



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของวัสดุห่อผนังต่อคุณสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

Effect of Wall Materials on Properties of Tuna Oil Microencapsulation

นามผู้วิจัย นางสาวจิรพร สวัสดิการ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุทัย กลิ่นเกษร, ประ.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราณี จิรภาคย์กุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงวี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของวัสดุห่อผนังต่อคุณสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

Effect of Wall Materials on Properties of Tuna Oil Microencapsulation

โดย

นางสาวจิรพร สวัสดิ์การ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิพร สวัสดิการ 2555: อิทธิพลของวัตถุดิบต่อคุณสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุทัย กลิ่นเกษร, ประ.ด. 147 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัตถุดิบที่ใช้ร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินต่อสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย การศึกษาผลของชนิดวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชัน (น้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 5 เลซิตินร้อยละ 1 และโคโคแซนร้อยละ 0.2) และปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล โดยใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ ได้แก่ ซูโครส แลกโทส หางนมผง โปรตีนเวย์เข้มข้น และกัมอะราบิก ร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทริน ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมอลโทเด็กซ์ทรินต่อสารวัตถุดิบรวมเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์สมบัติของอิมัลชัน ได้แก่ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมัน ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล พบว่าการใช้ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากการเติมวัตถุดิบดังกล่าวไม่ทำให้อิมัลชันเสียความคงตัว และไมโครแคปซูลที่เตรียมได้มีปริมาณน้ำมันอิสระต่ำ เมื่อนำซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ (0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50) มาเตรียมอิมัลชันให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อเตรียมเป็นไมโครแคปซูล จากการวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูล ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ ค่าสี พบว่าไมโครแคปซูลที่ใช้ระบบและปริมาณวัตถุดิบต่างๆ มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก มีค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ 0.3-0.4 และมีค่าสี (ΔE) ที่ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) กับไมโครแคปซูลที่ใช้มอลโทเด็กซ์ทรินอย่างเดียว (ตัวอย่างควบคุม) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มอัตราส่วนของซูโครส หรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินสามารถลดปริมาณน้ำมันอิสระ และเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน โดยไมโครแคปซูลที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูงสุดประมาณร้อยละ 96.5 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูลที่มีรูหรือรอยร้าวที่ผิวน้อยลง เมื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวพบว่า ไมโครแคปซูลที่ใช้ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบมีค่าการกระจายตัวที่ดีกว่าแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน ($p\leq 0.05$) และอิมัลชันคั้นรูปจากการละลายไมโครแคปซูลมีความคงตัวไม่เกิดการแยกชั้น การใช้ซูโครสร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบสามารถผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าที่มีสมบัติที่ดีและมีประสิทธิภาพการกักเก็บสูง น่าจะเหมาะต่อการนำไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้

Jiraporn Sawasdikarn 2012: Effect of Wall Materials on Properties of Tuna Oil Microencapsulation. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Utai Klinkesorn, Ph.D. 147 pages.

The objective of this research was to determine the influence of wall material with maltodextrin on the properties of microencapsulated spray dried tuna oil. Creaming stability, electrical charge (ζ -potential), droplet size and microstructure of liquid emulsion (5 wt% oil, 1 wt% lecithin, 0.2 wt% chitosan) and free oil content of spray dried emulsions (microcapsule) were studied by investigating the types of wall material with maltodextrin (sucrose, lactose, skimmed milk powder, whey protein concentrate and gum arabic). The weight ratio of maltodextrin to each of wall materials was set at 75:25 and total solid content of 30 wt% was used. The results showed that stable liquid emulsions and low free oil content microcapsules were achieved by using the combination of sucrose or lactose with maltodextrin as wall material system. Sucrose or lactose with maltodextrin at the weight ratios of 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 and 50:50 were employed to prepare the liquid emulsion with the total solid contents of 20, 30 and 40 wt%. After preparation, the emulsions were spray dried and characterized. The results showed that the moisture content and water activity of microcapsule were around 2-3 wt% and 0.3-0.4, respectively. The color of all microcapsules (ΔE) was not significant different ($p>0.05$) from control (use only maltodextrin). Free oil content in microcapsule decreased and encapsulation efficiency increased when the sucrose or lactose ratio and total solid content were increased. The highest encapsulation efficiency of microcapsule was approximately 96.5%. This result was supported by the microcapsule morphology with smooth surface and less pores. The dispersibility of microcapsule indicated that the sucrose-maltodextrin microcapsule has higher dispersibility than lactose-maltodextrin ($p\leq 0.05$). The reconstituted emulsions prepared from microcapsule containing sucrose-maltodextrin were stable to creaming and droplet aggregation. These results suggest that the microencapsulated tuna oil with high encapsulation efficiency could produce by using sucrose-maltodextrin combination as wall material. The microencapsulated tuna oil produced in this study could be an ingredient for the nutrition improvement in a variety of food products.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อุทัย กลิ่นเกษร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา อบรม สั่งสอน และแนะนำในเรื่องการเรียน งานวิจัยตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ปริศนา สุวรรณภรณ์ ประธานการสอบ วิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเชษฐ์ สมุหเสณีโต ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยศิลปากรที่ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่ให้โอกาสและทุนสนับสนุนในการศึกษา ต่อระดับปริญญาโท และขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏ รำไพพรรณี ที่สนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอนให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งบุคลากรของภาควิชาที่คอยอำนวยความสะดวกในการ ติดต่อประสานงานทั่วไป รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้ เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ อาหารทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคคลที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจ ได้แก่ ยิ้ม หมวย เจียบ เตย มิน สัม วัน และน้องหญิง รวมถึงนพ จิ เชนเคย์ และเพื่อนๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงที่คอย เป็นกำลังใจเสมอ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ ที่ห่วงใย ให้กำลังใจ และให้แง่คิดที่ดีตลอดมา อีกทั้งสมาชิกในครอบครัวทุกคนที่สนับสนุนและเป็นแรงใจเสมอมา

จิรพร สวัสดิการ

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	99
สรุป	99
ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	101
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก การคำนวณเพื่อเตรียมอิมัลชันจากไมโครแคปซูล	115
ภาคผนวก ข ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันและปริมาณน้ำมัน อิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าและผลการวิเคราะห์ ทางสถิติ	117
ภาคผนวก ค ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันและ ไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าและผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	122
ภาคผนวก ง สมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าก่อนการทำแห้งและอิมัลชัน คั้นรูปจากไมโครแคปซูล (Reconstituted emulsion) และผลการ วิเคราะห์ทางสถิติ	140
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ชนิดวัตถุก่อผนัง	39
2 องค์ประกอบของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	42
3 องค์ประกอบของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่า (น้ำมันร้อยละ 5, เลซิตินร้อยละ 1 และโคโคแซนร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	44
4 ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	69
5 ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	70
6 ค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	72
7 ค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	73
8 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	74
9 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
10	ค่า ΔE ของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	76
11	ค่า ΔE ของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	77
12	ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	78
13	ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	79
14	ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	80
15	ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเดกซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	81
ตารางผนวกที่		
ข1	ค่าศักย์ซิทาที่ผิวหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เค็มและเค็ม มอลโทเดกซ์ทริน หรือมอลโทเดกซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อนแห้งอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข2 ขนาดหยคน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติมและเติมมอลโท-เด็กซ์ทรินหรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	119
ข3 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล ที่เตรียมจากอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่เติมมอลโทเด็กซ์ทริน หรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	121
ค1 ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยคน้ำมัน (มิลลิโวลต์) ในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	124
ค2 ขนาดหยคน้ำมัน (ไมโครเมตร) ในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	125
ค3 ค่า L^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	131
ค4 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	132
ค5 ค่า L^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	133
ค6 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค7 ปริมาณน้ำมันที่คำนวณได้ (oil load) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้ง อิมัลชันที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	135
ค8 ประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติม วัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์- ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	136
ค9 ประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติม วัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์- ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	137
ค10 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่ เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโท- เด็กซ์ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	138
ค11 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่ เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโท- เด็กซ์ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ	139
ง1 ค่าศักย์ซึดาที่ผิวหยดนํ้ามันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูป จากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อ มอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	142
ง2 ค่าศักย์ซึดาที่ผิวหยดนํ้ามันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูป จากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ ซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75	143
ง3 ขนาดหยดนํ้ามันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูปจากการ ละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโท- เด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมี ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	144

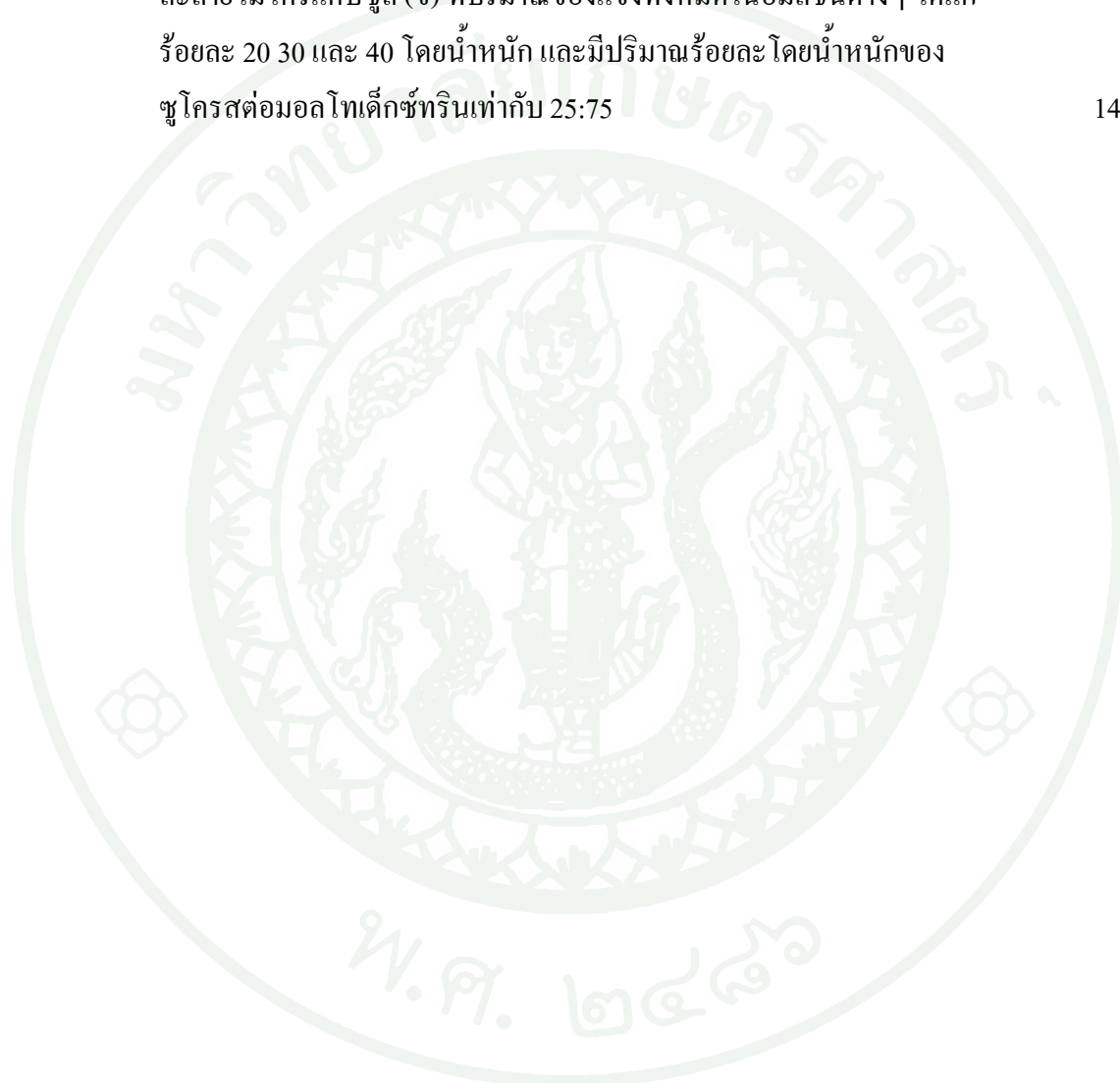
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- ง4 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของ ซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 25:75

145



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (Eicosapentaenoic acid; EPA)	5
2 โครงสร้างทางเคมีของกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (Docosahexaenoic acid; DHA)	6
3 โครงสร้างของไมโครแคปซูลประเภทวัตถุแกนเดี่ยว (single core) และวัตถุแกนกระจายในโครงสร้าง (multiple core)	15
4 กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย	19
5 โครงสร้างของกัมอะราบิก (GAL = Galactose, ARA = Arabinose, GlcA = Glucuronic acid, RHA = Rhamnose, 4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid)	22
6 ลักษณะปรากฏ และการแยกชั้นของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแลคโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)	52
7 ค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยดนํ้ามันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแลคโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติม มอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณ ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโท- เด็คซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับ กัมอะราบิก)	58
9 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อ ผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมด ในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับ ซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วม กับหางนมผง, MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโท- เด็คซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)	59
10 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่เติมมอลโทเด็คซ์- ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส (MS) หรือโปรตีนเวย์เข้มข้น (MW) หรือกัมอะราบิก (MG) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของวัตถุก่อผนังอื่น ร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน เท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	60
11 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล ที่เตรียมจากอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลา ทูน่าที่เติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่น ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดใน อิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับ หางนมผง และ MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์)	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	ลักษณะปรากฏของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	65
13	โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 5:95, 25:75 และ 50:50 ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	68
14	ประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อผนังที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ก) และ แลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ (■ = ร้อยละ 20; ■ = ร้อยละ 30 และ ■ = ร้อยละ 40)	82
15	โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 2000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	84
16	โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 4000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	85
17	โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 2000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
18	โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 4000X ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	87
19	การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ก) และแล็กโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ (■ = ร้อยละ 20; ■ = ร้อยละ 30 และ ■ = ร้อยละ 40)	89
20	ลักษณะปรากฏของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	91
21	ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยคน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	92
22	ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยคน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75	92
23	ขนาดหยคน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 25:75	94
25	การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	95
26	การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 25:75	96
27	โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 0:100 และ 25:75 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	97
28	โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับ ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 25:75	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข1 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติมมอลโท- เด็คซ์ทริน (NW) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส (ML) หรือหางนมผง (MM) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของวัตถุก่อผนังอื่นร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทริน เท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	120
ค1 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครส (MS) หรือแล็กโทส (ML) ต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมด ในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้ นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	123
ค2 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก ของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน เท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	126
ค3 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน เท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	127
ค4 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 5:95, 15:85 และ 37:63 ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	128
ค5 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทส ต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 5:95, 10:90 และ 15:85 ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	129
ค6 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทส ต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 25:75, 37:63 และ 50:50 ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ง1 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันกินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75 141
- ง2 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันกินรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 และ 25:75 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก 146

อิทธิพลของวัสดุห่อผนังต่อคุณสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

Effect of Wall Materials on Properties of Tuna Oil Microencapsulation

คำนำ

น้ำมันปลาทูน่าเป็นแหล่งของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโอเมก้า-3 ที่มีความสำคัญต่อร่างกาย ได้แก่ กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (Eicosapentaenoic acid; EPA, C20:5n3) และกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (Docosahexaenoic acid; DHA, C22:6n3) ซึ่งกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคเรื้อรัง เช่น โรคหัวใจและความดันเลือดสูง รวมถึงมีความสำคัญต่อระบบสมองและระบบประสาท ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะนำน้ำมันปลาทูน่ามาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันปลาทูน่ามาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์โดยตรงยังมีข้อจำกัด เนื่องจากน้ำมันปลาทูน่ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูง จึงไวต่อการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน ซึ่งสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันได้โดยการเติมสารต้านออกซิเดชัน หรือผลิตน้ำมันปลาทูน่าในรูปไมโครแคปซูล (Kagami *et al.*, 2003)

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูล เป็นกระบวนการกักเก็บสารสำคัญ หรือวัตถุดิบ (core material) ไว้ภายในโครงสร้างหรือวัสดุห่อผนัง (wall material) เพื่อให้สารสำคัญนั้นมีความคงตัวจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และสามารถปลดปล่อยสารสำคัญที่อยู่ภายในโครงสร้างออกมาได้ภายใต้สภาวะที่กำหนด (Dziezak, 1988) การผลิตไมโครแคปซูลมีหลายวิธี ในการศึกษานี้จะผลิตไมโครแคปซูลโดยการทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและไมโครแคปซูลที่ผลิตได้มีคุณภาพดี (Jafari *et al.*, 2007) ซึ่งขั้นตอนในการผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีนี้ต้องเตรียมน้ำมันให้อยู่ในระบบอิมัลชันโดยใช้อิมัลซิฟายเออร์ จากนั้นจึงเติมวัสดุห่อผนัง ก่อนนำไปทำแห้ง เพื่อให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีหุ้มน้ำมันที่หุ้มด้วยอิมัลซิฟายเออร์และถูกกักเก็บไว้ในวัสดุห่อผนัง (Sheu and Rosenberg, 1995; Hogan *et al.*, 2001a, 2001b; Kagami *et al.*, 2003)

อิมัลชันที่มีความคงตัว มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตไมโครแคปซูล ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า การผลิตอิมัลชันแบบผิวสัมผัสหลายชั้นโดยการหุ้มน้ำมันด้วยสารที่มีประจุตรงกันข้าม เช่น การหุ้มน้ำมันด้วยเลซิทีน-ไลโดแซน หรือโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)-

ไคโตแซน-เพกทิน ช่วยเพิ่มความคงตัวต่อสภาวะแวดล้อม และชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน (Aoki *et al.*, 2005; Klinkesorn *et al.*, 2005a) ขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันในการศึกษานี้จึงอาศัยการผลิตอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้นของน้ำมันปลาทูน่าโดยใช้เลซิทีนและไคโตแซน เนื่องจากเป็นระบบอิมัลชันที่มีความคงตัวและสามารถทำแห้งเพื่อเตรียมเป็นไมโครแคปซูลได้ (Klinkesorn *et al.*, 2005b; Shaw *et al.*, 2007) นอกเหนือจากความคงตัวของอิมัลชันแล้ว ชนิดหรือระบบวัตถุดิบและปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูลหลังการทำแห้งแบบพ่นฝอย เช่น ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค เป็นต้น

วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต เช่น มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) และผงคอร์นไซรัป (corn syrup solid) เนื่องจากละลายน้ำได้ดีและไม่มีการกลั่นรส (McNamee *et al.*, 2001) งานวิจัยก่อนหน้านี้ รายงานว่าไมโครแคปซูลที่ใช้ผงคอร์นไซรัปเป็นวัตถุดิบมีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่ดี แต่เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูล จะพบรู (pore) หรือรอยร้าว (wrinkle) ที่ผิวของไมโครแคปซูล (Klinkesorn *et al.*, 2006) ซึ่งมักพบในไมโครแคปซูลที่ใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นวัตถุดิบ โดยอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Sheu and Rosenberg, 1998; Kagami *et al.*, 2003) ด้วยเหตุนี้การนำวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ได้แก่ ซูโครส แล็กโทส หางนมผง โปรตีนเวย์เข้มข้น และกัมอะราบิก มาใช้ร่วมกับมอลโทเดกซ์ทริน จึงน่าจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติ และเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าได้

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของวัตถุดิบที่ใช้ร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินต่อสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อเพิ่มแนวทางในการนำน้ำมันปลาไปใช้เป็น ส่วนประกอบของอาหาร โดย

1. ศึกษาผลของชนิดวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันและปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลา
2. ศึกษาผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันและไมโครแคปซูลน้ำมันปลา
3. ศึกษาสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาคืนรูปจากไมโครแคปซูล (Reconstituted emulsion)

การตรวจเอกสาร

1. น้ำมันปลา

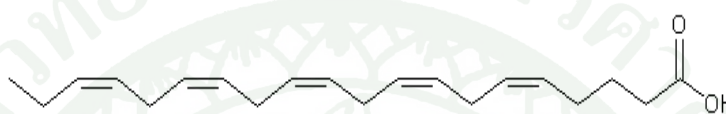
น้ำมันปลาทูน่าเป็นแหล่งของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโอเมก้า-3 ที่มีความสำคัญต่อร่างกาย ได้แก่ กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก หรืออีพีเอ (Eicosapentaenoic acid; EPA, C20:5n3) และกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิกหรือดีเอชเอ (Docosahexaenoic acid; DHA, C22:6n3) โดยน้ำมันปลาทูน่า 1 กรัม มีอีพีเอ 70 มิลลิกรัม และดีเอชเอ 250 มิลลิกรัม ซึ่งกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้ สามารถป้องกันและลดความเสี่ยงในการเกิดโรคเรื้อรัง เช่น โรคหัวใจขาดเลือดได้ เนื่องจากอีพีเอมีสมบัติในการลดการเกาะตัวของเกล็ดเลือด และสร้างสารที่ทำให้เส้นเลือดขยายตัวได้ดี ส่วนดีเอชเอจะมีความสำคัญต่อระบบสมองและระบบประสาท รวมทั้งเรตินาในดวงตา (สมพงษ์, 2538) นอกจากนี้ The American Heart Association ยังแนะนำว่า ควรรับประทานอาหารหรือผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีอีพีเอและดีเอชเอในปริมาณ 400-500 มิลลิกรัมต่อวัน เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (cardiovascular disease) และรับประทานกรดไขมันเหล่านี้ในปริมาณ 1 กรัมต่อวันสำหรับผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือด (Gebauer *et al.*, 2006)

1.1 องค์ประกอบของน้ำมันปลาที่มีผลในเชิงสุขภาพ

1.1.1 กรดไขมันอีพีเอ

อีพีเอ เป็นกรดไขมันสายยาวชนิดไม่อิ่มตัวโอเมก้า-3 ที่มีคาร์บอนจำนวน 20 ตัว และพันธะคู่ 5 ตำแหน่ง มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบซิส (cis form) (ภาพที่ 1) อีพีเอ มีประโยชน์ในการช่วยป้องกันโรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูง และลดการอักเสบของเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ เช่น โรคข้ออักเสบ (Rheumatoid arthritis) โดยร่างกายต้องการอีพีเอ เพื่อช่วยการสร้างสารกลุ่มพรอสตาแกลนดินส์ (prostaglandins) ที่ช่วยในการแข็งตัวของเลือด และระบบเส้นเลือดต่างๆ นอกจากนี้ อีพีเอยังมีผลในการลดอาการเจ็บป่วยต่างๆ เช่น ลดอาการเจ็บหน้าอกโดยเฉียบพลันจากโรคหัวใจ ลดความดันสำหรับผู้ที่ป่วยเป็นโรคความดันโลหิตสูง อีพีเอยังเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารกลุ่มไอโคซานอยด์ (eicosanoids) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ซีรีย์-3 พรอสตาแกลนดินส์ (series-3 prostaglandins) และซีรีย์-5 ลิวโคไทรอิน (series-5 leucotriene; MLB-5) ซึ่งจะช่วยลดการจับตัวกันของเกล็ดเลือด ทำให้เกิดลิ่มเลือดได้ช้าลง จึงช่วยลดความเสี่ยงของอันตรายจากโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ นอกจากนี้อีพีเอยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของผนังหลอดเลือด ช่วยในการลดความดันโลหิตและ

ลดการสร้างไตรกลีเซอไรด์ในตับ ส่งผลให้คอเลสเตอรอลและแอลดีแอลลิพโปรตีน (lipoprotein LDL) ลดลง ในกรณีของโรคข้ออักเสบ พบว่าอีพียูเลตการสร้างสารที่เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการที่ก่อให้เกิดการอักเสบ คือ ซีรี-4 ลิวโคไตรอิน (serie-4 leucotriene; MLB-4) ซึ่งเนื้อเยื่อในร่างกายสามารถสร้างได้จากกรดไขมันโอเมก้า-6 โดยอีพียูจะไปทำให้เกิดการสร้างซีรี-5 ลิวโคไตรอิน ที่ไม่มีผลร้ายต่อร่างกาย นอกจากนี้อีพียูมีผลในการลดการหลั่งสารซีโรโทนิน (serotonin) ของเกล็ดเลือด ทำให้การรวมกลุ่มของเกล็ดเลือดลดลงในระยะที่มีการบีบตัวของหลอดเลือดในสมอง ดังนั้นจึงสามารถลดอาการของไมเกรนลงได้ (สมพงษ์, 2538; สมศักดิ์, 2551)



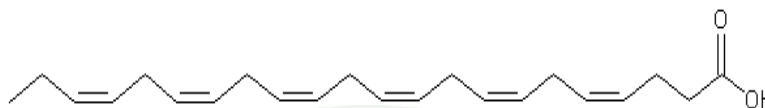
ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (Eicosapentaenoic acid; EPA)

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

1.1.2 กรดไขมันดีเอชเอ

ดีเอชเอ เป็นกรดไขมันสายยาวชนิดไม่อิ่มตัวโอเมก้า-3 ที่มีการับอนจำนวน 22 ตัว และพันธะคู่ 6 ตำแหน่ง มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบซิส (cis form) (ภาพที่ 2) ดีเอชเอ เป็นส่วนประกอบของฟอสโฟลิพิด ที่เป็นส่วนสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์โดยเฉพาะเยื่อหุ้มเซลล์สมองและเรตินา มีผลต่อพัฒนาการทางสมองและการมองเห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งดีเอชเอจำเป็นสำหรับการเจริญและพัฒนาการทางด้านสมองของทารก ช่วยเพิ่มความสามารถในการเรียนรู้ การขาดดีเอชเอในวัยเด็ก มีผลทำให้เกิดอาการสมาธิสั้น (Attention deficit hyperactivity disorder; ADHA) และยังพบว่าในน้ำนมมารดามีดีเอชเอเช่นกัน จึงมีข้อเสนอแนะให้เสริมดีเอชเอในนมผงสำหรับทารกด้วย สำหรับวัยผู้ใหญ่ดีเอชเอช่วยบำรุงรักษาการทำงานของสมอง เสริมสร้างเซลล์สมองและเซลล์ประสาท ช่วยให้ความจำดีขึ้น และช่วยให้สายตามีประสิทธิภาพสูง และลดอาการอัลไซเมอร์ (Alzheimer) การศึกษาทางด้านระบาดวิทยาพบว่า การบริโภคดีเอชเอวันละ 200 มิลลิกรัม สามารถลดความเสี่ยงจากโรคกล้ามเนื้อหัวใจตายลงร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาต่างๆ เกี่ยวกับดีเอชเอพบว่าช่วยลดความเสี่ยงหรือมีความเกี่ยวข้องกับโรคและภาวะต่างๆ ได้แก่ โรคความดันโลหิตสูง

โรคหลอดเลือดตีบ โรคเบาหวาน การแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง การอักเสบของโรคข้ออักเสบ และภาวะซึมเศร้าอีกด้วย (สมพงษ์, 2538; สมศักดิ์, 2551; Lloyd and Young, 1999)



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของกรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก (Docosahexaenoic acid; DHA)

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

2. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน

2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเสื่อมเสียของอาหาร โดยเฉพาะการเสื่อมเสียของน้ำมันและไขมัน หรืออาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบ โดยทำให้เกิดกลิ่นหรือกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ หรือกลิ่นหืน (rancid) ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค และสาเหตุทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง (Wassef, 1996)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอิสระหรือที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันและไขมัน หรืออาหารที่มีน้ำมันและไขมัน เมื่อน้ำมันและไขมันหรืออาหารสัมผัสกับออกซิเจน ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ (free-radical chain reaction) ซึ่งมีกลไกการเกิดเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (initiation) ขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ (propagation) ส่วนขั้นตอนที่ 3 เป็นปฏิกิริยาสุดท้าย (termination) ที่ทำให้อนุมูลอิสระเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียร (non-radical products) (นิธิยา, 2548)

ปฏิกิริยาเริ่มต้นของออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะทำให้เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) โดยไฮโดรคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ

แต่ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงไม่ใช่ปฏิกิริยาสำคัญในการเกิดออกซิเดชัน โดยปฏิกิริยาที่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดออกซิเดชันในอิมัลชัน คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันและไขมัน (ROOH) เป็นอนุมูลอิสระเพอร์ออกซิล (ROO[•]) และอัลคอกซิล (RO[•]) โดยโลหะแทรนซิชัน ดังนี้



อนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำมันและไขมันที่ไม่อิ่มตัว (RH) ภายในหยดนํ้ามัน หรือที่ผิวสัมผัสของหยดนํ้ามัน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของน้ำมันและไขมัน (R[•] และ ROO[•]) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจน จนกระทั่งปฏิกิริยาลิ้นสุดดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตามการเกิดอนุมูลอิสระอัลคอกซิล (RO[•]) ทำให้เกิดโมเลกุลของสารที่หลากหลาย ได้แก่ แอลดีไฮด์ คีโตน แอลกอฮอล์ และสารพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของน้ำมัน (McClements and Decker, 2007)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชัน

2.2.1 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

เนื่องจากชนิดของกรดไขมันในโมเลกุลของไขมันและน้ำมันมีผลกระทบต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและอัตราเร็วของการเกิดจะแตกต่างกัน โดยกรดไขมันที่มีพันธะคู่มากจะเกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่ากรดไขมันที่อยู่ในรูปซิสไอโซเมอร์เกิดออกซิไดส์ได้เร็วกว่าทรานส์ไอโซเมอร์ และตำแหน่งที่เป็น conjugated double bond จะเกิดออกซิเดชันได้ไวกว่า nonconjugated double bond

2.2.2 กรดไขมันอิสระ

กรดไขมันที่อยู่ในรูปอิสระจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่ายกว่าที่อยู่ในรูปเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

2.2.3 ความเข้มข้นของออกซิเจน

ในภาวะที่มีออกซิเจนมาก อัตราการเกิดออกซิเดชันจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน แต่ในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย อัตราการเกิดออกซิเดชัน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน อย่างไรก็ตาม ผลของออกซิเจนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิและพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับออกซิเจน

2.2.4 อุณหภูมิ

อัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิยังมีผลต่อความดันย่อยของออกซิเจนด้วย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนความดันย่อยของออกซิเจน จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชัน เพราะการละลายของออกซิเจนในน้ำมันและน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.2.5 พื้นที่ผิว

อัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อพื้นที่ผิวของน้ำมันและไขมันที่สัมผัสกับอากาศ ดังนั้นหากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น การเกิดออกซิเดชันจะเร็วขึ้น สำหรับอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำการเกิดออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าไปยังส่วนที่เป็นน้ำมัน

2.2.6 ความชื้น

อัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (a_w) อาหารแห้งที่มีความชื้นต่ำมาก (a_w ประมาณ 0.1) ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า a_w เพิ่มมากขึ้น อยู่ในช่วง 0.55-0.85 อัตราการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาและออกซิเจน

2.2.7 ระบบอิมัลชัน

ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ หยदन้ำมันจะกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ ออกซิเจนจะต้องแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเข้าไปยังหยदन้ำมัน ผ่านชั้นระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมัน ดังนั้นอัตราการเกิดออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ ขนาดของอนุภาคหยदन้ำมัน พื้นที่ผิวของผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ความหนืดของตัวกลางที่เป็นน้ำ ค่าพีเอช เป็นต้น

2.2.8 Pro-oxidants

แร่ธาตุหรือโลหะบางชนิด เช่น โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และนิกเกิล มีสมบัติเป็น Pro-oxidants ได้ ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.1 ส่วนต่อล้านส่วน ซึ่งจะเร่งอัตราการเกิดออกซิเดชันได้ แร่ธาตุหรือโลหะเหล่านี้ได้มาจากดินที่ปลูกพืช และปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันพืช หรือมาจากสัตว์ และอุปกรณ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปและเก็บรักษา

2.2.9 Radiant energy

แสงและรังสีต่างๆ เช่น visible light แสงอัลตราไวโอเลต และแกมมาเรดิเอชัน มีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดเร็วขึ้นได้

2.2.10 สารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันช่วยยับยั้ง หรือชะลอการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งมีทั้งสารต้านออกซิเดชันในธรรมชาติ เช่น วิตามินอีในน้ำมันพืช และสารต้านออกซิเดชันที่เป็นสารสังเคราะห์ และอนุญาตให้เติมลงในอาหารได้ เช่น โพรพิลเกลดแลต BHA และ BHT เป็นต้น (นิธิยา, 2551)

2.3 การปรับปรุงความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน

2.3.1 น้ำมันบริโภคน

2.3.1.1 การทำไฮโดรจิเนชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีพันธะคู่ โดยการเติมไฮโดรเจนอะตอมให้กับโมเลกุลกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนเปลี่ยนเป็นพันธะเดี่ยว การทำไฮโดรจิเนชัน จึงเป็นการลดจำนวนพันธะคู่ซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้น้ำมันที่ผ่านไฮโดรจิเนชันเกิดออกซิเดชันได้น้อยลง (นิธิยา, 2548; McClements and Decker, 2007)

2.3.1.2 การกำจัดอากาศ

เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นการกำจัดอากาศ หรือใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปทดแทนอากาศบริเวณที่ว่างในภาชนะบรรจุ น้ำมัน หรือผลิตภัณฑ์อาหารจึงช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้น้อยลง

2.3.1.3 การเติมสารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันสามารถช่วยหยุดยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ (free radical chain reaction) ได้ โดยสารต้านออกซิเดชันจะให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีความเสถียร และไม่เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับออกซิเจนทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเกิดออกซิเดชันช้าลง

2.3.1.4 การเติมตัวคีเลต (Chelating agents)

สารประกอบพวกกรดซิตริก กรดฟอสฟอริก และกรดเอทิลีนไดอะมีน-เตตระแอซีติก (ethylene diamine tetra acetic acid; EDTA) จะทำปฏิกิริยากับโลหะ เช่น เหล็ก หรือ ทองแดง ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตัวคีเลตจะเกิดสารประกอบ

เชิงซ้อนกับอนุมูลโลหะ ทำให้ไม่มีอนุมูลโลหะอิสระที่จะเร่งการเกิดออกซิเดชันเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้น้ำมันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ช้าลง

2.3.1.5 การป้องกันไม่ให้ถูกแสง

แสงเป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระในไขมันและน้ำมันได้เช่นกัน ดังนั้นการบรรจุน้ำมันในภาชนะที่ทึบแสง โดยเฉพาะแสงช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลตจะชะลอการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (นิธิยา, 2548)

