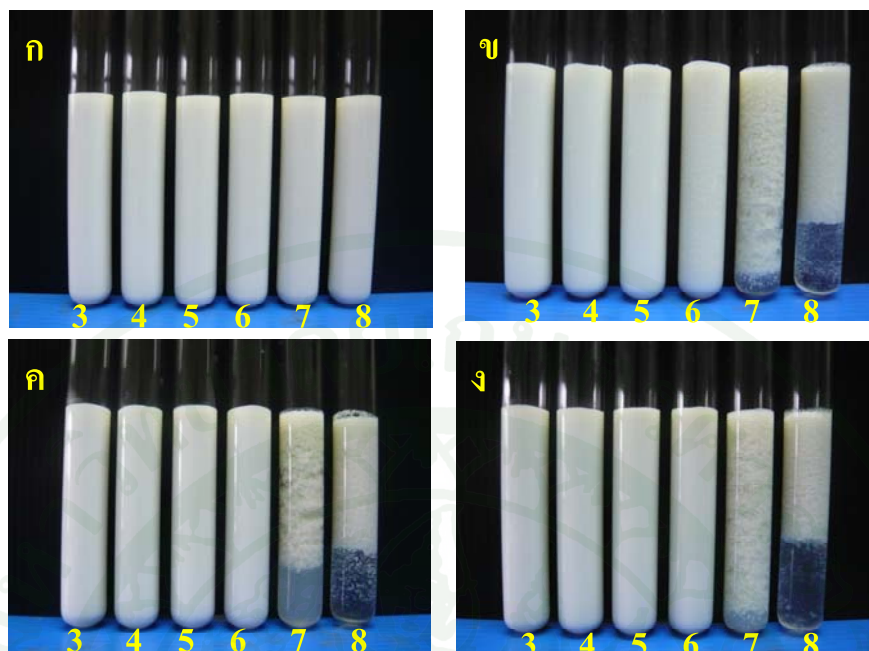
เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐมภูมิ พบว่ามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้น (ภาพที่ 43) ตลอดช่วงการปรับค่าพีเอช ส่วนอิมัลชันทุติยภูมินั้น เกิดการแยกชั้นที่ค่าพีเอชมากกว่า 6 สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยคน้ำมัน และ โครงสร้างระดับจุลภาค



ภาพที่ 41 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอิมัลชันปฐภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ±98 kDa) กลาง (250±60 kDa) และใหญ่ (342.5±45 kDa) ที่ค่าพีเอช 3-5



ภาพที่ 42 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ของโครงสร้างระดับจุลภาคอีมีลชันปฐมภูมิ (ไมเด็มไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ±98 kDa) กลาง (250±60 kDa) และใหญ่ (342.5±45 kDa) ที่ค่าพีเอช 6-8



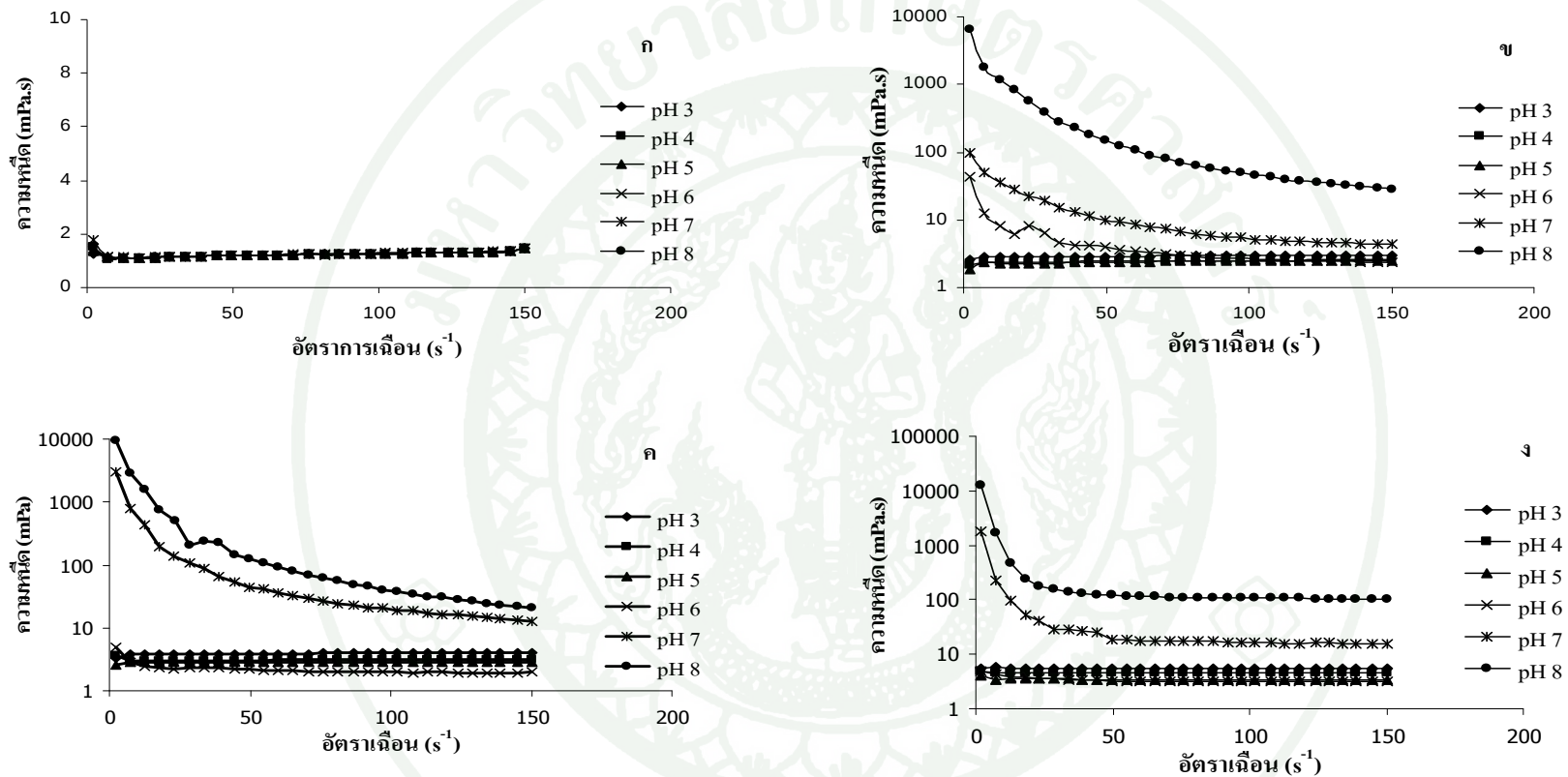
ภาพที่ 43 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ค่าพีเอช 3-8 หลังเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสนของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ค่าพีเอช 3-8 โดยการวัดค่าความหนืดต่ออัตราการเฉือน อิมัลชันปฐมภูมิไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดและพฤติกรรมการไหลในทุกค่าพีเอช (ภาพที่ 44 และ ตารางที่ 7) ซึ่งแสดงถึงอิมัลชันปฐมภูมิมีความคงตัวต่อการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน ส่วนอิมัลชันทุติยภูมินั้นที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 7 ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยมีค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (ภาพที่ 44) เนื่องจากการเกาะกลุ่มรวมตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน (McClements, 2005) สอดคล้องกับขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค และเมื่อนำค่าความหนืด ความข้นเหนียว และอัตราการเฉือน มาคำนวณตามสมการ Power Law (ตารางที่ 7) ได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลน้อยกว่า 0.6

จากผลของการปรับค่าพีเอชต่อสมบัติต่างๆ ของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ พบว่าอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) มีความคงตัวต่อการแยกชั้นดีกว่าอิมัลชันทุติยภูมิในทุกค่าพีเอช

โดยมีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เล็กและไม่เกาะกลุ่มกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงการนำไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีพีเอชต่ำ (acid food) (พีเอชน้อยกว่า 4.6) อิมัลชันทุติยภูมิมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าอิมัลชันปฐมภูมิ ซึ่งอิมัลชันทุติยภูมิทุกขนาดโมเลกุลมีความคงตัวที่ดี ไม่เกิดการแยกชั้นในช่วงกรด และอิมัลชันทุติยภูมิสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าอิมัลชันปฐมภูมิในระหว่างการเก็บรักษา (Klinkesorn *et al.*, 2005b) ดังนั้นจึงสามารถนำอิมัลชันทุติยภูมิไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ และยังคงมีความคงตัวที่ดี





ภาพที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเฉือนของอิมัลชันปลูมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (ข) กลาง (ค) และใหญ่ (ง) ที่ค่าพีเอช 3-8

ตารางที่ 7 ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืดและสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจของ
อิมัลชันน้ำมันปาล์มภูมิ(ไม่เติมโคโคซาน) และหุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุล
ขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ค่าพีเอช 3-8

ขนาดโมเลกุล โคโคซาน	พีเอช	ดัชนีพฤติกรรม การไหล; n	สัมประสิทธิ์การ ตัดสั่นใจ; R^2	สัมประสิทธิ์ ความข้นหนืด; K (Pa.s ⁿ)
ไม่เติมโคโคซาน	3	1.043 ± 0.02	0.997	0.00104
	4	1.025 ± 0.02	0.993	0.00113
	5	1.037 ± 0.01	0.995	0.00107
	6	1.031 ± 0.02	0.992	0.00109
	7	1.006 ± 0.01	0.989	0.00123
	8	1.023 ± 0.01	0.993	0.00114
ขนาดเล็ก (120 ± 98 กิโลดาลตัน)	3	1.035 ± 0.01	0.999	0.00254
	4	1.038 ± 0.03	0.999	0.00211
	5	1.052 ± 0.02	0.998	0.00192
	6	0.614 ± 0.05	0.920	0.05861
	7	0.320 ± 0.09	0.800	0.06036
	8	0.270 ± 0.30	0.541	0.29124
ขนาดกลาง (250 ± 60 กิโลดาลตัน)	3	1.033 ± 0.05	0.998	0.00345
	4	0.991 ± 0.03	0.997	0.00323
	5	1.009 ± 0.02	0.999	0.00269
	6	0.842 ± 0.14	0.993	0.00440
	7	0.335 ± 0.33	0.544	5.17620
	8	0.143 ± 0.27	0.709	9.42590
ขนาดใหญ่ (342.5 ± 45 กิโลดาลตัน)	3	0.997 ± 0.02	0.999	0.00565
	4	0.986 ± 0.01	0.999	0.00475
	5	0.981 ± 0.01	0.999	0.00377
	6	0.898 ± 0.03	0.999	0.00505
	7	0.631 ± 0.04	0.939	0.09171
	8	0.460 ± 0.01	0.746	6.41100

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ความเข้มข้นและขนาดโมเลกุลของไคโตซานมีผลต่อความคงตัว โครงสร้างระดับจุลภาค และคุณสมบัติด้านวิทยากระแสของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ก่อให้เกิดตัวด้วยเลซิทิน โดยอิมัลชันทุติยภูมิที่เตรียมโดยไคโตซานความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักมีความคงตัวที่ดี ไม่เกิดการแยกชั้น อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก (0.7-0.8 ไมโครเมตร) และค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันสูง (ประมาณ +50 มิลลิโวลต์) อิมัลชันทุติยภูมิที่เติมไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันที่เล็กกว่าและมีค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันสูงกว่าการใช้ไคโตซานโมเลกุลขนาดกลางและใหญ่

การให้ความร้อน การแช่แข็ง การเติมโซเดียมคลอไรด์ และการปรับค่าพีเอช มีผลต่อคุณสมบัติของอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ การเติมไคโตซานช่วยปรับปรุงความคงตัวของอิมัลชันปฐมภูมิเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 60-90 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระบวนการแช่แข็ง การเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 200 มิลลิโมลาร์) และที่ค่าพีเอช 6-8 มีผลทำให้อิมัลชันเกิดการแยกชั้น อนุภาคหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ พบว่าอิมัลชันเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เนื่องจากการหลอมรวมของอนุภาคหยดน้ำมัน (coalescence) และการเกาะกลุ่มของอนุภาคหยดน้ำมัน (bridging flocculation)

สำหรับคุณสมบัติวิทยากระแส พบว่าความเข้มข้นของไคโตซานมีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน โดยอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นไคโตซานเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมการไหลชนิดนิวโตเนียน ซึ่งมีความหนืดคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน ยกเว้นที่ความเข้มข้นไคโตซานคือร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก อิมัลชันมีพฤติกรรมการไหลชนิดนอน-นิวโตเนียนแบบ shear thinning ความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน สอดคล้องกับสมการ Power Law

ผลของสภาวะแวดล้อมต่อคุณสมบัติวิทยากระแสของอิมัลชัน พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส ไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของอิมัลชัน โดยมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน แต่เมื่อผ่านการแช่แข็งอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิมีพฤติกรรมการไหล

เปลี่ยนแปลงจากนิวโตเนียนเป็นนอน-นิวโตเนียน แบบ shear thinning เช่นเดียวกับอิมัลชันทุติยภูมิ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูง (มากกว่า 500 มิลลิโมลาร์) และที่ค่าพีเอช 7 และ 8 ในทุก ขนาดโมเลกุลไคโตซาน

อิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถนำไปประยุกต์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาในการนำไปใช้ให้เหมาะสม อาทิเช่น ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนสูง (60-90 องศาเซลเซียส) อาหารที่มีพีเอชต่ำ (น้อยกว่าพีเอช 5) และผลิตภัณฑ์อาหารที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ (ไม่เกิน 56 มิลลิโมลาร์) อิมัลชันทุติยภูมิมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าอิมัลชันปฐมภูมิ เนื่องจากสามารถรักษาความคงตัวต่อการเกิดการแยกชั้นไว้ได้ พร้อมทั้งสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันได้ แต่อย่างไรก็ตาม อิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ ผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง เนื่องจากอิมัลชันเกิดการแยกชั้นหลังผ่านการแช่แข็งและทำละลาย

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการนำอิมัลชันทุติยภูมิไปพัฒนาในผลิตภัณฑ์อาหารต่อไป เช่น ในเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดสูง (น้ำผลไม้) มาของเนย น้ำสลัด เป็นต้น เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยควรศึกษาถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษาด้วย เพื่อให้ทราบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางโภชนาการและลักษณะทางประสาทสัมผัสของน้ำมันปลาพุ่งขึ้นหรือไม่ในระหว่างการเก็บรักษาตามสภาวะการเก็บรักษาของอาหารนั้นๆ

ควรศึกษาระดับความแรงของกลิ่นน้ำมันปลาพุ่งก่อนและหลังจากการเตรียมอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิ เพื่อการยอมรับของผู้บริโภคเมื่อมีการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากในการประยุกต์อิมัลชันน้ำมันปลาพุ่งในผลิตภัณฑ์อาหาร กลิ่นรสนี้มีความสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค หากสามารถลดระดับความแรงของกลิ่นน้ำมันปลาพุ่งได้ สามารถเพิ่มการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ไชยรัตน์ เอื้อพัทธยากร. 2552. มาทำความรู้จักกับ Omega-3 ใน Fish oil กันดีกว่า. แหล่งที่มา:

<http://www.signaturecrown.com/topmenuarticles/7-nutrition-information/28--omega-3--fish-oil-->, 14 กรกฎาคม 2552.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2545. เคมีอาหาร. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2548. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ธารินี หัสติละเมียร. 2538. แนวทางการพิจารณาการเติมวิตามินและเกลือแร่ในผลิตภัณฑ์อาหาร. สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี

สมพงษ์ สหพงศ์. 2538. น้ำมันปลา น้ำมันลดไขมัน. ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์รวมธรรมส์, กรุงเทพฯ.

วิภาวรรณ ศรีมุข. 2549. เรื่องน่ารู้ของเลซิทิน (Lecithin). บทความวิทยุกระจายเสียงรายการสาระยามบ่าย ครั้งที่ 74. แหล่งที่มา: http://siweb.dss.go.th/dss_doc/fulltext/radio/T74.pdf, 22 กันยายน 2552.

Akhtar, M., J. Stenzel, B.S. Murray and E. Dickinson. 2005. Factors affecting the perception of creaminess of oil-in-water emulsions . **Food Hydrocolloid**. 19 (3): 521-526.

Alamed, J., D.J. McClements and E.A. Decker. 2006. Influence of heat processing and calcium ions on the ability of EDTA to inhibit lipid oxidation in oil-in-water emulsions containing omega-3 fatty acids. **Food Chem**. 95: 585–590

Angelo, A.J.St. 1992. **Lipid Oxidation in Food**. American Chemical Society, Washington.

Ansell, G.B. and S. Spanner. 1982. phosphatidylserine, phosphatidylethanolamine and phosphatidycholine, pp. 1-50. *In* J.N. Hawthorne and G.B. Ansell, eds.

Phospholipids. Elsevier Biomedical Press, Amsterdam.

Aoki, T., E.A. Decker and D.J. McClements. 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 Hydrocolloid.** 19 (2): 209-220.

Bao, M. 2000. **Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers, and Gyroscopes.** 1 ed. Elsevier B.V., Amsterdam.

Bhathena, S.J. 2000. Dietary fatty acids and fatty acid metabolism in diabetes, pp. 915-962. *In* C.K. Chow, ed. **Fatty Acids in Foods and Their Health Implications.** Marcel Dekker, New York.

Boyle, M.A. and S. Long. 2007. **Personal Nutrition.** 6 ed. Wadsworth Cengage Learning, Belmont.

Bruckner, G. 2000. Fatty acid and cardiovascular diseases, pp. 843-864. *In* C.K. Chow, ed. **Fatty Acids in Foods and Their Health Implications.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Bueschelberger, H. 2002. Lecithins, pp. 1-39. *In* R.J. Whitehurst, ed. **Emulsifiers in Food Technology.** Blackwell publishing Ltd, Oxford.

Burgess, Diane J. 2002. Colloids and colloid drug-delivery system, pp. 497-508. *In* J. Swarbrick and J.C. Boylan, eds. **Encyclopedia of Pharmaceutical Technology.** Marcel Dekker, Inc., New York.