2.3.2 น้ำมันในระบบอิมัลชัน

วิฤกาน้ำมันเป็นส่วนประกอบหลักของระบบอิมัลชันสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน ปริมาณออกซิเจน สารต้านออกซิเดชัน คุณสมบัติของผิวสัมผัสของหยดน้ำมัน (interfacial) และคุณสมบัติของอนุภาคหยดน้ำมัน (McClements and Decker, 2000) ค่าประจุทางไฟฟ้า (electrical charge) หรือ ศักย์ซีตา (ζ -potential) ที่ผิวสัมผัสหยดน้ำมัน มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของระบบอิมัลชัน โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า ศักย์ซีตาของหยดน้ำมันจะควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดในน้ำที่มีอิมัลซิฟายเออร์ที่ผิวหยดน้ำมันชนิดต่างๆ ได้แก่ หยดน้ำมันที่มีศักย์ซีตาลบของ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate; SDS) และหยดน้ำมันที่มีศักย์ซีตาบวกของ DTAB (dodecyl-trimethyl ammonium bromide) พบว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเติมเกลือลงไปในอิมัลชันมีค่าสูงเมื่อผิวหยดน้ำมันมีค่าศักย์ซีตาลบ ในขณะที่หยดน้ำมันที่มีศักย์ซีตาบวกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยกว่ามาก (Mei *et al.*, 1998) สอดคล้องกับการศึกษาของ Mancuso *et al.* (1999) พบว่าอิมัลชันน้ำมันปลาแซลมอนที่ทำให้คงตัวด้วยอิมัลซิฟายเออร์ต่างชนิดกัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่างกัน โดยอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (อิมัลซิฟายเออร์ประจุลบ) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วย Tween 20 (อิมัลซิฟายเออร์ไม่มีประจุ) และ DTAB (อิมัลซิฟายเออร์ประจุบวก) เนื่องจากประจุลบของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ทำให้ศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันมีค่าลบ ดึงดูดอนุมูลโลหะ ซึ่งมีประจุบวกให้เคลื่อนที่เข้าใกล้หยดน้ำมัน และเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ซีตาบนผิวสัมผัสของหยดน้ำมัน มีความสำคัญต่อการควบคุม อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชัน ดังนั้นนอกเหนือจากวิธีการที่ช่วยให้อิมัลชันมีความ คงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น การเติมสารต้านออกซิเดชัน และการเติมตัวเคลือบ ยังมีอีกหนึ่ง วิธีการที่สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชันน้ำมันได้ คือ การผลิตอิมัลชันแบบ ผิวสัมผัสหลายชั้น ซึ่งเป็นการเพิ่มชั้นผิวสัมผัสให้แก่หยดน้ำมัน โดยความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่ เพิ่มขึ้น และชนิดของอิมัลซิไฟเออร์หรือพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ในการผลิตอิมัลชันชนิดนี้ สามารถ ชะลอการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันในระบบอิมัลชันได้ เช่น การใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุลบ (anionic emulsifier) ในการสร้างอิมัลชันเริ่มต้น (primary emulsion) ที่มีหยดน้ำมันขนาดเล็ก หลังจากนั้นเติมพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่มีประจุบวกลงในระบบ การเติมสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ใน ปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้พอลิอิเล็กโตรไลต์ถูกดูดซับที่ผิวสัมผัส ได้อิมัลชันที่มีผิวสัมผัสสองชั้น (secondary emulsion) ที่มีความคงตัวต่อสภาวะแวดล้อมดีกว่าอิมัลชันที่มีผิวสัมผัสแบบชั้นเดียว (Guzey and McClements, 2006) ตัวอย่างเช่น การผลิตอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียม- โดเดซิลซัลเฟต-โคโคแชน พบว่ามีความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีกว่าอิมัลชันน้ำมัน ปลาที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียวที่ศักย์ซีตาเป็นลบ (~ -50 มิลลิโวลต์) เนื่องจากความหนาของชั้นผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันระหว่างอนุมูลโลหะ ซึ่งเป็นตัวเร่งและน้ำมันในอิมัลชันเกิดได้ช้าลง นอกจากนี้หยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมโดเดซิล- ซัลเฟต-โคโคแชน ซึ่งมีค่าศักย์ซีตาเป็นบวก (~ + 60 มิลลิโวลต์) เกิดแรงผลักระหว่างประจุกับอนุมูล โลหะ (Fe^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกเช่นเดียวกัน ทำให้อนุมูลโลหะเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำมัน ได้ ยากกว่าหยดน้ำมันที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเพียงอย่างเดียวที่มีศักย์ซีตาเป็นลบ ซึ่งอนุมูล โลหะสามารถดูดซับที่พื้นผิวสัมผัสได้ง่าย จึงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน ได้ (Guzey and McClements, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการเกิดออกซิเดชันของอิมัลชันน้ำมัน ปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีน-โคโคแชน (Klinkesorn *et al.*, 2005b)

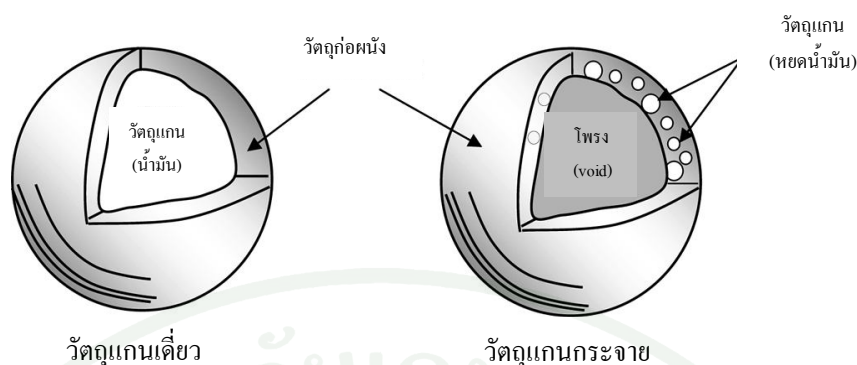
อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากการผลิตอิมัลชันแบบผิวสัมผัสหลายชั้นแล้ว กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ น้ำมันและไขมันได้

3. กระบวนการผลิตไมโครแคปซูล (microencapsulation)

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลเป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ยา ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหาร สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมใช้กระบวนการผลิตนี้ เช่น กลิ่นรส น้ำมันและไขมัน เนื่องจากเป็นสารที่มีความไวต่อการเสื่อมเสียหรือไม่คงตัวจากสภาวะแวดล้อม เช่น แสง ความร้อน อากาศและอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง (Kagami *et al.*, 2003) กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลเป็นกระบวนการกักเก็บสารสำคัญตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป ซึ่งอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ ไว้ภายในโครงสร้าง เพื่อให้สารสำคัญนั้นมีความคงตัวจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และสามารถปลดปล่อยสารสำคัญที่อยู่ภายในโครงสร้างออกมาได้ภายใต้สภาวะที่กำหนด (Dziezak, 1988) โดยที่สารสำคัญเรียกว่าวัสดุแกน (core material) หรืออาจเรียกชื่ออื่นๆ เช่น แกน (core) internal phase หรือ fill ส่วนสารที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างเรียกว่า วัสดุก่อก่อผนัง (wall material) หรืออาจเรียกชื่ออื่นๆ เช่น ผนัง (wall) เปลือก (shell) สารเคลือบ (coating) หรือ เยื่อ (membrane) (Gharsallaoui *et al.*, 2007) ขนาดของไมโครแคปซูลจะอยู่ในช่วง 1.0-5,000 ไมโครเมตร ถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 5,000 ไมโครเมตร เรียกแมโครแคปซูล และถ้ามีขนาดเล็กกว่า 1.0 ไมโครเมตร เรียกว่านาโนแคปซูล (King, 1995)

วัตถุประสงค์ของการผลิตไมโครแคปซูลที่มีน้ำมันและไขมันเป็นวัสดุแกนนั้น เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพิ่มความคงตัว ควบคุมการปลดปล่อยของกลิ่นรสที่ละลายได้ในน้ำมัน และปกปิดรสชาติหรือกลิ่นที่ไม่เป็นที่ยอมรับของสารที่ละลายในน้ำมันได้ (Matsuno and Adachi, 1993) นอกจากนี้ประโยชน์ของการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมัน คือ สะดวกในการเก็บรักษา สามารถนำไมโครแคปซูลน้ำมันชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันปลา น้ำมันพืชชนิดต่างๆ เติมลงในอาหารประเภทต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เครื่องดื่ม และอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากมีกรดไขมันชนิดที่เป็นประโยชน์กับร่างกาย (Shahidi and Han, 1993)

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลมีหลายวิธี ในการเลือกใช้วิธีใดจะขึ้นอยู่กับสมบัติของไมโครแคปซูลที่ต้องการ เช่น โครงสร้างของอนุภาค (ภาพที่ 3) ขนาดอนุภาค สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุแกนและวัสดุก่อก่อผนัง กระบวนการปลดปล่อยสาร (control release) และการนำไปใช้งาน รวมถึงต้นทุนในการผลิตที่เหมาะสม โดยวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ วิธีทางเคมีและวิธีที่อาศัยเครื่องมือ



ภาพที่ 3 โครงสร้างของไมโครแคปซูลประเภทวัสดุแก่นเดี่ยว (single core) และวัสดุแก่นกระจายในโครงสร้าง (multiple core)

ที่มา: Jafari *et al.* (2008)

3.1 วิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูล

3.1.1 กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลที่อาศัยวิธีทางเคมี

โคแอเซเวชัน (coacervation หรือ coprecipitation หรือ phase separation) เป็นกระบวนการที่ใช้ปรากฏการณ์การเกิดคอลลอยด์ซึ่งประกอบไปด้วยวัฏภาค 3 วัฏภาค โดยไม่ละลายซึ่งกันและกัน ได้แก่ วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) วัสดุแก่น (core material) และวัฏภาคของวัสดุห่อหุ้มหรือสารเคลือบ (coating material phase) (Risch, 1995) วิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือ การทำให้เกิดอนุภาคหรือหยดของเหลวที่มีขนาดเล็ก โดยนำอนุภาคที่จะกักเก็บไปกระจายตัวในสารละลายพอลิเมอร์ (ตัวอย่างเช่น กัมอะราบิก และเจลาติน) เพื่อให้เป็นอิมัลชันโดยมักเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ แล้วแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์ออกจากตัวทำละลายเพื่อไปดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาค หรือเรียกว่าการเกิด coacervative wall โดยการปรับเปลี่ยนพีเอช และขั้นตอนสุดท้าย คือ การทำให้ชั้นของพอลิเมอร์แข็งแรงขึ้นโดยอาศัยอุณหภูมิหรือสารที่เสริมความแข็งแรงให้แก่พอลิเมอร์ เช่น สารประกอบแคลเซียม และแยกไมโครแคปซูลที่ได้ออกจากสารละลาย (Madene *et al.*, 2006)

โมเลกุลาร์ อินคลูชัน (molecular inclusion) เป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากผลของอันตรกิริยาของโมเลกุลของสารที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ในโครงสร้างของอีกโมเลกุลหนึ่ง เช่น การกักเก็บกลีโคไซด์ไว้ในโครงสร้างของบีตา-ไซโคลเด็กซ์ทริน (β -cyclodextrin) วิธีการนี้จะใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน (cyclodextrin) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอนไซม์ไกลโคซิลทรานเฟอเรส (glycosyl transferase; GCTase) มาทำปฏิกิริยากับสตาร์ช เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์วงแหวนที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส หก เจ็ด หรือ แปด โมเลกุลเรียกว่า แอลฟา-, บีตา-, หรือ แกมมา-ไซโคลเด็กซ์ทริน ตามลำดับ บริเวณตรงกลางโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่วนที่ผิวนอกจะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) เมื่ออยู่ในสารละลายโมเลกุลที่มีขั้วน้อยกว่าจะแทนที่โมเลกุลของน้ำที่อยู่ตรงกลางของโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน สารประกอบที่เกิดขึ้นจะละลายได้น้อยและตกตะกอนแยกตัวออกมาจากสารละลาย (Madene *et al.*, 2006)

วิธีโคคริสตัลไลเซชัน (Co-crystallization) เป็นการตกผลึกของซูโครสไซรีปในสถานะอิมิตัวแข็งยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 120 องศาเซลเซียส) และความชื้นต่ำ (95-97 องศาบริกซ์) โดยเติมวัตถุแทนลงไประหว่างการเกิดผลึก (spontaneous crystallization) ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีขนาดเล็กล้อมรอบวัตถุแทนอยู่ภายใน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีสามารถในการดูดความชื้นต่ำ (low hygroscopicity) มีความสามารถในการไหล (flowability) และการกระจายตัวที่ดี (dispersion properties) (Madene *et al.*, 2006)

การใช้ลิโปโซมในการกักเก็บ (Liposome entrapment) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยา และปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยกักเก็บสารสำคัญเพื่อเพิ่มความคงตัว แล้วนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร เช่น การใช้ลิโปโซมที่เตรียมจากเลซิธินในถั่วเหลืองกักเก็บกรดแอสคอร์บิก และบีตา-แคโรทีนเพื่อเสริมในผลิตภัณฑ์น้ำสับปะรด (หทัยรัตน์, 2548)

3.1.2 กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลที่อาศัยเครื่องมือ

เอกซ์ทรูชัน (Extrusion) เป็นกระบวนการที่ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลสารให้กลิ่นรส หรือสารที่ระเหยได้ง่าย โดยกักเก็บในคาร์โบไฮเดรต (glassy carbohydrate) และอาศัยเครื่องเอกซ์ทรูด โดยส่วนผสมจะเคลื่อนที่ผ่านหัวไดล์ (die) ไปยังส่วนที่มีของเหลวซึ่งใช้ในการดึงน้ำออก เช่น ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ทำให้วัตถุก่อนเกิดการแข็งตัวแล้วกักเก็บวัตถุแทน

ไว้ภายใน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นหรือแผ่น จึงต้องนำไปทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ และทำให้แห้ง (Madene *et al.*, 2006)

วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying หรือ Lyophilization) หมายถึง การทำแห้ง (dehydration) ด้วยการแช่เยือกแข็ง (freezing) ให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน แล้วจึงลดความดันเพื่อให้ผลึกน้ำแข็งระเหิด (sublimation) เป็นไอ ด้วยการลดความดันให้ต่ำกว่า บรรยากาศ ขณะควบคุมให้อุณหภูมิต่ำ (ที่อุณหภูมิเท่ากับหรือต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส น้ำแข็งระเหิด ที่ความดันเท่ากับ 4.7 มิลลิเมตรปรอทหรือต่ำกว่า) วิธีนี้ใช้ในการกักเก็บวัตถุแกนหรือสารสำคัญที่ไวต่อความร้อน โดยการกักเก็บจะเกิดระหว่างขั้นตอนการแช่เยือกแข็งโดยขณะที่น้ำในสารละลาย เปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็ง สารละลายในส่วนที่น้ำยังไม่แข็งตัว (non-frozen solution) จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยชะลอการแพร่ของวัตถุแกน เมื่อปริมาณผลึกน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น สารละลายที่มี วัตถุแกนละลายอยู่จะอยู่ในสภาวะอิมพัลิ่งยวดและเริ่มตกผลึกโดยกักเก็บวัตถุแกนไว้ภายใน (Madene *et al.*, 2006)

วิธีสเปรย์ชิลลิ่ง (Spray chilling) และสเปรย์คูลลิ่ง (Spray cooling) ซึ่งวิธีเหล่านี้จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยวัตถุแกนจะกระจายตัวอยู่ในสารละลายวัตถุอ่อนนุ่ม จากนั้นทำการป้อน ของผสมที่ได้ผ่านหัวฉีด (atomizer) เพื่อพ่นให้เป็นละอองฝอย วิธีนี้แตกต่างจากการทำแห้งแบบ พ่นฝอยตรงที่ไม่มีการระเหยน้ำ โดยของผสมระหว่างวัตถุแกนและวัตถุอ่อนนุ่มจะถูกฉีดพ่นไปยัง อากาศเย็น (cool or chill air) ทำให้วัตถุอ่อนนุ่มที่มีสมบัติเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องแข็งตัว (Madene *et al.*, 2006) วัตถุอ่อนนุ่มที่ใช้ในวิธีสเปรย์ชิลลิ่ง จะเป็นน้ำมันที่ผ่านการแยกส่วน (fractionation) หรือไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 32-42 องศาเซลเซียส ส่วนวัตถุอ่อนนุ่มที่ใช้ในวิธีสเปรย์คูลลิ่ง เป็นน้ำมันที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 45-122 องศาเซลเซียส ดังนั้นสองวิธีนี้จึงแตกต่างกันที่จุดหลอมเหลวของวัตถุอ่อนนุ่มเท่านั้น และนิยมใช้ในการกักเก็บสารให้กลิ่นรส วิตามิน เกลือแร่ และสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนผสม ของไขมันสูง (Madene *et al.*, 2006)

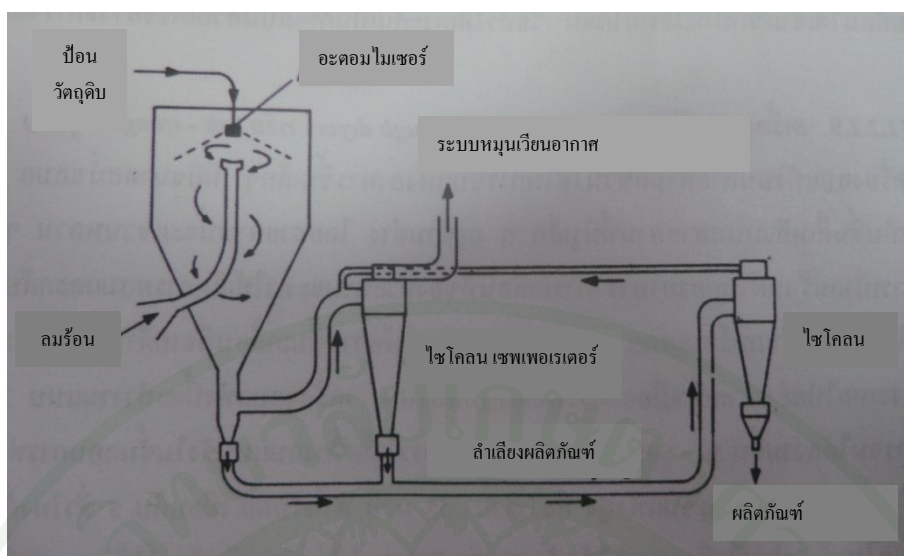
กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เป็นกระบวนการทางกายภาพ (physical process) ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร สำหรับการผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีนี้ ใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เพื่อผลิตกลิ่นรสโดยใช้กัมอะราบิกเป็นวัตถุอ่อนนุ่ม (Shahidi and Han, 1993) ในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลโดยการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นที่นิยม เนื่องจากมีความสะดวก ในการผลิต ต้นทุนในการผลิตต่ำ เครื่องมือที่ใช้สามารถหาได้ง่าย กำลังการผลิตสูง ระยะเวลาการ

ผลิตสั้น (Risch, 1995) อีกทั้งเหมาะสมสำหรับการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันและไขมัน (Krishnan *et al.*, 2005) นอกจากนี้วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นการทำแห้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากหยดของเหลวถูกกำจัดน้ำออกจากอนุภาคอย่างรวดเร็ว และหยดของเหลวเกิดการสร้างฟิล์มรอบผิวอนุภาค จึงทำให้อุณหภูมิภายในอนุภาคต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิในห้องทำแห้งที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่า 150 องศาเซลเซียส (Rosenberg, 1990) จึงทำให้วัตถุดิบไม่เสื่อมเสียเนื่องจากความร้อนในการทำแห้ง โดยมีการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้าอยู่ในช่วง 150-220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอนุภาคจะอยู่ในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส (Gharsallaoui *et al.*, 2007) นอกจากนี้วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงที่ละเอียดมาก โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร ซึ่งอาจจะต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการ (agglomeration) โดยใช้กระบวนการฟลูอิดไดส์เบด เพื่อให้อนุภาคไมโครแคปซูลสามารถละลายได้ทันที หรือละลายได้ง่ายขึ้น

4. การทำแห้งแบบพ่นฝอย

4.1 หลักการ

การทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นการทำแห้งเพื่อผลิตอาหารที่มีลักษณะเป็นผง เช่น นมผง น้ำผลไม้ผง กาแฟ โดยอาศัยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) โดยอาหารเหลวจะผ่านอะตอมไมเซอร์เพื่อถูกพ่นให้เป็นละอองฝอย และสัมผัสกับกระแสลมร้อนภายในห้องทำแห้ง (drying chamber) ทำให้น้ำในอาหารระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะเป็นผงแห้ง ตกสู่ภาชนะรองรับด้านล่าง ผงบางส่วนที่รวมอยู่กับลมร้อนจะถูกแยกออก ด้วยระบบแยกซึ่งแสดงกระบวนการผลิต ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา: วิไล (2546)

4.2 ขั้นตอนในการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันโดยอาศัยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ขั้นตอนแรกในการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันโดยอาศัยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ การเตรียมน้ำมันให้อยู่ในระบบอิมัลชัน โดยการผสมวัตถุแทนกับวัตถุก่อผนังซึ่งไม่ละลายเข้าด้วยกัน (หรืออาจเติมวัตถุก่อผนังหลังการเตรียมน้ำมันแล้ว) อาจมีการเติมหรือไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ลงในระบบ โดยบางครั้งอาจมีการให้ความร้อนร่วมด้วย จากนั้นจึงนำของผสมนั้นไป ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง เกิดเป็นอิมัลชันชนิดหยาบ (coarse emulsion) แล้วทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮโมจิไนส์ เพื่อให้ได้อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ ที่มีขนาดหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็ก และมีความคงตัวก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย หลังจากนั้นจึงนำอิมัลชันที่เตรียมไปผ่านขั้นตอนการพ่นให้เป็นละอองฝอย และสุดท้ายคือขั้นตอนการระเหยแห้ง (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

ขั้นตอนการพ่นให้เป็นละอองฝอย (Atomization) จะเป็นการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนระหว่างลมร้อนและอิมัลชันที่ถูกพ่นเป็นละอองฝอย โดยนำอิมัลชันที่มีความคงตัวมาพ่นเป็นละอองฝอย โดยอาศัยเครื่องอะตอมไมเซอร์ (atomizer) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น อะตอมไมเซอร์ที่อาศัยแรงเหวี่ยง (centrifugal atomizer) หรืออะตอมไมเซอร์ที่อาศัยแรงดัน (pressure nozzle atomizer) เกิดเป็นหยดอิมัลชัน (droplet) ที่มีขนาดเล็กสัมผัสกับลมร้อนภายในเครื่องทำแห้งแบบ

พ่นฝอย (droplet-hot air contact) ซึ่งเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำแห้ง ลมร้อนที่ใช้อาจมีทิศทางเดียวกับอิมัลชันที่พ่นออกมา (co-current) หรือในทิศทางตรงกันข้าม (counter-current) สำหรับลมร้อนแบบทิศทางเดียวกับการพ่นของอิมัลชันจะมีอุณหภูมิในช่วง 150-220 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิภายในผงแห้งจะอยู่ในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียจากความร้อน ส่วนลมร้อนที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับการพ่นของอิมัลชัน จะทำให้ผงแห้งมีอุณหภูมิสูง จึงจำกัดการนำไปใช้กับสารที่ไวต่อความร้อน (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

ขั้นตอนการระเหยแห้ง (Evaporation of droplet water) ในขั้นตอนที่อิมัลชันที่พ่นฝอยสัมผัสกับลมร้อน จะเกิดสมดุลของอุณหภูมิและความดันไอระหว่างของเหลวและก๊าซ นั่นคือความร้อนเคลื่อนที่จากอากาศไปยังหยดอิมัลชันทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ในขณะที่น้ำเคลื่อนที่ออกจากหยดอิมัลชันทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างอากาศและหยดอิมัลชันเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะเกิดการระเหยของน้ำในหยดอิมัลชันที่อุณหภูมิและความดันไอระหว่างอากาศที่ อัตราการแพร่จากภายในหยดอิมัลชันไปที่ผิวของหยดอิมัลชันจะเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของหยดอิมัลชัน จนกระทั่งน้ำในหยดอิมัลชันลดลงถึงค่าหนึ่ง เปลือกแข็ง (dry crust) จะถูกสร้างขึ้นที่ผิวของหยดอิมัลชัน ทำให้อัตราการทำแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การทำแห้งในช่วงต่อมาจึงขึ้นกับการแพร่ของน้ำผ่านเปลือกแข็งนี้ การทำแห้งจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคผงเท่ากับอากาศในห้องทำแห้ง กลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการระเหยแห้งอาจแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิที่ท่อทางเข้าของอนุภาค โดยถ้าอุณหภูมิที่ท่อทางเข้าของอนุภาคสูง อัตราการระเหยของน้ำสูงเปลือกแข็งจะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ้าหยดอิมัลชันมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง การระเหยแห้งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

5. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไมโครแคปซูลโดยอาศัยการทำแห้งแบบพ่นฝอย

5.1 วัตถุดิบ

การเลือกชนิดของวัตถุดิบที่เหมาะสมเป็นขั้นตอนแรกในการผลิตไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย และเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง สมบัติและความคงตัวของไมโครแคปซูล เช่น ประสิทธิภาพในการกักเก็บ ความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความสามารถในการกระจายตัว และอายุการเก็บรักษาหลังการทำแห้ง เป็นต้น (Jafari *et al.*, 2008) โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อรูปร่าง และลักษณะพื้นผิวภายนอกของ

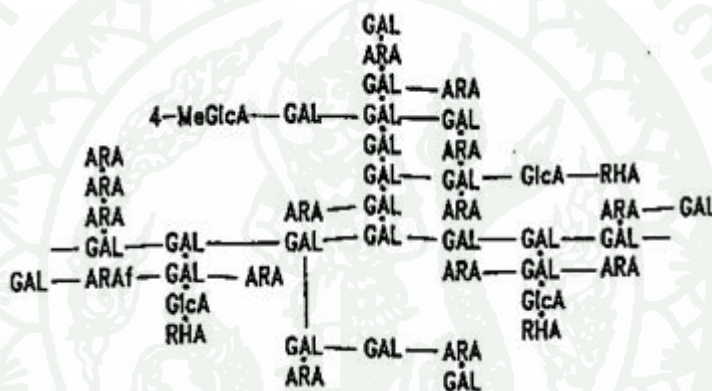
ไมโครแคปซูล สมบัติของวัตถุก่อผนังบางชนิดมีผลทำให้พื้นผิวไมโครแคปซูลหดร หรือยุบตัว และแตกออก ทำให้เกิดการปลดปล่อยวัตถุก่อนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง และการเก็บรักษา ซึ่งการเติมน้ำตาลสามารถช่วยลดความเปราะ หรือการแตกหักในระหว่างการเกิดฟิล์มที่พื้นผิวของไมโครแคปซูลได้ การเลือกชนิดวัตถุก่อผนังที่เหมาะสมจะสามารถกักเก็บวัตถุก่อน หรือสารสำคัญ และรักษาสมดุลของสารสำคัญในโครงสร้างของไมโครแคปซูลได้ (Bhandari, 2004) ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงสมบัติของวัตถุก่อผนังที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ความสามารถในการละลาย ความหนืด น้ำหนักโมเลกุล สมบัติในการสร้างฟิล์ม (film forming property) สมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ ความคงตัวต่อความเป็นกรด-เบส กลิ่น สี รส ความร้อน แสง รังสี และเอนไซม์ การสลายตัว ข้อจำกัดการใช้ในอาหาร และต้นทุนในการผลิต เป็นต้น (Bhandari, 2004; Augustin and Sanguansri, 2008)

โดยทั่วไปสมบัติของวัตถุก่อผนังที่ต้องการ จะต้องไม่ละลายและไม่เกิดปฏิกิริยากับสารที่ต้องการกักเก็บ สามารถทนอุณหภูมิสูงของกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยได้ และวัตถุก่อผนังต้องสามารถละลายได้ดี ไม่มีรสชาติ (bland flavor) เป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดี และเกิดฟิล์มได้ดี มีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูง (Reineccius, 1988) เพื่อช่วยให้ระบบหัวฉีดภายในเครื่องทำงานได้ดีขึ้น (Risch, 1995; Trubiano, 1995; Vega and Roos, 2006) และช่วยลดอุณหภูมิภายในเครื่องเนื่องจากน้ำในระบบระเหยออกไปได้เร็ว (Ahmed *et al.*, 2008) นอกจากนี้วัตถุก่อผนังต้องป้องกันสารที่ต้องการกักเก็บจากอันตรายจากสารอื่นหรือปัจจัยที่จะทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้ และสามารถปลดปล่อยสารในสภาวะที่ต้องการได้ (Shahidi and Han, 1993) การเลือกใช้วัตถุก่อผนังสามารถเลือกใช้ได้หลากหลายชนิด และแหล่งที่มาทั้งที่เป็นสารธรรมชาติและสังเคราะห์ ซึ่งอาจใช้วัตถุก่อผนังชนิดเดียว หรือการใช้วัตถุก่อผนังหลายชนิดร่วมกัน โดยสามารถแบ่งวัตถุก่อผนังที่นิยมใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน

5.1.1 กัม (Gum)

กัมเป็นสารเพิ่มความหนืด ไม่มีกลิ่นรส แต่ส่งผลต่อกลิ่น และรสชาติของอาหาร โดยทั่วไปแล้ว กัมซึ่งเป็นสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ จะลดความหวาน เนื่องจากความข้นหนืดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การแพร่ของรสหวานไปสู่ต่อมรับรสนั้นลดน้อยลง (Madene *et al.*, 2006) กัมที่นิยมใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลคือ กัมอะราบิก หรือกัมอะคาเซีย โดยใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อการปรับปรุงเนื้อสัมผัส มีสมบัติในการสร้างฟิล์มและสมบัติในการเกาะติด สมบัติทางเคมีและทาง

เคมีกายภาพของกัมอะราบิกแปรตามแหล่งที่มา อายุของพืช เวลาในการเก็บวัตถุดิบ และสภาวะในการเก็บรักษา กัมที่ได้จากต้น *Acacia senegal* มีคุณภาพดีที่สุดในการใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ กัมอะราบิกเป็นสารผสมที่ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ กรดดี-กลูคูโรนิก (D-glucuronic acid) แอล-แรมนโนส (L-rhamnose) ดี-กาแลกโทส (D-galactose) แอล-อะราบินโนส (L-arabinose) โครงสร้างของกัมอะราบิกจะมีส่วนของโปรตีน และอะราบินโนกาแลกโทโปรตีน ซึ่งให้สมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ โดยอะราบินโนกาแลกแทนจะเชื่อมกับสายโซ่พอลิเปปไทด์ และส่วนนี้จะอยู่ที่รอยต่อระหว่างน้ำกับน้ำมัน โดยที่หมู่ของอะราบินโนกาแลกแทนจะยื่น (protrude) ในส่วนสารละลาย และสายโซ่พอลิเปปไทด์จะอยู่ที่บริเวณรอยต่อ (Jayme *et al.*, 1999) โดยโครงสร้างของกัมอะราบิกแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างของกัมอะราบิก (GAL = Galactose, ARA = Arabinose, GlcA = Glucuronic acid, RHA = Rhamnose, 4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid)

ที่มา: คุชฎี (2552)

กัมอะราบิกมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดี ช่วยให้อิมัลชันคงตัวในช่วงความเป็นกรดและด่างกว้าง สร้างฟิล์มได้ดี ละลายน้ำได้ดี มีความหนืดต่ำ จึงนิยมใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมัน (Kenyon, 1995) และอัตราส่วนของน้ำมันต่อกัมอะราบิกควรมีค่าต่ำกว่า 0.15 จากการศึกษาของ McNamee *et al.* (2001) พบว่าการใช้กัมอะราบิกร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทริน DE 18.5 ที่มีอัตราส่วน 1:1 เพื่อผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันถั่วเหลือง จะได้ไมโครแคปซูลที่มีสมบัติในการละลายที่ดี

5.1.2 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

5.1.2.1 อนุพันธ์ของสตาร์ช

วัตถุก่อนนึ่งกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่นิยมใช้ในวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุดคือ อนุพันธ์ของสตาร์ช (Augustin and Sanguansri, 2008) เช่น มอลโทเด็กซ์ทรีน (Maltodextrin) คอร์นไซรัป (Corn syrup) เป็นต้น เนื่องจากสารเหล่านี้มีราคาถูก สามารถเกิดฟิล์ม หรือเกิดโครงสร้างไมโครแคปซูลล้อมรอบสารสำคัญหรือวัตถุแกนได้ (Krishnan *et al.*, 2005) อนุพันธ์ของสตาร์ช เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสตาร์ช (starch hydrolysis products) โดยการให้ความร้อนสตาร์ช หรือทำให้สตาร์ชเกิดเจลาคีไนซ์ จากนั้นนำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือเอนไซม์แอลฟาเอมิเลส (ย่อยพันธะแอลฟา 1 → 4 อย่างสุ่ม) และอาจใช้เอนไซม์พัลลูลาเนส (ย่อยพันธะแอลฟา 1 → 6) ร่วมด้วย หรือใช้ทั้งกรดและเอนไซม์ ทำให้สายพอลิเมอร์น้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1 → 4 ในโครงสร้างสั้นลง เกิดเป็นพอลิเมอร์ของแซ็กคาไรด์ $[(C_6H_{10}O_5)_nH_2O]$ ที่ประกอบด้วยกลูโคสจำนวน 5-10 หน่วยต่อโมเลกุล ขึ้นกับระดับการไฮโดรไลซิสของสตาร์ช โดยรายงานเป็นค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (dextrose equivalent; DE) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ในตัวอย่างคิดเป็นร้อยละเทียบกับเด็กซ์โทรสหรือกลูโคสเมื่อน้ำหนักเท่ากัน ถ้าค่าสมมูลเด็กซ์โทรสน้อยกว่า 20 จะเรียกว่า มอลโทเด็กซ์ทรีน และถ้าหากค่าสมมูลเด็กซ์โทรสมากกว่า 20 จะเรียกว่า คอร์นไซรัป ดังนั้นค่าสมมูลเด็กซ์โทรส จึงเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่ใช้ในการจำแนกกระหว่างมอลโทเด็กซ์ทรีน และคอร์นไซรัป นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของมอลโทเด็กซ์ทรีนจะลดลงเมื่อค่า DE เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่าง เช่น ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของมอลโทเด็กซ์ทรีน DE 5 DE 10 DE 15 มีค่า 3600 1800 และ 1200 ดาลตัน ตามลำดับ (Wang and Wang, 2000)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารนำมอลโทเด็กซ์ทรีนมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ได้แก่ ใช้เคลือบถั่วลิสงคั่วเพื่อป้องกันออกซิเจน ช่วยยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ลูกอมและของหวาน ยับยั้งการเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่เยือกแข็ง ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขนมอบ มาร์การีน น้ำสลัด ครีมแต่งหน้าขนมหรือ ไอศกรีมและโยเกิร์ต เป็นต้น และช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในเครื่องดื่มสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการควบคุมอาหาร (BeMiller, 2007) นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารใช้มอลโทเด็กซ์ทรีนเพื่อเพิ่มปริมาณของแข็งในอาหารให้สูงขึ้น เช่น เครื่องดื่ม สารให้กลิ่นรสในนม ชูป ซอส และน้ำสลัด เป็นต้น ซึ่ง

สมบัติต่างๆ ของมอลโทเด็กซ์ทรินที่กล่าวมา เป็นสมบัติสำคัญสำหรับวัตถุดิบเพื่อผลิตไมโครแคปซูลโดยใช้วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (วิภา, 2547; BeMiller, 2007)

มอลโทเด็กซ์ทรินนิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลมากที่สุด เนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทรินช่วยป้องกันสารสำคัญที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Shahidi and Han, 1993) ละลายน้ำได้ดี และมีความหนืดต่ำที่ความเข้มข้นสูง สามารถเพิ่มปริมาณของแข็งในระบบได้มากขึ้น ทำให้สร้างฟิล์มง่ายและการกักเก็บสูงขึ้นด้วย โดยความหนืดของระบบจะลดลงเมื่อใช้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE สูงขึ้น นอกจากนี้มอลโทเด็กซ์ทรินยังเป็นสารที่มีกลิ่นรสอ่อน และไม่มีสี แต่มอลโทเด็กซ์ทรินมีข้อเสีย คือมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ต่ำ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์สายสั้น ไม่มีกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำในโครงสร้าง จึงทำให้อิมัลชันมีความคงตัวต่ำ ประสิทธิภาพการกักเก็บจึงต่ำด้วย ดังนั้นจึงมีการใช้มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุดิบชนิดอื่นที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ เช่น โปรตีน เพื่อให้อิมัลชันก่อนการทำแห้งมีความคงตัว นอกจากนี้สมบัติในการสร้างฟิล์มของมอลโทเด็กซ์ทรินจะส่งผลต่อคุณภาพของไมโครแคปซูลคือ ถ้ามอลโทเด็กซ์ทรินสร้างฟิล์มล้อมรอบวัตถุดิบได้ดีจะทำให้มีประสิทธิภาพการกักเก็บและความคงตัวเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นและเพิ่มค่า DE แต่การเพิ่มค่า DE จะทำให้ไมโครแคปซูลที่ผลิตได้สามารถดูดความชื้นได้ดี (hygroscopicity) เมื่อเก็บรักษาในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ดังนั้นในการผลิตไมโครแคปซูลจะต้องใช้มอลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE และความเข้มข้นที่เหมาะสม (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