- Chanamai, R. and D.J. McClements. 2000. Dependence of creaming and rheology of monodisperse oil-in-water emulsions on droplet size and concentration. **Colloid Surface A**. 172: 79-86.
- Chantrapornchai, W., F. Clydesdale and D.J. McClements. 1998. Influence of droplet size and concentration on the color of oil-in-water emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 46 (8): 2914-2920.
- Chen, R.H., J.R. Chang and J.S. Shyur. 1997. Effects of ultrasonic conditions and storage in acidic solutions on changes in molecular weight and polydispersity of treated chitosan. **Carbohydr. Res.** 299 (4): 287-294.
- Chuah, A.M., T. Kuroiwa, I. Kobayashi and M. Nakajima. 2008. Effect of chitosan on the stability and properties of modified lecithin stabilized oil-in-water monodisperse emulsion prepared by microchannel emulsification. **Food Hydrocolloid.** 23 (3): 600-610.
- Coupland, J.N. and D.J. McClements. 1996. Lipid oxidation in food emulsions. **Trends Food Sci. Tech.** 7 (3): 83-91.
- _____ and _____. 2001. Ultrasonic characterization in food emulsion, pp. 233-242. *In* J. Sjöblom, ed. **Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Czechowska-Biskup, R., B. Rokita, S. Lotfy, P. Ulanski and J.M. Rosiak. 2005. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. **Carbohydr. Polym.** 60 (2): 175-184.
- Das, A.K., D. Mukesh, V. Swayambunathan, D.D. Kotkar and P.K. Ghosh. 1992. Concentrated emulsions. 3. studies on the influence of continuous-phase viscosity, volume fraction, droplet size, and temperature on emulsion viscosity. **Langmuir.** 8: 2421-2436.

- Del Blanco, L.F., M.S. Rodríguez, P.C. Schulz and E. Agulló. 1999. Influence of the deacetylation degree on chitosan emulsification properties. **Colloid Polym. Sci.** 277: 1087-1092
- Desbrieres, J. 2002. Viscosity of semiflexible chitosan solutions: influence of concentration, temperature, and role of intermolecular interactions. **Biomacromolecules.** 3: 342-349.
- Dickinson, E. and G. Stainsby. 1988. **Adv. Food Emulsions Foams.** Elsevier Applied Science, London.
- Dupuis, G. and J.G. LeHoux. 2007. Recovery of chitosan from aqueous acidic solutions by salting-out: part 1 use of inorganic salts. **Carbohydr. Polym.** 68: 295-304.
- Frankel, E.N., S. Huang, J. Kanner and J.B. German. 1994. Interfacial phenomena in the evaluation of antioxidants: bulk oils vs emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 42: 1054-1059
- Friberg, S.E. and K. Larsson. 1997. **Food Emulsions.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Glauert, H.P. 2000. Dietary fatty acids and cancer, pp. 865-882. *In* C.K. Chow, ed. **Fatty Acids in Foods and Their Health Implications.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Guzey, D. and D. J. McClements. 2006a. Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. **Adv. Colloid Interface Sci.** (128-130): 227-248.
- _____ and _____. 2006b. Influence of environmental stresses on O/W emulsions stabilized by beta-lactoglobulin-pectin and beta-lactoglobulin-pectin-chitosan membranes produced by the electrostatic layer-by-layer deposition technique. **Food Biophys.** 1(1): 30-40.

- Guzey, D., H.J. Kim and D.J. McClements. 2004. Factors influencing the production of O/W emulsions stabilized by β -lactoglobulin–pectin membranes. **Food Hydrocolloid.** 18 (6): 967-975.
- Haag, M. 2003. Essential fatty acids and the brain. **Can. J. Psychiatry.** 48 (3): 195-203.
- Hall, S.R. 2009. **Biotemplating: Complex Structures from Natural Materials.** 1 ed. World Scientific Publishing Co. Ple. Ltd., Singapore.
- Harnoy, A. 2003. **Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Higashi, S. and T. Setoguchi. 2000. Hepatic arterial injection chemotherapy for hepatocellular carcinoma with epirubicin aqueous solution as numerous vesicles in iodinated poppy-seed oil microdroplets: clinical application of water-in-oil-in-water emulsion prepared using a membrane emulsification technique. **Adv. Drug Deliver Rev.** 45 (1): 57-64.
- Hong, Y. and D.J. McClements. 2007. Modulation of pH sensitivity of surface charge and aggregation stability of protein-coated lipid droplets by chitosan addition. **Food Biophys.** 2: 46-55.
- Hsieh, C., S. Tsai, D. Wang, Y. Chang and H. Hsieh. 2005. Preparation of γ -PGA/chitosan composite tissue engineering matrices. **Biomaterials.** 26 (28): 5617-5623.
- Huang, S., E.D. Frankel and J.B. German. 1994. Antioxidant activity of α - and γ -tocopherols in bulk oils and in oil-in-water emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 42: 2108-2114
- Jansen, J. and H.I. Maibach. 2001. Encapsulation to deliver topical actives, pp. 125-144. *In* M. Paye, A.O. Barel and H.I. Maibach, eds. **Handbook of Cosmetic Science and Technology.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Kinsella, J.E. 1987. **Seafoods and Fish Oils in Human Health and Disease**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Klinkesorn, U., P. Sophanodora, P. Chinachoti, E.A. Decker and D.J. McClements. 2005a. Encapsulation of emulsified tuna oil in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. **Food Hydrocolloid**. 19 (6): 1044-1053.

_____, _____, _____, D. J. McClements and E.A. Decker. 2005b. Increasing the oxidative stability of liquid and dried tuna oil-in-water emulsions with electrostatic layer-by-layer deposition technology. **J. Agric. Food Chem.** 53: 4561-4566.

Kofuji, K., C. Qian, M. Nishimura, I. Sugiyama, Y. Murata and S. Kawashima. 2005. Relationship between physicochemical characteristics and functional properties of chitosan. **Eur. Polym. J.** 41: 2784-2791.

Kotz, J.C., P.M. Treichel and G.C. Weaver. 2006. **Chemistry & Chemical Reactivity**. 6 ed. Thomson Higher Education, Belmont.

Kulmyrzaev, A., M.P.C. Sivistre and D.J. McClements. 2000. Rheology and stability of whey protein stabilized emulsions with high CaCl_2 concentrations. **Food Res. Int.** 33: 21-25.

Leane, M.M., R. Nankervis, A. Smith and L. Illum. 2004. Use of the ninhydrin assay to measure the release of chitosan from oral solid dosage forms. **Int. J. Pharm.** 271: 241-249.

Lindsay, R.C. 2007. Food additives, pp. 689-750. In S. Damodaran, K.L. Parkin and O.R. Fennema, eds. **Fennema's Food Chemistry**. CRC Press, Boca Raton.

Logaraj, T.V., S. Bhattacharya, K.U. Sankar and G. Venkateswaran. 2008. Rheological behaviour of emulsions of avocado and watermelon oils during storage. **Food Chem.** 106 (3): 937-943.

- Malvern Instruments. 2003. **Zetasizer Nano Series User Manual**. Malvern Instruments Ltd., England.
- Mancuso, J.R., D.J. McClements and E.A. Decker. 1999. The effects of surfactant type, pH, and chelators on the oxidation of salmon oil-in-water emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 47: 4112-4116.
- Martin-González, M., F. San, A. Roach and F. Harte. 2009. Rheological properties of corn oil emulsions stabilized by commercial micellar casein and high pressure homogenization. **Food Sci. Technol-LEB.** 42: 307-311.
- McClements, D.J. 2000. Comments on viscosity enhancement and depletion flocculation by polysaccharides. **Food Hydrocolloid.** 14 (2): 173-177.
- _____. 2002. Lipid-based emulsions and emulsifier, pp. 63-102. In C.C. Akoh and D.B. Min, eds. **Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- _____. 2005. **Food Emulsions : Principles, Practice, and Techniques**. 2 ed. CRC Press, Boca Raton.
- _____ and E.A. Decker. 2000. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: impact of molecular environment on chemical reactions in heterogeneous food systems. **J. Food Sci.** 65 (8): 1270 - 1282.
- McClements, D.J. and E.A. Decker. 2007. Lipids, pp. 156-216. In S. Damodaran, K.L. Parkin and O.R. Fennema, eds. **Fennema's Food Chemistry**. CRC Press, Boca Raton.
- Meharban, S. 2005. Essential fatty acids, DHA and human brain. **Indian J. Pediatr.** 72 (3): 239-242.

- Meletis, C.D. and J.E. Barker. 2004. **Herbs and Nutrients for the Mind: A Guide to Natural Brain Enhancers**. 1 ed. Praeger Publishers, London.
- Menon, V.B. and D.T. Wasan. 1983. Demulsification, pp. 1-76. *In* P. Becher, ed. **Encyclopedia of Emulsion Technology: Applications**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Miller, D.L. 2002. Health benefits of lecithin and choline. **Cereal Food World**. 47 (5): 178-184.
- Morales, M.T., J.J. Rios and R. Aparicio. 1997. Changes in the volatile composition of virgin olive oil during oxidation: flavors and off-flavors. **J. Agric. Food Chem.** 45: 2666-2673.
- Mun, S., E.A. Decker and D.J. McClements. 2006. Effect of molecular weight and degree of deacetylation of chitosan on the formation of oil-in-water emulsions stabilized by surfactant–chitosan membranes. **J. Colloid Interf. Sci.** 296 (2): 581-590.
- Muzzarelli, R.A.A. and C. Muzzarelli. 2007. Chitosan and dietary supplement and a food, pp. 215-248. *In* C.G. Biliaderis and M.S. Izydorczyk, eds. **Functional Food Carbohydrates**. CRC Press, Boca Raton.
- Nichols, P.D., B.D. Mooney and N.G. Elliott. 2004. Value-adding to Australian marine oils, pp. 115-130. *In* M. Sakaguchi, ed. **More Efficient Utilization of Fish and Fisheries Products**. Elsevier Ltd., Oxford.
- Ogawa, S., E.A. Decker and D.J. McClements. 2003a. Influence of environmental conditions on the stability of oil in water emulsions containing droplets stabilized by lecithin-chitosan membranes. **J. Agric. Food Chem.** 51: 5522-5527.