สำหรับคอร์นไซรป มีงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าสามารถใช้คอร์นไซรปที่มีค่า DE 36 และความเข้มข้นร้อยละ 20 เป็นวัตถุดิบเพื่อกักเก็บน้ำมันปลาทูน่า โดยอาศัยการเตรียมอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้นของเลซิตินและไคโตแซนได้ โดยอิมัลชันมีความคงตัวไม่เกิดการเกาะกัน (flocculation) (Klinkesorn *et al.*, 2005a) และเมื่อทำการผลิตเป็นไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าโดยการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันสูงถึงร้อยละ 87 แต่เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) พบว่าผิวของอนุภาคมีรู (pore) และรอยริ้ว (wrinkle) (Klinkesorn *et al.*, 2006) ซึ่งอาจทำให้ไมโครแคปซูลมีความคงตัวลดลงระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปที่แกนของอนุภาค ส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียของน้ำมันจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ นอกจากนี้ Shaw *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันปลาโดยใช้คอร์นไซรปที่มีค่า DE 24 และเตรียมอิมัลชันน้ำมันปลาก่อนการทำแห้งแบบผิวสัมผัสสองชั้นโดยใช้เลซิตินและไคโตแซน พบว่าความเข้มข้นของคอร์นไซรปมีผลต่อสมบัติและความ

คงตัวของไมโครแคปซูล ซึ่งการใช้คอร์นไซรัปอย่างน้อยร้อยละ 5 สามารถทำแห้งอิมัลชันเพื่อผลิตเป็นไมโครแคปซูลได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการกักเก็บ ความสามารถในการละลาย และ ความคงตัวของอิมัลชันหลังการละลายไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคอร์นไซรัป โดยการใช้คอร์นไซรัปร้อยละ 20 สามารถผลิตไมโครแคปซูลที่มีความคงตัวมากที่สุดทั้งความคงตัวทางกายภาพและความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน

5.1.2.2 น้ำตาล

ในการผลิตไมโครแคปซูลได้มีการนำน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลคู่ชนิดต่างๆ เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุคโทส และน้ำตาลซูโครส มาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับวัตถุดิบอื่น จากการศึกษาพบว่า การเติมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลคู่ในมอลโทเด็กซ์ทรินที่ใช้เป็นวัตถุดิบของไมโครแคปซูลบีตา-แคโรทีน สามารถลดขนาดอนุภาคที่โครงสร้างของมอลโทเด็กซ์ทริน และจำกัดการแพร่ของออกซิเจนได้ (Desobry *et al.*, 1999) ดังนั้นการใช้ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลคู่เป็นองค์ประกอบร่วมกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆ จะสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความคงตัวและประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลได้

น้ำตาลกลูโคส (Glucose) ชื่อเรียกอื่นๆ ได้แก่ เด็กซ์โทรส น้ำตาลในเลือด น้ำตาลในสสาร เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวไม่สามารถถูกไฮโดรไลสให้เล็กลงได้อีก โดยจัดเป็น น้ำตาลอิสระที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติทั้งในพืชและสัตว์ พบในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ผลไม้สุก ดอกไม้ น้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้ทางการค้าจะได้รับการไฮโดรไลซิสสสาร โดยมีเอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยา วัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งของสสาร เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี มันเทศ และมันสำปะหลัง จากการศึกษาทดแทนกัมอะราบิกปริมาณร้อยละ 50 ด้วยกลูโคส พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลน้ำมันถั่วเหลืองจากร้อยละ 74 เป็นร้อยละ 92 เนื่องจากสถานะ glass ของกลูโคส จะลดรูและรอยร้าวที่ผิวของไมโครแคปซูลได้ (McNamee *et al.*, 2001)

น้ำตาลฟรุคโทส (Fructose) หรือ ลิวโลส (Levulose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีความสำคัญ พบมากในน้ำผึ้งและผลไม้ต่าง ๆ เช่น เบอร์รี่ เมล่อน เป็นต้น โดยปกติจะพบอยู่ร่วมกับซูโครสและกลูโคส ส่วนน้ำตาลซูโครส (Sucrose) หรือ แซกคาไรส (Saccharose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ซูโครสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสหนึ่งโมเลกุล เชื่อมต่อกับหนึ่งโมเลกุลของฟรุคโทส ด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) พบซูโครสเป็นองค์ประกอบทั่วไปในพืช มีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1-25 โดยเฉพาะในอ้อย หรือบีต (beets) ซึ่งใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล

ชูโครระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังพบน้ำตาลชูโครสได้ในผลไม้สดด้วย จากการศึกษาการใช้ น้ำตาลชูโครสเพื่อผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันเนย (butter oil) พบว่าสามารถยืดอายุการเก็บรักษาโดย เก็บรักษาได้เป็นเวลา 6 เดือน และไมโครแคปซูลมีความคงตัวสูง (Strange *et al.*, 1997) และมีการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลไขมันนม โดยใช้ น้ำตาลชูโครสเป็นวัตถุดิบพบว่า ลักษณะ โครงสร้างของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จะไม่พบโพรงหรือช่องว่างขนาดใหญ่ จึงกักเก็บไขมันนม ได้ดี มีความคงตัวต่อการแพร่ของออกซิเจนระหว่างการเก็บรักษา (Onwulata *et al.*, 1996)

น้ำตาลแลกโทส เป็นน้ำตาลที่พบเฉพาะในน้ำนมของสัตว์ที่เลี้ยงลูกด้วยนม เท่านั้น ในน้ำนมวัวมีน้ำตาลแลกโทสประมาณร้อยละ 4-5 น้ำตาลแลกโทสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยเอนไซม์แลกเทสหรือกรดแก่ ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและกาแลกโทส น้ำตาลแลกโทสเป็นน้ำตาล ที่มีความหวานน้อยกว่าชูโครสและกลูโคส และละลายน้ำได้น้อยด้วย (17 กรัม/น้ำ 100 กรัม ที่ 20 องศาเซลเซียส) (นิธิยา, 2551) จากการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลของเอทิลบิวทิเรตและเอทิล-คาปริเลตที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการใช้โปรตีนเวย์กับน้ำตาลแลกโทสในอัตราส่วน 1:1 เป็น วัตถุดิบมีประสิทธิภาพในการกักเก็บมากกว่าการใช้โปรตีนเวย์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำตาล แลกโทสจะช่วยในการสร้างเปลือก (crust) ของไมโครแคปซูล ซึ่งระหว่างการทำแห้ง แลกโทสอยู่ใน โครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และสร้าง glass phase ที่ต่อเนื่อง ส่วนโปรตีนจะเกิดเป็นโครงตาข่ายกระจายอยู่ในไมโครแคปซูล (Rosenberg and Sheu, 1996) ซึ่งสอดคล้องกับการใช้โปรตีนเวย์ เพื่อกักเก็บไขมันนม จะมีประสิทธิภาพในการกักเก็บมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อทดแทนโปรตีนเวย์ด้วย น้ำตาลแลกโทสประมาณร้อยละ 50 ซึ่งน้ำตาลแลกโทสในโครงสร้างแบบอสัณฐานและโปรตีนเวย์ จำกัดการแพร่ของตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเข้าไปในส่วน of วัตถุดิบ ทำให้ประสิทธิภาพการกัก เก็บของไมโครแคปซูลมีค่าสูง (Young *et al.*, 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ ทรีฮาโลส (trehalose) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่มีสภาวะ glass สามารถลดการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันของน้ำมันได้ แต่การเกิดผลึกของทรีฮาโลสทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ และการ เก็บรักษา เนื่องจากต้องเก็บในสภาวะความชื้นต่ำ (Drusch *et al.*, 2006)

5.1.3 โปรตีน (Protein)

โปรตีนมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ และสมบัติในการสร้างฟิล์ม โดย โมเลกุลของโปรตีนมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (ไฮโดรฟิลิก) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก) ใน ระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การให้ความร้อน จะทำให้โปรตีนเสียสภาพ หรือเกิดการคลายเกลียว และเผยส่วนที่ไฮโดรโฟบิกออกมา ซึ่งโปรตีนทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ในอิมัลชันได้ด้วยการหัน

ส่วนไฮโดรฟิลิกเข้าหาน้ำ และหันเอาส่วนไฮโดรโฟบิกเข้าหาน้ำมัน การเรียงตัวดังกล่าวทำให้ลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำและน้ำมันได้ ทำให้น้ำและน้ำมันรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันเกิดเป็นอิมัลชันได้ นอกจากนี้การเรียงตัวที่รอยต่อของโปรตีนเปรียบเสมือนเกราะกำบังที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัฏภาคกระจายทำให้อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ของโปรตีน คือ โปรตีนต้องมีความสามารถในการละลายที่ดีเพื่อให้โปรตีนสามารถแผ่ตัวอยู่ในส่วนของสารละลายที่เป็นน้ำได้ และปัจจัยที่ทำให้การแผ่ตัวของโปรตีนลดน้อยลง จะมีผลลดสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ของโปรตีน เช่นที่ pH เท่ากับ pI หรือที่อุณหภูมิสูง จนกระทั่งโปรตีนเสียสภาพ เป็นต้น (ปาริฉัตร, 2548) เนื่องจากโปรตีนมีสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ที่ดี เช่น ความสามารถในการละลาย การเป็นอิมัลซิฟายเออร์ และความสามารถในการสร้างฟิล์ม โปรตีนจึงเป็นสารประกอบประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไมโครแคปซูล (Madene *et al.*, 2006)

5.1.3.1 หางนมผง (Skim Milk Powder)

หางนมผง (Skim Milk Powder; SMP) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้หลากหลายในอุตสาหกรรม หางนมเป็นส่วนที่เหลือจากการแยกไขมันออก มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ โปรตีนร้อยละ 34-37 น้ำตาลแลคโทสร้อยละ 49-52 ไขมันร้อยละ 0.6-1.25 เกลือร้อยละ 8.2-8.6 และความชื้นร้อยละ 3-4 เคซีนเป็นโปรตีนในหางนมที่มีโครงสร้างเป็นแบบเรนดอมคอยล์ (random coil) เป็นส่วนใหญ่และมีบริเวณที่เป็นไฮโดรโฟบิกอยู่แยกต่างหากจากบริเวณที่เป็นไฮโดรฟิลิก ทำให้เคซีนมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีและรักษาความคงตัวในระยะยาวของอิมัลชันได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากโมเลกุลค่อนข้างยืดหยุ่น (ปาริฉัตร, 2548) นอกจากนี้หางนมยังมีโปรตีนเวย์เป็นองค์ประกอบด้วย เมื่อศึกษาการกักเก็บน้ำมันปลาหนูโดยใช้โซเดียมเคซีนेट หรือหางนมผงเป็นวัตถุดิบ พบว่าไมโครแคปซูลที่ใช้หางนมผงเป็นวัตถุดิบจะมีช่องว่าง (vacuole) ของโครงสร้างต่ำกว่า จึงมีอายุการเก็บรักษามากกว่า (Keogh *et al.*, 2001)

5.1.3.2 โปรตีนเวย์ (Whey Protein)

โปรตีนเวย์ คือโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในนมเป็นโปรตีนทรงกลม (Globular protein) ประกอบด้วย บีตา-แลคโทโกลบูลิน (β -lactoglobulin) แอลฟา-แลคตัลบูมิน (α -lactalbumin) โบวีนซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin) และอิมมูโนโกลบูลิน (immunoglobulin) โปรตีนเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำตาลแลคโทสในเวย์โดยการกรองหรือ

การแลกเปลี่ยนไอออนที่สามารถทำได้ในระดับอุตสาหกรรม โปรตีนเวย์ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหารฟังก์ชัน (functional food) และนิยมใช้แทนนมในผลิตภัณฑ์นม มีคุณค่าทางอาหารสูง และมีสมบัติที่ดีในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (De Wit, 1998)

โปรตีนเวย์เข้มข้น (Whey Protein Concentrate, WPC) ได้จากเวย์ที่เป็นผลพลอยได้ในกระบวนการผลิตชีส มีปริมาณแลคโทสและไขมันต่ำ ปริมาณโปรตีนขึ้นกับการนำไปใช้ จึงมีปริมาณโปรตีนตั้งแต่ร้อยละ 30-85 ผลิตโดยการนำเวย์มาผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ พาสเจอร์ไรซ์ อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) อิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) หรือการตกผลึก เพื่อแยกเอาน้ำตาลแลคโทส และแร่ธาตุต่างๆออกไป แล้วจึงระเหยนํ้าออกเพื่อให้เข้มข้นขึ้นก่อนการทำแห้งเป็นผง สามารถใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมอาหารได้หลากหลาย เช่น เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมลูกกวาด ผลิตภัณฑ์เนื้อ เบเกอรี่ ผลิตภัณฑ์นมและขนมหวาน (Renner and Abd El-Salam, 1991)

ในการผลิตไมโครแคปซูลนิยมใช้โปรตีนเวย์เนื่องจากโปรตีนเวย์สามารถสร้างฟิล์มล้อมรอบหยดน้ำมันที่คงตัวและมีความหนาและยืดหยุ่นที่ผิวสัมผัสของน้ำและน้ำมัน (oil-water interface) ทำให้มีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่ดี จากการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลไขมันนมที่ทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้โปรตีนเวย์เป็นวัตถุดิบพบว่า ลักษณะไมโครแคปซูลเป็นทรงกลม ผิวเรียบ และไม่พบรอย หรือรูที่ไมโครแคปซูล (Young *et al.*, 1993) เมื่อใช้โมลโทเด็กซ์ทรินที่มีค่า DE ต่างๆ ร่วมกับโปรตีนเวย์ไอโซเลต (WPI) เพื่อเป็นวัตถุดิบพบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างโปรตีนเวย์ไอโซเลตกับมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 1:1 หรือสูงกว่า ทำให้ผิวของอนุภาคไมโครแคปซูลมีลักษณะเรียบ ลดการหดตัวของไมโครแคปซูล และการใช้โปรตีนเวย์ไอโซเลตร่วมกับคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DE สูง จะมีประสิทธิภาพในการกักเก็บมากกว่า DE ต่ำ (Sheu and Rosenberg, 1998)

5.2 วัตถุดิบ

สมบัติของวัตถุดิบได้แก่ รสชาติ การทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆ ในอาหาร การละลายได้ในน้ำหรือไขมัน รวมถึงความคงตัวต่อสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น ความร้อน แสง และเอนไซม์ เป็นต้น มีผลต่อการเลือกใช้วิธี หรือกระบวนการในการผลิตไมโครแคปซูล (Augustin and Sanguansri, 2008) นอกจากนี้สมบัติของวัตถุดิบ เช่น ขนาดโมเลกุล และระดับ

ความมีขี้ว ยังมีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บในโครงสร้างไมโครแคปซูลระหว่างการทำแห้งด้วย เนื่องจากสมบัติเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ และการแพร่ผ่าน โครงสร้างไมโครแคปซูลของวัตถุ แกนหรือโมเลกุลสารสำคัญ โดยโมเลกุลสารสำคัญที่ไม่มีขี้วมักสูญเสียไปในระหว่างการ ทำแห้ง น้อยกว่าโมเลกุลสารสำคัญที่มีขี้ว เนื่องจากโมเลกุลสารสำคัญที่มีขี้วสามารถแพร่ผ่านไมโคร- แคปซูลภายหลังการทำแห้งได้ (Bhandari, 2004)

นอกจากนี้ปริมาณสารสำคัญที่ใช้ในระบบยังมีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูล โดยทั่วไปนิยมใช้ปริมาณสารสำคัญร้อยละ 25 ของปริมาณวัตถุดิบ เนื่องจาก ปริมาณสารสำคัญที่เพิ่มขึ้นในระบบทำให้วัตถุดิบไม่สามารถกักเก็บ หรือห่อหุ้มสารสำคัญได้ทั่ว ทั้งหมดบริเวณผิวของอนุภาคไมโครแคปซูลจึงมีปริมาณสารสำคัญมากขึ้น นอกจากนี้วัตถุดิบ สร้างชั้นเปลือกหุ้มได้ไม่หนา ทำให้สารสำคัญในไมโครแคปซูลอยู่ใกล้ผิวภายนอกของไมโคร- แคปซูลมากขึ้นมีโอกาสสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม และเกิดการเสื่อมเสียได้ (Dziezak, 1988)

5.3 สมบัติของอิมัลชันที่จะนำมาทำแห้ง

ความไม่คงตัวของอิมัลชันจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคในระบบอิมัลชันสามารถแบ่ง ได้เป็น 2 ชนิด คือ การเกาะกลุ่มของอนุภาค (Flocculation) และการหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกัน (Coalescence) การเกาะกลุ่มของอนุภาคเกิดจากอนุภาคสองอนุภาคหรือมากกว่าเข้ามา เกาะกลุ่มกัน โดยที่ยังคงลักษณะเดิมไว้ มีกลไกการเกิดหลายรูปแบบ เช่น การเกิดการเกาะกลุ่มกันเนื่องจากการ เติมอิมัลซิฟายเออร์ที่ไม่เพียงพอต่อการดูดซับที่ผิวสัมผัสของอนุภาค หรือการเติม อิมัลซิฟายเออร์ที่มี โมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการดูดซับที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมากกว่าหนึ่งอนุภาค อนุภาคจึง เชื่อมต่อกันเป็นสาย (molecular bridges) หรือเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคในระบบอิมัลชัน เนื่องจากแรงดึงดูดทางประจุที่ตรงกันข้าม เรียกกลไกเหล่านี้ว่า bridging flocculation (McClements, 2005) ส่วนกลไกการเกิดการเกาะกลุ่มกันเนื่องจากการเติมสารที่ไม่ดูดซับที่ผิวสัมผัสของอนุภาค เช่น น้ำตาล หรือพอลิแซ็กคาไรด์ เป็นต้น ในส่วนวิทยาศาสตร์ของระบบอิมัลชันในปริมาณที่มาก เกินไป หรือเกินความเข้มข้นวิกฤต (critical flocculation concentration) จะทำให้พื้นที่รอบอนุภาค หยดน้ำมันเกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ผลักดัน โมเลกุลน้ำออกจาก ผิวสัมผัสของอนุภาค ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน เรียกกลไกการ เกาะกลุ่มกันนี้ว่า depletion flocculation (Jenkins and Snowden, 1996; McClements, 2000; Blijdenstein *et al.*, 2004) ในขณะที่การหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวนั้น เกิดจากอนุภาคสอง อนุภาคหรือมากกว่านั้นมาหลอมรวมกันกลายเป็นอนุภาคเดียวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการเกาะกลุ่ม

ของอนุภาคและการหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันจะเร่งอัตราเร็วในการเกิดการแยกชั้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (McClements, 2005)

ขั้นตอนการเตรียมอิมัลชัน เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมัน โดยอาศัยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ความคงตัวของอิมัลชันก่อนการทำแห้งจะส่งผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ โดยประสิทธิภาพของการกักเก็บน้ำมันจะเป็นผลมาจากความคงตัวของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง ซึ่งถ้าอิมัลชันมีความคงตัวสูง ประสิทธิภาพในการกักเก็บจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Danviriyakul *et al.*, 2002) การผลิตไมโครแคปซูลน้ำมัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำนั้น การเตรียมอิมัลชันจะต้องใช้อิมัลซิฟายเออร์ หรือสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เช่น ฟอสโฟลิปิด หรือไบโอโพลิเมอร์ (biopolymer) ชนิดต่างๆ ที่มีความเหมาะสม หรือใช้วัตถุก่อผนังที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ เช่น การใช้โปรตีนเป็นวัตถุก่อผนังเพื่อให้อิมัลชันมีความคงตัวและได้ไมโครแคปซูลที่มีประสิทธิภาพการกักเก็บและความคงตัวที่ดี (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

ขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชัน ส่งผลต่อความคงตัวของไมโครแคปซูล เนื่องจากหยดน้ำมันขนาดใหญ่ที่ได้จากการเตรียมอิมัลชันจะลดขนาดลงเมื่อผ่านอะตอมไมเซอร์ ในเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ทำให้น้ำมันที่ต้องการกักเก็บอยู่ที่บริเวณผิวของไมโครแคปซูลมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกักเก็บจึงลดลง รวมทั้งความคงตัวของไมโครแคปซูลลดลงด้วย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การศึกษาผลของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันต่อการกักเก็บเอทิลบิวทิเรต (ethyl butyrate) และเอทิลโพรพิโอเนต (ethyl propionate) โดยใช้กัมอะราบิก พอลิแซ็กคาไรด์จากถั่วเหลืองที่ละลายน้ำได้ (soybean water soluble polysaccharides) หรือสตาร์ชตัดแปรผสมกับมอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนัง พบว่าการเตรียมไมโครแคปซูลของเอทิลบิวทิเรต และเอทิลโพรพิโอเนต มีประสิทธิภาพการกักเก็บมากที่สุดเมื่อหยดน้ำมันในอิมัลชันมีขนาด 1.5-2.0 และ 2.5-3.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ การลดขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันให้มีความเหมาะสม ควบคุมโดยการใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดที่มีความเหมาะสม รวมทั้งสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ แรงดันและจำนวนรอบในการโฮโมจีไนซ์ เมื่อเพิ่มแรงดันและเพิ่มจำนวนรอบในการโฮโมจีไนซ์ จะทำให้น้ำขนาดของหยดน้ำมันเล็กลง และทำให้อิมัลชันก่อนการทำแห้งมีความคงตัวด้วย (Soottitantawat *et al.*, 2003)

5.4 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันและความหนืดของอิมัลชัน

การเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้น เมื่ออิมัลชันถูกพ่นในเครื่องทำแห้งจะทำให้หยดของอิมัลชันมีขนาดใหญ่ และประสิทธิภาพการกักเก็บจะสูงขึ้น เนื่อง

จากการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นการลดอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร จึงเพิ่มการกักเก็บของน้ำมัน และลดปริมาณน้ำมันที่ผิวของไมโครแคปซูล อิมัลชันที่มีความหนืดต่ำจะทำให้การสร้างเปลือกไมโครแคปซูลระหว่างการทำให้แห้งช้า วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาว่าความหนืดจะช่วยให้การสร้างเปลือกได้เร็ว ป้องกันการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันจึงลดการสูญเสีย อย่างไรก็ตาม ความหนืดควรมีค่าต่ำพอที่จะทำให้พ่นออกมาจากอะตอมไมเซอร์ได้ดี เพราะถ้าความหนืดมากเกินไปจะเป็นการยากในการสร้างหยดอิมัลชัน และอาจได้อนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม ดังนั้นจึงต้องเลือกความหนืดที่เหมาะสมในการทำแห้ง (Bhandari *et al.*, 1992) โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Liu *et al.* (2000) พบว่าประสิทธิภาพในการกักเก็บ ดี-ลิโมนีน (D-limonene) จะขึ้นกับความเข้มข้นของปริมาณของแข็งเริ่มต้นในอิมัลชัน โดยการกักเก็บจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการสร้างเปลือกของหยดอิมัลชันได้อย่างรวดเร็ว จึงป้องกันการสูญเสียสารสำคัญในระหว่างการทำให้แห้งได้

5.5 สภาพในการทำแห้ง

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันที่ดี นอกจากวัตถุดิบที่เหมาะสมแล้ว สภาพในการทำแห้งที่ดีก็ต้องพิจารณาด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบที่เหมาะสม อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า และอุณหภูมิลมร้อนขาออก

อุณหภูมิของอิมัลชันขณะป้อนเข้าเครื่องทำแห้ง (feed temperature) ส่งผลต่อการไหลของอิมัลชัน การเพิ่มอุณหภูมิของอิมัลชันจะทำให้ความหนืดลดลง และทำให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การทำให้อิมัลชันมีอุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจส่งผลต่อการเสื่อมเสียของน้ำมันที่ต้องการกักเก็บได้เนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของอากาศเข้า (air inlet temperature) อุณหภูมิของอากาศเข้า เป็นปัจจัยเริ่มต้นเพื่อกำหนดสภาวะการทำแห้ง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเข้า (160-220 องศาเซลเซียส) จะเป็นการเพิ่มสมบัติในการสร้างฟิล์มรอบหยดอิมัลชันของวัตถุดิบ จึงทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บ (Rulkens *et al.*, 1972) จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บไมโครแคปซูลของสารที่ระเหยได้ ได้แก่ การเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดของอิมัลชันและการใช้อุณหภูมิในการทำแห้งที่สูง เนื่องจากสารระเหยจะสูญเสียในช่วงแรกของการทำแห้งขณะอิมัลชันถูกพ่นออกมาจากอะตอมไมเซอร์ (Rosenberg *et al.*, 1990) ดังนั้นการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสร้างเปลือกอย่างรวดเร็ว ป้องกันการสูญเสียขณะทำแห้ง แต่ถ้าอุณหภูมิของอากาศเข้าเครื่องทำแห้ง

สูงเกินไป จะทำให้มีการระเหยน้ำที่มากเกินไป ทำให้เกิดรอยที่ผิวของไมโครแคปซูลส่งผลให้เกิดการสูญเสียสารที่กักเก็บได้ นอกจากนี้อุณหภูมิของอากาศเข้าสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการทำแห้ง ส่งผลต่อปริมาณน้ำในไมโครแคปซูล ถ้าอุณหภูมิของอากาศเข้าต่ำเกินไป จะทำให้การระเหยน้ำไม่เพียงพอจึงง่ายต่อการเกาะติดที่ผนังห้องทำแห้ง

อุณหภูมิของอากาศออก (air outlet temperature) จะส่งผลต่อปริมาณความชื้นในไมโครแคปซูล ซึ่งสามารถควบคุมโดยการควบคุมอุณหภูมิของอากาศเข้า ถ้าอุณหภูมิของอากาศออกสูงเกินไป จะทำให้เกิดรอย (crack) ที่ผิวของไมโครแคปซูล จึงควรมีอุณหภูมิในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส (Reineccius, 1988)

6. สมบัติและคุณภาพของไมโครแคปซูล

6.1 ขนาดอนุภาคและโครงสร้างของไมโครแคปซูล

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลโดยอาศัยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย นอกเหนือจากสภาวะในการทำแห้งที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของไมโครแคปซูลแล้ว การกระจายของขนาดหดยดิมัลชันยังส่งผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูลด้วย (Alamilla-Beltran *et al.*, 2006) ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลส่งผลต่อความคงตัวของไมโครแคปซูล โดยการเพิ่มขนาดอนุภาค จะเป็นการลดพื้นที่ผิวของไมโครแคปซูล จึงลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Desobry *et al.*, 1997) จากการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูล ดี-ลิโมนีน (D-limonene) เมื่อใช้กัมอะราบิกและมอลโทเดกซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนัง ซึ่งขนาดของผงไมโครแคปซูลควบคุมด้วยความเร็วของเซนตริฟิวกัล อะตอมไมเซอร์ ของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่มีขนาดใหญ่จะคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าขนาดเล็ก (Sootitantawat *et al.*, 2005) แต่เมื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บไมโครแคปซูลน้ำมันปลาพบว่า ปริมาณน้ำมันที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็ก (น้อยกว่า 38 ไมโครเมตร) ไม่มีความแตกต่างจากอนุภาคขนาดใหญ่ (มากกว่า 63 ไมโครเมตร) (Jafari *et al.*, 2007) ดังนั้นขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติและความคงตัวของไมโครแคปซูล แต่อาจมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อสมบัติและความคงตัวของไมโครแคปซูลมากกว่า เช่น ชนิดของวัตถุก่อผนัง

ในระหว่างการระเหยแห้งไมโครแคปซูล อาจเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การหดตัว (shrinkage) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) การแผ่ขยาย (expansion) การสร้างเปลือก

(formation of crust) และการแตกหัก (breakage) ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีการที่เหมาะสมเพื่อศึกษาโครงสร้างของอาหาร ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) หรือลักษณะโครงสร้างของไมโครแคปซูล และขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลระหว่างการทำแห้ง (Alamilla-Beltran *et al.*, 2006) โดยมีงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ในการศึกษาโครงสร้างของทางด้านการผลิตไมโครแคปซูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างที่ผิวของไมโครแคปซูล และโครงสร้างภายใน โดยการตัดขวางไมโครแคปซูลเพื่อให้เห็นการกระจายตัวของวัตถุภายในไมโครแคปซูล ดังงานวิจัยของ Danviriyakul *et al.* (2002) ได้ศึกษาผลของสถานะในการทำแห้งและวัตถุก่อผนังต่อโครงสร้างของไมโครแคปซูลไขมันนม (milk fat) ทั้งโครงสร้างภายนอก (outer structures) และโครงสร้างภายใน (inner structures) พบว่าอุณหภูมิในการทำแห้งส่งผลต่อโครงสร้างของไมโครแคปซูลเล็กน้อย โดยทั่วไปโครงสร้างของไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม และอาจพบรอยร้าวที่ผิวได้บ้าง และจะพบรอยร้าวมากขึ้นเล็กน้อยในไมโครแคปซูลที่มีอุณหภูมิในการทำแห้งต่ำ และเมื่อศึกษาผลของวัตถุก่อผนัง โดยใช้มอลโทเด็กซ์ทรินที่ค่า DE ต่างๆ ได้แก่ DE 10 DE 20 และ DE 36 พบว่าไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเด็กซ์ทริน DE 36 มีโครงสร้างเป็นทรงกลม บนผิวมีรอยร้าวเล็กน้อย และจะพบรอยร้าวมากขึ้นเมื่อค่า DE ลดลง และจะพบโครงสร้างของไมโครแคปซูลที่ไม่สมมาตร และมีรอยบุบในไมโครแคปซูลที่ใช้มอลโทเด็กซ์ทริน DE 10 และโครงสร้างภายในของไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเด็กซ์ทริน DE ต่างๆ ไม่แตกต่างกัน จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าชนิดวัตถุก่อผนังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติด้านโครงสร้างของไมโครแคปซูล

6.2 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลโดยอาศัยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นการลดปริมาณน้ำในอาหารอย่างรวดเร็ว เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ได้แก่ ความสะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง และยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ รวมถึงค่าวอเตอร์แอคติวิตี จะส่งผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูลและความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลหลังการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ สถานะในการทำแห้ง ดังการศึกษาของ Kelly *et al.* (2002) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ท่อทางออกของผงไมโครแคปซูลมีค่าต่ำ จะทำให้ปริมาณความชื้นคงเหลือในไมโครแคปซูลมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อควบคุมสถานะในการทำแห้งพบว่า ปริมาณความชื้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอิมัลชันก่อน

การทำแห้ง รวมถึงสมบัติของวัตถุดิบ ซึ่งพบว่าการใช้คาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DE สูง เป็นวัตถุดิบ ทำให้ปริมาณความชื้นสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า DE สูง มีสมบัติในการดูดความชื้นได้ดี (Gharsallaoui *et al.*, 2011)

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีจะส่งผลต่อสมบัติและความคงตัวของไมโครแคปซูล โดยถ้าไมโครแคปซูลมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำมาก จะทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สูง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดออกซิเดชันจะต่ำสุด เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีค่าประมาณ 0.3-0.4 เนื่องจากน้ำจะช่วยป้องกันการสัมผัสของน้ำมันและออกซิเจน แต่เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มมากขึ้นอีก การเกิดออกซิเดชันก็จะเกิดในอัตราที่เร็วขึ้น (Fennema, 1996) ตัวอย่าง เช่น การศึกษาความคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชันของนมผง พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำ จะลดความหนืดของอนุภาค ทำให้เกิดการเกาะตัวของไมโครแคปซูล (stickiness, caking) โดยในนมผงที่มีแล็กโทสเป็นองค์ประกอบจะทำให้เกิดการตกผลึกของแล็กโทส และเกิดการปลดปล่อยไขมันที่กักเก็บไว้ออกมา จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในนมผงได้อย่างรวดเร็ว (Roos, 2002)

6.3 สี

สีของไมโครแคปซูลเป็นคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านหนึ่งที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยการทำแห้งแบบพ่นฝอยอาจส่งผลให้สมบัติด้านสีของไมโครแคปซูลเปลี่ยนแปลง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ (nonenzymatic browning) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ฟรุคโทส หรือ น้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น มอลโทส หรือ แล็กโทส ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับอุณหภูมิ และค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารหรือระบบที่ทำการศึกษา โดยอัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงขึ้น (Roos, 2002) นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของสีอาจไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์เพียงสาเหตุเดียว ดังงานวิจัยของ Rodríguez-Hernández *et al.* (2005) พบว่า cactus pear juice ที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย มีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ค่าสีเหลืองลดลง แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีดังกล่าวไม่ได้มีสาเหตุจากสภาวะในการทำแห้ง แต่การเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นนี้ เกิดจากสีของมอลโทเด็กซ์ทรินที่ใช้เตรียมที่ส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้ง

6.4 การละลาย

การละลายของไมโครแคปซูลเป็นสมบัติที่สำคัญอีกด้านหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย การกระจายตัวและการละลายของไมโครแคปซูลในของเหลวสามารถแบ่งได้หลายขั้นตอน ได้แก่ การแพร่ (penetration) ของของเหลวเข้าสู่ผนังอนุภาค (แสดงถึง wettability) การจมของอนุภาคในของเหลว (sinkability) การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อมีการกวน หรือคน (dispersability) และสุดท้ายคือการละลายของอนุภาคในของเหลว (solubility) โดยองค์ประกอบของผิวอนุภาคจะส่งผลต่อขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้ ซึ่งองค์ประกอบของผิวอนุภาคเป็นผลมาจากความคงตัวของอิมัลชันระหว่างการทำแห้ง (Faldt and Bergenstahl, 1996)

ขนาดของหยดน้ำมันหลังจากการละลายกลับ โดยการเปรียบเทียบกับขนาดหยดน้ำมันก่อนการทำแห้ง จะแสดงถึงโครงสร้างภายในของไมโครแคปซูล และความคงตัวของหยดน้ำมันระหว่างการทำแห้ง โดยเมื่อนำไมโครแคปซูลมาละลายกลับด้วยตัวทำละลาย สมบัติที่ต้องการคืออิมัลชันที่มีความคงตัว มีขนาดหยดน้ำมันขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ให้การกระจายตัวที่ดี แต่อิมัลชันที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูล อาจพบว่ามีความหนาแน่นของหยดน้ำมันใหญ่ขึ้น อันเนื่องมาจากเกิดการหลอมรวมของหยดน้ำมัน (coalescence) (Faldt and Bergenstahl, 1996) นอกจากนี้มีรายงานว่าถ้าการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูล มีลักษณะเป็น bimodal distribution จะแสดงถึงการละลายที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งไมโครแคปซูลจะละลายได้น้อยลงเมื่อมีปริมาณน้ำมันสูง (high oil powders) (McNamee *et al.*, 1998)

6.5 ประสิทธิภาพในการกักเก็บ

กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลน้ำมัน มุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการกักเก็บและการยืดอายุ หรือการเพิ่มความคงตัวของไมโครแคปซูล เพื่อให้ไมโครแคปซูลที่ผลิตได้มีคุณภาพสูง สมบัติของวัตถุดิบและวัตถุดิบ และสภาวะในการทำแห้งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน นอกจากนี้ขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อการกักเก็บและความคงตัวของไมโครแคปซูลน้ำมัน โดยหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กจะเพิ่มประสิทธิภาพ ในการกักเก็บระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย รวมถึงได้ร้อยละของผลได้ (% yield) จากการทำแห้งสูง (Jafari *et al.*, 2008)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมี

1.1 น้ำมันปลาทูน่า (Fully refined tuna oil, T.C. Union Global Public Co., Ltd., Samutsakorn, Thailand; Acid value 0.08 mg KOH/g oil, Iodine value 198.70 g I₂/100 g oil, Peroxide value 2.64 meq/kg oil, Moisture 0 %, DHA 26.68 % by area, EPA 6.52 % by area, Total omega-3 36.75 % by area)

1.2 เลซิทีนเหลว (Liquid lecithin, Lab Valley Ltd., Part., Bangkok, Thailand; Acetone Insoluble 82 %, Acid Value (mg KOH/g) 30, Moisture 1 %)

1.3 ไคโตแซน (Powdered chitosan, Aldrich Chemical Co., St. Louis, MO, USA; medium molecular weight (250±60 kDa), deacetylation = 75–85 %)

1.4 มอลโทเด็กซ์ทรีน (Maltodextrin; D-PERSE 4, Siam Modified Starch Co., Ltd., Pathumthani, Thailand; dextrose equivalent 17-19)

1.5 กัมอะราบิก (Instant gum arabic, Rama Production Co., Ltd., Bangkok, Thailand)

1.6 หางนมผง (Skimmed milk powder; SMR 202T, Vicchi Enterprise Co., Ltd., Bangkok, Thailand; Color: white/cream, Lactose 54.00 %, Protein 26.00 %, Moisture 6.00 %, Ash 6.00 %, Fat 3.25 %)

1.7 โปรตีนเวย์เข้มข้น (Whey protein concentrate; WPC 80, Vicchi Enterprise Co., Ltd., Bangkok, Thailand; Color: light cream/ cream, Protein 81.00 % , Moisture 5.30 % , Ash < 3 % , Fat 5.50 %, Carbohydrate < 10%)

1.8 ซูโครส (Sucrose, Food grade, TTK Science Co., Ltd., Bangkok, Thailand)

1.9 แล็กโทส (Lactose, Food grade, TTK Science Co., Ltd., Bangkok, Thailand)

1.10 โซเดียมแอซิเตท (Sodium acetate; CH₃COONa, Analytical grade, BDH Chemicals MLd, Poole, England)

1.11 กรดแอซิติกกลั่น (Gracial acetic acid; CH₃COOH, Analytical grade, Labscan Asia Co., Ltd., Bangkok, Thailand)

1.12 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl, Analytical grade, Univar, Australia)

1.13 เฮกเซน (Hexane; C₆H₁₄, Analytical grade, J.T. Baker, USA)

1.14 ไอโซโพรพานอล (Isopropanol; C_3H_8O , Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

1.15 แอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodium sulfate; Na_2SO_4 , Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

1.16 ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas; TIG, Thailand)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

2.2 เครื่องปั่นผสมแบบหยาบ (IKA-UMLRA-TURRAX[®] T 25 basic, KIKA[®]-WERKE GMBH & CO.KG, Germany)

2.3 เครื่องโฮโมจีไนส์ความดันสูง (High pressure homogenizer, 15MR-8TA, APV Gaulin, Inc., Wilmington, MA, USA)

2.4 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer, A/S, GAE Niro, Denmark)

2.5 เครื่องวัดขนาดอนุภาคและค่าศักย์ซีตาบนผิวอนุภาค (Zetasizer Nano-ZS Instruments, Zen 3600, Malvern Instrument Ltd., Worcestershire, UK)

2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light optical microscope, Axiolab[®], Carl Zeiss Ple Ltd, Germany)

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM, S-3400 N Type II, Hitachi, Japan)

2.8 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี (Testo 650, Testo GmbH & Co., Germany)

2.9 เครื่องวัดสี (Ultrascan XE, Hunter Lab, USA)

2.10 มาตรฐานวัดความเป็นกรดเบส (pH meter, Orions 5 star, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)

2.11 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer, Multistirrer 6, Velp Scientifica, Italy)

2.12 เครื่องผสมสาร (Vortex mixer, VX 100, Labnet International, Inc, USA)

2.13 เครื่องเขย่าอัตโนมัติ (Automatic shaker, BS-11, Lab Companion, JEIO TECH Co., Ltd., Korea)

2.14 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge, Heraeus Instrument, Denmark)

2.15 เครื่องอ่างน้ำ (Water bath, OB 14, memmert, Schwabach, Germany)

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

- 2.17 ตู้เย็น (Prezio, Mitsubishi Electric Co., Ltd., Thailand)
- 2.18 ตู้แช่เยือกแข็ง (SF-C1497 (GYN), SANYO, Thailand)
- 2.19 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Memmert, Schwach, Germany)
- 2.20 ตู้อบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum oven, VOS-450SD, EYELA, Rikakikai Co., Ltd., Japan)
- 2.21 เครื่องชั่งแบบ 2 ตำแหน่ง (ARC 120, OHAUS, USA)
- 2.22 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Model SPB 31, Scale Tech, Germany)
- 2.23 เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ (Vacuum sealer, Europac Co., Ltd., Bangkok, Thailand)
- 2.24 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (Test sieve, Retsch, Germany)

วิธีการ

1. การเตรียมอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีน

อิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีนหรืออิมัลชันปฐมภูมิ ที่ประกอบด้วยน้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเลซิทีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยผสมน้ำมันปลาทูน่ากับเลซิทีน แล้วกวนผสมอย่างสม่ำเสมอ 10 นาที ด้วยเครื่องกวนผสมแบบแม่เหล็ก จากนั้นเติมแอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) ก่อนนำของผสมดังกล่าวมาปั่นผสมโดยใช้เครื่องปั่นผสมแบบหยาบ ที่ความเร็ว 9,500 รอบต่อนาที นาน 5 นาที ได้อิมัลชันที่มีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ หลังจากนั้นนำมาผ่านเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูงที่ความดัน 5,000 psi หรือ 4,500/500 psi (ความดันของวาล์วตัวที่ 1 และ 2 เท่ากับ 4,500 และ 500 psi ตามลำดับ) จำนวน 5 รอบ ได้อิมัลชันปฐมภูมิที่มีขนาดหยดนํ้ามันประมาณ 0.4 ไมโครเมตร และค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดนํ้ามัน -43.77 ± 2.81 มิลลิโวลต์ ซึ่งอิมัลชันดังกล่าวมีความคงตัวต่อการแยกชั้นและการรวมตัวของหยดนํ้ามัน เมื่อเก็บอิมัลชันไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

2. การเตรียมอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีนและโคโคแซน

อิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ให้งดด้วยเลซิทีนและโคโคแซน หรืออิมัลชันทุติยภูมิเตรียมโดยนำอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าปฐมภูมิข้างต้น มาเจือจางด้วยสารละลายโคโคแซนในแอซิเตทบัฟเฟอร์ (ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก) หลังเติมโคโคแซนลงในอิมัลชันปฐมภูมิ กวนของผสมอย่างสม่ำเสมอ 10 นาที ด้วยเครื่องกวนผสมแบบแม่เหล็ก อิมัลชันที่ได้มีลักษณะการเกาะกลุ่มกันของ

อนุภาคหยดน้ำมัน จึงนำตัวอย่างอิมัลชันดังกล่าวมาผ่านเครื่องโฮโมจีไนส์ความดันสูงที่ความดัน 4,000 psi (3,600/400 psi) จำนวน 3 รอบ เพื่อทำการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคในอิมัลชัน จากนั้นนำอิมัลชันมาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3.0 ได้อิมัลชันทุดียูมิของน้ำมันปลาทูน่าที่ประกอบด้วยน้ำมันปลาทูน่าร้อยละ 10 เลขทึบร้อยละ 2 และโคโคแซนร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก อิมัลชันทุดียูมิที่เตรียมได้มีขนาดหยดน้ำมันประมาณ 0.8 ไมโครเมตร มีค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน $+55.77 \pm 0.37$ มิลลิโวลต์ และมีความคงตัวต่อการแยกชั้นเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3. ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันและปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

3.1 ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันทุดียูมิน้ำมันปลาทูน่า

3.1.1 การเตรียมสารละลายวัตถุก่อผนัง

เตรียมสารละลายวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ (ตารางที่ 1) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักดังนี้ ผสมวัตถุก่อผนังร่วม (คาร์โบไฮเดรต หรือ โปรตีน หรือ กัม) กับมอลโทเด็คซ์ทรินที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนหรือกัมต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75 นำของผสมไปละลายในแอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3) ข้ามคืนหรือประมาณ 16 ชั่วโมง สำหรับสารละลายผสมระหว่างแลกโทสและมอลโทเด็คซ์ทรินจะต้องทำให้ความร้อนระหว่างการละลายโดยใช้เครื่องอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อช่วยให้น้ำตาลแลกโทสละลายได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 1 ชนิดวัตถุก่อผนัง

ชนิดวัตถุก่อผนัง	อักษรย่อ
มอลโทเด็คซ์ทริน	MD
มอลโทเด็คซ์ทรินและซูโครส	MS
มอลโทเด็คซ์ทรินและแลกโทส	ML
มอลโทเด็คซ์ทรินและหางนมผง	MM
มอลโทเด็คซ์ทรินและโปรตีนเวย์เข้มข้น	MW
มอลโทเด็คซ์ทรินและกัมอะราบิก	MG

3.1.2 การเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิที่มีวัตถุก่อนผนังชนิดต่างๆ

อิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีองค์ประกอบของวัตถุก่อนผนังชนิดต่างๆ (ตารางที่ 1) และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยนำอิมัลชันทุติยภูมิ (เตรียมได้จากข้อ 2) มาเจือจางด้วยสารละลายวัตถุก่อนผนังที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 (เตรียมได้จากข้อ 3.1.1) แล้วนำของผสมดังกล่าวมาทวนอย่างสม่ำเสมอ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก จากนั้นนำอิมัลชันมาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3.0 อิมัลชันที่ได้มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2 นำอิมัลชันเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของอิมัลชัน ได้แก่ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน ค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน (ζ -potential) ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

3.2 ผลของชนิดวัตถุก่อนผนังต่อปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

เตรียมไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าโดยนำอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีวัตถุก่อนผนังชนิดต่างๆ (เตรียมได้จากข้อ 3.1.2) ไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้อุณหภูมิหัวฉีด (Inlet temperature) เป็น 180 ± 2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ท่อทางออกของผงอนุภาค (Outlet temperature) เป็น 85 ± 5 องศาเซลเซียส และอิมัลชันมีอัตราเร็วการไหลเข้าเครื่องเฉลี่ย 35 มิลลิลิตรต่อนาที (ความเร็วของปั๊ม 14 รอบต่อนาที) หลังการทำแห้งนำไมโครแคปซูลที่ผลิตได้บรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์แล้วนำไปผึ่งด้วยเครื่องปิดผนึกสุญญากาศ เก็บในตู้แช่เยือกแข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส) ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ชนิดวัตถุก่อผนัง	องค์ประกอบของอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ^a				
	น้ำมัน	เลซิทิน	ไคโตแซน	วัตถุก่อผนังที่ใช้	
				ร่วมกับมอลโท-เด็กซ์ทริน	มอลโทเด็กซ์ทริน
ไม่เติมวัตถุก่อผนัง (NW)	5	1	0.2	-	-
มอลโทเด็กซ์ทริน (MD)	5	1	0.2	-	23.8
มอลโทเด็กซ์ทรินและ ซูโครส (MS)	5	1	0.2	6.0	17.8
มอลโทเด็กซ์ทรินและ แล็กโทส (ML)	5	1	0.2	6.0	17.8
มอลโทเด็กซ์ทรินและ หางนมผง (MM)	5	1	0.2	6.0	17.8
มอลโทเด็กซ์ทรินและ โปรตีนเวย์เข้มข้น (MW)	5	1	0.2	6.0	17.8
มอลโทเด็กซ์ทรินและ กัมอะราบิก (MG)	5	1	0.2	6.0	17.8

^a ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึง ผลรวมขององค์ประกอบต่างๆ ในอิมัลชัน ยกเว้นส่วนน้ำ

4. ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่า

4.1 การเตรียมสารละลายวัตถุก่อผนัง

ชนิดวัตถุก่อผนังที่ศึกษาได้แก่ วัตถุก่อผนังผสมของซูโครสกับมอลโทเด็กซ์ทริน (MS) และแลกโทสกับมอลโทเด็กซ์ทริน (ML) โดยใช้วัตถุก่อผนังที่มีมอลโทเด็กซ์ทรินอย่างเดียว (MD) เป็นตัวอย่างควบคุม วัตถุก่อผนังผสมเตรียมที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของคาร์โบไฮเดรตต่อมอลโทเด็กซ์ทรินที่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 ก่อนนำไปละลายข้ามคืน (ประมาณ 16 ชั่วโมง) ในแอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 50 และร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก สำหรับสารละลายวัตถุก่อผนังที่มีแลกโทสเป็นองค์ประกอบ ต้องให้ความร้อนโดยใช้เครื่องอุ่นน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อช่วยให้แลกโทสละลายได้อย่างสมบูรณ์

4.2 การเตรียมอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีวัตถุก่อผนังชนิดและปริมาณต่างๆ

อิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยนำอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่า (เตรียมได้จากข้อ 2) มาเจือจางด้วยสารละลายวัตถุก่อผนัง โดยอิมัลชันตัวอย่างที่ต้องการความเข้มข้นสุดท้ายของปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 และร้อยละ 30 เจือจางด้วยสารละลายเริ่มต้นของวัตถุก่อผนังความเข้มข้นร้อยละ 50 สำหรับอิมัลชันที่ต้องการความเข้มข้นสุดท้ายของปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 40 เจือจางด้วยสารละลายเริ่มต้นของวัตถุก่อผนังความเข้มข้นร้อยละ 70 หลังจากนั้นนำของผสมดังกล่าวมาควนอย่างสม่ำเสมอ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก นำอิมัลชันมาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3.0 อิมัลชันที่ได้มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 เก็บอิมัลชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของอิมัลชัน ได้แก่ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน ค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน (ζ -potential) ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่า (น้ำมันร้อยละ 5 เลซิตินร้อยละ 1 และ ไคโตแซนร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) ที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส หรือแล็กโทสต่อ มอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
		ซูโครส หรือ แล็กโทส	มอลโทเด็กซ์ทริน
0:100	20	-	13.8
	30	-	23.8
	40	-	33.8
5:95	20	0.7	13.1
	30	1.2	22.6
	40	1.7	32.1
10:90	20	1.4	12.4
	30	2.4	21.4
	40	3.4	30.4
15:85	20	2.0	11.8
	30	3.4	20.4
	40	4.8	29.0
25:75	20	3.5	10.3
	30	6.0	17.8
	40	8.5	25.3
37:63	20	5.2	8.6
	30	8.9	14.9
	40	12.7	21.1
50:50	20	6.9	6.9
	30	11.9	11.9
	40	16.9	16.9

5. ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อนผนังต่อสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

เตรียมไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าโดยนำอิมัลชันทุดิยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่มีระบบวัตถุก่อนผนังต่างๆ (เตรียมได้จากข้อ 4) ไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้อุณหภูมิหัวฉีด (Inlet temperature) 180 ± 2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ท่อทางออกของผงอนุภาค (Outlet temperature) 85 ± 5 องศาเซลเซียส และอิมัลชันมีอัตราการไหลเข้าเครื่องเฉลี่ย 35 มิลลิลิตรต่อนาที (ความเร็วของปั๊ม 14 รอบต่อนาที) นำไมโครแคปซูลหรืออิมัลชันผงหลังทำแห้งบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์แล้วนำไปปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกสุญญากาศ หลังจากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็ง (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส) ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของไมโครแคปซูล ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content) วอเตอร์แอคทีวิตี (Water activity; a_w) ค่าสีของไมโครแคปซูล (Color) ปริมาณน้ำมันอิสระ (Free oil) ปริมาณน้ำมันทั้งหมด (Total oil) ของไมโครแคปซูล ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันของไมโครแคปซูล (Encapsulation efficiency) วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) และการกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูล

6. สมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าคั้นรูปจากไมโครแคปซูล (Reconstituted emulsion)

อิมัลชันทุดิยภูมิน้ำมันปลาทูน่าคั้นรูปจากไมโครแคปซูล เตรียมโดยชั่งไมโครแคปซูลที่มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ละลายในแอซิเตทบัฟเฟอร์ (100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3.0) ให้มีองค์ประกอบเหมือนกับอิมัลชันก่อนการทำแห้ง นั่นคือชั่งไมโครแคปซูล 20.41 30.61 และ 40.82 กรัม ละลายในแอซิเตทบัฟเฟอร์ 79.59 69.39 และ 59.18 กรัม สำหรับอิมัลชันที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ก) แล้วกวนอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำอิมัลชันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของอิมัลชัน ได้แก่ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน ค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวหยดน้ำมัน (ζ -potential) ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

7. การวัดและวิเคราะห์สมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่า

7.1 ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน

นำตัวอย่างอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 16 x 160 มิลลิเมตร แล้วเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง สังเกตการแยกชั้นของอิมัลชัน และรายงานเป็นค่าร้อยละการเกิดครีမ် (Creaming index) คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของชั้นครีမ်ที่เกิดการแยกชั้น (H_c) และความสูงทั้งหมดของอิมัลชันในหลอดทดลอง (H_e) ดังสมการ (Klinkesorn *et al.*, 2004)

$$\text{Creaming index} = 100 \times (H_c/H_e)$$

7.2 ค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน (ζ -potential)

นำตัวอย่างอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ต้องการวิเคราะห์มาเจือจางด้วยแอซิเตทบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้นของหยดน้ำมันร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก นำมาบรรจุให้เต็มเซลล์สำหรับบรรจุตัวอย่างที่มีลักษณะรูปร่างเป็นคาพิลลารี (DTS-1060 Folded Capillary Cells) ตรวจวัดค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน ด้วยเครื่องวัดค่าศักย์ซีตาบนผิวอนุภาค (Zetasizer Nano-ZS Instruments) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถวัดค่าศักย์ซีตาบนผิวอนุภาคหยดน้ำมันได้โดยอิงแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ให้อยู่ตรงบริเวณ Stationary layer ของเซลล์ที่บรรจุตัวอย่าง อาศัยวิธี Laser doppler velocimetry (LDV) โดยมีหลักการคือวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า คำนวณจากค่าการเคลื่อนที่ทางอิเล็กโทรโฟเรติก (Electrophoretic mobility) ตามสมการของเฮนรี (Henry's equation) (Malvern instruments, 2004)

7.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน

นำตัวอย่างอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่ามาเจือจางด้วยแอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) ให้มีความเข้มข้นของหยดน้ำมันร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมสารนาน 10 วินาที จากนั้นนำอิมัลชันปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ใส่ลงในคิวเวตสำหรับบรรจุตัวอย่างขนาด 45 x 10 x 10 มิลลิเมตร (DTS-0012 disposable sizing cuvette) ตรวจวัดขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zetasizer Nano-ZS

Instruments) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดตาม Cumulants mean หรือเรียกว่า Z-average ในการวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขนาดอนุภาคจะใช้หลักการกระเจิงของแสงแบบพลวัต (Dynamic light Scattering) ซึ่งวัดอัตราความถี่ขึ้น-ลงของแสงที่กระเจิงออกมาเมื่อยิงแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และคำนวณโดยใช้สมการสโตกส์และไอสไอน์ (Stokes-Einstein equation) (Malvern instruments, 2004)

7.4 โครงสร้างระดับจุลภาค

วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน โดยนำตัวอย่างอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่ามาเจือจาง 10 เท่า โดยใช้เอซีเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) จากนั้นหยดอิมัลชันลงบนแผ่นสไลด์และปิดทับด้วยแผ่นกระจก (Cover glass) แล้วส่องดูโครงสร้างของอิมัลชันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light optical microscope) (Axiolab[®], Carl Zeiss Ple Ltd, Germany) โดยใช้เลนส์วัตถุที่กำลังขยาย 40× และทำการบันทึกภาพด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Image-Pro Plus version 6.0

8. การวัดและวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

8.1 ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Baik *et al.* (2004) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างผงไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า 2 กรัม ใส่ในถ้วยแอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน แล้วอบแห้งในตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความดัน 74 เซนติเมตรปรอท นาน 5 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกจากตู้อบทิ้งให้เย็นในเดลิเคเตอร์และชั่งน้ำหนักอบแห้งตัวอย่างซ้ำจนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นรายงานเป็นกรัมของน้ำต่อ 100 กรัมไมโครแคปซูล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

8.2 วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity; a_w)

ตรวจวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยชั่งตัวอย่างไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่าน้ำหนัก 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยวอเตอร์แอกติวิตี แล้ววางในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง จากนั้นอ่านค่าตัวเลขที่คงที่บนหน้าจอของเครื่อง ซึ่งแสดงถึงค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่าง โดยต้องควบคุมสภาวะในการ

ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องใส่ตัวอย่างต้องน้อยกว่าร้อยละ 25 (ดัดแปลงจากคู่มือการใช้เครื่องวัดค่าอวเตอร์แอกติวิตี้ โดยบริษัท Testo GmbH & Co.)

8.3 ค่าสีของไมโครแคปซูล

นำตัวอย่างไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูลาน้ำหนัก 10 กรัม ใส่ลงในถุงพลาสติกใสชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ขนาด 3x5 นิ้ว แล้วตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสี (Ultrascan Pro, Hunter Lab, USA) แสดงผลค่าของสีที่วัดได้ในระบบ CIE เป็น L^* (ค่าความสว่างของสี), a^* ($-a^*$ คือค่าความเป็นสีเขียว และ $+a^*$ คือค่าความเป็นสีแดง), และ b^* ($-b^*$ คือค่าความเป็นสีน้ำเงิน และ $+b^*$ คือค่าความเป็นสีเหลือง) (ดัดแปลงจากคู่มือการใช้เครื่องวัดสี โดยบริษัท Hunter Associates Laboratory, Inc. (2004) และคู่มือการใช้งานโปรแกรม Universal โดยบริษัท Color Global Co., Ltd)

นำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณค่าความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ตามวิธีการของ Koc *et al.* (2011) แสดงดังสมการ

$$\Delta E = [(L^*R - L^*S)^2 + (a^*R - a^*S)^2 + (b^*R - b^*S)^2]^{0.5}$$

เมื่อ L^*R , a^*R , b^*R เป็นค่าสีของตัวอย่างควบคุม

L^*S , a^*S , b^*S เป็นค่าสีของตัวอย่าง

8.4 ปริมาณน้ำมันอิสระ (Free oil; FO)

วิเคราะห์ปริมาณน้ำมันอิสระที่ผิวไมโครแคปซูลตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Baik *et al.* (2004) และ Hardas *et al.* (2000) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างผงไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูลาน้ำหนัก 2.5 กรัม ลงในหลอดสำหรับเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วเติมเฮกเซน 15 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องผสมสาร (vortex mixer) เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที กรองส่วนใส (supernatant) ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ไมโครเมตร ลงในหลอดทดลองขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ล้างตะกอนอีกครั้งด้วยเฮกเซน แล้วระเหยเฮกเซนออกด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำหลอดทดลองที่มีน้ำมันมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกมาทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก อบตัวอย่างซ้ำ

จนน้ำหนักคงที่ รายงานค่าปริมาณน้ำมันอิสระเป็นกรัมของน้ำมันต่อ 100 กรัมไมโครแคปซูล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)

8.5 ปริมาณน้ำมันทั้งหมด (Total oil; TO)

วิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคปซูล ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Baik *et al.* (2004) และ Hardas *et al.* (2000) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างผงไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า 0.5 กรัม ลงในหลอดสำหรับเครื่องหมุนเหวี่ยงแล้วเติมสารละลายเอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องผสมสารเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมเฮกเซนและไอโซโพรพานอล (อัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ นาน 15 นาที ที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที แล้วหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แยกเอาส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ใส่หลอดทดลองขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ส่วนที่ละลายน้ำนำมาสกัดซ้ำด้วยตัวทำละลาย (เฮกเซนและไอโซโพรพานอล อัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร) เก็บส่วนที่ไม่ละลายน้ำผสมกับส่วนแรก ระเหยตัวทำละลาย (เฮกเซนและไอโซโพรพานอล) ด้วยก๊าซไนโตรเจน นำหลอดทดลองที่มีน้ำมันมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก อบหลอดทดลองซ้ำจนน้ำหนักคงที่ รายงานค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดเป็นกรัมน้ำมันต่อ 100 กรัมไมโครแคปซูล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)

8.6 ประสิทธิภาพการกักเก็บ (Encapsulation Efficiency; EE)

คำนวณประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ได้จากสมการต่อไปนี้ (McNamee *et al.*, 2001)

$$EE = \frac{TO - FO}{TO} \times 100$$

8.7 โครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูล

วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค (outer morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Hardas *et al.* (2000) โดยนำตัวอย่างไมโครแคปซูลวางลงบนแท่นวางตัวอย่าง (aluminium stub) จากนั้นนำไปเคลือบผิวอนุภาคด้วยทองเพื่อช่วยนำประจุอิเล็กตรอนด้วยเครื่องเคลือบทอง (Fine Coater, JFC-1200,

JEOL, Japan) โดยใช้เวลาเคลือบ 140 วินาที แล้วจึงนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.0 kV กำลังขยาย 2000× และ 4000× เพื่อตรวจดูขนาด การกระจายของอนุภาค และผิวของไมโครแคปซูล จากนั้นบันทึกภาพและวัดขนาดไมโครแคปซูลเทียบกับสเกลในภาพ

8.8 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูล

วิเคราะห์การกระจายตัวของไมโครแคปซูล ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Powder dispersibility IDF Method (GIA Niro analytical method A 6 a) โดยชั่งไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูลาน้ำหนัก 13 ± 0.1 กรัม นำไปกระจายตัวในสารละลายเอซิเตทบัฟเฟอร์ (ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3) น้ำหนัก 125 ± 0.1 กรัม ด้วยการเทไมโครแคปซูลลงในสารละลายเอซิเตทบัฟเฟอร์ แล้วกวนด้วย spatula อย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 20 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 30 วินาที จากนั้นกรองของเหลวด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช (150 ไมโครเมตร) นาน 30 วินาที ให้เหลือของเหลวในบีกเกอร์ ปริมาตร 75 มิลลิลิตร จากนั้นนำของเหลวที่ได้จากการกรองน้ำหนัก 8.00 กรัม ใส่ลงในถ้วยแอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 102 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำถ้วยแอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างออกมาทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก อบด้วยแอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างชั่งน้ำหนักครั้งที่ บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ แล้วนำมาคำนวณค่าการกระจายตัวของไมโครแคปซูล ดังสมการ

$$D = \frac{250 T}{100 (M + T)} \times \frac{100}{W}$$

โดยที่ D = การกระจายตัวของไมโครแคปซูล (ร้อยละ)

M = ความชื้นของไมโครแคปซูล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W = น้ำหนักของตัวอย่างไมโครแคปซูล (กรัม)

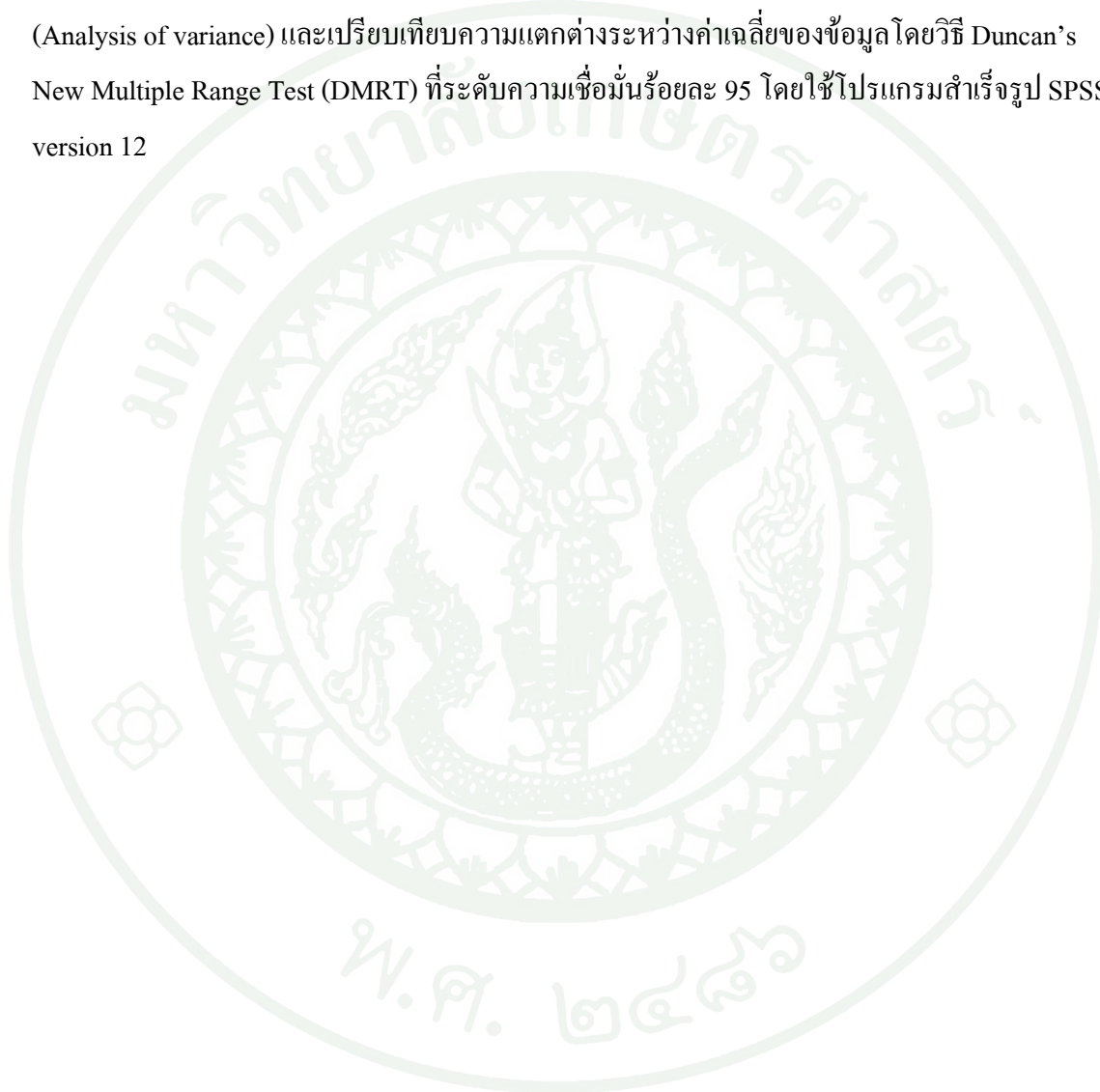
T = ปริมาณของแข็งทั้งหมดในของเหลวที่ได้จากการกรอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

คำนวณดังสมการ

$$T = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{8.00} \times 100$$

9. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized design, CRD) สำหรับการทดลองข้อ 3 และ 6 ส่วนการทดลองข้อ 4 และ 5 วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยสุ่มสมบูรณ์ (Factorial in CRD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองโดยใช้ ANOVA (Analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 12



ผลและวิจารณ์

1. ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันและปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

1.1 ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่า

อิมัลชันก่อนการทำแห้งเป็นไมโครแคปซูลต้องมีความคงตัว เพื่อให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันที่ดี (Danviriyakul *et al.*, 2002) ดังนั้นการศึกษาผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อความคงตัวของอิมัลชันจึงมีความสำคัญ เนื่องจากระบบอิมัลชันที่ศึกษาเป็นอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้นที่ผิวอนุภาคหยดนํ้ามันมีค่าศักย์ซิตาเป็นบวก ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับสารพอลิเมอร์ในวัฏภาคต่อเนื่องได้ และการเกิดอันตรกิริยาดังกล่าว อาจส่งผลต่อสมบัติและความคงตัวของอิมัลชันด้วย การทดลองนี้จึงศึกษาผลของชนิดวัตถุก่อผนังที่มีประจุบวก (โปรตีน) ประจุลบ (กัมมะราบิก) และไม่มีประจุ (คาร์โบไฮเดรต) ที่พีเอช 3.0 ร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทรินต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและไคโตแซน (อิมัลชันทุติยภูมิ) โดยชนิดวัตถุก่อผนังที่ศึกษาได้แก่ มอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับน้ำตาล (ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน; MS และแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน; ML) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีน (หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน; MM และโปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน; MW) หรือกัมมะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทริน (MG) โดยใช้ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมอลโทเด็คซ์ทริน ต่อสารก่อวัตถุผนังร่วมเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีอิมัลชันที่ไม่เติมวัตถุก่อผนังเป็นตัวอย่างควบคุม (NW) วิเคราะห์สมบัติของอิมัลชันจากการสังเกตลักษณะปรากฏ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน การวัดค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยดนํ้ามัน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดนํ้ามัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

1.1.1 ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน

การเกิดคริม (Creaming) เป็นสมบัติหนึ่งที่บ่งบอกถึงความไม่คงตัวของระบบอิมัลชัน เกิดเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง และความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคตัวถูกกระจายและของเหลววัฏภาคต่อเนื่องที่อยู่รอบๆ อนุภาค ซึ่งทั่วไปจะเป็นการแยกชั้นระหว่างอนุภาคนํ้ามันและน้ำ โดยอนุภาคนํ้ามันจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ทำให้อิมัลชันเกิดการแยกชั้น (McClements, 2005) เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏของอิมัลชันและความ

คงตัวต่อการแยกชั้นหลังจากเก็บอิมัลชันไว้นาน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 6) พบว่าอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ ยกเว้นอิมัลชันที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทริน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความคงตัวต่อการแยกชั้น เช่นเดียวกับอิมัลชันควบคุมที่ไม่เติมวัตถุก่อผนัง (NW) ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชันควบคุม และอิมัลชันที่เติมมอลโทเด็คซ์ทริน มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Klinkesorn *et al.* (2005a) ซึ่งพบว่าการเติมคอร์นไซรัป (DE 36) ความเข้มข้นร้อยละ 0-25 โดยน้ำหนัก ไม่ทำให้อิมัลชันน้ำมันปลาทวน้ำที่หาคงตัวด้วยเลซิทีนและโคโคแซนเกิดการแยกชั้น



ภาพที่ 6 ลักษณะปรากฏ และการแยกชั้นของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทวน้ำที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแลคโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)

ในทำนองเดียวกัน อิมัลชันที่เติมมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับน้ำตาล (MS และ ML) มีความคงตัวต่อการแยกชั้นเช่นกัน เนื่องจากการเติมมอลโทเด็คซ์ทรินและน้ำตาลนั้นเป็นการเพิ่มความหนืดให้กับของเหลวที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้สามารถลดการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมัน ป้องกันการหลอมรวมกัน และชะลอการแยกชั้นของอิมัลชันได้ (Ponginebbi *et al.*, 1999) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2003) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของซูโครส (ร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก) ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่ทำให้คงตัวด้วยปีตา-แลคโทโกลบูลิน สามารถชะลอการเกาะกลุ่มกัน