Ogawa, S., E.A. Decker and D.J. McClements. 2003b. Production and characterization of O/W emulsions containing cationic droplets stabilized by lecithin-chitosan membranes. **J. Agric. Food Chem.** 51(9): 2806-2812.

_____, _____ and _____. 2004. Production and characterization of O/W emulsions containing droplets stabilized by lecithin-chitosan-pectin multilayered membranes. **J. Agric. Food Chem.** 52(11): 3595-3600.

Olivas, G.L. and G. Barbosa-Canovas. 2009. Edible films and coatings for fruits and vegetables, pp. 211-244. *In* M.E. Embuscado and K.C. Huber, eds. **Edible Films and Coatings for Food Applications**. Springer Science, New York.

O'Regan, J. and D.M. Mulvihill. 2009. Sodium caseinate–maltodextrin conjugate stabilized double emulsions: encapsulation and stability. **Food Res. Int.** 43 (1): 224-231.

Pal, R. 2000. Shear viscosity behavior of emulsions of two immiscible liquids. **J. Colloid Interf. Sci.** 225: 359–366.

Pan, L.G., M.C. Tomás and M.C. Añón. 2002. Effect of sunflower lecithins on the stability of water-in-oil and oil-in-water emulsions. **J. Surfactants Deterg.** 5 (2): 135-143.

Prajapati , B.G. 2009. **Chitosan a marine medical polymer and its lipid lowering capacity**. The Internet Journal of Health 2009. Available Source:
http://www.ispub.com/journal/the_internet_journal_of_health/volume_9_number_2_13/article_printable/chitosan-a-marine-medical-polymer-and-its-lipid-lowering-capacity.html,
 February 16, 2010.

Rao, M.A.. 1999. **Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications**. Aspen Publishers, Inc., Meryland

Reid, D.S. and O.R. Fennema. 2008. Water and ice, pp. 17-82. *In* S. Damodaran, K.L. Parkin and O.R. Fennema, eds. **Fennema's Food Chemistry**. CRC Press, Boca Raton.

Rodríguez, M.S., L.A. Albertengo and E. Agulló. 2001. Emulsification capacity of chitosan. **Carbohydr. Polym.** 48: 271-276.

Schulz, P.C., M.S. Rodríguez, L.F. Del Blanco, M. Pistonesi and E. Agulló. 1998. Emulsification properties of chitosan. **Colloid Polym Sci.** 276: 1159-1165

Shahidi, F. 2008. Omega-3 oils: sources, application and health effects, pp. 23-62. *In* C. Barrow and F. Shahidi, eds. **Marine Nutraceuticals and Functional Foods**. CRC Press, Boca Raton.

Silletti, E., M.H. Vingerhoedsa, W. Nordeb,d and G.A. van Aken. 2007. The role of electrostatics in saliva-induced emulsion flocculation. **Food Hydrocolloid.** 21: 596-606

Simopoulos, A.P. 1990. Omega-3 fatty acids in growth and development, pp. 115-156. *In* R.S. Lees and M. Karel, eds. **Omega-3 Fatty Acids in Health and Disease**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Sizer, F.S. and E. Whitney. 2006. **Nutrition : Concepts and Controversies**. 10 ed. Thomson Wadsworth, Australia.

Shchipunov, Y.A. 2002. Lecithin, pp. 2997-3015. *In* A.T. Hubbard, ed. **Encyclopedia of Surface and Colloid Science**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Sovilj, V.J. and L.B. Petrović. 2006. Influence of hydroxypropylmethyl cellulose–sodium dodecylsulfate interaction on the solution conductivity and viscosity and emulsion stability. **Carbohydr. Polym.** 64 (1): 41-49.

- Speiciene, V., F. Guilmineau., U. Kulozik. And D. Leskauskaite. 2007. The effect of chitosan on the properties of emulsions stabilized by whey proteins. **Food Chem.** 102: 1048-1054.
- Tang, E.S.K., M. Huang and L.Y. Lim. 2003. Ultrasonication of chitosan and chitosan nanoparticles. **Int. J. Pharm.** 265 (1-2): 103-114.
- Thanasukarn, P., R. Pongsawatmanit and D.J. McClements. 2006. Utilization of layer-by-layer deposition technique to improve freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions. **Food Res. Int.** 39: 721-729.
- Vélez, G., M.A. Fernández, J..Muñoz, P.A. Williams and R.J. English. 2003. Role of hydrocolloids in the creaming of oil in water emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 51 (1): 265–269
- Venugopal, V. 2009. **Marine Products for Healthcare: Functional and Bioactive Nutraceutical Compounds from the Ocean.** CRC Press, Boca Raton.
- Volkman, J.K., S.W. Jeffrey, P.D. Nichols, G.I. Rogers and C.D. Garland. 1989. Fatty acids and lipid classes of ten species of microalgae used in mariculture. **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** (128): 219-240.
- Walstra, P. 2003. **Physical Chemistry of Foods.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Werner, M., A.C. and C. Johnston. 2009. Characterization of nanostructured materials, pp. 319-350. *In* J.C. Riviere and S. Myhra, eds. **Handbook of Surface and Interface Analysis: Methods for Problem-Solving.** CRC Press, Boca Raton.
- Zheng, S., R.L. Beissinger, L.R. Sehgal and D.T. Wasan. 2000. A new technique for drug release using multiple emulsion technology, pp. 121-130. *In* K.L. Mittal and P. Kumar, eds. **Emulsions, Foams, and Thin Films.** Marcel Dekker, Inc., New York.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน และขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไลโดซานขนาดต่างๆ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก

ขนาดโมเลกุลไคโตซาน	ความเข้มข้นไคโตซาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
โมเลกุลขนาดเล็ก	-43.2 ± 7.27^{Aa}	18.8 ± 4.95^{Ba}	54.6 ± 5.05^{Cb}	51.7 ± 6.98^{Ca}	55.8 ± 1.48^{Cb}	55.7 ± 2.61^{Cb}
โมเลกุลขนาดกลาง	-43.2 ± 7.27^{Aa}	16.2 ± 6.14^{Ba}	49.8 ± 1.77^{Ca}	49.4 ± 3.30^{Ca}	50.8 ± 1.54^{Ca}	53.8 ± 2.72^{Cab}
โมเลกุลขนาดใหญ่	-43.2 ± 7.27^{Aa}	21.0 ± 6.60^{Ba}	46.9 ± 1.30^{Ca}	48.2 ± 3.58^{Ca}	50.7 ± 1.70^{Ca}	51.2 ± 2.13^{Ca}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ไคโตซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ความเข้มข้นไคโตซานเดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ก2 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และหุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	ความเข้มข้นโคโคซาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
โมเลกุลขนาดเล็ก	0.454 ± 0.025^{Aa}	11.719 ± 3.350^{Ba}	0.929 ± 0.220^{Aa}	0.604 ± 0.116^{Aa}	0.689 ± 0.160^{Aa}	0.587 ± 0.072^{Aa}
โมเลกุลขนาดกลาง	0.454 ± 0.025^{Aa}	13.257 ± 8.030^{Ba}	0.980 ± 0.305^{Aa}	0.741 ± 0.137^{Aab}	0.805 ± 0.099^{Aa}	0.755 ± 0.124^{Aab}
โมเลกุลขนาดใหญ่	0.454 ± 0.025^{Aa}	17.125 ± 8.643^{Ba}	0.945 ± 0.285^{Aa}	0.837 ± 0.228^{Ab}	0.819 ± 0.262^{Aa}	0.860 ± 0.264^{Ab}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ความเข้มข้นโคโคซานเดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการให้ความร้อน 25-90 องศาเซลเซียส

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	อุณหภูมิในการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)					
	25	30	45	60	75	90
ไม่เติมโคโคซาน	-47.6 ± 2.22^{Aa}	-48.0 ± 2.18^{Aa}	-47.7 ± 3.78^{Aa}	-47.9 ± 3.19^{Aa}	-48.1 ± 2.50^{Aa}	-47.8 ± 2.89^{Aa}
ขนาดเล็ก	54.3 ± 3.72^{Ab}	55.1 ± 3.53^{Ab}	54.8 ± 4.12^{Ab}	55.9 ± 2.61^{Ab}	56.3 ± 2.86^{Ab}	56.4 ± 2.93^{Ab}
ขนาดกลาง	53.2 ± 1.52^{Ab}	54.7 ± 2.06^{Ab}	54.9 ± 1.86^{Ab}	55.9 ± 2.14^{Ab}	55.9 ± 2.11^{Ab}	55.6 ± 2.02^{Ab}
ขนาดใหญ่	51.6 ± 1.97^{Ab}	52.9 ± 2.10^{Ab}	52.8 ± 1.99^{Ab}	51.9 ± 2.23^{Ab}	52.7 ± 2.70^{Ab}	52.8 ± 2.08^{Ab}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซาน โมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิเดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ 4 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) หลังผ่านการให้ความร้อน 25-90 องศาเซลเซียส หลังผ่านการให้ความร้อน 25-90 องศาเซลเซียส