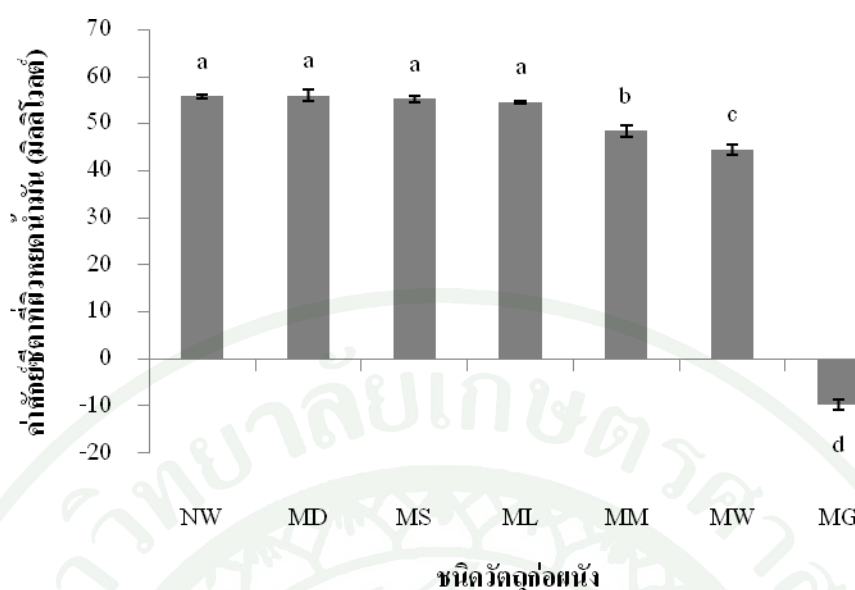
ของหยดน้ำมัน จึงทำให้อิมัลชันคงตัวต่อการแยกชั้น และยังมีการศึกษาของ Cornacchia and Roos (2012) พบว่าการเติมฟรุคโทส หรือฟรุคโทสและกลูโคส (อัตราส่วน 1:1) ความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์ไอโซเลตไม่ทำให้อิมัลชันเสียความคงตัว และไม่เกิดการแยกชั้น เช่นเดียวกับอิมัลชันที่มีการเติมมอลโทเด็คซ์ทริน ร่วมกับโปรตีนที่ยังมีความคงตัวต่อการการแยกชั้น สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่มีการใช้มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเพื่อเตรียมอิมัลชันก่อนการทำแห้งที่มีความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมันสามารถผลิตเป็นไมโครแคปซูลได้ (Young *et al.*, 1993; Kagami *et al.*, 2003)

สำหรับอิมัลชันที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ ก่อให้เกิดการแยกชั้นเป็นชั้นครีมที่เหลืองอ่อนด้านบน และเป็นของเหลวใสด้านล่างของหลอดทดลอง โดยมีค่า creaming index เท่ากับร้อยละ 25.11 แสดงถึงอิมัลชันไม่มีความคงตัว การแยกชั้นของอิมัลชันที่มีการเติมกัมอะราบิกและมอลโทเด็คซ์ทรินในการทดลองนี้ อาจเนื่องมาจากการเกิดแรงดึงดูดทางประจุระหว่างประจุลบบนโมเลกุลกัมอะราบิกกับประจุบวกของไคโตแซนที่ดูดซับบนหยดน้ำมันในสถานะที่มีปริมาณกัมอะราบิกไม่มากพอที่จะล้อมรอบหยดน้ำมันได้ทั้งหมด ทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของหยดน้ำมันแบบ bridging flocculation แต่ถ้าหากมีการเติมกัมอะราบิกในปริมาณที่มากพอ ก็จะสามารถเตรียมอิมัลชันที่มีความคงตัวต่อการแยกชั้นได้ (Espinosa-Andrews *et al.*, 2007; 2010) ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Harnsilawat *et al.* (2006) พบว่าการเติมกัมอะราบิกในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยบีตา-แลกโทโกลบูลิน จะมีความคงตัวเมื่อมีความเข้มข้นของกัมอะราบิกมากพอ และความคงตัวของอิมัลชันจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อพีเอชของอิมัลชันเพิ่มขึ้น

1.1.2 ผลของชนิดวัตถุดิบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวหยดน้ำมันในอิมัลชัน

ค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาค (ζ -potential) สามารถแสดงถึงความคงตัวของระบบอิมัลชันได้ โดยถ้าอนุภาคมีค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวมากกว่า 30 มิลลิโวลต์ (ค่าศักย์ไฟฟ้าอาจเป็นบวกหรือลบ) อนุภาคนั้นจะมีแรงผลักระหว่างอนุภาคเนื่องจากแรงทางประจุมากพอที่จะทำให้อนุภาคไม่เคลื่อนที่มาใกล้กัน จึงไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาคน้อยกว่า 30 มิลลิโวลต์ (ทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าบวกหรือลบ) อิมัลชันมีแนวโน้มที่จะสูญเสียความคงตัว เนื่องจากแรงทางประจุมีค่าไม่มากพอที่จะป้องกันการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและรวมกลุ่มกันของอนุภาค (Malvern instruments, 2004)

เมื่อวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิที่ไม่เติมวัตถุก่อผนังหรืออิมัลชันควบคุม (NW) พบว่ามีค่า $+55.77 \pm 0.37$ มิลลิโวลต์ (ตารางผนวกที่ ข1) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ogawa *et al.* (2003) ที่มีการเตรียมอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและไคโตแซน โดยไม่ได้เติมวัตถุก่อผนังใดๆ ลงไป มีค่าศักย์ซีตาที่ผิวของหยดน้ำมันเท่ากับ $+54$ มิลลิโวลต์ ประจุมีค่าเป็นบวกเนื่องจากการแตกตัวของหมู่เอมีนในโมเลกุลของไคโตแซนที่ pH น้อยกว่า pKa (ไคโตแซนมีค่า pKa ประมาณ 6.5) จึงทำให้อิมัลชันคงตัวด้วยแรงดึงดูดทางประจุระหว่างประจุลบของเลซิทีนและประจุบวกของไคโตแซน เมื่อเติมวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ ในอิมัลชันทุติยภูมิ ได้แก่ มอลโทเด็คซ์ทรินเพียงชนิดเดียว (MD) ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน (MS) และแลก-โทส-มอลโทเด็คซ์ทริน (ML) พบว่าอิมัลชันมีค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันในช่วง $+54$ ถึง $+56$ มิลลิโวลต์ (ตารางผนวกที่ ข 1) ซึ่งแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับอิมัลชันควบคุม (ภาพที่ 7) จากผลการทดลองแสดงว่ามอลโทเด็คซ์ทรินและน้ำตาลไม่ถูกดูดซับที่ผิวอนุภาคหยดน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากมอลโทเด็คซ์ทริน และน้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถดูดซับที่ผิวของหยดน้ำมันที่มีประจุในอิมัลชันได้ (Dickinson, 2003) จึงไม่ทำให้ค่าศักย์ซีตาของอนุภาคหยดน้ำมันเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับผลของการเติมคอร์นไซรัปความเข้มข้น ร้อยละ 0–25 โดยน้ำหนัก ที่ไม่มีผลต่อค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมันในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและไคโตแซน (Klinkesorn *et al.*, 2005a) นอกจากนี้ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมันมีค่ามากกว่า $+30$ มิลลิโวลต์ แรงผลักระหว่างอนุภาคเนื่องจากแรงทางประจุมากพอ ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของหยดน้ำมัน อิมัลชันมีความคงตัว สอดคล้องกับผลลักษณะปรากฏและความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน (ภาพที่ 6) การเติมน้ำตาลหรือพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่มีประจุไม่ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมันเนื่องจากแรงดึงดูดทางประจุที่ตรงกันข้าม (bridging flocculation) อย่างไรก็ตาม การเติมน้ำตาลหรือพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่มีประจุเหล่านี้ในระดับความเข้มข้นที่มากเกินไป อาจทำให้หยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันแบบ depletion flocculation โดยกลไกการเกิดการเกาะกลุ่มกันนี้เกิดจากน้ำตาลหรือพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่มีประจุที่อยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องของระบบอิมัลชันในระดับความเข้มข้นที่จะทำให้พื้นที่รอบอนุภาคหยดน้ำมันเกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) จึงผลักดันโมเลกุลน้ำออกจากผิวสัมผัสของหยดน้ำมัน ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน (Jenkins and Snowden, 1996; McClements, 2000; Blijdenstein *et al.*, 2004) แต่สำหรับการทดลองนี้ความเข้มข้นของน้ำตาลและมอลโทเด็คซ์ทริน ที่เติมลงในอิมัลชันต่ำกว่าความเข้มข้นที่จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมัน (depletion flocculation concentration) อิมัลชันจึงยังคงมีความคงตัว



ภาพที่ 7 ค่าดัชนีชี้วัดที่ผิวหอยน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุดิบอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับ แล็กโทส, MM = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับ โปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)

หมายเหตุ ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

อิมัลชันที่มีการเติมหางนมผง-มอลโทเด็กซ์ทริน (MM) และ โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็กซ์ทริน (MW) มีค่าดัชนีชี้วัดที่ผิวหอยน้ำมัน $+48.41 \pm 1.12$ และ $+44.38 \pm 1.13$ มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ ข1) โดยค่าดัชนีชี้วัดของอิมัลชันทั้งสองตัวอย่างมีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ แสดงถึงอิมัลชันมีความคงตัว สอดคล้องกับผลลักษณะปรากฏและความคงตัวต่อการแยกชั้นของหอยน้ำมัน (ภาพที่ 6) แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัดที่ผิวหอยน้ำมันในอิมัลชันที่มีการเติมโปรตีน-มอลโทเด็กซ์ทรินกับอิมัลชันควบคุม พบว่าค่าดัชนีชี้วัดบนผิวหอยน้ำมันในอิมัลชันที่เติมโปรตีน-มอลโทเด็กซ์ทรินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าโมเลกุลของโปรตีนมีการดูดซับบนผิวหอยน้ำมัน การเติมโปรตีนในอิมัลชันจึงส่งผลต่อค่าดัชนีชี้วัดที่ผิวหอยน้ำมัน เพื่อตรวจสอบว่าโปรตีนถูกดูดซับที่ผิวของหอยน้ำมัน จึงนำอิมัลชันไปหมุนเหวี่ยงที่ 15,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำส่วนครีมมากระจายตัวในอะซิเตทบัพเฟอร์ (พีเอช 3) อีกครั้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่า

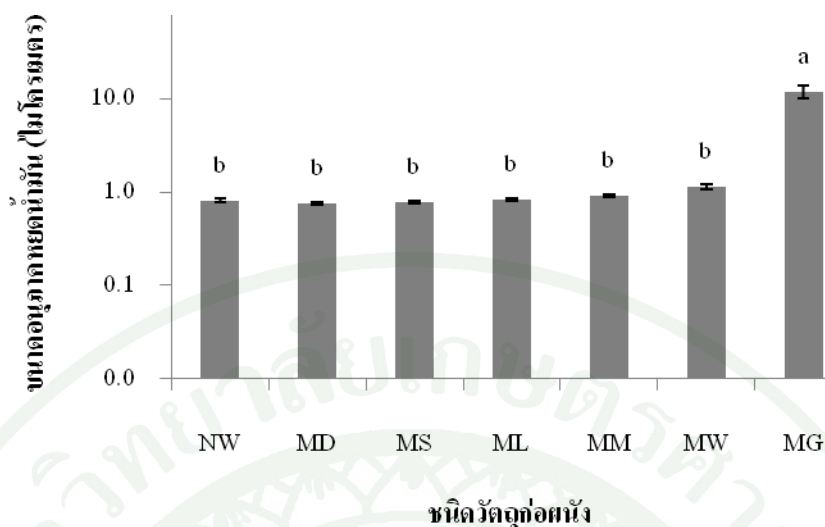
ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันในอิมัลชัน (Mun *et al.*, 2006) พบว่าส่วนครีมจากอิมัลชันที่มีหางนมผงและอิมัลชันที่มีโปรตีนเวย์เข้มข้น เมื่อนำมากระจายตัวซ้ำในอะซิเตทบัฟเฟอร์มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่หยดน้ำมัน +48 มิลลิโวลต์ และ +41 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันก่อนและหลังการหมุนเหวี่ยงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าโปรตีนนั้นถูกดูดซับที่ผิวของหยดน้ำมัน ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ไม่ได้คาดหมาย ทั้งนี้เนื่องจากหางนมผงหรือโปรตีนเวย์เข้มข้นในอิมัลชันแสดงค่าประจุสุทธิเป็นบวกในระบบอิมัลชันที่สภาวะพีเอช 3 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ต่ำกว่า pI ของโปรตีนทั้งสองที่มีค่าประมาณ 4.5-5 (McClements, 2005) โมเลกุลโปรตีนจึงไม่ควรถูกดูดซับบนผิวหยดน้ำมันที่มีประจุบวกแล้วทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่าประจุบนโมเลกุลของโปรตีนนั้นเป็นแบบ heterogeneously distribution มีส่วนที่เป็นทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโมเลกุล (Schonhoff, 2003) การลดลงของประจุที่ผิวของหยดน้ำมันในการทดลองนี้จึงอาจจะเนื่องจากการดูดซับองค์ประกอบที่มีประจุลบบางชนิดในโมเลกุลโปรตีนบนผิวของหยดน้ำมัน ซึ่งจากข้อมูลทางเทคนิคของหางนมผงและโปรตีนเวย์เข้มข้นพบว่าโมเลกุลโปรตีน มีฟอสฟอรัสและโฟลาซิน (Folacin) เป็นองค์ประกอบ โดยฟอสฟอรัสแสดงความเป็นประจุลบ ส่วนโฟลาซินมีโครงสร้างที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก 2 หมู่ มีค่า pKa 4.82 และ 10.5 (Ghasemi *et al.*, 2005) ดังนั้นที่สภาวะพีเอช 3 จึงมีส่วนที่แสดงประจุลบที่สามารถดูดซับบนผิวของหยดน้ำมันได้ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่า ไคโตแซนสามารถเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้า (electrostatic attraction) กับโปรตีนเวย์ที่ถูกดูดซับบนผิวของหยดน้ำมันในสภาวะที่อิมัลชันมีพีเอชต่ำกว่า pI ของโปรตีน ($\text{pH} < 5.5$) ซึ่งทั้งโมเลกุลของไคโตแซนและโปรตีนเวย์มีประจุสุทธิเป็นบวก (Hong and McClements, 2007)

สำหรับอิมัลชันที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทรินมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันลดลงเหลือประมาณ -10 มิลลิโวลต์ (ภาพที่ 7) แสดงถึงกัมอะราบิกถูกดูดซับที่ผิวสัมผัสของอนุภาคหยดน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องมาจากกัมอะราบิกมีค่า pI ประมาณ 1.8 (Jayme *et al.*, 1999) เมื่ออยู่ในระบบอิมัลชันที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ซึ่งสูงกว่าค่า pI โมเลกุลกัมอะราบิกจึงมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chanamai and McClements (2002) ที่ใช้กัมอะราบิกเป็นอิมัลซิฟายเออร์ในอิมัลชันประเภทเครื่องดื่ม และรายงานว่าในสภาวะพีเอช 3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันมีค่าประมาณ -20 มิลลิโวลต์ เนื่องจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^-$) ในโมเลกุล ด้วยเหตุนี้กัมอะราบิกจึงสามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับหยดน้ำมันในอิมัลชันที่ผิวสัมผัสของหยดน้ำมันมีประจุบวกได้ จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของหยดน้ำมันในอิมัลชันควบคุมสำหรับงานวิจัยนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าบวก (เลซิทีน-ไคโตแซน) เป็นค่าลบ (เลซิทีน-ไคโตแซน-กัมอะราบิก) แต่เนื่องจากปริมาณของกัมอะราบิกไม่มากเพียงพอที่จะล้อมรอบหยดน้ำมันได้ทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้ความแรงของประจุนี้น้อย ซึ่งมีค่าน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ อิมัลชันจึงไม่มีความคงตัว สอดคล้องกับผลลักษณะ

ปรากฏและความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน (ภาพที่ 6) และงานวิจัยของ Moschakis *et al.* (2010) ที่ศึกษาผลของอัตราส่วนของกัมอะราบิกกับไคโตแซนต่อค่าศักย์ซีตาในสารละลายผสมที่สถานะเฟส 3 พบว่าสารละลายไคโตแซนมีค่าศักย์ซีตาเท่ากับ +60 มิลลิโวลต์ ส่วนสารละลายกัมอะราบิกมีค่าศักย์ซีตา -10 มิลลิโวลต์ เมื่อนำสารละลายทั้งสองมาผสมกันที่อัตราส่วนของกัมอะราบิกกับไคโตแซนเท่ากับ 1-9 ค่าศักย์ซีตาของสารละลายผสมลดลงเหลือประมาณ -5 มิลลิโวลต์ และเมื่อเติมสารละลายผสมของกัมอะราบิกและไคโตแซนที่อัตราส่วนต่างๆ ลงในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์ไอโซเลทพบว่า อิมัลชันเกิดการแยกชั้น (phase separation) ในลักษณะต่างๆ ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนของกัมอะราบิกและไคโตแซน

1.3.3 ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชัน

ขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันควบคุม (NW) อิมัลชันที่เติมมอลโทเด็กซ์ทริน หรือซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน หรือแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน มีขนาดหยดน้ำมันในช่วง 0.7-0.8 ไมโครเมตร (ภาพที่ 8, ตารางผนวกที่ ข2) ส่วนอิมัลชันที่มีการเติมหางนมผง-มอลโทเด็กซ์ทริน หรือโปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็กซ์ทริน มีขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชัน ประมาณ 0.9 ไมโครเมตร และ 1.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยขนาดหยดน้ำมันในทุกตัวอย่างดังกล่าวมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนอิมัลชันที่มีการเติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทริน พบว่าขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันมีค่าเฉลี่ยประมาณ 12 ไมโครเมตร ซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างอิมัลชันอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากอิมัลชันเกิด bridging flocculation ดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตาม ค่าขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันที่มีการเติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทรินที่รายงานในการทดลองนี้ อาจจะไม่ใช่ว่าที่แท้จริง เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่สามารถวัดค่าที่ถูกต้องและแม่นยำได้แค่ช่วง 0.6 ไมโครเมตร ถึง 6 ไมโครเมตร เท่านั้น (Malvern instruments, 2004)



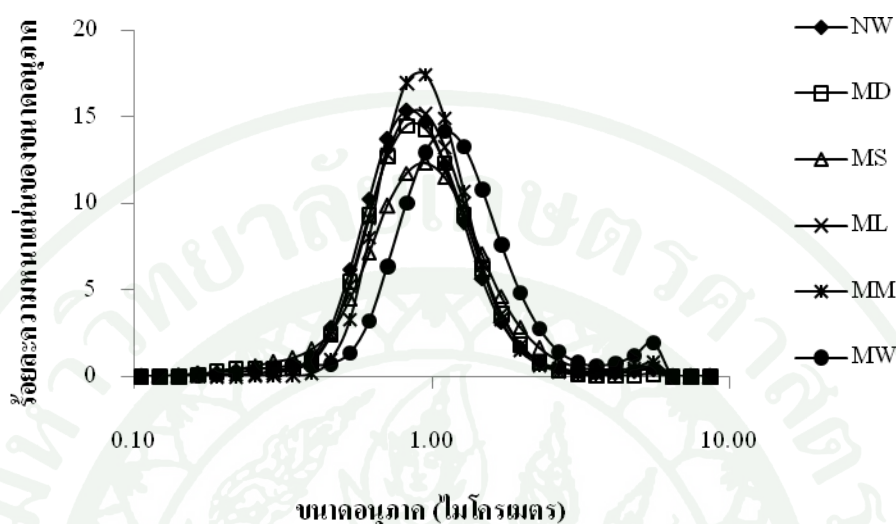
ภาพที่ 8 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส, MM = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)

หมายเหตุ ตัวอักษร a-b หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

1.1.4 ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชัน

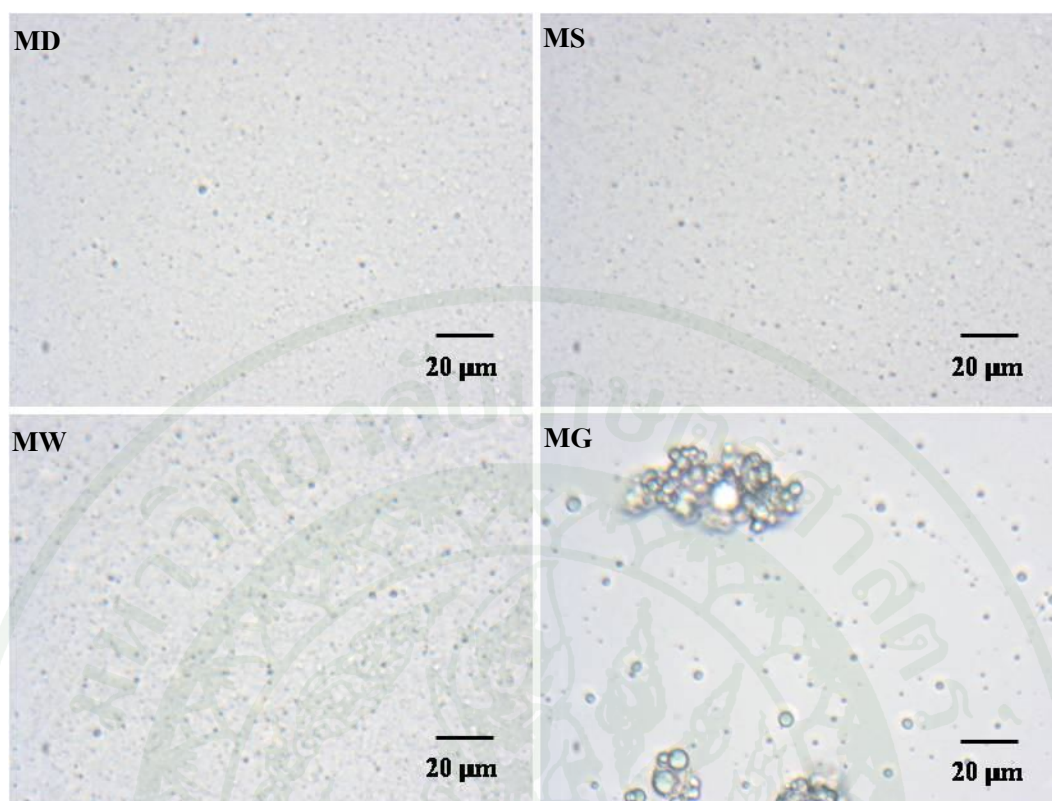
เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันควบคุมและอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังชนิดต่างๆ (ภาพที่ 9) พบว่าอิมัลชันควบคุม อิมัลชันที่มีการเติมมอลโทเด็กซ์ทริน หรือซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน หรือแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดน้ำมันแบบ monomodal distribution แสดงถึงมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอในช่วงเดียวกัน ส่วนการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในอิมัลชันที่เติมหางนมผง-มอลโทเด็กซ์ทริน หรือโปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็กซ์ทริน (ภาพที่ 9) มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดน้ำมันแบบ bimodal distribution แสดงถึงมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอในสองช่วง สำหรับอิมัลชันที่มีการเติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทริน มีขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันมีค่าเฉลี่ย 12 ไมโครเมตร ซึ่งอาจจะไม่ใช่ค่าที่แท้จริง เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่สามารถวัดค่าที่ถูกต้องและแม่นยำได้แค่ช่วง 0.6 นาโนเมตร ถึง 6 ไมโคร-

เมตร เท่านั้น (Malvern instruments, 2004) จึงไม่แสดงผลการกระจายของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันในรายงานนี้



ภาพที่ 9 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เติม (NW) และเติมมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับแลคโตส, MM = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับหางนมผง, MW = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์ และ MG = มอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับกัมอะราบิก)

การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน (ภาพที่ 10, ภาพผนวกที่ ข1) พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเกาะกลุ่ม (flocculation) และการรวมตัวกัน (coalescence) ของหยดน้ำมัน ยกเว้นอิมัลชันที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทริน (MG) พบว่าหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่และหยดน้ำมันเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากการเกิด bridging flocculation ดังอธิบายข้างต้น (Ogawa *et al.*, 2003)



ภาพที่ 10 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่เติมมอลโทเด็กซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับซูโครส (MS) หรือโพรตีนเวย์เข้มข้น (MW) หรือ กัมอะราบิก (MG) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของวัตถุดิบอื่นร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทริน เท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

1.2 ผลของชนิดวัตถุดิบต่อปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

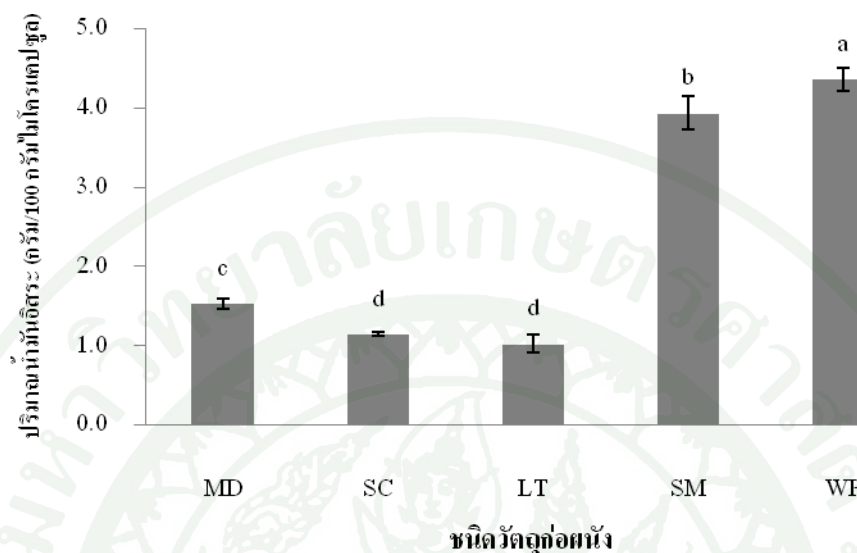
จากการศึกษาผลของชนิดวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัว ด้วยเลซิทีนและไคโตแซน พบว่าอิมัลชันที่เติมวัตถุดิบทุกชนิดที่ทำการศึกษามีความคงตัว สามารถนำมาทำแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อผลิตเป็นไมโครแคปซูลได้ ยกเว้นอิมัลชันที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทริน โดยเตรียมอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของโพรตีนหรือน้ำตาลต่อ ปริมาณมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากทำแห้งอิมัลชันจะได้ผงไมโครแคปซูล นำไมโครแคปซูลมาวิเคราะห์ปริมาณ น้ำมันอิสระที่ผิว และประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมัน

ปริมาณน้ำมันอิสระ (free oil) หรือน้ำมันที่สกัดได้ (extractable oil) คือ น้ำมันที่บริเวณผิวไมโครแคปซูล (surface oil) และน้ำมันที่สกัดได้ด้วยตัวทำละลายจากรอยร้าวของอนุภาคไมโครแคปซูล (Buma, 1971) ระบบวัตถุก่อผนังที่ดีจะต้องสามารถกักเก็บน้ำมันไว้ในโครงสร้างภายในหรือเมทริกซ์ (matrix) ได้มากที่สุด นั่นคือควรมีปริมาณน้ำมันอิสระที่ผิวน้อย ด้วยเหตุนี้ปริมาณน้ำมันอิสระจึงสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของไมโครแคปซูลในการกักเก็บน้ำมันได้

เมื่อศึกษาผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล (ภาพที่ 11) พบว่าไมโครแคปซูลที่ใช้ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนัง มีปริมาณน้ำมันอิสระน้อยกว่าไมโครแคปซูลที่ใช้มอลโทเด็คซ์ทรินเพียงชนิดเดียว (ตัวอย่างควบคุม) เป็นวัตถุก่อผนังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากซูโครสและแล็กโทส สามารถสร้าง glassy layer รอบไมโครแคปซูล ทำให้รูและรอยร้าวที่ผิวของไมโครแคปซูลลดลง จึงสามารถป้องกันการแพร่ของตัวทำละลายเข้าไปในไมโครแคปซูลได้ ทำให้ปริมาณน้ำมันอิสระที่สกัดได้น้อยลง (Moreau and Rosenberg, 1993; McNamee *et al.*, 2001)

ในทางตรงกันข้าม การใช้หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน และ โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน เป็นวัตถุก่อผนังทำให้ปริมาณน้ำมันอิสระในไมโครแคปซูล (ภาพที่ 11) มีค่ามากกว่าไมโครแคปซูลที่ใช้มอลโทเด็คซ์ทรินเพียงชนิดเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากการดูดซับของโปรตีนที่ผิวนอกของหยดน้ำมัน (ภาพที่ 7) อาจทำให้โคโคแซนบางส่วนหลุดออกจากที่ผิวสัมผัส ความคงตัวของอิมัลชันระหว่างการทำแห้งอาจจะลดลง ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันของระบบวัตถุก่อผนังดังกล่าวจึงลดลงด้วย จากการศึกษาของ Shaw *et al.* (2007) พบว่าไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่เตรียมจากอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้นของเลซิทีนและโคโคแซน มีความคงตัวมากกว่าไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่เตรียมจากอิมัลชันแบบผิวสัมผัสชั้นเดียวของเลซิทีน โดยใช้คอรีนไชรูป (DE 24) เป็นวัตถุก่อผนัง นอกจากนี้งานวิจัยของ Bae and Lee (2008) พบว่าการลดอัตราส่วนระหว่างโปรตีนเวย์ไอโซเลตและมอลโทเด็คซ์ทรินจากอัตราส่วน 1:1 เป็น 1:9 ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลเพิ่มจากร้อยละ 45 เป็นร้อยละ 66 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การศึกษาของ Young *et al.* (1993) พบว่าการใช้โปรตีนร่วมกับสตาร์ชดัดแปรเป็นวัตถุก่อผนัง ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สตาร์ชดัดแปรเป็นวัตถุก่อผนังอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนมีบทบาทในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ในระบบอิมัลชัน ส่วนสตาร์ชดัดแปรซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตมีส่วนที่ชอบน้ำ จึงสามารถป้องกันการสกักน้ำมันที่กักเก็บจากตัวทำละลาย ดังนั้นสมบัติของไมโครแคปซูลและประสิทธิภาพในการกักเก็บนั้นจึง

ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตด้วย



ภาพที่ 11 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล ที่เตรียมจากอิมัลชันหุติยภูมิน้ำมันปลาที่เติมมอลโทเด็คซ์ทริน (MD) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุดิบแห้งอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MS = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับซูโครส, ML = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส, MM = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับหางนมผง และ MW = มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีนเวย์)

หมายเหตุ ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณน้ำมันอิสระในไมโครแคปซูล (ตารางผนวกที่ ข3) สามารถนำมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันได้ โดยจะแปรผกผันกับปริมาณน้ำมันอิสระ คือ เมื่อปริมาณน้ำมันอิสระมีค่าน้อยประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันจะมีค่ามาก ซึ่งค่าประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันในไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเด็คซ์ทรินเพียงอย่างเดียวเป็นวัตถุดิบแห้ง พบว่ามีค่าร้อยละ 91.42 ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้คอร์นไซรัปเป็นวัตถุดิบแห้งที่มีค่าประสิทธิภาพการกักเก็บประมาณร้อยละ 87 (Klinkesorn *et al.*, 2006) เมื่อมีการใช้น้ำตาลหรือโปรตีนร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทริน ได้แก่ แล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน และ โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน ประสิทธิภาพการกักเก็บมีค่าร้อยละ 94.16 93.28 73.28 และ 75.89 ตามลำดับ

ดังนั้นซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลคโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน จึงเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเตรียมไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่น่าที่มีประสิทธิภาพการกักเก็บที่ดีได้

2. ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันและไมโครแคปซูลน้ำมันปลา

2.1 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลา

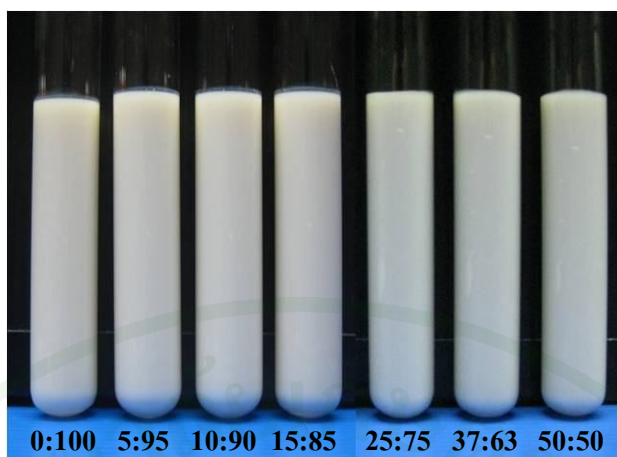
จากการศึกษาผลของชนิดวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันและปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลา พบว่าการใช้วัตถุดิบร่วมระหว่างซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลคโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมอลโทเด็กซ์ทรินต่อสารก่อวัตถุดิบร่วมเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการใช้เป็นระบบวัตถุดิบเพื่อปรับปรุงสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลา เนื่องจากระบบวัตถุดิบดังกล่าวไม่ส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน และสามารถเตรียมไมโครแคปซูลที่มีปริมาณน้ำมันอิสระต่ำ และมีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูง

อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากปัจจัยด้านชนิดวัตถุดิบแล้ว ระบบวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ร่วมกัน และปริมาณรวมของวัตถุดิบเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บสารสำคัญหรือวัตถุดิบของไมโครแคปซูล โดยปริมาณรวมของวัตถุดิบอาจจะแสดงในรูปของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน หรืออัตราส่วนของวัตถุดิบกับวัตถุดิบซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้อัตราส่วน 1:4 หรือมีปริมาณวัตถุดิบเท่ากับร้อยละ 25 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Dziezak, 1988) แต่ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบที่อัตราส่วนของน้ำตาลกับมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ อาจส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไมโครแคปซูลที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่ดี (Reineccius, 1988; Danviriyakul *et al.*, 2002) ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาผลของชนิดและปริมาณของวัตถุดิบต่อสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิทีนและโคโคแซน (อิมัลชันทุติยภูมิ) โดยมีระบบวัตถุดิบที่ทำการศึกษา ได้แก่ ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน (MS) และแลคโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ML) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลคโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยมีอิมัลชันที่ใช้ระบบวัตถุดิบมอลโทเด็กซ์ทรินเพียงอย่างเดียวเป็นตัวอย่างควบคุม (ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลคโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100; MD) วิเคราะห์สมบัติของอิมัลชันจากการสังเกตลักษณะปรากฏ

ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน การวัดค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมัน ขนาดและการกระจายตัวของหยดน้ำมันและโครงสร้างระดับจุลภาค

2.1.1 ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อผนังต่อลักษณะปรากฏของอิมัลชันและความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมันในอิมัลชัน

ลักษณะปรากฏของอิมัลชันและความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน หลังจากเก็บอิมัลชันไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าอิมัลชันทุกขบวนการวัตถุก่อผนัง (ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลคโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน) ที่ทุกปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50) และทุกระดับของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนม เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความคงตัวต่อการแยกชั้น (ภาพที่ 12, ภาพผนวกที่ ค 1) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมน้ำตาลหรือมอลโทเด็กซ์ทรินสามารถเพิ่มความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่องในระบบอิมัลชัน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นสูง (มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) (Blijdenstein *et al.*, 2004) จึงสามารถชะลอการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมัน ทำให้ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมัน และเกิดการแยกชั้น แต่อย่างไรก็ตาม การเติมน้ำตาลหรือมอลโทเด็กซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้นสูง (critical flocculation concentration) อาจส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของหยดน้ำมันแบบ depletion flocculation แต่ในการทดลองนี้อัตราส่วนของน้ำตาลต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณวัตถุก่อผนังในช่วงระดับที่ทำการศึกษายังไม่ส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน สอดคล้องกับการศึกษาต่างๆ ที่รายงานว่าการเติมน้ำตาล และ/หรือมอลโทเด็กซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ไม่ส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน ตัวอย่างเช่น การเติมซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่ทำให้คงตัวด้วยบีตา-แลคโทโกลบูลิน (Kim *et al.*, 2003) การเติมซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่ทำให้คงตัวด้วยบีตา-แลคโทโกลบูลินที่มีเด็กซ์แทรนร้อยละ 0.17 โดยน้ำหนัก (Blijdenstein *et al.*, 2004) การเติมซูโครสและกลูโคสที่ความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 60 โดยปริมาตร ในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมแคซีเนต (Dickinson and Merino, 2002) และการเติมน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์ไอโซเลต ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัฏภาคต่อเนื่องในอิมัลชัน (Cornacchia and Roos, 2012)