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	อุณหภูมิในการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส)					
	25	30	45	60	75	90
ไม่เติมโคโคซาน	0.416 ± 0.018^{Aa}	0.419 ± 0.012^{Aa}	0.420 ± 0.019^{Aa}	0.443 ± 0.017^{Ba}	0.435 ± 0.029^{Ba}	0.463 ± 0.030^{Ca}
ขนาดเล็ก	0.557 ± 0.043^{Ab}	0.565 ± 0.030^{Ab}	0.571 ± 0.027^{Ab}	0.573 ± 0.019^{Ab}	0.570 ± 0.038^{Ab}	0.577 ± 0.045^{Ab}
ขนาดกลาง	0.765 ± 0.035^{Ac}	0.775 ± 0.022^{Ac}	0.780 ± 0.040^{Ac}	0.784 ± 0.055^{Ac}	0.778 ± 0.087^{Ac}	0.783 ± 0.045^{Ac}
ขนาดใหญ่	0.863 ± 0.029^{Ad}	0.869 ± 0.049^{Ad}	0.889 ± 0.033^{Ad}	0.889 ± 0.050^{Ad}	0.889 ± 0.048^{Ad}	0.884 ± 0.039^{Ad}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-d หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิเดียวกัน(แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ๓ ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ก่อนและหลังผ่านการแช่แข็ง (ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	ค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคหยดน้ำมัน (มิลลิโวลต์)	
	ก่อนการแช่แข็ง	หลังการแช่แข็ง
ไม่เติมโคโคซาน	-47.6 ± 2.22^{Aa}	-9.7 ± 1.11^{Ab}
ขนาดเล็ก	54.3 ± 3.72^{Cb}	51.4 ± 2.21^{Ca}
ขนาดกลาง	53.2 ± 1.52^{Cb}	49.2 ± 2.45^{Ba}
ขนาดใหญ่	51.6 ± 1.97^{Bb}	46.7 ± 2.89^{Ba}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ก่อนและหลังการแช่แข็ง (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a และ b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซาน โมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ 6 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และหุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ก่อนและหลังผ่านการแช่แข็ง (ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 22 ชั่วโมง)

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	ขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน (ไมโครเมตร)	
	ก่อนการแช่แข็ง	หลังการแช่แข็ง
ไม่เติมโคโคซาน	0.416 ± 0.018^{Aa}	2.338 ± 0.615^{Ab}
โมเลกุลขนาดเล็ก	0.557 ± 0.043^{Ba}	8.256 ± 3.26^{Cb}
โมเลกุลขนาดกลาง	0.765 ± 0.035^{Ca}	4.347 ± 1.59^{Bb}
โมเลกุลขนาดใหญ่	0.863 ± 0.029^{Ca}	4.166 ± 2.07^{Bb}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ก่อนและหลังการแช่แข็ง (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a และ b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซาน โมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมไคโตซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 $\pm$ 98 kDa) กลาง (250 $\pm$ 60 kDa) และใหญ่ (342.5 $\pm$ 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์

ขนาดโมเลกุล ไคโตซาน	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)							
	0	50	100	200	300	500	750	1000
ไม่เติมไคโตซาน	-36.4 $\pm$ 2.50 ^{Aa}	-26.1 $\pm$ 4.05 ^{Ba}	-19.6 $\pm$ 3.59 ^{Ca}	-13.8 $\pm$ 2.95 ^{CDa}	-8.22 $\pm$ 11.3 ^{Da}	-8.20 $\pm$ 8.41 ^{Da}	-7.9 $\pm$ 8.95 ^{Da}	1.0 $\pm$ 11.71 ^{Ea}
โมเลกุลขนาดเล็ก	60.4 $\pm$ 5.50 ^{Db}	36.3 $\pm$ 3.26 ^{Cb}	31.2 $\pm$ 3.32 ^{Cb}	27.5 $\pm$ 3.36 ^{Bc}	22.1 $\pm$ 7.68 ^{ABb}	17.9 $\pm$ 6.53 ^{ABb}	14.4 $\pm$ 4.93 ^{Ab}	10.5 $\pm$ 5.28 ^{Ab}
โมเลกุลขนาดกลาง	59.4 $\pm$ 3.24 ^{Db}	30.9 $\pm$ 6.25 ^{Cb}	29.5 $\pm$ 2.60 ^{Cb}	23.5 $\pm$ 3.02 ^{Bb}	18.8 $\pm$ 9.71 ^{ABb}	17.2 $\pm$ 8.52 ^{ABb}	12.2 $\pm$ 10.1 ^{Ab}	9.96 $\pm$ 4.66 ^{Ab}
โมเลกุลขนาดใหญ่	58.2 $\pm$ 4.20 ^{Db}	32.4 $\pm$ 3.66 ^{Cc}	29.2 $\pm$ 2.98 ^{Cb}	22.8 $\pm$ 2.05 ^{Bb}	20.6 $\pm$ 7.42 ^{ABb}	15.0 $\pm$ 10.4 ^{ABb}	12.5 $\pm$ 7.01 ^{Ab}	10.5 $\pm$ 7.51 ^{Ab}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-E หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ไคโตซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ก8 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์

ขนาดโมเลกุล โคโคซาน	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)							
	0	50	100	200	300	500	750	1000
ไม่เติมโคโคซาน	0.431 ± 0.029^{Aa}	0.562 ± 0.037^{Ba}	0.637 ± 0.041^{Ca}	0.655 ± 0.043^{Ca}	0.666 ± 0.055^{Ca}	0.690 ± 0.034^{Da}	0.686 ± 0.034^{Da}	0.637 ± 0.025^{Ca}
ขนาดเล็ก	0.680 ± 0.044^{Ab}	0.757 ± 0.060^{Bb}	1.072 ± 0.152^{Cb}	1.085 ± 0.107^{Cb}	2.090 ± 0.846^{Cc}	2.209 ± 0.897^{Dc}	5.163 ± 1.92^{Ed}	5.857 ± 2.03^{Ed}
ขนาดกลาง	0.846 ± 0.059^{Ac}	1.306 ± 0.130^{Bc}	2.297 ± 0.427^{Cd}	2.652 ± 0.421^{Cd}	2.559 ± 0.453^{Cc}	3.319 ± 0.638^{Dd}	4.097 ± 0.818^{Ec}	4.095 ± 0.536^{Ec}
ขนาดใหญ่	0.996 ± 0.080^{Ad}	1.173 ± 0.330^{ABc}	1.473 ± 0.408^{Bc}	1.526 ± 0.414^{Bc}	1.565 ± 0.349^{Bb}	1.577 ± 0.300^{Bb}	1.720 ± 0.318^{Bb}	2.834 ± 0.454^{Cb}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-E หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ 9 ค่าประจุที่พื้นผิวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก (120 $\pm$ 98 kDa) กลาง (250 $\pm$ 60 kDa) และใหญ่ (342.5 $\pm$ 45 kDa) ที่พีเอช 3-8

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	พีเอช					
	3	4	5	6	7	8
ไม่เติมโคโคซาน	-44.3 $\pm$ 3.37 ^{Aa}	-42.0 $\pm$ 3.51 ^{Aa}	-27.7 $\pm$ 3.14 ^{Ba}	-23.8 $\pm$ 3.18 ^{Cb}	-25.8 $\pm$ 3.38 ^{CBb}	-29.4 $\pm$ 3.62 ^{Bb}
โมเลกุลขนาดเล็ก	56.5 $\pm$ 3.22 ^{Eb}	44.9 $\pm$ 1.62 ^{Da}	30.6 $\pm$ 4.09 ^{Cb}	17.6 $\pm$ 7.02 ^{Ba}	-5.83 $\pm$ 7.96 ^{Aa}	-28.2 $\pm$ 5.89 ^{Cb}
โมเลกุลขนาดกลาง	54.8 $\pm$ 3.07 ^{Eb}	43.2 $\pm$ 2.19 ^{Da}	30.5 $\pm$ 3.48 ^{Cb}	18.3 $\pm$ 2.65 ^{Ba}	1.4 $\pm$ 2.06 ^{Aa}	-19.9 $\pm$ 9.35 ^{Ba}
โมเลกุลขนาดใหญ่	54.2 $\pm$ 2.10 ^{Eb}	42.1 $\pm$ 2.24 ^{Da}	29.0 $\pm$ 2.56 ^{Cb}	18.9 $\pm$ 2.34 ^{Ba}	-22.2 $\pm$ 5.70 ^{Ab}	-21.5 $\pm$ 3.56 ^{Ba}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-F หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตารางผนวกที่ ก10 ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐุมภูมิ (ไม่เติมโคโคซาน) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่พีเอช 3-8

ขนาดโมเลกุลโคโคซาน	พีเอช					
	3	4	5	6	7	8
ไม่เติมโคโคซาน	0.382 ± 0.025^{Aa}	0.375 ± 0.045^{Aa}	0.393 ± 0.055^{Aa}	0.421 ± 0.052^{Ba}	0.405 ± 0.052^{Aa}	0.370 ± 0.032^{Aa}
โมเลกุลขนาดเล็ก	0.659 ± 0.037^{Ab}	0.813 ± 0.038^{Bb}	0.810 ± 0.060^{Bb}	1.000 ± 0.224^{Cb}	1.526 ± 0.39^{Db}	2.369 ± 0.704^{Eb}
โมเลกุลขนาดกลาง	0.791 ± 0.037^{Ac}	0.876 ± 0.050^{Ac}	1.117 ± 0.173^{Bc}	1.459 ± 0.253^{Cc}	2.523 ± 0.696^{Dc}	3.173 ± 0.657^{Ec}
โมเลกุลขนาดใหญ่	1.074 ± 0.117^{Ad}	1.295 ± 0.149^{Bd}	1.440 ± 0.128^{Cd}	1.727 ± 0.319^{Dd}	3.289 ± 1.212^{Ed}	3.420 ± 0.860^{Ec}

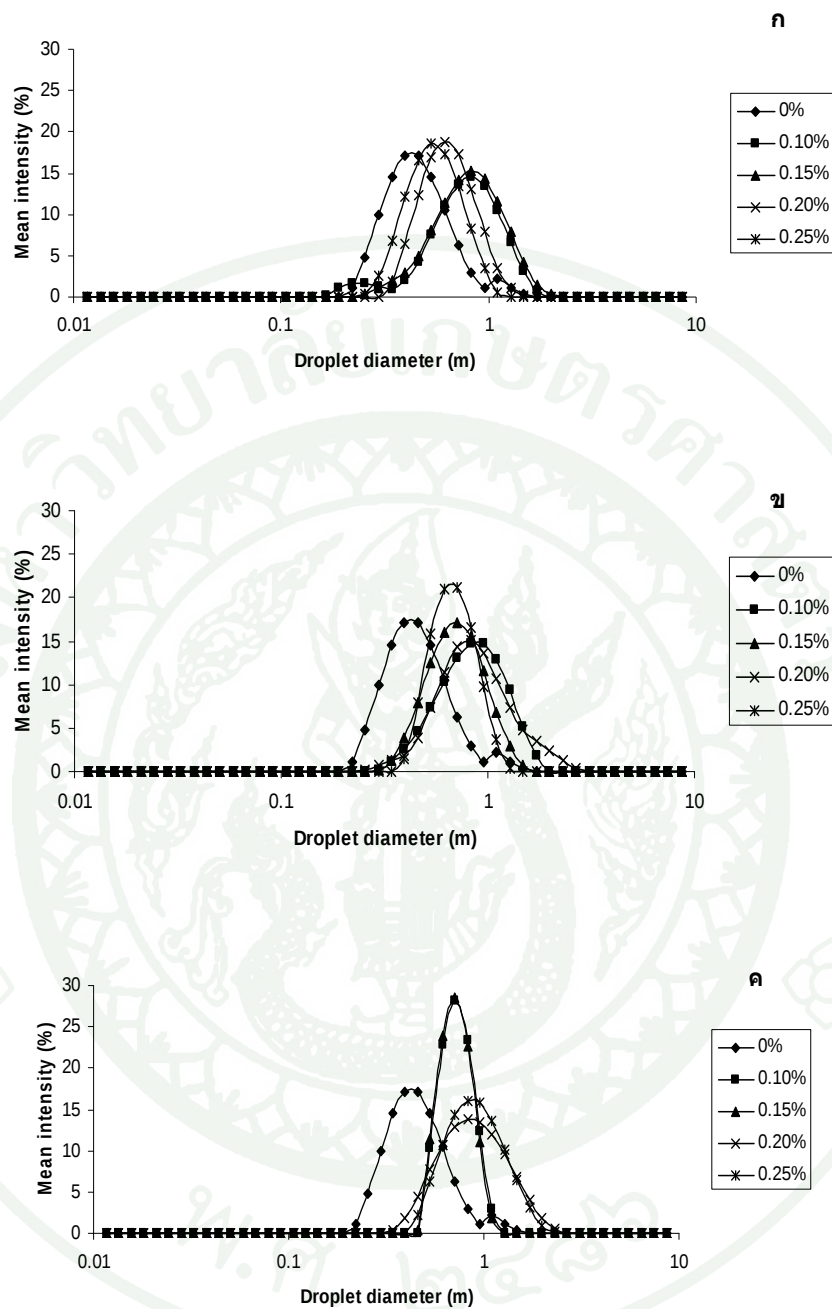
หมายเหตุ ตัวอักษร A-E หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่โคโคซานโมเลกุลขนาดเดียวกัน (แนวนอน) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกัน (แนวตั้ง) เรียงตัวอักษรจากค่าน้อยไปมาก