ภาพที่ 12 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.1.2 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันในอิมัลชัน

เมื่อวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันพบว่าอิมัลชันทุกชนิดที่มีส่วนผสมของซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ตารางผนวกที่ ค1) มีค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมัน +54 ถึง +56 มิลลิโวลต์ โดยระบบของวัตถุดิบร่วมทั้งสองระบบมีค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Mun *et al.* (2006) ซึ่งรายงานว่าอิมัลชันแบบผิวสัมผัสสองชั้นที่ใช้ไคโตแซนเป็นสารพอลิเมอร์สร้างผิวสัมผัสชั้นที่สอง มีค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันอยู่ในช่วง +50 ถึง +60 มิลลิโวลต์ เนื่องจากการเติมมอลโทเด็กซ์ทรินหรือซูโครสไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ซีตาบนผิวหยดน้ำมันในอิมัลชัน (Harnsilawat *et al.*, 2006; Klinkesorn *et al.*, 2005a) เพราะมอลโทเด็กซ์ทรินและน้ำตาลเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสของหยดน้ำมัน (Dickinson, 2003)

2.1.3 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชัน

ขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันที่มีส่วนผสมของซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ตารางผนวกที่ ค2) ทุกปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50) และทุกระดับของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก) มีขนาดของหยดน้ำมันในช่วง 0.7-

0.8 ไมโครเมตร โดยระบบของวัตถุอ่อนนุ่มรวมทั้งสองระบบมีขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันไม่มีผลต่อขนาดของหยดน้ำมัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Dickinson and Merino (2002) พบว่าการเติมซูโครสและกลูโคสในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโซเดียมแลซีเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0-60 โดยปริมาตรไม่ส่งผลต่อขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชัน (d_{43}) โดยมีค่าประมาณ 0.8 ไมโครเมตร

2.1.4 ผลของระบบและปริมาณวัตถุอ่อนนุ่มต่อการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชัน

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทั้งที่เติมซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ภาพผนวกที่ ค2) และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ภาพผนวกที่ ค3) ทุกปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และทุกระดับของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน พบว่ามีการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในลักษณะเดียวกัน คือ แบบ monomodal distribution แสดงถึงมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอในช่วงเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Klinkesorn *et al.* (2004) พบว่าการกระจายของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันข้าวโพดในน้ำ ที่มีมอลโทเด็กซ์ทริน (DE 10-36) ร้อยละ 0-35 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นแบบ monomodal distribution นอกจากนี้การเติมน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัฏภาคต่อเนื่องในอิมัลชันที่ทำให้คงตัวด้วยโปรตีนเวย์ไอโซเลต มีลักษณะการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันแบบ monomodal distribution (Cornacchia and Roos, 2012)

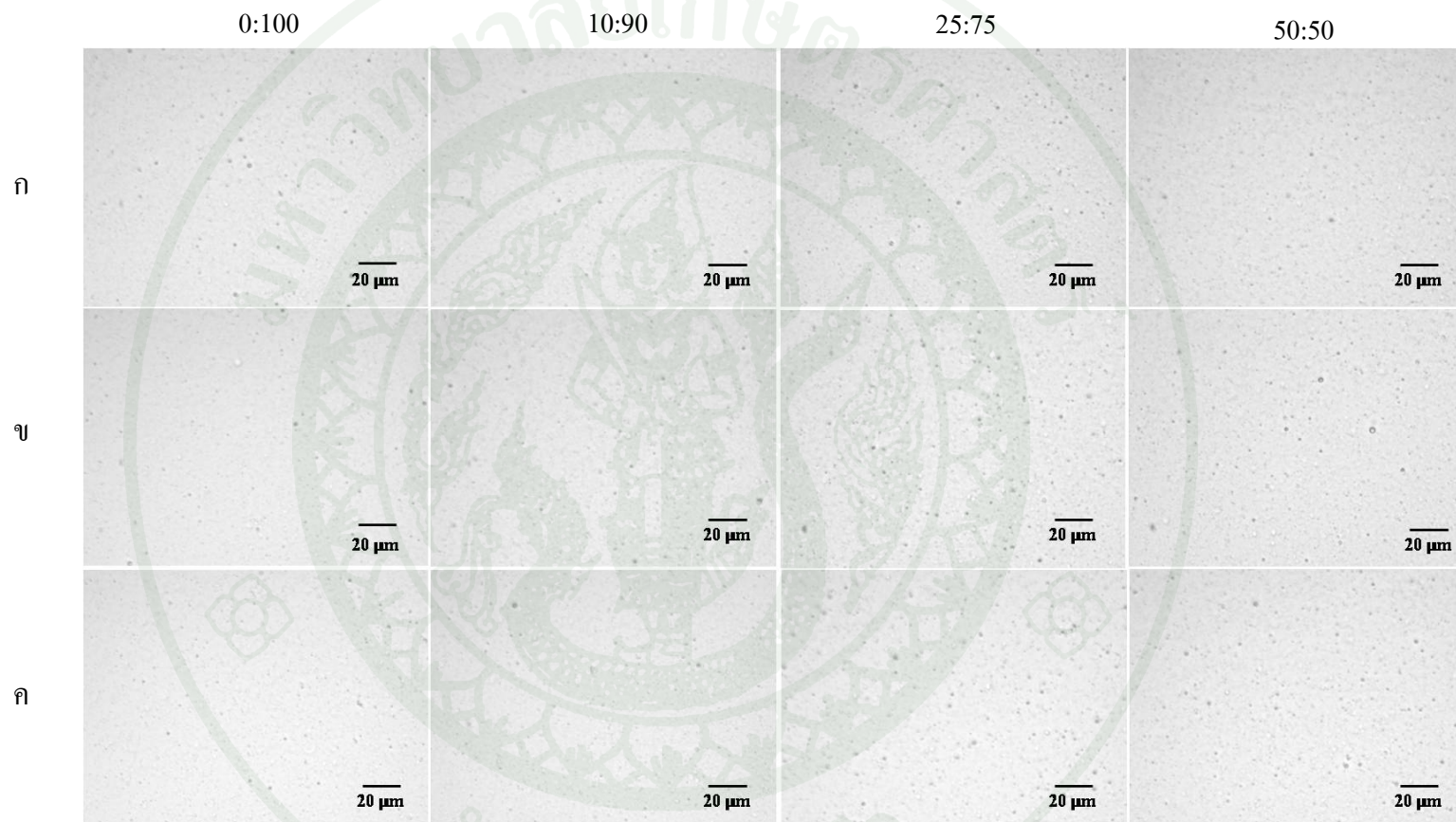
2.1.5 ผลของระบบและปริมาณวัตถุอ่อนนุ่มต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชัน

เมื่อสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้เลนส์วัตถุที่กำลังขยาย 40 เท่า (ภาพที่ 13, ภาพผนวกที่ ค4-ค6) พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันทุกตัวอย่างมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเกาะกลุ่ม (flocculation) และการหลอมรวมกัน (coalescence) ของหยดน้ำมัน สอดคล้องกับผลลักษณะปรากฏ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน และขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำการหาค่าด้วยเลซิทิน และไลโดแซนที่เติมวัตถุดิบงูโครส หรือแล็กโทสกับมอลโทเด็กซ์ทริน ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของงูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า อิมัลชันมีความคงตัว ดังนั้นจึงสามารถนำอิมัลชันที่เติมวัตถุดิบดังกล่าวไปทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อผลิตเป็นไมโครแคปซูลได้

2.2 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลา

ระบบวัตถุดิบที่มีวัตถุดิบชนิดเดียว หรือหลายชนิดใช้ร่วมกันที่อัตราส่วนต่างๆ และปริมาณรวมของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูล เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของไมโครแคปซูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพในการกักเก็บวัตถุดิบหรือสารสำคัญ การศึกษาผลของปัจจัยเหล่านี้จึงมีความสำคัญ ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาผลของระบบ และปริมาณวัตถุดิบต่อสมบัติของไมโครแคปซูล โดยเตรียมไมโครแคปซูลจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยอิมัลชันน้ำมันปลาที่ทำการหาค่าด้วยเลซิทินและไลโดแซน ที่มีระบบวัตถุดิบ ได้แก่ งูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน (MS) และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ML) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของงูโครส หรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยมีไมโครแคปซูลที่เตรียมจากอิมัลชันที่ใช้ระบบวัตถุดิบมอลโทเด็กซ์ทรินเพียงอย่างเดียวเป็นตัวอย่างควบคุม (ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของงูโครส หรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100; MD) วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของไมโครแคปซูล ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content) ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity; a_w) ค่าสีของไมโครแคปซูล (Color) ปริมาณน้ำมันอิสระ (Free oil) ปริมาณน้ำมันทั้งหมด (Total oil) ของไมโครแคปซูล ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันของไมโครแคปซูล (Encapsulation efficiency) โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) และการกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูล



ภาพที่ 13 โครงสร้างระดับจุลภาคของอีพ็อกซีที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 10:90, 25:75 และ 50:50 ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอีพ็อกซีเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก

2.2.1 ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อปนื้อต่อปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูล

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูล ที่เตรียมจากอิมัลชันทุติยภูมิ ที่เติมซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ตารางที่ 4 และตารางที่ 5) พบว่ามีปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าไมโครแคปซูลที่ใช้วัตถุก่อปนื้อร่วมระหว่างโซเดียมแคซิเนตและคาร์โบไฮเดรตที่มีอัตราส่วนของวัตถุแก่นต่อวัตถุก่อปนื้อ และอัตราส่วนของโซเดียมแคซิเนตต่อคาร์โบไฮเดรตระดับต่างๆ มีความชื้นในช่วงร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก (Hogan *et al.*, 2001b) ซึ่งมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อาหารผงควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (Codex Standard 207, 1999)

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อปนื้อผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	1.71±0.12 ^{Ad}	1.63±0.40 ^{Ad}	1.59±0.14 ^{Ad}
5:95	1.93±0.16 ^{AcD}	1.57±0.12 ^{Bd}	1.63±0.08 ^{Bd}
10:90	2.05±0.26 ^{Abc}	1.79±0.24 ^{AcD}	1.80±0.33 ^{AcD}
15:85	2.38±0.22 ^{Ab}	2.08±0.04 ^{Bbc}	1.95±0.11 ^{Bbc}
25:75	2.72±0.22 ^{Aa}	2.28±0.20 ^{Bab}	2.14±0.15 ^{Bb}
37:63	2.74±0.11 ^{Aa}	2.16±0.37 ^{Babc}	2.19±0.19 ^{Bb}
50:50	2.71±0.16 ^{Aa}	2.51±0.21 ^{Aa}	2.48±0.13 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

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

ตารางที่ 5 ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละ โดย น้ำหนักของแล็กโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	1.71±0.12 ^{Ac}	1.63±0.40 ^{Ad}	1.59±0.14 ^{Ac}
5:95	2.66±0.43 ^{Ab}	2.55±0.06 ^{Ab}	2.48±0.25 ^{Ab}
10:90	2.74±0.25 ^{Ab}	2.50±0.10 ^{Abc}	2.44±0.24 ^{Ab}
15:85	2.70±0.23 ^{Ab}	2.36±0.12 ^{Bc}	2.47±0.12 ^{ABb}
25:75	2.70±0.35 ^{Ab}	2.78±0.18 ^{Aa}	2.76±0.09 ^{Aa}
37:63	2.83±0.21 ^{Aab}	2.79±0.16 ^{Aa}	2.93±0.17 ^{Aa}
50:50	3.14±0.16 ^{Aa}	2.75±0.12 ^{Ba}	2.92±0.19 ^{ABa}

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

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

เมื่อพิจารณาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลต่อมอลโทเด็กซ์ทรินที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูล พบว่าเมื่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เนื่องจากซูโครสและแล็กโทส เป็นน้ำตาลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ส่งผลให้มีสมบัติในการละลายน้ำและสมบัติในการดูดความชื้น (hygroscopicity) (Davis, 1995) สอดคล้องกับการศึกษาผลของค่า Dextrose equivalent (DE) ของสตาร์ชไฮโดรไลเซตต่อปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น เมื่อ DE เพิ่มขึ้น เพราะสตาร์ชไฮโดรไลเซตที่ DE สูงขึ้นจะมีส่วนของหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) มากขึ้น จึงมีสมบัติในการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น (Gharsallaoui *et al.*, 2011)

ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน ไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ มีปริมาณความชื้นลดลง ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเมื่อควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งหรือสถานะการทำแห้ง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณความชื้น ได้แก่ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง และสมบัติในการดูดความชื้นของวัตถุดิบ (Quek *et al.*, 2007; Gharsallaoui *et al.*, 2011) ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งในอิมัลชัน สัดส่วนของปริมาณน้ำในอิมัลชันก่อนการทำแห้งจึงลดลง ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลจึงลดลง แต่ทั้งนี้ไมโครแคปซูลที่เตรียมจากอิมัลชันทุกชนิดที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันทุกชนิด ทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่ออัตราการทำแห้ง โดยหวั่น虑ประสิทธิภาพในการพ่นเป็นละอองฝอย ความชื้นจึงเพิ่มขึ้น (Loksuwan, 2007)

2.2.2 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีของไมโครแคปซูล

เมื่อวิเคราะห์ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ (ตารางที่ 6) พบว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินไม่ส่งผลต่อค่าออสโมเตอร์แอกติวิตี ($p > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินระดับต่างๆ พบว่าที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินระดับต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด จะส่งผลให้ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีลดลง ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน การเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดจะไม่ส่งผลต่อค่าออสโมเตอร์แอกติวิตี ($p > 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีของไมโครแคปซูลที่มีแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ (ตารางที่ 7) พบว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน ไม่ส่งผลต่อค่าออสโมเตอร์แอกติวิตี ($p > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมแล็กโทสทำให้ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไมโครแคปซูลที่ไม่เติมแล็กโทสที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากัน แต่ทั้งนี้การเติมแล็กโทสที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทส

ต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ทำให้ค่าวอเตอร์แอกทีวิตีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อค่าวอเตอร์แอกทีวิตีที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินระดับต่างๆ พบว่าการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่ส่งผลต่อค่าวอเตอร์แอกทีวิตี ($p>0.05$)

ตารางที่ 6 ค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุอ่อนนุ่มผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20 ^{ns}	30 ^{ns}	40
0:100	0.39±0.08 ^A	0.32±0.07 ^A	0.30±0.03 ^{Ac}
5:95	0.39±0.00 ^A	0.38±0.01 ^B	0.35±0.00 ^{Cb}
10:90	0.39±0.02 ^A	0.37±0.01 ^{AB}	0.36±0.01 ^{Bb}
15:85	0.41±0.02 ^A	0.36±0.02 ^B	0.37±0.01 ^{Bab}
25:75	0.40±0.01 ^A	0.40±0.01 ^A	0.38±0.01 ^{Bab}
37:63	0.38±0.00 ^A	0.37±0.04 ^A	0.39±0.02 ^{Aa}
50:50	0.38±0.01 ^A	0.37±0.04 ^A	0.37±0.02 ^{Aab}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

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

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางที่ 7 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุอ่อนนุ่มผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20 ^{ns}	30	40
0:100	0.39±0.08 ^A	0.32±0.07 ^{Ab}	0.30±0.03 ^{Ab}
5:95	0.42±0.01 ^A	0.43±0.00 ^{Aa}	0.41±0.02 ^{Aa}
10:90	0.41±0.00 ^A	0.42±0.05 ^{Aa}	0.39±0.01 ^{Aa}
15:85	0.41±0.03 ^A	0.42±0.02 ^{Aa}	0.43±0.03 ^{Aa}
25:75	0.41±0.01 ^A	0.41±0.01 ^{Aa}	0.42±0.05 ^{Aa}
37:63	0.43±0.02 ^A	0.42±0.04 ^{Aa}	0.41±0.02 ^{Aa}
50:50	0.42±0.01 ^A	0.41±0.01 ^{Aa}	0.41±0.00 ^{Aa}

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

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

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

เนื่องจากค่าวอเตอร์แอกติวิตี คือ สัดส่วน โมลของตัวทำละลายต่อผลรวมของโมลตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ดังนั้นเมื่อเติมน้ำตาลในระบบที่ทำการศึกษา จะเป็นการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตี ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง อาจเนื่องมาจากการเก็บรักษาตัวอย่างไมโครแคปซูลในขณะทำการผลิต อย่างไรก็ตาม ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุอ่อนนุ่ม พบว่ามีค่าในช่วง 0.3-0.4 สอดคล้องกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของนมผงที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.37 (Roos, 2002) และไมโครแคปซูลกรดคอนจูเกตลิโนเลอิก (Conjugated linoleic acid; CLA) ที่มีโปรตีนเวย์เข้มข้นเป็นวัตถุอ่อนนุ่มมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีประมาณ 0.3 (Jimenez *et al.*, 2004)

2.2.3 ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อผนังต่อค่าสีของไมโครแคปซูล

ค่าสีของไมโครแคปซูลแสดงในระบบ CIE ได้แก่ ค่า L^* , a^* และ b^* แสดงถึงค่าความสว่างของสี ค่าความเป็นสีเขียวหรือสีแดง และค่าความเป็นสีน้ำเงินหรือสีเหลือง ตามลำดับ เมื่อตรวจวัดค่าสีไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนัง พบว่ามีค่า L^* (ตารางผนวกที่ ค3) อยู่ในช่วง 93 ถึง 94 ค่า a^* (ตารางผนวกที่ ค4) อยู่ในช่วง -0.19 ถึง 0.11 ทำนองเดียวกันกับค่าสีของไมโครแคปซูลที่มีแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนังที่มีค่า L^* (ตารางผนวกที่ ค5) อยู่ในช่วง 93 ถึง 94 ค่า a^* (ตารางผนวกที่ ค6) อยู่ในช่วง -0.20 ถึง -0.02 โดยการเพิ่มปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันระดับต่างๆ ไม่มีผลต่อค่า L^* และ ค่า a^* ของไมโครแคปซูล

ตารางที่ 8 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า b^* ($-b^*$ คือค่าความเป็นสีน้ำเงิน และ $+b^*$ คือค่าความเป็นสีเหลือง) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	9.17±0.32 ^{Ad}	9.18±0.29 ^{Ac}	9.78±0.52 ^{Ab}
5:95	8.96±0.31 ^{Bd}	9.76±0.54 ^{Ab}	10.12±0.24 ^{Aab}
10:90	9.87±0.09 ^{Abc}	9.80±0.07 ^{Ab}	9.73±0.42 ^{Ab}
15:85	9.74±0.27 ^{Ac}	9.34±0.11 ^{Ac}	9.41±0.46 ^{Ab}
25:75	9.55±0.25 ^{Bc}	10.11±0.06 ^{Bab}	10.74±0.62 ^{Aa}
37:63	10.16±0.10 ^{Bb}	10.11±0.07 ^{Bab}	10.76±0.39 ^{Aa}
50:50	11.06±0.13 ^{Ba}	10.22±0.04 ^{ABa}	10.59±0.57 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

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

ตารางที่ 9 ค่า b* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน ต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส มอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า b* (-b* คือค่าความเป็นสีน้ำเงิน และ +b* คือค่าความเป็นสีเหลือง) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40 ^{ns}
0:100	9.17±0.32 ^{AcD}	9.18±0.29 ^{Ac}	9.78±0.52 ^A
5:95	9.07±0.05 ^{Bd}	10.01±0.39 ^{Aa}	9.80±0.31 ^A
10:90	9.41±0.26 ^{Abc}	9.06±0.08 ^{Ac}	9.50±0.37 ^A
15:85	9.29±0.13 ^{AcD}	9.20±0.17 ^{Ac}	9.50±0.52 ^A
25:75	9.63±0.05 ^{Bb}	9.96±0.17 ^{Aa}	9.68±0.16 ^B
37:63	10.04±0.03 ^{Ba}	9.54±0.02 ^{ABb}	9.35±0.59 ^A
50:50	9.93±0.08 ^{Aa}	9.64±0.02 ^{Ab}	9.87±0.59 ^A

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

สำหรับค่า b* ของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุก่อนแห้งในช่วง 9-11 (ตารางที่ 8-9) โดยการเพิ่มปริมาณร้อยละ โดย น้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันระดับ ต่างๆ จะส่งผลให้ค่า b* เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ค่า b* ซึ่งแสดงความเป็นสีเหลืองของไมโครแคปซูล เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ดังงานวิจัยของ Quek *et al.* (2007) พบว่าผลิตภัณฑ์ น้ำแดงโมฟงที่เติมมอลโทเด็กซ์ทรินมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากในน้ำแดงโมฟงมีองค์ประกอบของน้ำตาล ได้แก่ กลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส ทำให้เกิดสี น้ำตาลที่อุณหภูมิสูง จากปฏิกิริยาการเมลลไเซชัน(caramelization reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิด

สีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำตาลในสภาวะที่ไม่มีสารประกอบไนโตรเจน เกี่ยวข้องกับการสูญเสีย น้ำ การแตกสลาย และการเกิดพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบคาร์บอนที่มีสีน้ำตาล

เมื่อนำค่า L^* , a^* และ b^* ของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินและแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบมาคำนวณเป็นค่าความแตกต่างของค่าสี (ΔE) (ตารางที่ 10-11) พบว่าค่า ΔE ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 0-1.5 แสดงถึงค่าสีมีความแตกต่างกันน้อยมากจนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างด้วยสายตาได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Koc *et al.* (2011) พบว่าในผลิตภัณฑ์ไข่ผงที่มีการเติมแล็กโทสก่อนการทำแห้งจะช่วยให้ความแตกต่างของสี (ΔE) ลดลงและป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของไข่ผงหลังการทำแห้ง

ตารางที่ 10 ค่า ΔE ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุดิบผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า ΔE		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	ตัวอย่างควบคุม	0.56 ± 0.17	0.83 ± 0.38
5:95	0.36 ± 0.23	0.68 ± 0.51	1.06 ± 0.29
10:90	0.76 ± 0.12	0.66 ± 0.08	0.74 ± 0.15
15:85	0.63 ± 0.26	0.26 ± 0.14	0.60 ± 0.25
25:75	0.53 ± 0.18	0.99 ± 0.09	1.32 ± 0.35
37:63	1.04 ± 0.11	0.99 ± 0.06	1.50 ± 0.09
50:50	1.03 ± 0.14	1.13 ± 0.09	1.49 ± 0.61

ตารางที่ 11 ค่า ΔE ของไมโครแคลปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า ΔE		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	ตัวอย่างควบคุม	0.56 ± 0.17	0.83 ± 0.38
5:95	0.41 ± 0.16	0.99 ± 0.33	0.69 ± 0.26
10:90	0.35 ± 0.18	0.29 ± 0.08	0.45 ± 0.14
15:85	0.34 ± 0.17	0.63 ± 0.07	0.94 ± 0.77
25:75	0.48 ± 0.03	0.81 ± 0.16	0.62 ± 0.23
37:63	0.91 ± 0.05	0.40 ± 0.04	0.67 ± 0.23
50:50	0.86 ± 0.23	0.47 ± 0.02	0.93 ± 0.31

2.2.4 ผลของระบบและปริมาณวัตถุก่อผนังต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคลปซูล

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคลปซูลโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันที่คำนวณได้ (oil load) (ตารางผนวกที่ ค7) พบว่าไม่มีความแตกต่าง ($p > 0.05$) โดยปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคลปซูล (ตารางที่ 12-13) ที่เตรียมจากอิมัลชันทุติยภูมิที่เติมซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยปริมาณร้อยละของของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคลปซูล ($p > 0.05$) แต่ปัจจัยที่มีผลคือปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน โดยปริมาณน้ำมันทั้งหมดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณวัตถุก่อผนัง ดังนั้นจึงมีสัดส่วนของปริมาณน้ำมันทั้งหมดลดลง หรืออัตราส่วนระหว่างวัตถุแกนต่อวัตถุก่อผนังลดลง

ตารางที่ 12 ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนผสม ที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณน้ำมันทั้งหมด (กรัม/100 กรัม ไมโครแคปซูล)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20 ^{ns}	30 ^{ns}	40 ^{ns}
0:100	26.56±0.41 ^A	17.85±0.54 ^B	13.80±0.41 ^C
5:95	27.29±0.80 ^A	18.16±0.79 ^B	14.45±1.15 ^C
10:90	26.15±0.24 ^A	17.55±0.49 ^B	14.21±0.77 ^C
15:85	26.57±1.01 ^A	18.05±0.88 ^B	14.01±1.17 ^C
25:75	26.71±1.04 ^A	17.12±0.84 ^B	13.42±0.56 ^C
37:63	26.76±0.59 ^A	17.96±0.92 ^B	14.19±0.86 ^C
50:50	26.39±0.49 ^A	17.62±0.89 ^B	13.11±1.23 ^C

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางที่ 13 ปริมาณน้ำมันทั้งหมดของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนผสม ที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแล็กโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณน้ำมันทั้งหมด (กรัม/100 กรัม ไมโครแคปซูล)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20 ^{ns}	30 ^{ns}	40 ^{ns}
0:100	26.56±0.41 ^A	17.85±0.54 ^B	13.80±0.4 ^C
5:95	27.15±0.49 ^A	18.71±1.11 ^B	14.85±0.96 ^C
10:90	27.05±0.68 ^A	18.22±0.74 ^B	14.18±0.86 ^C
15:85	26.68±0.33 ^A	17.90±0.47 ^B	13.36±0.60 ^C
25:75	27.07±0.77 ^A	17.64±0.61 ^B	13.35±1.21 ^C
37:63	26.90±1.07 ^A	17.63±0.67 ^B	13.81±1.46 ^C
50:50	27.15±0.49 ^A	17.46±0.57 ^B	13.46±1.09 ^C

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล (ตารางที่ 14-15) ที่เตรียมจาก อิมัลชันทุติยภูมิที่เดิมซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน พบว่ามีผลอัน เนื่องมาจากปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณ ของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันจาก ร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 40 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาณวัตถุก่อนแห้งเพียงพอที่จะห่อหุ้มหรือกักเก็บน้ำมันไว้ในอนุภาคไมโครแคปซูล (Gharsallaoui *et al.*, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shaw *et al.* (2007) พบว่าการ ผลิตไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่น่าจะต้องมีปริมาณวัตถุก่อนแห้งอย่างน้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จึงจะ สามารถกักเก็บน้ำมันไว้ได้ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณวัตถุก่อนแห้งเป็นร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ไมโครแคปซูลจะมีความคงตัวมากขึ้น และการศึกษาผลของอัตราส่วนของวัตถุแกต่อวัตถุก่อนแห้ง ในไมโครแคปซูลน้ำมันที่มีไซโตเคมีแคซินเป็นวัตถุก่อนแห้ง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันต่อ

โซเดียมแฉะขึ้นดจาก 0.25-3.00 ประสิทธิภาพในการกักเก็บจะลดลงจากร้อยละ 89.15 เหลือร้อยละ 18.80 โดยน้ำหนัก (Hogan *et al.*, 2001a)

ตารางที่ 14 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุดิบผสมที่มี ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณน้ำมันอิสระ (กรัม/100 กรัม ไมโครแคปซูล)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	3.36±0.13 ^{Aa}	1.53±0.06 ^{Ba}	0.77±0.02 ^{Ca}
5:95	3.32±0.15 ^{Aa}	1.28±0.02 ^{Bb}	0.76±0.05 ^{Ca}
10:90	3.37±0.22 ^{Aa}	1.21±0.04 ^{Bbc}	0.69±0.04 ^{Cb}
15:85	3.31±0.13 ^{Aa}	1.18±0.15 ^{Bbc}	0.67±0.03 ^{Cb}
25:75	2.83±0.07 ^{Ab}	1.15±0.03 ^{Bcd}	0.57±0.03 ^{Cc}
37:63	2.53±0.25 ^{Ac}	1.13±0.03 ^{Bcd}	0.53±0.03 ^{Cc}
50:50	2.02±0.12 ^{Ad}	1.05±0.02 ^{Bd}	0.46±0.05 ^{Cd}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครส หรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน จาก 0:100 ถึง 50:50 พบว่าปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากซูโครส และแล็กโทส มีสมบัติในการสร้าง glassy layer รอบไมโครแคปซูล จึงสามารถปิดรูหรือรอยร้าวที่ผิว ของไมโครแคปซูลจึงสามารถป้องกันการแพร่ของน้ำมันจากรูและรอยร้าวที่ผิวของไมโครแคปซูลได้ (Moreau and Rosenberg, 1993; McNamee *et al.*, 2001) นอกจากนี้การเติมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือ โมเลกุลคู่สามารถลดรอยร้าวที่ผิวอนุภาคที่เกิดจากโครงสร้างของมอลโทเด็กซ์ทรินที่เป็นสายยาวได้ (Desobry *et al.*, 1999)

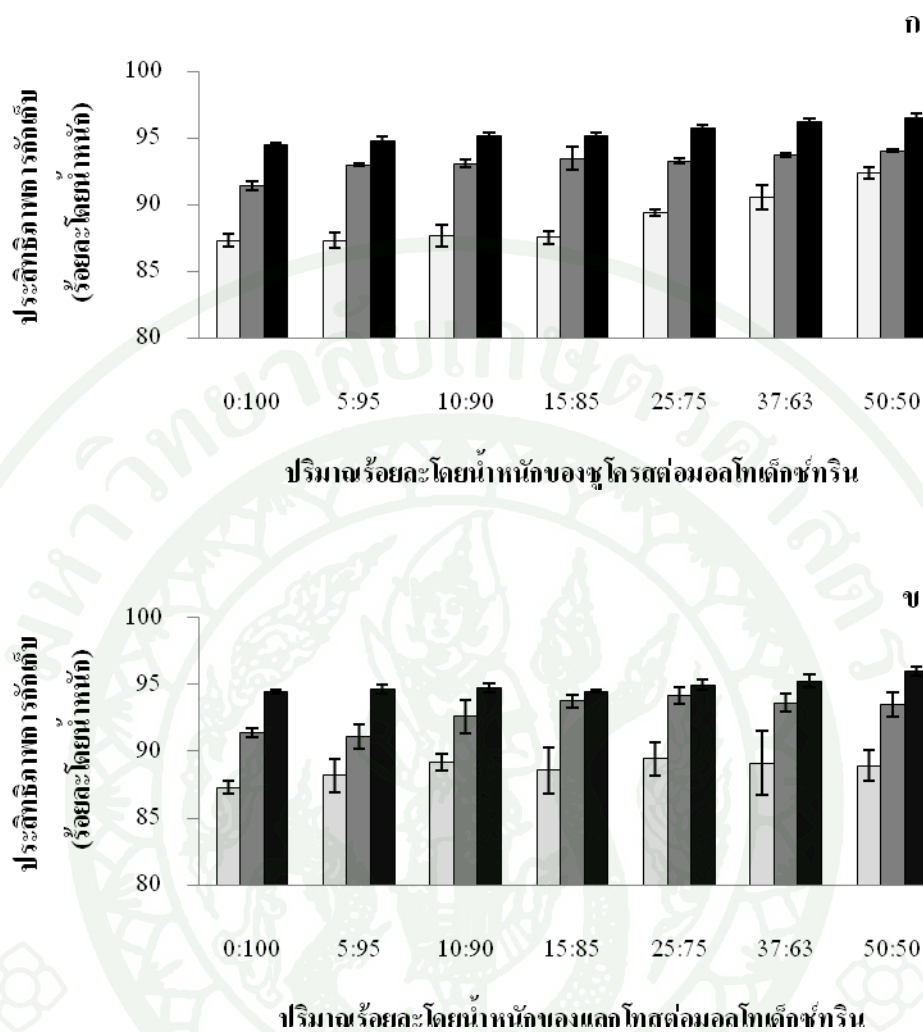
ตารางที่ 15 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุดิบผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ปริมาณน้ำมันอิสระ (กรัม/100 กรัม ไมโครแคปซูล)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	3.36±0.13 ^{Aa}	1.53±0.06 ^{Bab}	0.77±0.02 ^{Ca}
5:95	3.20±0.33 ^{Aa}	1.66±0.17 ^{Ba}	0.79±0.05 ^{Ca}
10:90	2.92±0.17 ^{Aa}	1.34±0.23 ^{Bbc}	0.74±0.05 ^{Ca}
15:85	3.05±0.45 ^{Aa}	1.11±0.08 ^{Bcd}	0.74±0.01 ^{Bab}
25:75	2.85±0.34 ^{Aa}	1.03±0.11 ^{Bcd}	0.67±0.05 ^{Cbc}
37:63	2.92±0.64 ^{Aa}	1.12±0.13 ^{Bcd}	0.66±0.07 ^{Bc}
50:50	3.00±0.31 ^{Aa}	1.14±0.16 ^{Be}	0.54±0.05 ^{Cd}

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

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

เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน (ภาพที่ 14, ตารางผนวกที่ 8-9) โดยการคำนวณจากปริมาณน้ำมันทั้งหมดและปริมาณน้ำมันอิสระ พบว่าประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน โดยที่ไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน มีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันมากกว่าแลกโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันสูงสุดเท่ากับร้อยละ 96.5 ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดของระบบวัตถุดิบ หรือการลดอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อวัตถุดิบเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดคือการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดจะส่งผลให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้น จึงลดประสิทธิภาพในการปั่นเป็นละอองฝอยของอะตอมไมเซอร์ได้ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตอีกด้วย (Bhandari *et al.*, 1992)