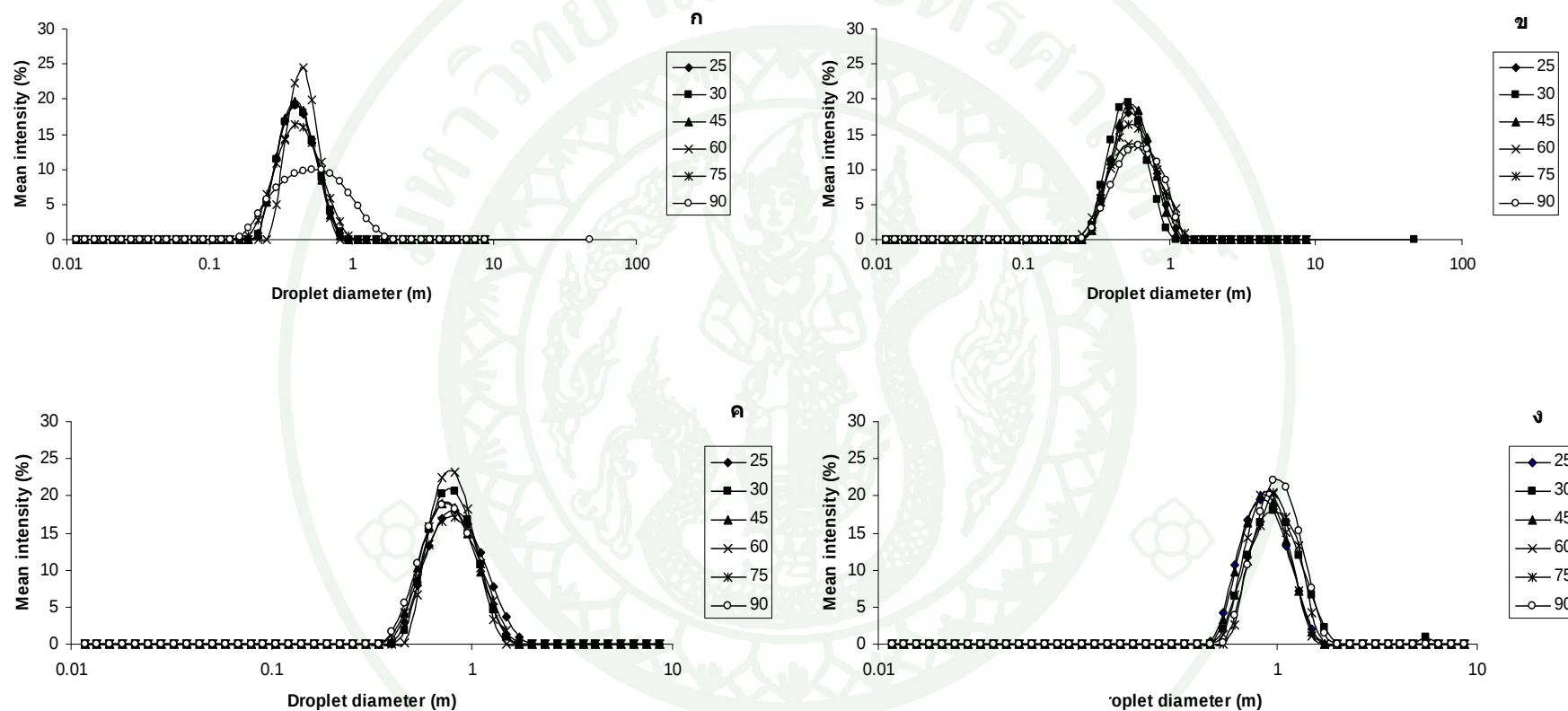


ภาคผนวก ข

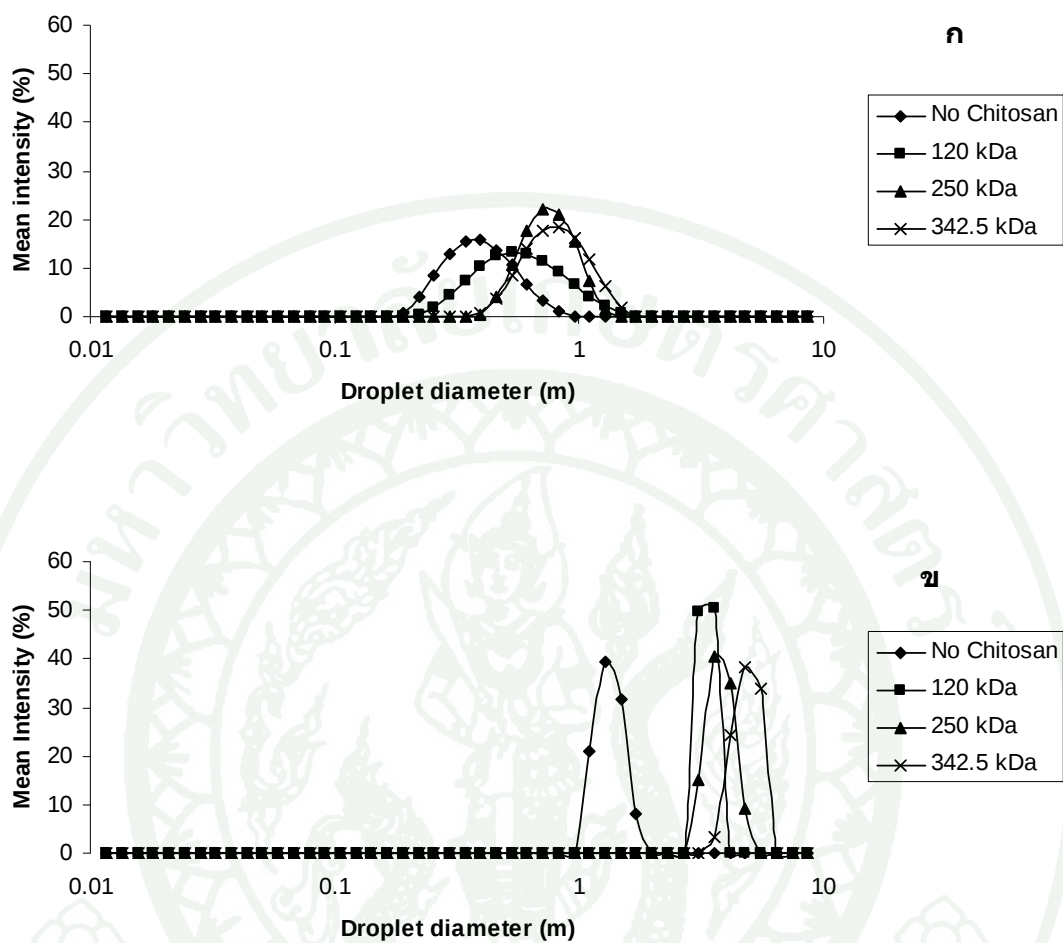
ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดนํ้ามัน (size distribution)



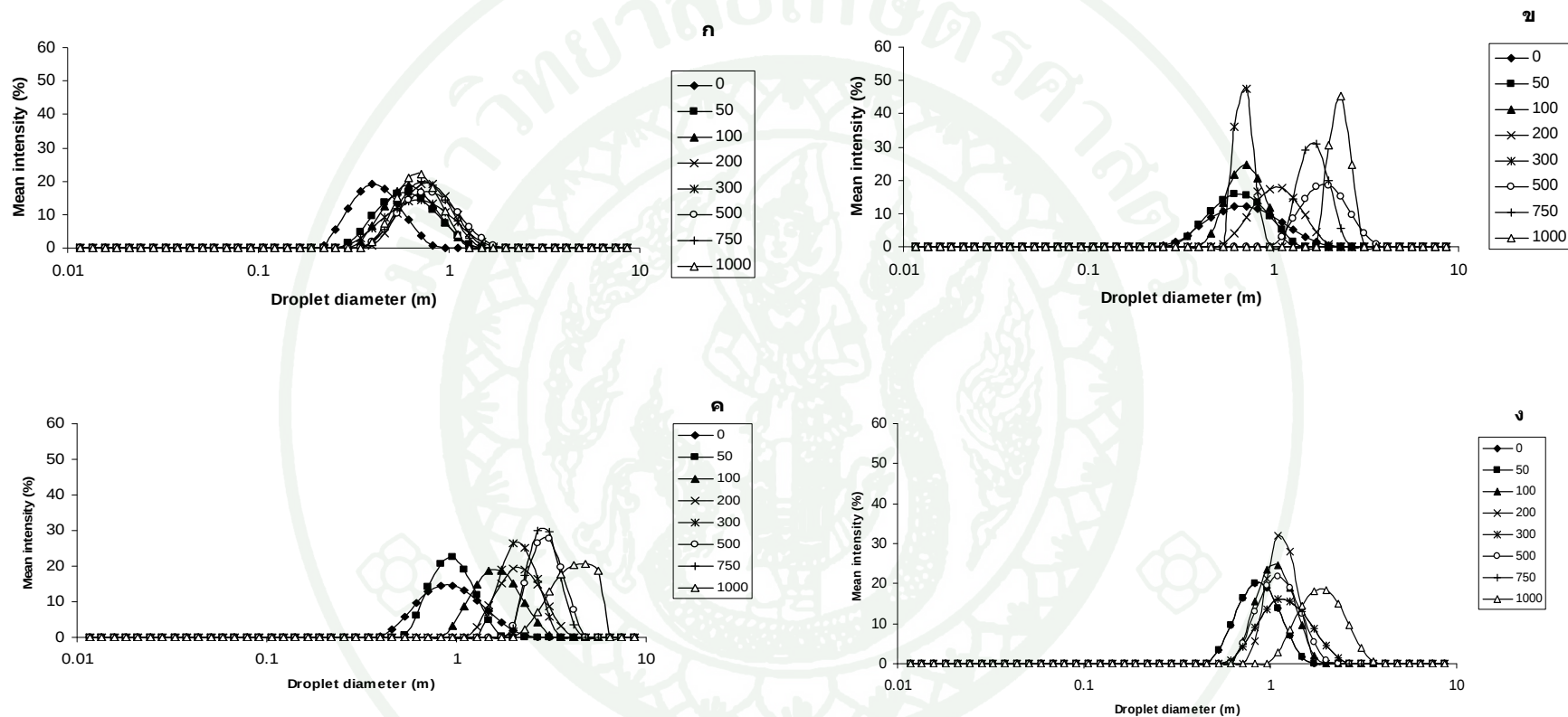
ภาพผนวกที่ ข1 การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซาน (120 ±98 kDa: ก) กลาง (250±60 kDa: ข) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ค) ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก



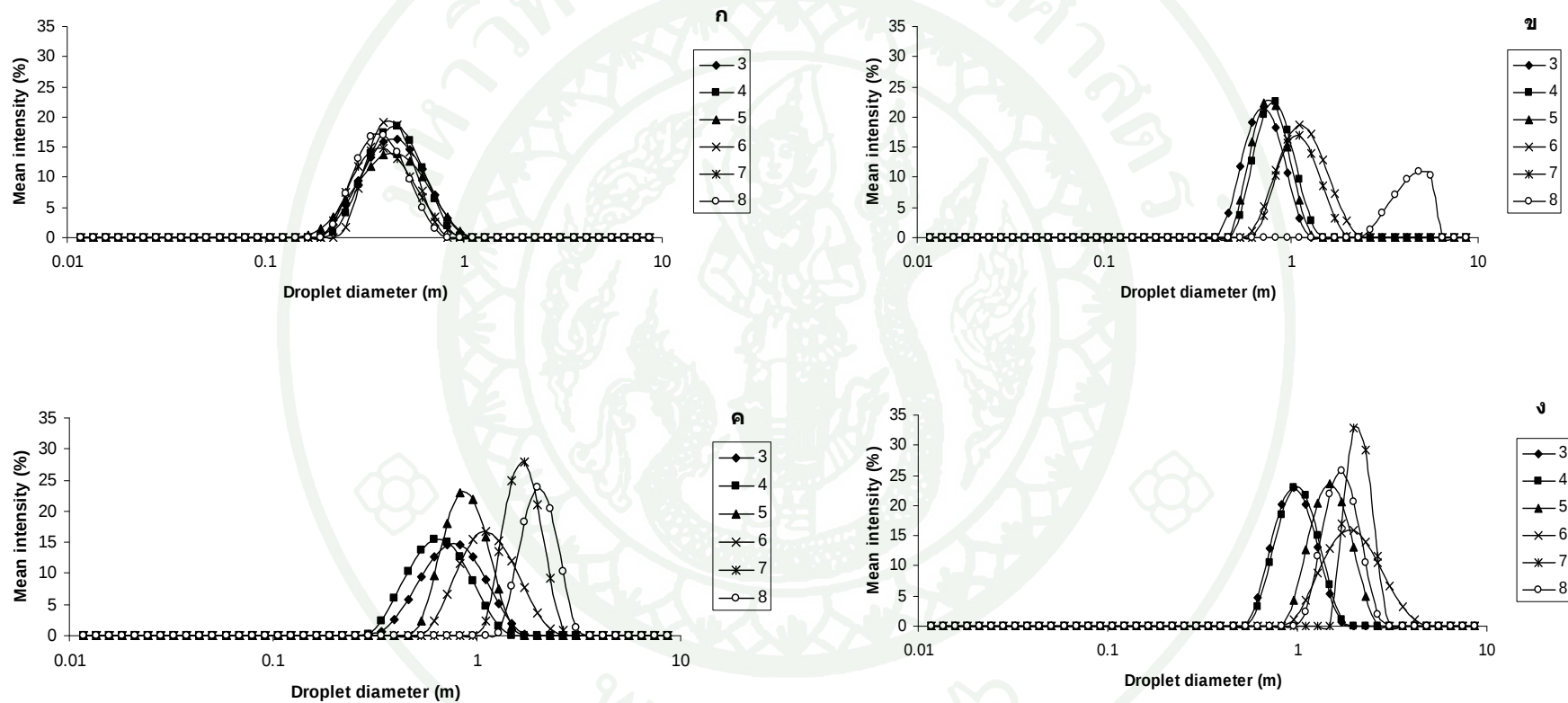
ภาพผนวกที่ ข2 การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานขนาด(120 ±98 kDa: ข) กลาง (250±60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ง) ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ข3 การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยไคโตซานขนาดขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ที่ก่อน (ก) และหลัง (ข) ผ่านการแช่แข็ง



ภาพผนวกที่ ๔ การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันโปรตีน (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานขนาด (120 ± 98 kDa: ข) กลาง (250 ± 60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa: ง) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 0-1000 มิลลิโมลาร์



ภาพผนวกที่ ๕ การกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันปฐมภูมิ (ก) และทุติยภูมิที่ประกอบด้วยโคโคซานขนาด(120 ±98 kDa: ข) กลาง (250±60 kDa: ค) และใหญ่ (342.5±45 kDa: ง) ที่พีเอช 3-8



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าประจุที่พื้นผิว และสมบัติด้านวิทยากระแสของสารละลายโคโตซาน

ตารางภาคผนวกที่ ค1 ค่าประจุที่พื้นผิวและสมบัติด้านวิทยากระแสของสารละลายไคโตซานโมเลกุลขนาดเล็ก (120 ± 98 kDa) กลาง (250 ± 60 kDa) และใหญ่ (342.5 ± 45 kDa) ละลายในอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่พีเอช 3 ที่ความเข้มข้นไคโตซานร้อยละ 0-0.25 โดยน้ำหนัก

ขนาดโมเลกุลไคโตซาน	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าประจุที่พื้นผิว (มิลลิโวลต์)	ดัชนีพฤติกรรมการไหล n	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ²	สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด K (Pa.s ⁿ)
โมเลกุลขนาดเล็ก	0.05	30.28±4.34	0.955	0.979	0.0026
	0.10	57.33±4.51	1.027	0.996	0.0030
	0.15	65.3±3.25	1.007	0.999	0.0043
	0.20	64.7±3.74	1.091	0.996	0.0038
	0.25	67.23±7.73	0.992	0.997	0.0071
โมเลกุลขนาดกลาง	0.05	39.33±2.08	1.009	0.992	0.0024
	0.10	62.03±0.93	1.096	0.995	0.0024
	0.15	65.36±3.56	1.100	0.996	0.0036
	0.20	66.33±7.17	0.976	0.995	0.0080
	0.25	68.81±8.71	0.975	0.995	0.0099
โมเลกุลขนาดใหญ่	0.05	29.37±4.67	1.034	0.998	0.0033
	0.10	64.40±1.55	0.976	0.997	0.0071
	0.15	66.80±5.40	0.971	0.999	0.0111
	0.20	69.96±2.27	0.989	0.999	0.0142
	0.25	77.66±3.97	0.979	0.999	0.0193

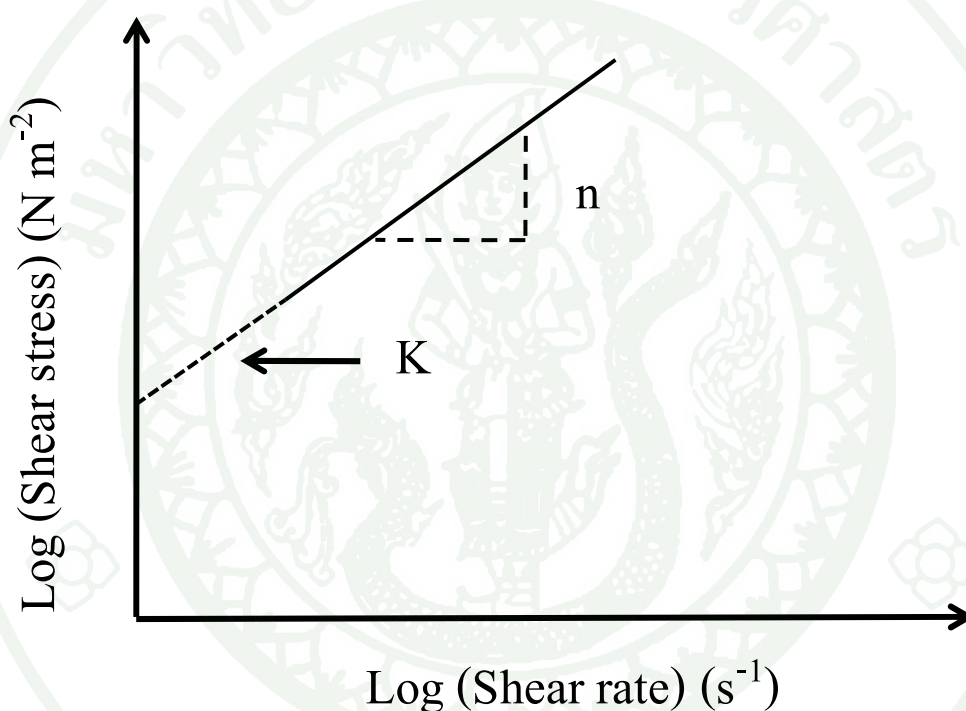


ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าดัชนีพฤติกรรมกรไหล สัมประสิทธิ์ความขุ่นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
ตามสมการของ Power Law

วิธีการคำนวณ

วิธีการหาค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior index; n) สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จากสมการของ Power Law โดยการสร้างกราฟระหว่างค่าลอการิทึมความเค้นเฉือน ($\log$ shear stress) และค่าลอการิทึมอัตราการเฉือน ($\log$ shear rate) (ภาพผนวกที่ ค 1) ความชันของเส้นกราฟที่ได้ คือ ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล และจุดตัดแกน Y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด



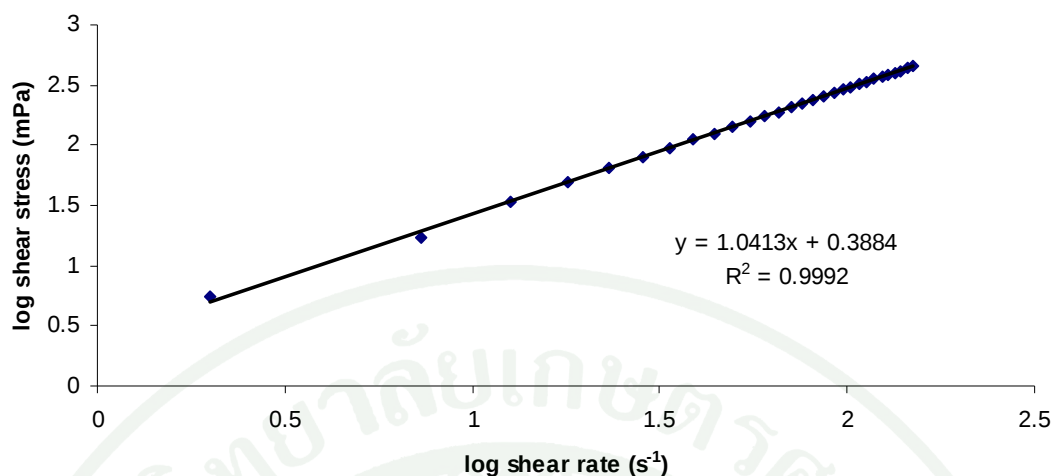
ภาพผนวกที่ ง1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตราการเฉือน

ที่มา : ดัดแปลงจากณรงค์ฤทธิ์ (ม.ป.ป.)

ตัวอย่างการหาค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้งอตัวด้วยเลซิตินและโคโคซาน โมเลกุลขนาดเล็ก ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก โดยสร้างกราฟระหว่างค่าความเค้นเฉือน ($\log$ shear stress) และอัตราการเฉือน ($\log$ shear rate)

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าความเค้นเฉือน อัตราการเฉือน ลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตรา
การเฉือนของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและโคโคซาน
โมเลกุลขนาดเล็ก ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก

ความเค้นเฉือน (mPa)	ลอการิทึม ความเค้นเฉือน	อัตราการเฉือน (s ⁻¹)	ลอการิทึม อัตราการเฉือน
5.46	0.73	2	0.30
17	1.23	7.29	0.86
34.4	1.53	12.6	1.10
49.4	1.69	17.9	1.25
64.9	1.81	23.1	1.36
79.9	1.90	28.4	1.45
95.2	1.97	33.7	1.52
111	2.04	39	1.59
126	2.10	44.3	1.64
142	2.15	49.6	1.69
158	2.19	54.9	1.73
174	2.24	60.1	1.77
190	2.27	65.4	1.81
207	2.31	70.7	1.84
224	2.35	76	1.88
240	2.38	81.3	1.91
254	2.40	86.6	1.93
271	2.43	91.9	1.96
288	2.45	97.1	1.98
303	2.48	102	2.00
319	2.50	108	2.03
337	2.52	113	2.05
354	2.54	118	2.07
371	2.56	124	2.09
388	2.58	129	2.11
402	2.60	134	2.12
418	2.62	139	2.14



ภาพผนวกที่ ๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมความเค้นเฉือน และลอการิทึมอัตรา
การเฉือนของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทินและโคโคซาน
โมเลกุลขนาดเล็ก ที่ความเข้มข้นโคโคซานร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก

เมื่อได้กราฟแล้ว พบว่า ค่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 1.04 และมีจุดตัดแกนที่ 0.388
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืดที่ได้ มีค่าเท่ากับ $10^{0.388}$ หรือ 2.44 mPa s^n และมีสัมประสิทธิ์การ
ตัดสินใจเท่ากับ 0.9992

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสุภัทชนม์ คล่องดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	28 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (เทคโนโลยีการอาหาร) ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-