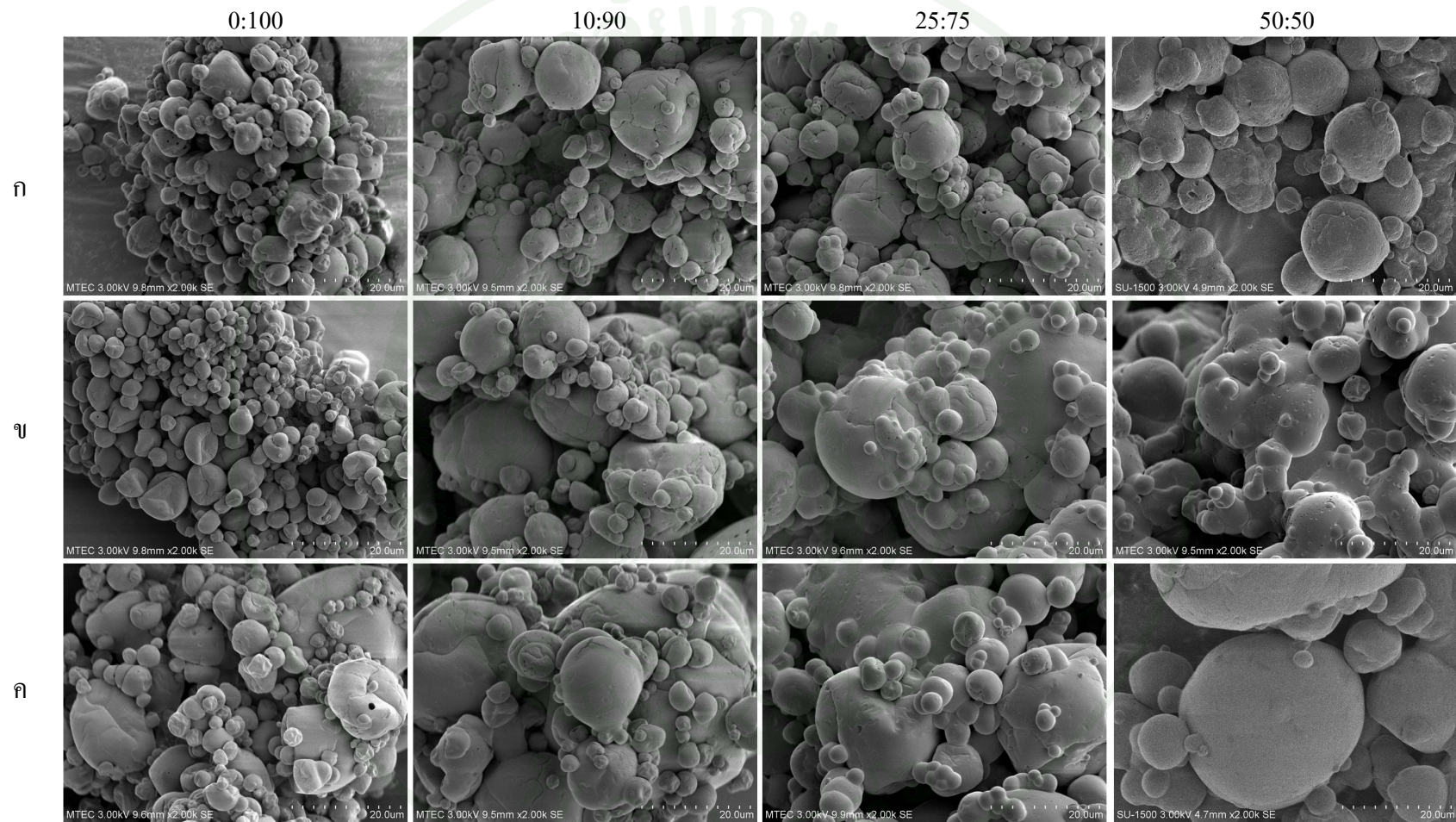
ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุดิบที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรีน (ก) และแลคโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรีน (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ (■ = ร้อยละ 20; ■ = ร้อยละ 30 และ ■ = ร้อยละ 40)

2.2.5 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของไมโครแคปซูล

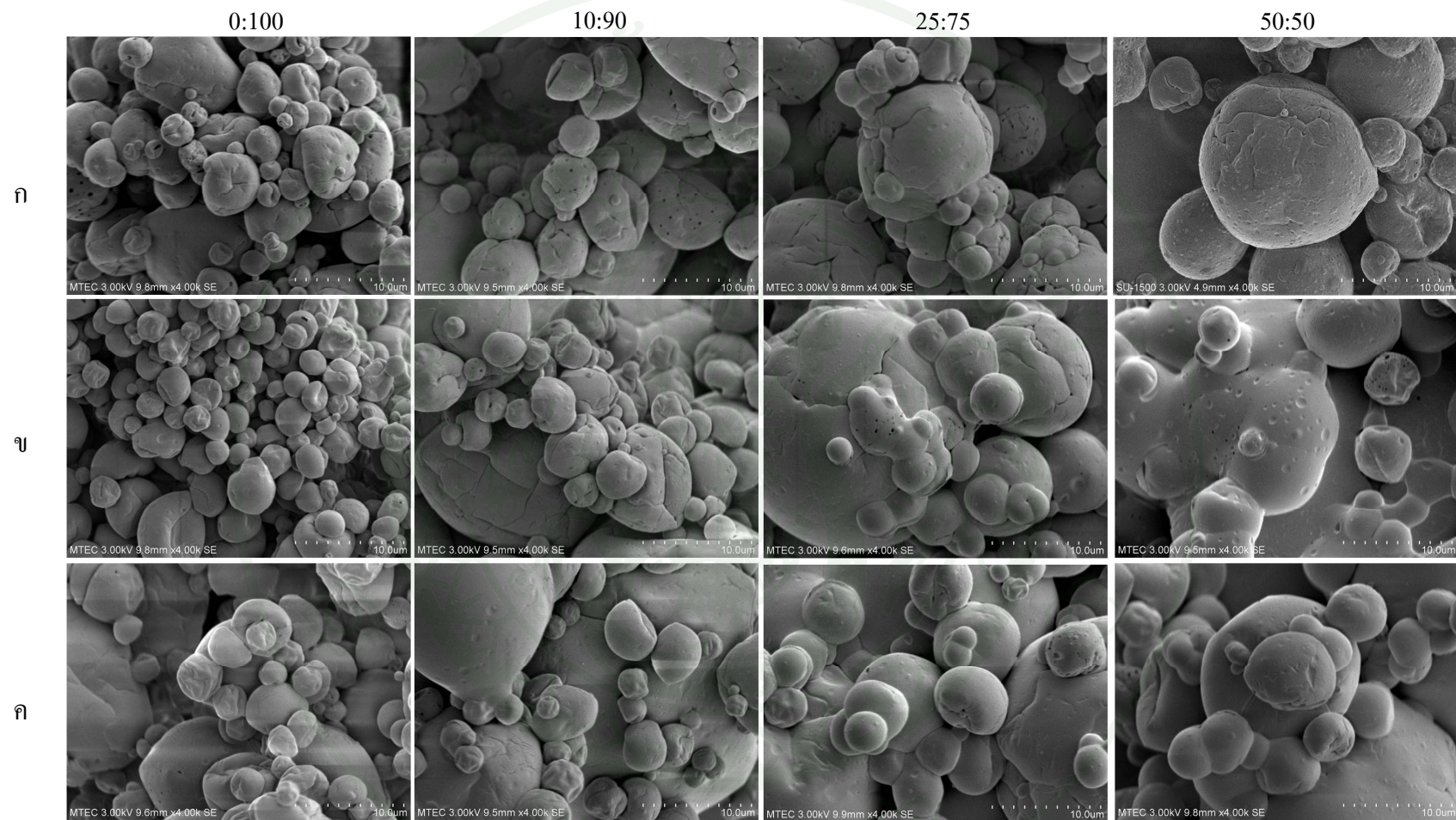
จากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค (outer morphology) ของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยใช้เลนส์วัตถุที่กำลังขยาย 2000X และ 4000X เพื่อตรวจดูขนาด การกระจายของอนุภาค และผิวของไมโครแคปซูล พบว่าไมโครแคปซูลที่มี

ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ภาพที่ 15-16) และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุอ่อนนุ่ม (ภาพที่ 17-18) มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม มีขนาดไม่สม่ำเสมอ จากการสังเกตขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่กำลังขยาย $2000\times$ พบว่าเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น อนุภาคของไมโครแคปซูล มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องมาจากการที่เพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดจะทำให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การกระจายตัวเพื่อเป็นละอองฝอยของหัวฉีด มีประสิทธิภาพน้อยลง (Gharsallaoui *et al.*, 2007) และเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเด็กซ์ทรินเพียงอย่างเดียว กับไมโครแคปซูลที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่างๆ พบว่าไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเด็กซ์ทรินเพียงอย่างเดียว มีรอยบุบ (dent) ซึ่งอาจเกิดจากการหดตัว (shrinkage) ระหว่างการทำแห้ง และอนุภาคกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว เมื่อเติมซูโครสหรือแล็กโทสร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินทำให้อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมมากขึ้น แต่จะมีการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคหลายอนุภาค โดยที่จะมีการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคมากขึ้นเมื่อมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสเพิ่มมากขึ้น

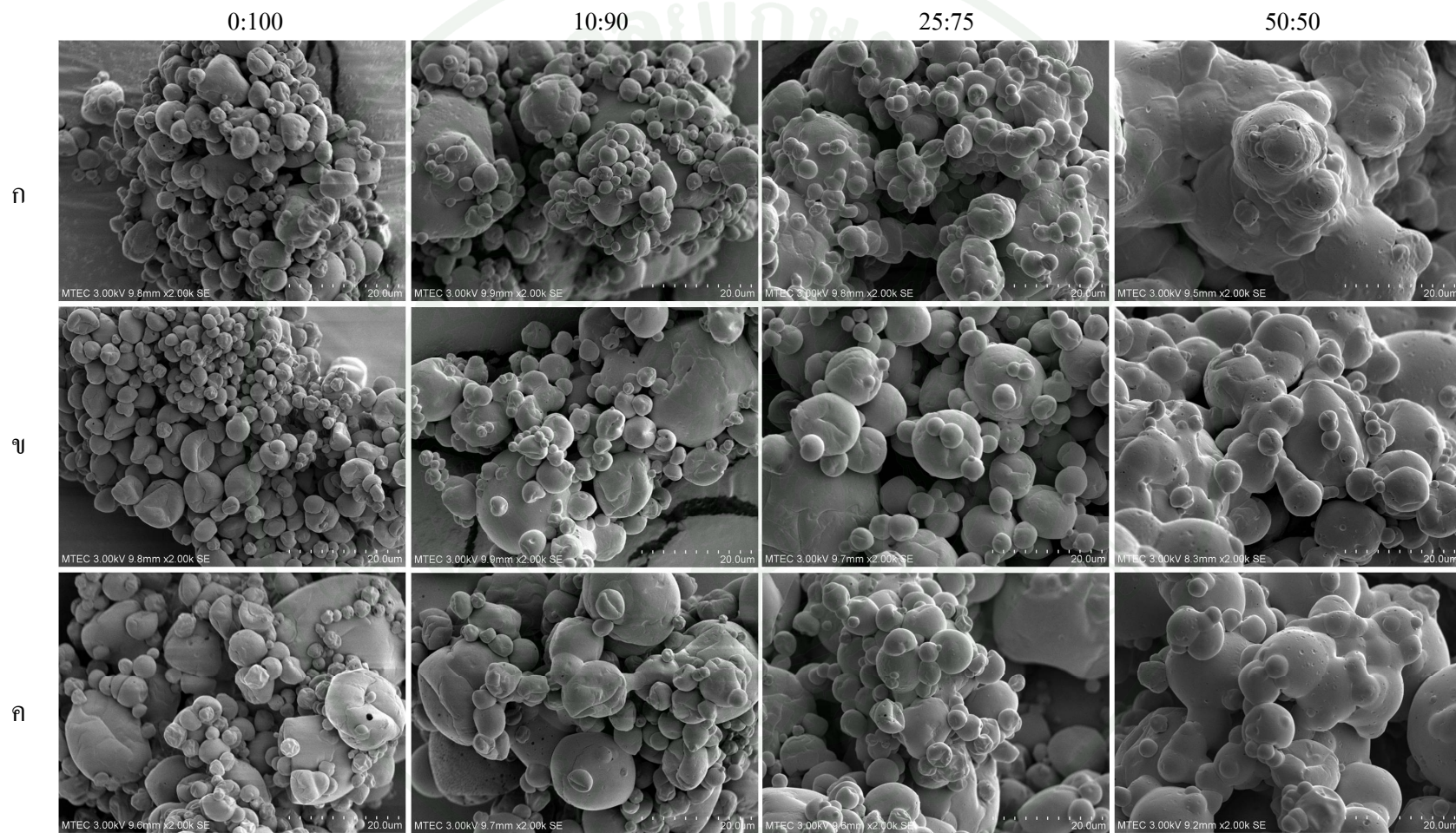
เมื่อพิจารณาผิวของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุอ่อนนุ่มที่กำลังขยาย $4000\times$ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครส หรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด อนุภาคไมโครแคปซูลมีผิวเรียบมากขึ้น รู (pore) และรอยร้าว (wrinkle) ลดลง สอดคล้องกับผลปริมาณน้ำมันอิสระที่ลดลง และประสิทธิภาพในการกักเก็บที่เพิ่มขึ้นของไมโครแคปซูลเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครส หรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมด เนื่องจากซูโครสและแล็กโทสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าจึงสามารถปิดรูและรอยร้าวของอนุภาคที่มีเนื่องจากมอลโทเด็กซ์ทรินมีลักษณะโมเลกุลเป็นสายยาว (Desobry *et al.*, 1999) จึงสามารถกักเก็บน้ำมันไว้ในโครงสร้างของไมโครแคปซูลได้ดีกว่า



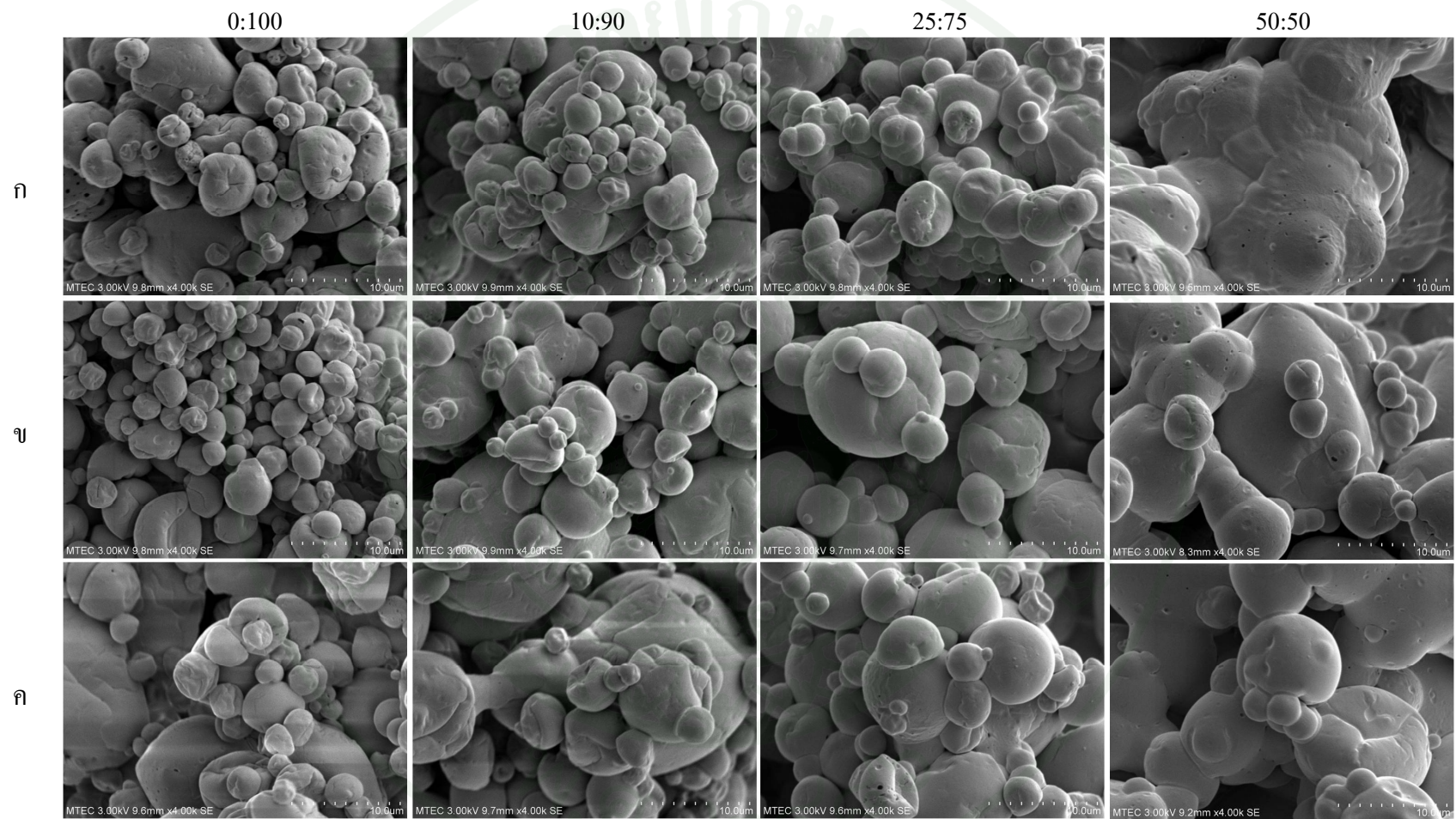
ภาพที่ 15 โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 2000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโท-เด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 16 โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 4000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแก้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอดโท-เด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 17 โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 2000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโต-เด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก

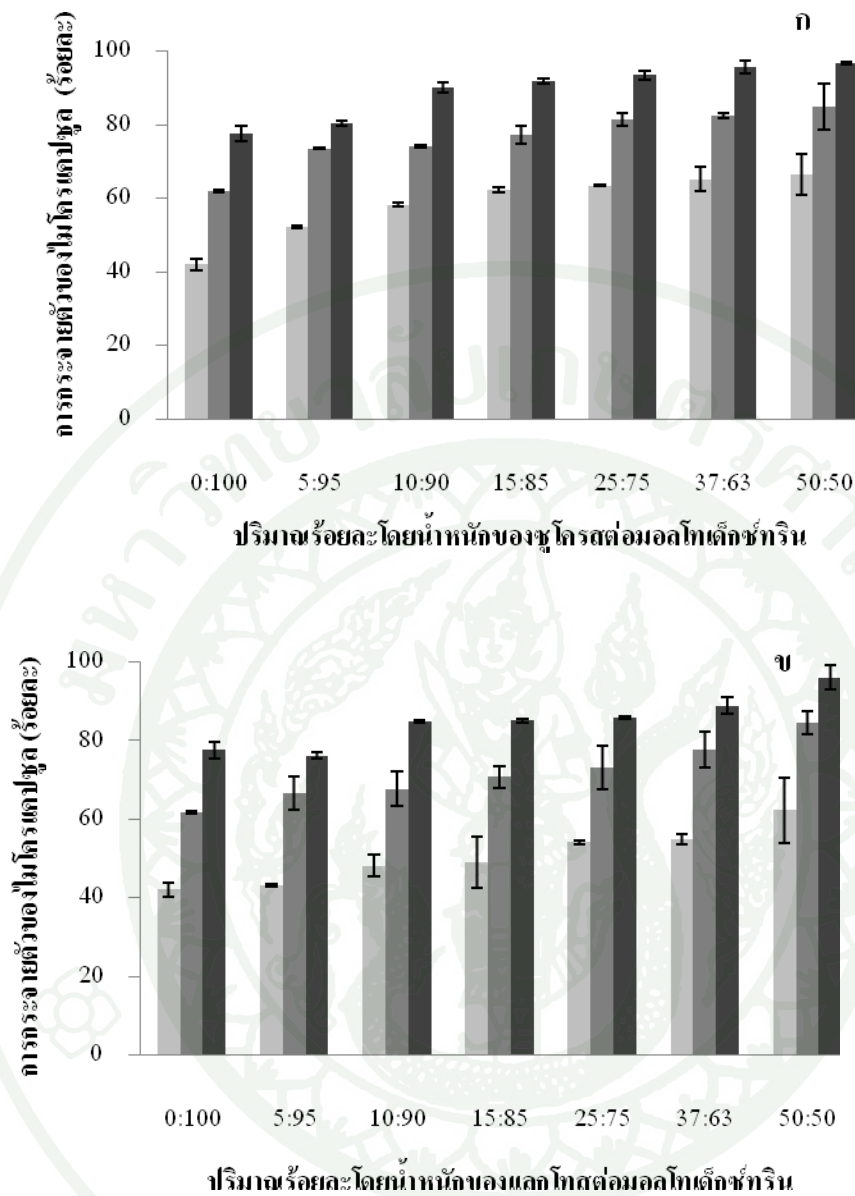


ภาพที่ 18 โครงสร้างระดับจุลภาคกำลังขยาย 4000× ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันทุติยภูมิที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโต-เด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100 10:90 25:75 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก

2.2.6 ผลของระบบและปริมาณวัตถุดิบต่อการกระจายตัวของไมโครแคปซูล

การกระจายตัว (dispersibility) เป็นสมบัติสำคัญของไมโครแคปซูล เพื่อการนำไมโครแคปซูลไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ (ภาพที่ 19, ตารางผนวกที่ 10-11) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด ไมโครแคปซูลมีการกระจายตัวดีขึ้น เนื่องจากน้ำตาลมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี โดยที่ซูโครสมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดีกว่าแล็กโทส (Davis, 1995) ดังนั้นการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินจึงดีกว่าไมโครแคปซูลที่มีแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ ($p \leq 0.05$) และมีการวิจัยก่อนหน้านี้ รายงานว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของโกโก้ผง ได้แก่ ปริมาณน้ำตาล (ซูโครส) และปริมาณไขมันในโกโก้ โดยผงโกโก้ที่มีปริมาณน้ำตาลสูงกว่าและปริมาณไขมันต่ำกว่าจะกระจายตัวได้ดีกว่า (Shittu and Lawal, 2007)

จากการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ของไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบ พบว่ามีปริมาณความชื้นร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตี 0.3-0.4 และมีค่าที่ไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม แต่เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมัน โดยคำนวณจากปริมาณน้ำมันอิสระและปริมาณน้ำมันทั้งหมด พบว่าไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินมีประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันสูง (ร้อยละ 96.5) และสูงกว่าไมโครแคปซูลที่มีแล็กโทส-มอลโทเด็กซ์ทริน (ร้อยละ 96.0) ประกอบกับไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุดิบมีการกระจายตัวที่ดีกว่า จึงนำไมโครแคปซูลดังกล่าวไปศึกษาสมบัติของอิมัลชันคีนรูปจากไมโครแคปซูล ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของไมโครแคปซูลเพื่อการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร



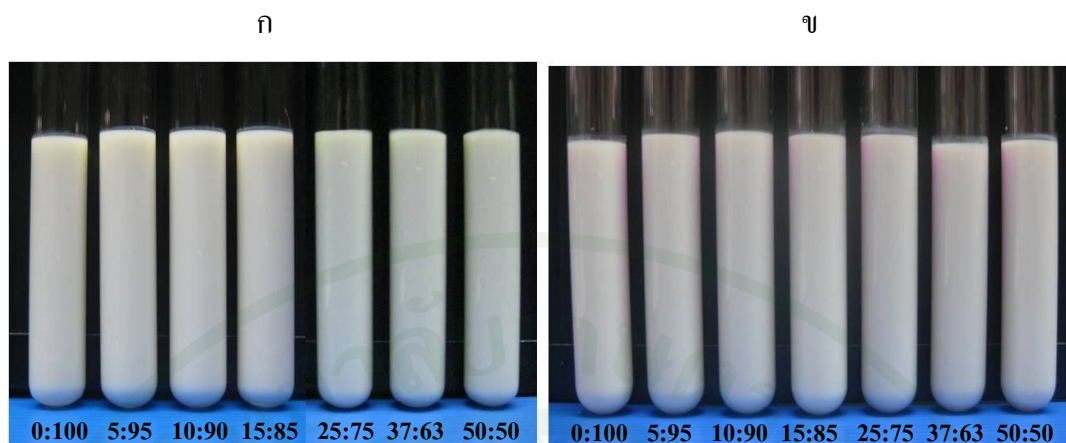
ภาพที่ 19 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุดิบผงที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ก) และแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ (■ = ร้อยละ 20; ■ = ร้อยละ 30 และ ■ = ร้อยละ 40)

3. สมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำคั้นรูปจากไมโครแคปซูล (Reconstituted emulsion)

ไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำ คควรมีสมบัติในการละลายที่ดีเมื่อนำมาละลายในตัวทำละลายเพื่อให้อยู่ในรูปแบบอิมัลชัน อีกทั้งอิมัลชันคั้นรูปที่เตรียมได้จากการละลายไมโครแคปซูลควรมีความคงตัว แต่เนื่องจากการทำแห้งนั้นอาจจะส่งผลให้อิมัลชันสูญเสียความคงตัว เช่น การเกิดการเชื่อมกันของอิมัลชันฟายเออร์ที่ผิวสัมผัสของหยดน้ำมันหลายหยด ทำให้เกิดการเกาะกันของหยดน้ำมัน (Guzey and McClements, 2006) ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำก่อนการทำแห้ง (ตัวอย่างควบคุม) และอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำคั้นรูปที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนังโดยศึกษาผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสกับมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ (0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสกับมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75 วิเคราะห์สมบัติของอิมัลชันจากการสังเกตลักษณะปรากฏ ความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชัน การวัดค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมัน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคหยดน้ำมัน และโครงสร้างระดับจุลภาค

ก. ลักษณะปรากฏของอิมัลชันและความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำคั้นรูปจากไมโครแคปซูล

ลักษณะปรากฏของอิมัลชันและความคงตัวต่อการแยกชั้นของอิมัลชันก่อนการทำแห้งและอิมัลชันคั้นรูปที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูลในแอซิเตทบัฟเฟอร์ (100 มิลลิโมลาร์ และพีเอช 3.0) ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ หลังจากเก็บอิมัลชันไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าอิมัลชันมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนม เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความคงตัวต่อการแยกชั้น (ภาพที่ 20) ทำนองเดียวกัน อิมัลชันก่อนการทำแห้ง และอิมัลชันคั้นรูปที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูลที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันระดับต่างๆ (ร้อยละ 20 30 และ 40) โดยอิมัลชันมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนม เป็นเนื้อเดียวกัน และไม่สังเกตเห็นการการแยกชั้นของอิมัลชัน (ภาพผนวกที่ ง1)



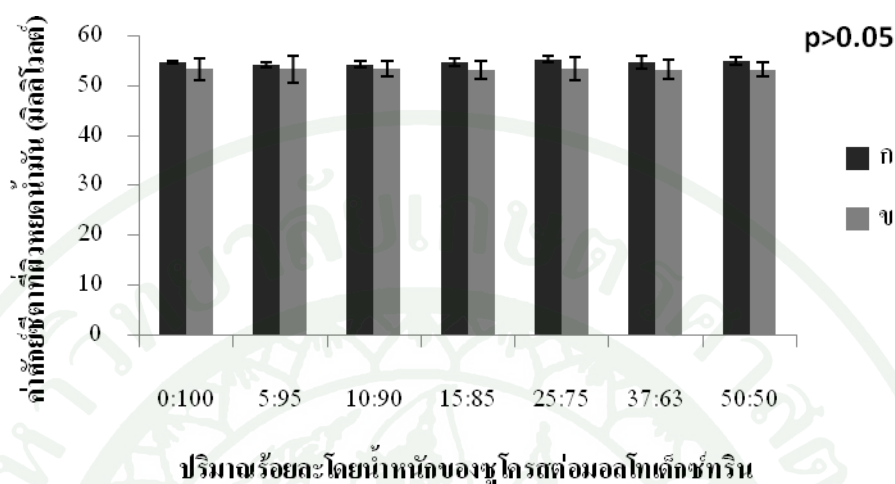
ภาพที่ 20 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปที่ได้จากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ข. ค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยดนํ้ามันในอิมัลชันนํ้ามันปลาทุนาคั่นรูปจากไมโครแคปซูล

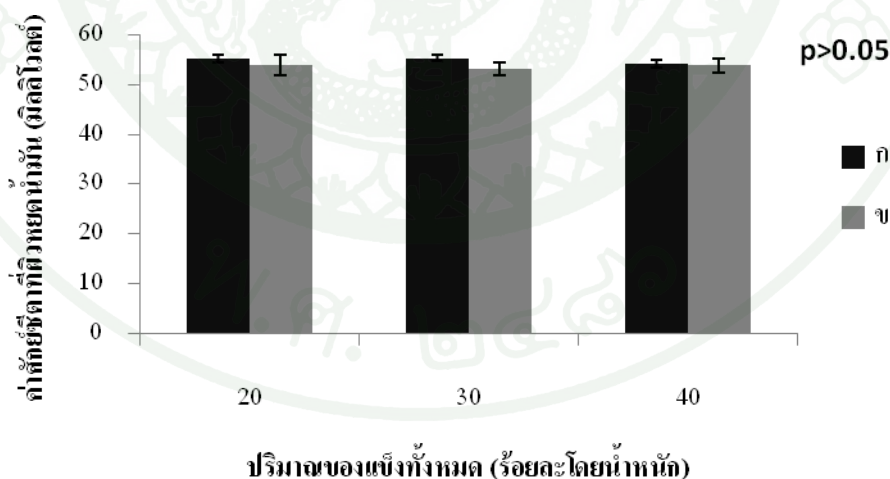
ค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยदनํ้ามัน (ภาพที่ 21) ในอิมัลชันก่อนการทำแห้งที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ มีค่าประมาณ +54 มิลลิโวลต์ (ตารางผนวกที่ ง1) โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เช่นเดียวกับค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยदनํ้ามันในอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูลที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ มีค่าประมาณ +53 มิลลิโวลต์ (ตารางผนวกที่ ง1) โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยदनํ้ามันในอิมัลชันก่อนการทำแห้งไม่แตกต่างกับค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยदनํ้ามันในอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล ($p>0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันก่อนการทำแห้งต่อค่าศักย์ซิตาที่ผิวหยदनํ้ามัน (ภาพที่ 22, ตารางผนวกที่ ง2) พบว่ามีค่าในช่วง +54 ถึง +55 มิลลิโวลต์ ($p>0.05$) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล มีค่าในช่วง +53 ถึง +54 มิลลิโวลต์ ($p>0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันก่อนการทำแห้งและอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูลพบว่าที่

ปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ ค่าศักย์ซึดาที่ผิวหยดน้ำมันมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงถึงอิมัลชันไม่สูญเสียความคงตัวเนื่องจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย



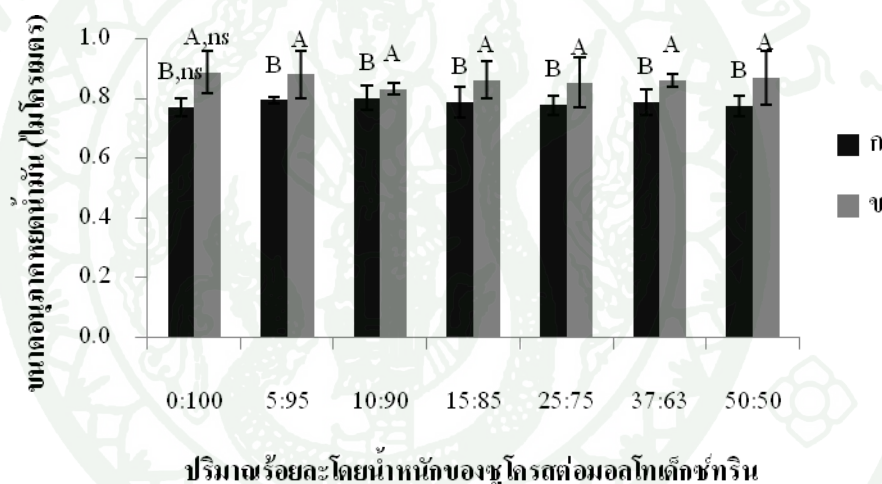
ภาพที่ 21 ค่าศักย์ซึดาที่ผิวหยดน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 22 ค่าศักย์ซึดาที่ผิวหยดน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75

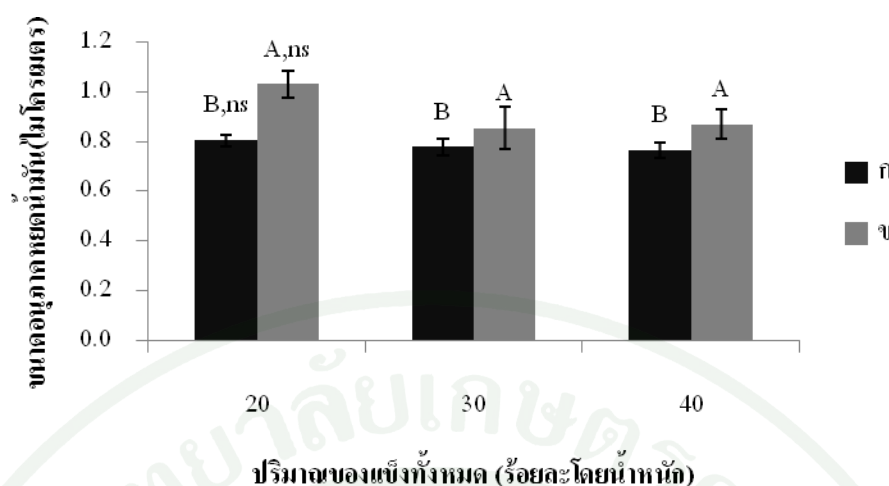
ก. ขนาดหยดนํ้ามันในอิมัลชันนํ้ามันปลาทูลูกจิ้งจอกจากไมโครแคปซูล

ขนาดหยดนํ้ามันในอิมัลชันก่อนการทำแห้งที่เดิมซูโครสและมอลโทเด็กซ์ทรินที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ (ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 30) (ตารางผนวกที่ 3) และที่ระดับปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ (ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 25:75) (ตารางผนวกที่ 4) มีค่าประมาณ 0.8 ไมโครเมตร โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เช่นเดียวกับขนาดหยดนํ้ามันในอิมัลชันคีนรูปจากไมโครแคปซูลที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ มีค่าในช่วง 0.8-0.9 ไมโครเมตร (ภาพที่ 23) และที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันระดับต่างๆ ซึ่งมีค่าในช่วง 0.9 -1.0 ไมโครเมตร (ภาพที่ 24) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



ภาพที่ 23 ขนาดหยดนํ้ามันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคีนรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน
ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่อิมัลชันชนิดเดียวกัน



ภาพที่ 24 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคืนรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75

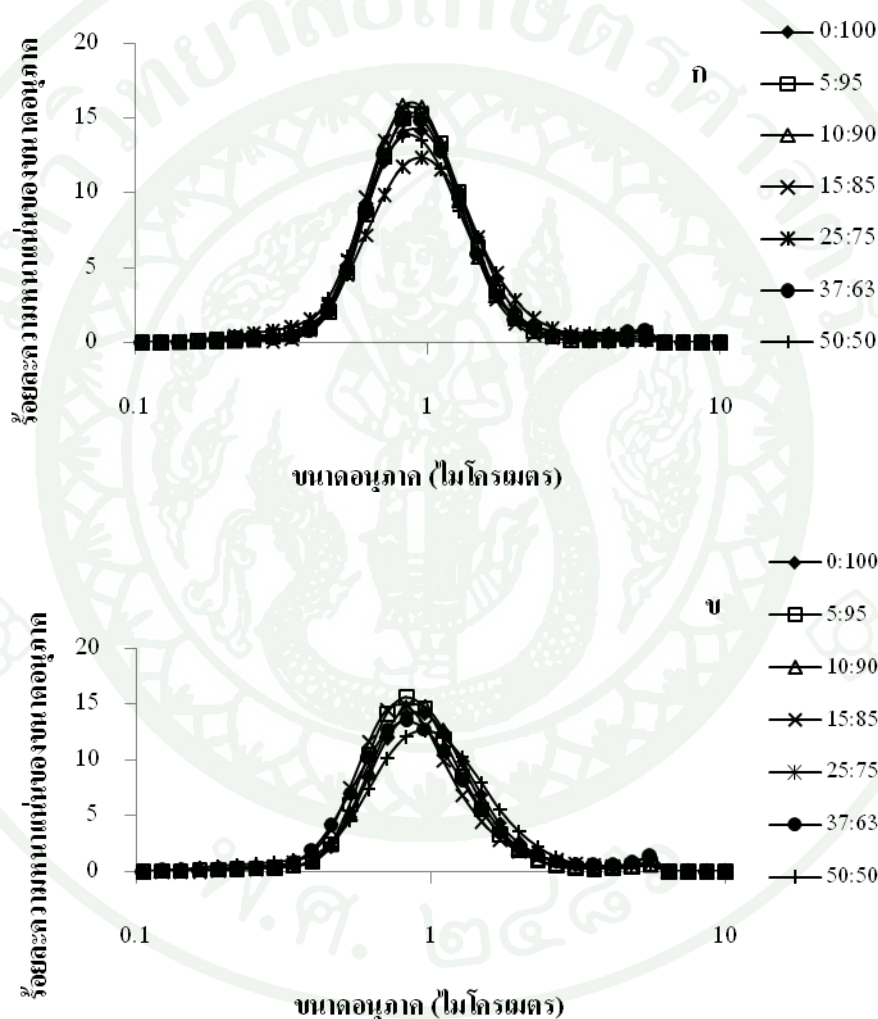
หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่อิมัลชันชนิดเดียวกัน

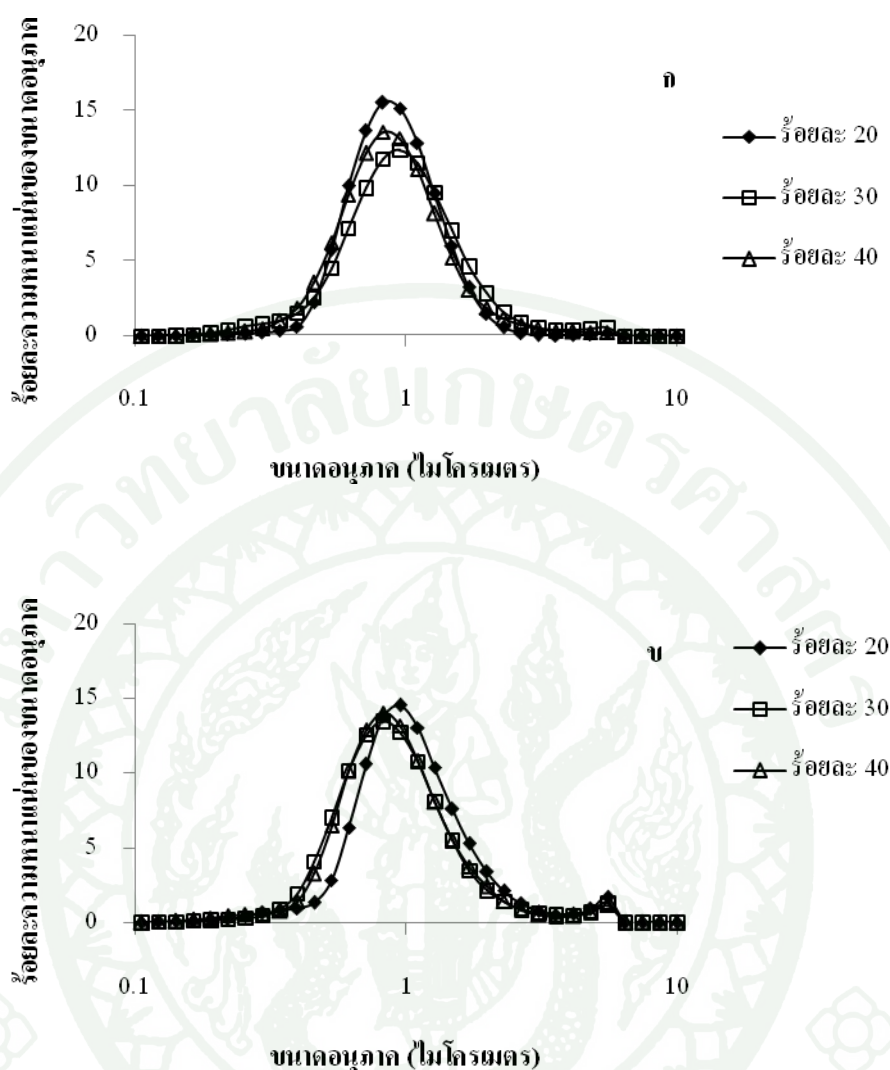
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้งและอิมัลชันคืนรูปจากไมโครแคปซูล พบว่าขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันคืนรูปที่ได้จากไมโครแคปซูลใหญ่กว่าอิมัลชันก่อนการทำแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ทุกปริมาณของแข็งทั้งหมดและที่ทุกปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทริน (ภาพที่ 23 และ 24) สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ (Dollo *et al.*, 2003; Gharsallaoui *et al.*, 2011) การที่ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันคืนรูปที่เตรียมจากไมโครแคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากหยดอิมัลชันถูกทำลาย หรืออิมัลซิฟายเออร์ที่ผิวสัมผัสของหยดน้ำมันเกิดการสูญเสียโครงสร้างระหว่างการพ่นเป็นละอองฝอย (atomization) เมื่อนำมาคืนรูปหรือละลายกลับในตัวทำละลาย (reconstituted) หยดน้ำมันจึงเกิดการเคลื่อนที่มาหลอมรวมกัน

ง. การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันปลาพ่นน้ำคั้นรูปจากไมโครแคปซูล

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้งและอิมัลชันคั้นรูปจากไมโครแคปซูลที่ทุกปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน (ภาพที่ 25) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (ภาพที่ 26) พบว่าการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันเป็นแบบ monomodal distribution และแบบ bimodal distribution ตามลำดับ



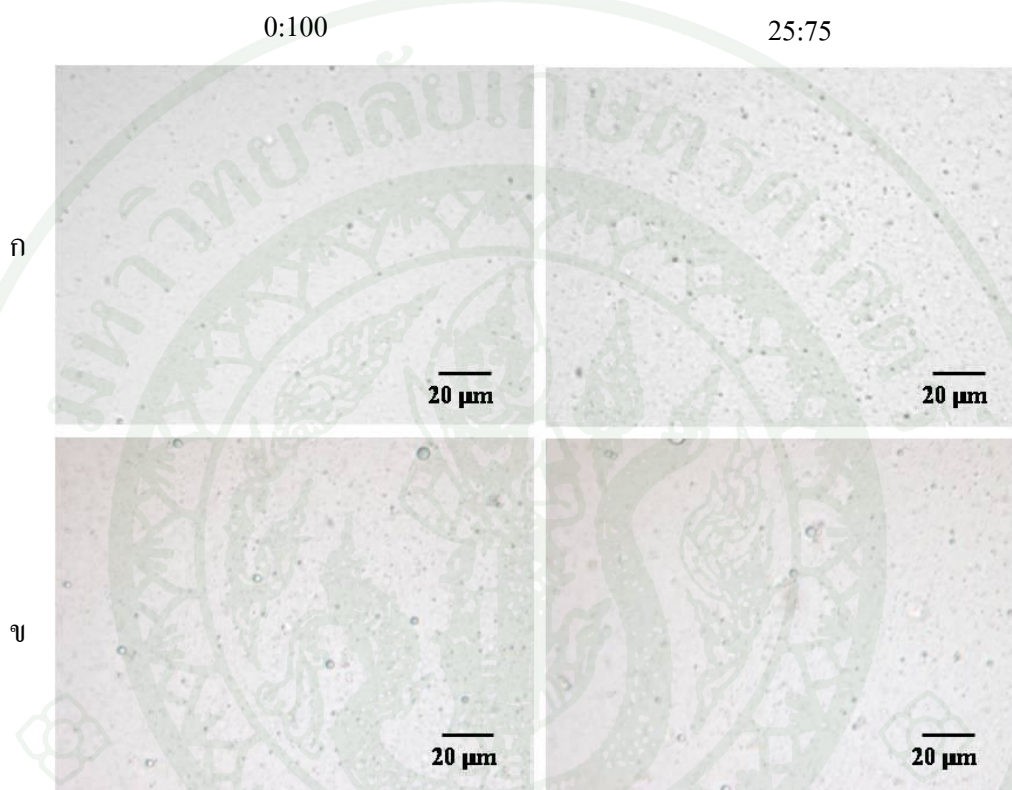
ภาพที่ 25 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 26 การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโตเด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75

อิมัลชันก่อนการทำแห้งมีการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันเป็นแบบ monomodal distribution แสดงถึงมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอในช่วงเดียวกัน ส่วนอิมัลชันคั่นรูปจากไมโครแคปซูล มีการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันเป็นแบบ bimodal distribution แสดงถึงการมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ โดยมีกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่รวมอยู่ด้วยกัน ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาว (long term stability) สอดคล้องกับผลขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันคั่นรูปจากไมโครแคปซูลที่ใหญ่กว่าอิมัลชันก่อนการทำแห้ง แสดงถึงหยดน้ำมันอาจเกิดการเกาะกลุ่มกัน หรือหลอมรวมกัน สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า (Dollo *et*

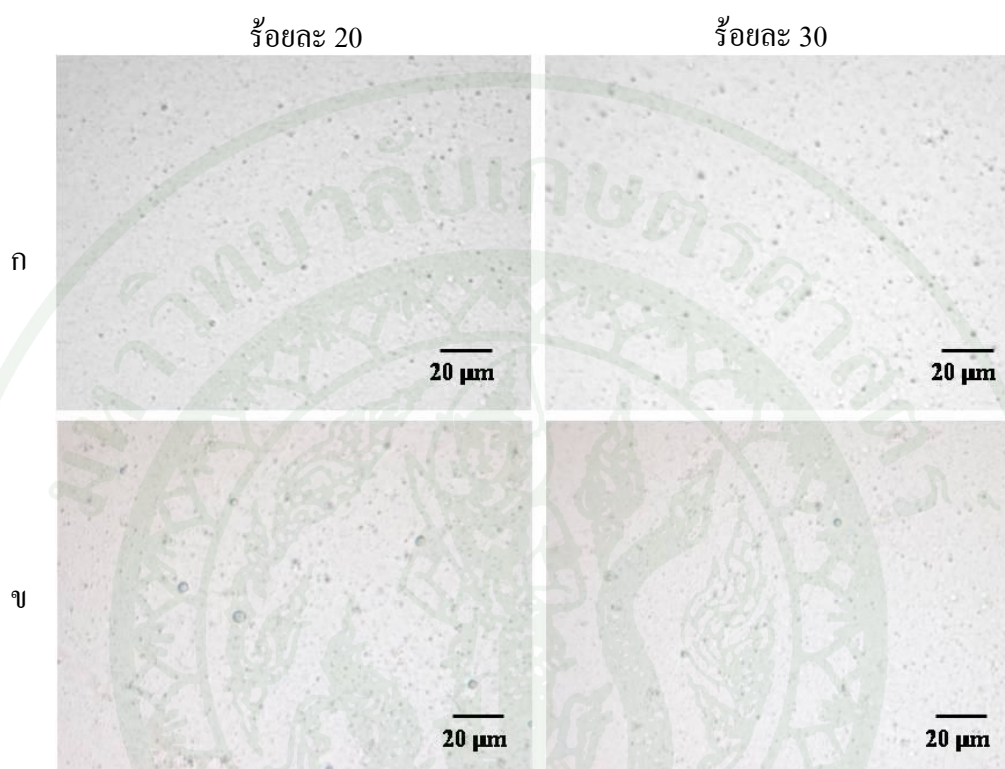
al., 2003; Klinkesorn *et al.*, 2005; Gharsallaoui *et al.*, 2011) ซึ่งรายงานว่าอิมัลชันคั้นรูปจากไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้งอิมัลชันน้ำมันในน้ำมีการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันแบบ bimodal distribution เมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลชันก่อนการทำแห้งซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันแบบ monomodal distribution



ภาพที่ 27 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100 และ 25:75 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

เมื่อสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้เลนส์วัตถุที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้งที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ (ภาพที่ 27, ภาพผนวกที่ 2) และที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ (ภาพที่ 28) มีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเกาะกลุ่ม (flocculation) และการรวมตัวกัน (coalescence) ของหยดน้ำมัน ส่วนอิมัลชันคั้นรูปจากไมโครแคปซูลที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ (ภาพที่ 27, ภาพผนวกที่ 2) และที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ (ภาพที่ 28) มีลักษณะ

เป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่พบหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการหลอมรวมของหยดน้ำมัน สอดคล้องกับผลของขนาดและการกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชัน



ภาพที่ 28 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับ ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของอิมัลชันคั่นรูปจากไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสและมอลโทเด็คซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ พบว่าขนาดหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการหลอมรวมของหยดน้ำมันบางส่วน แต่ทั้งนี้ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมันไม่แตกต่างจากอิมัลชันก่อนการทำแห้งและอิมัลชันมีความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน นั่นคือ อิมัลชันผิวสัมผัสสองชั้นของน้ำมันปลาทูน่าที่ใช้ซูโครสและมอลโทเด็คซ์ทรินเป็นวัตถุก่อผนังมีความคงตัวต่อการทำแห้งแบบพ่นฝอยสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ชนิดของวัตถุก่อผนังมีผลต่อสมบัติของอิ้มัลชันน้ำมันปลาทูน่าที่ทำให้คงตัวด้วยเลซิตินและไคโตแซน (อิ้มัลชันทุติยภูมิ) และปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า โดยการใช้วัตถุก่อผนังมอลโทเด็คซ์ทริน หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับน้ำตาล (ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน) หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีน (หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน และโปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน) หรือกัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทริน โดยใช้ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมอลโทเด็คซ์ทรินต่อสารก่อวัตถุก่อผนังรวมเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิ้มัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าอิ้มัลชันทุติยภูมิที่มีวัตถุก่อผนังร่วมชนิดต่างๆ มีความคงตัวที่ดี ยกเว้นอิ้มัลชันทุติยภูมิที่เติมกัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทรินที่ อิ้มัลชันไม่มีความคงตัว จึงไม่สามารถนำไปผลิตเป็นไมโครแคปซูลได้ เมื่อนำอิ้มัลชันทุติยภูมิที่มีวัตถุก่อผนังร่วมชนิดต่างๆ ที่มีความคงตัวไปผลิตเป็นไมโครแคปซูล พบว่าไมโครแคปซูลที่มีการใช้มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับน้ำตาล มีปริมาณน้ำมันอิสระต่ำกว่าการใช้มอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับโปรตีน ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นระบบวัตถุก่อผนังเพื่อปรับปรุงสมบัติของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า

ระบบและปริมาณของวัตถุก่อผนังที่ทำการศึกษา ได้แก่ ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิ้มัลชันเท่ากับ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อสมบัติและความคงตัวของอิ้มัลชัน เมื่อนำอิ้มัลชันที่มีระบบและปริมาณของวัตถุก่อผนังต่างๆ มาทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน และแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตี 0.3-0.4 และมีค่าสีที่ไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม (มอลโทเด็คซ์ทรินอย่างเดียว)

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันอิสระ ปริมาณน้ำมันทั้งหมด และคำนวณประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมัน พบว่าการใช้ซูโครสหรือแล็กโทสร่วมกับมอลโทเด็คซ์ทริน สามารถลดปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล และเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันปลาทูน่าได้ โดยไมโครแคปซูลที่มีซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทรินมีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่ดีกว่า อีกทั้งมีการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่ดีกว่าไมโครแคปซูลที่มีแล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน

อิมัลชันน้ำมันปลาที่เตรียมจากไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย ที่มีปริมาณร้อยละของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดระดับต่างๆ มีขนาดหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าศักย์ซึตาที่ผิวหยดน้ำมัน ไม่แตกต่างจากอิมัลชันก่อนการทำแห้ง และอิมัลชันมีความคงตัวต่อการแยกชั้นของหยดน้ำมัน แสดงถึงอิมัลชันน้ำมันปลาที่เตรียมจากไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารได้

ข้อเสนอแนะ

ไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่มีซูโครสหรือแลกโทสร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินมีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันที่ดี ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของการใช้ซูโครสหรือแลกโทสร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินต่อความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษาต่อไป ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสมบัติในด้าน glass transition ของน้ำตาลทั้งสองชนิด เนื่องจากสมบัติด้าน glass transition มีผลต่อความคงตัวของไมโครแคปซูล รวมถึงส่งผลกระทบต่อร้อยละของผลได้ (% yield) ของการทำแห้งแบบพ่นฝอยอีกด้วย

ควรศึกษาการนำไมโครแคปซูลน้ำมันปลาที่มีซูโครสหรือแลกโทสร่วมกับมอลโทเด็กซ์ทรินไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น มายองเนส น้ำสลัด หรือผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดสูง เป็นต้น เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์ โดยควรศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางโภชนาการ คุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส รวมถึงความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษา

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คุชฎี อุตภาพ. 2552. สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต-ไอโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap4/chapter4_5.html, 20 มีนาคม 2552.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2548. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2551. เคมีอาหาร. ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2548. โปรตีนในอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมพงษ์ สหพงศ์. 2538. น้ำมันปลา น้ำมันลดไขมัน. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์รวมธรรมส์, กรุงเทพฯ.
- สมศักดิ์ วรคามิน. 2551. **Omega-3 amazing fish oil**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2547. รูปแบบของสตาร์ชกับการใช้เป็นสารไมโครแคปซูลเพื่อกักเก็บสารให้กลิ่นรส. วารสารอาหาร 34(4): 277-281.
- วิไล รังสาทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. ครั้งที่ 3. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- หทัยรัตน์ ปิ่นแก้ว. 2548. การกักเก็บกรดแอสคอร์บิกและเบทา-แคโรทีนในไลโปโซมที่เตรียมด้วยเลซิทีนจากถั่วเหลืองเพื่อเสริมในผลิตภัณฑ์น้ำสับปะรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Álvarez Cerimedo, M. S., M. Cerdeira, R. J. Candal and M. L. Herrera. 2008. Microencapsulation of a low-trans fat in trehalose as affected by emulsifier type. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 85: 797–807.
- Andrews, H. E., J. G. Ba'ez-González, F. Cruz-Sosa and E. Jaime. 2007. Gum arabic chitosan complex coacervation. **Biomacromolecules**. 8: 1313-1318.
- _____, O. S. Castilla, H. V. Torres, E. J. V. Carter and C. L. Calleros. 2010. Determination of the gum arabic-chitosan interactions by fourier transform infrared spectroscopy and characterization of the microstructure and rheological features of their coacervates. **Carbohydrate Polymers**. 79: 541–546.
- 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 Hydrocolloids**. 19: 209-220.
- Augustin, M. A. and L. Sanguansri. 2008. Encapsulation of bioactives, pp. 577-601. In J. M. Aquilera and P. J. Lillford., eds. **Food Materials Science: Principles and Practice**. Springer Science and Business Media, LCC, New York.
- Bae, E. K. and S. J. Lee. 2008. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrin. **Journal of Microencapsulation**. 25(8): 549-560.
- Baik, M. Y., E. L. Suhendro, W. W. Nawar, D. J. McClements, E. A. Decker and P. Chinachoti. 2004. Effects of antioxidants and humidity on the oxidative stability of microencapsulated fish oil. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 81: 355-360.
- BeMiller, J. N. 2007. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. 2nd ed. AACC International, Inc., Minnesota.

- Bhandari, B. R. 2004. Spray-drying: an encapsulation technique for food flavors, pp. 513-533. *In* Mujumdar A. S., ed. **Dehydration of Products of Biological Origin**. Science Publishers Inc, New Hampshire.
- _____, E. D. Dumoulin, H. M. J. Richard, I. Noleau and A.M. Lebert. 1992. Flavor encapsulation by spray drying: application to citral and linalyl acetate. **Journal of Food Science**. 57: 217-221.
- _____, and T. Howes. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. **Journal of Food Engineering**. 40: 71-79.
- Blijdenstein, T. B. J., F. D. Zoet, T. van Vliet, E. van der Linden and G. A. van Aken. 2004. Dextran-induced depletion flocculation in oil-in-water emulsions in the presence of sucrose. **Food Hydrocolloids**. 18: 857-863.
- Buma, T. J. 1971. Free fat in spray-dried whole milk. 1. General introduction and brief review of literature. **Milk and Dairy Journal**. 25: 33-41.
- Chanamai, R. and D. J. McClements. 2002. Comparison of gum arabic, modified starch and whey protein isolate as emulsifiers: Influence of pH, CaCl_2 and temperature. **Journal of Food Science**. (67)1: 120-125.
- Cornacchia, L and Y. H. Roos. 2012. Sugar crystallization and glass transition as destabilizing factors of protein-stabilized emulsions. **Food Biophysics**. 7: 93-101.
- Danviriyakul, S., D. J. McClements, E. A. Decker, W. W. Nawar and P. Chinachoti. 2002. Physical stability of spray-dried milk fat emulsion as affected by emulsifiers and processing conditions. **Journal of Food Science**. 67: 2183-2189.
- Davis, E. A. 1995. Functionality of sugars: physicochemical interactions in foods. **The American Journal of Clinical Nutritional**. 62(suppl): 170S-7S.

- Desobry, S., F. M. Netto and T. P. Labuza. 1997. Comparison of spray-drying, drum-drying and freeze-drying for β -carotene encapsulation and preservation. **Journal of Food Science**. 62: 1158-1162.
- _____, _____ and _____. 1999. Influence of maltodextrin systems at an equivalent 25DE on encapsulated β -carotene loss during storage. **Journal of Food Process Preservation**. 23: 39-55.
- De Wit, J. N. 1998. Nutritional and functional characteristics of whey proteins in food. **Journal of Dairy Science**. 81: 597- 608.
- Dickinson, E. 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. **Food Hydrocolloids**. 17: 25-39.
- _____ and L. M. Merino. 2002. Effect of sugar on the rheological properties of acid caseinate -stabilized emulsion gels. **Food Hydrocolloids**. 16: 321-331.
- Dollo, G., P. L. Corre, A. Guerin, F. Chevanne, J. L. Burgot and R. Leverage. 2003. Spray-dried redispersible oil-in-water emulsion to improve oral bioavailability of poorly soluble drugs. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**. 19: 273-280.
- Drusch, S., Y. Serfert, A. Van Den Heuvel and K. MShwarz. 2006. Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil encapsulated in an amorphous matrix containing trehalose. **Food Research International**. 39: 807-815.
- Dziezak, J. D. 1988. Microencapsulation and encapsulated ingredients. **Food Technology**. 42: 136-151.
- Faltdt, P. and B. Bergenstahl. 1996. Spary-dried whey protein/lactose/soybean oil emulsion. 2. Redispersability, wettability and particle structure. **Food Hydrocolloids**. 10(4): 431-439.

- Fennema, O. R. 1996. Water and Ice, pp 17-94. *In* O. R. Fennema., ed. **Food Chemistry**. Marcel Dekker, Inc, Wisconsin.
- Gebauer, S. K., T. L. Psota, W. S. Harris and P. M. Kris-Etherton. 2006. n-3 fatty acid dietary recommendations and food source to achieve essentiality and cardiovascular benefits. **The American Journal of Clinical Nutrition**. 83(Suppl): 1526S-35S.
- Gharsallaoui, A., G. Roudaut, O. Chambin, A. Voilley and R. Saurel. 2007. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. **Food Research International**. 40: 1107-1121.
- _____, R. Saurel, O. Chambin and A. Voilley. 2011. Pea (*Pisum sativum*, L.) protein isolate stabilized emulsions: A novel system for microencapsulation of lipophilic ingredients by spray drying. **Food and Bioprocess Technology**. DOI 10.1007/s11947-010-0497-z.
- Ghasemi, J., S. Ghobadi, B. Abbasi and M. Kubista. 2005. Spectrophotometric determination of acidity constants of group B vitamins in different ionic strengths at $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$. **Journal of the Korean Chemical Society**. 49(3): 269-277.
- Guzey, D. and D. J. McClements. 2006. Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. **Advances in Colloid and Interface Science**. 128-130: 227-248.
- Hardas, N., S. Danviriyakul, J. L. Foley, W. W. Nawar and P. Chinachoti. 2000. Accelerated stability studies of microencapsulated anhydrous milk fat. **Food Science and Technology Lubensmittel Wissenschaft und Technology**. 33: 506-513.
- Harnsiliwat, T., R. Pongsawatmanit and D. J. McClements. 2006. Stabilization of model beverage cloud emulsions using protein-polysaccharide electrostatic complexes formed at the oil-water interface. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 54: 5540-5547.

- Hogan, S. A., B. F. McNamee, E. D. O' Riordan and M. O' Sullivan. 2001a. Emulsification and microencapsulation properties of sodiumcaseinate/carbohydrate blends. **International Dairy Journal**. 11: 137-144.
- _____, _____, _____ and _____. 2001b. Microencapsulating properties of sodium caseinate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 49: 1934-1938.
- Hong, Y. H. and D. J. McClements. 2007. Modulation of pH sensitivity of surface charge and aggregation stability of protein-coated lipid droplets by chitosan addition. **Food Biophysics**. 2: 46-55.
- Horrocks, L. A. and Y. K. Yeo. 1999. Health benefits of docosahexaenoic acid (DHA). **Pharmacological Research**. 40(3): 211-225.
- Jafari, S. M., Y. He and B. Bhandari. 2007. Role of powder particle size on the encapsulation efficiency of oils during spray drying. **Drying Technology**. 25: 1081-1089.
- _____, E. Assadpoor, Y. He and B. Bhandari. 2008. Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. **Drying Technology**. 26: 816-835.
- Jayme, M. L., D. E. Dunstan and M. L. Gee. 1999. Zeta potentials of gum arabic stabilised oil in water emulsions. **Food Hydrocolloids**. 13: 459-465.
- Jenkins, P. and M. Snowden. 1996. Depletion flocculation in colloidal dispersions. **Advances in Colloid and Interface Science**. 68: 57-96.
- Jimenez, M., H. S. Garcia and C. I. Beristain. 2004. Spray-drying microencapsulation and oxidative stability of conjugated linoleic acid. **European Food Research and Technology**. 219:588-592 DOI 10.1007/s00217-004-0992-4.

- Kagami, Y., S. Sugimura, N. Fujishima, K. Matsuda, T. Kometani and Y. Matsumura. 2003. Oxidative stability, structure and physical characteristics of microcapsules formed by spray drying of fish oil with protein and dextrin wall materials. **Journal of Food Science**. 68: 2248-2255.
- Kelly, J., P. M. Kelly and D. H. Lait. 2002. Influence of processing variables on the physicochemical properties of spray dried fat-based milk powders. **July-August 2002 First International Symposium on Spray Drying of Milk Products**. 82(4): 401-412.
- Kenyon, M. M. 1995. Modified starch, maltodextrin and corn syrup solids as wall materials for food encapsulation, pp. 42–50. *In* S.J. Risch and G. A. Reineccius, eds. **Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients**. American Chemical Society, Washington, D. C.
- Keogh, M. K., B. T. O’Kennedy, J. Kelly, M. A. Auty, P. M. Kelly, A. Fureby and A. M. Haahr. 2001. Stability to oxidation of spray-dried fish oil powder microencapsulated using milk ingredients. **Journal of Food Science**. 66: 217–224.
- Kim, H. J., E. A. Decker and D. J. McClements. 2003. Influence of sucrose on droplet flocculation in hexadecane oil-in-water emulsions stabilized by β -lactoglobulin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51(3): 766-772.
- King, A. H. 1995. Encapsulation of food ingredients: A review of available technology, focusing on hydrocolloids, pp. 26–39. *In* S.J. Risch and G. A. Reineccius, eds. **Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients**. American Chemical Society, Washington, D. C.
- Klinkesorn, U., P. Sophanodora, P. Chinachoti and D. J. McClements. 2004. Stability and rheology of corn oil-in-water emulsions containing maltodextrin. **Food Research International**. 37(9): 851–859.

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 Hydrocolloids**. 19: 1044-1053.

_____, _____, _____, E. A. Decker and D. J. McClements. 2006. Characterization of spray-dried tuna oil emulsified in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition. **Food Research International**. 39: 449-457.

_____, _____, _____, 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. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 53: 4561- 4566.

Krishnan, S., R. Bhosale and R. S. Singhal. 2005. Microencapsulation of cardamom oleoresin: Evaluation of blends of gum arabic, maltodextrin and a modified starch as wall materials. **Carbohydrate Polymers**. 61: 95–102.

Liliana, L-B. and J. J. Chanona-Perez. 2006. Morphology and size of particles during spray drying, pp 513-518. *In* M. del. P. Buera, J. WeMLi-Chanes, P. J. Lillford and H. R. Corti., ed. **Water Properties of Food, Pharmaceutical, and Biological Materials**. CRC Taylor and Francis, New York.

Loksuwan, J. 2007. Characteristics of microencapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin. **Food Hydrocolloids**. 21: 928–935.

Madene, A., M. Jacquot, J. Scher and S. Desobry. 2006. Flavour encapsulation and controlled released – a review. **International of Food Science and Technology**. 41: 1-21.

Malvern Instruments. 2004. **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. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 47: 4112-4116.
- Matsuno, R. and S. Adachi. 1993. Lipid encapsulation technology-techniques and applications to food. **Trend in Food Science and Technology**. 4: 256-261.
- McClements, D. J. 2000. Comments on viscosity enhancement and depletion flocculation by polysaccharides. **Food Hydrocolloids**. 14: 173-177.
- _____. 2005. **Food Emulsions: Principles, Practice, and Techniques**. CRD Press LLC., Florida.
- _____ and E. A. Decker. 2000. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: impact of molecular environment on chemical reactions in heterogeneous food systems. **Journal of Food Science**. 65(8): 1270-1282.
- _____ and _____. 2007. Lipids, pp. 156-216. *In* S. Damodaran, K .L. Parkin and O. R. Fennema, ed. **Food Chemistry**. CRC Press, Boca Raton.
- McNamee, B. F., L. E. White, E. D. O’Riordan and M. O’Sullivan. 1998. Emulsification and microencapsulation properties of gum arabic. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46: 4551-4555.
- _____, _____, _____ and _____. 2001. Effect of partial replacement of gum arabic with carbohydrates on its microencapsulation properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 49: 3385-3388.
- Mehmet, K., B. Koc, G. Susyal, M. S. Yilmazer, N. B. G. Glu and F. K. Ertekin. 2011. Improving functionality of whole egg powder by the addition of gelatine, lactose and pullulan. **Journal of Food Science**. 76(9): S508-15.

- Mei, L., D. J. McClements, J. Wu and E. A. Decker. 1998. Iron-catalyzed lipid oxidation in emulsion as affected by surfactant, pH and NaCl. **Food Chemistry**. 61(3): 307–312.
- Moreau, D. L. and M. Rosenberg. 1993. Microstructure and fat extractability in microcapsules based on whey proteins or mixtures of whey proteins and lactose. **Food Structure**. 12: 457–468.
- Moschakis, T., B. S. Murray and C. G. Biliaderis. 2010. Modifications in stability and structure of whey protein-coated o/w emulsions by interacting chitosan and gum arabic mixed dispersions. **Food Hydrocolloids**. 24(1): 8-17.
- 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. **Journal of Colloid and Interface Science**. 296: 581–590.
- Nawar, W. W. 1996. Lipids, pp 225-320. In O.R. Fennema., ed. **Food Chemistry**. Marcel Dekker, Inc, Wisconsin.
- Ogawa, S., E. A. Decker and D. J. McClements. 2003. Influence of environmental conditions on the stability of oil in water emulsions containing droplets stabilized by lecithin-chitosan membranes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51: 5522-5527.
- Onwulata C. I., P. W. Smith, P. H. Cooke and V. H. Holsinger. 1996. Particle structures of encapsulated milk fat powders. **Lebensm.-Wiss. u.-Technology**. 29: 163–172.
- Ponginebbi, L., W. W. Nawar and P. Chinachoti. 1999. Oxidation of linoleic acid in emulsions: effect of substrate, emulsifier, and sugar concentration. **Journal of American Oil Chemists Society**. 76(1): 131-138.
- Quek, S. Y., N. K. Chok and P. Swedlund. 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. **Chemical Engineering and Processing**. 46: 386–392.

- Reineccius, G. A. 1988. Spray-drying of food flavors, pp. 55-56. *In* G.A. Reineccius and S. J. Risch., ed. **Flavor Encapsulation**. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Renner, E. and M. H. Abd El-Salam. 1991. Application of ultrafiltration in the dairy industry. **Elsevier Science Publisher**, Essex.
- Roos, Y. H. 2002. Importance of glass transition and water activity to spray drying and stability of dairy powders. **Lait**. 82(4): 475-484.
- Rosenberg, M., I. J. Kopelman and Y. Talmon. 1990. Factors affecting retention in spray-drying microencapsulation of volatile materials. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 38: 1288-1294.
- _____ and T. Y. Sheu. 1996. Microencapsulation of volatiles by spray-drying in whey protein-based wall systems. **International Dairy Journal**. 6: 273-284.
- Rulkens, W. H. and H. A. C. Thijssen. 1972. The retention of organic volatiles in spray drying aqueous carbohydrate solutions. **Journal of Food Technology**. 7: 95-105.
- Schonhoff, M. 2003. Self-assembled polyelectrolyte multilayers. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**. 8: 86-95.
- Shahidi, F. and X. Q. Han. 1993. Encapsulation of food ingredients. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 33(6): 501-547.
- Shaw, L. A., D. J. McClements and E. A. Decker. 2007. Spray-dried multilayered emulsions as a delivery method for omega-3 fatty acids into food systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 55: 3112-3119.
- Sheu, T. Y. and M. Rosenberg. 1995. Microencapsulation by spray drying ethyl caprylate in whey protein and carbohydrate wall systems. **Journal of Food Science**. 60: 98-103.

- Sheu, T. Y. and M. Rosenberg. 1998. Microstructure of microcapsules consisting of whey proteins and carbohydrates. **Journal of Food Science**. 63: 491-494.
- Shittu, T. A. and M. O. Lawal. 2007. Factors affecting instant properties of powdered cocoa beverages. **Food Chemistry**. 100: 91–98.
- Soottitantawat, A., H. Yoshii, T. Furuta, M. Ohkawarac and P. Linko. 2003. Microencapsulation by spray drying: Influence of emulsion size on the retention of volatile compounds. **Journal of Food Science**. 68: 2256-2262.
- _____, F. Bigeardb, H. Yoshii, T. Furuta, M. Ohkawarac and P. Linko. 2005. Influence of emulsion and powder size on the stability of encapsulated d-limonene by spray drying. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 6: 107-114.
- Strange, E. D., R. P. Konstance, D. Lu, P. W. Smith, C. I. Onwulata and V. H. Holsinger. 1997. Oxidative and functional stability during storage of butter oil encapsulated with sucrose or flour. **Journal of Food Lipids**. 4: 245–260.
- Trubiano, P.C. 1995. The role of specialty food starches in flavor encapsulation, pp. 244-253. *In* C. T. Ho, C. T. Tan and C. H. Tong, ed. **ACS Symposium Series 610; Flavor Technology: Physical Chemistry, Modification, and Process**. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Vega, C. and Y. H. Roos. 2006. Spray-dried dairy and dairy-like emulsions compositional considerations. **Journal of Dairy Science**. 89(2): 383-401.
- 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. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**. 128: 219-240.

Wang, Y. J. and L. Wang. 2000. Structures and properties of commercial maltodextrins from corn, potato and rice starches. **Starch**. 52: 296-304.

Young, S. L., X. Sarda and M. Rosenberg. 1993. Microencapsulation properties of whey proteins. **Journal of Dairy Science**. 76: 2868–2877.





ภาคผนวก



การคำนวณเพื่อเตรียมอิมัลชันจากไมโครแคปซูล

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อเตรียมอิมัลชันโดยการละลายไมโครแคปซูลที่ได้จากอิมัลชันก่อน
การทำแห้งที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผงไมโครแคปซูลมี
ความชื้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

คำนวณหาปริมาณผงไมโครแคปซูลที่ได้จากการทำแห้ง (X) จาก

$$X - (\text{ความชื้น})X = \text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน}$$

$$X - (0.02)X = 20$$

$$X = 20.41$$

ดังนั้นในการเตรียมอิมัลชันจากไมโครแคปซูล จึงชั่งน้ำหนักไมโครแคปซูล 20.41 กรัม เพื่อ
ละลายในแอซิเตทบัพเฟอร์ 79.59 กรัม



ภาคผนวก ข

ผลของชนิดวัตถุก่อผนังต่อสมบัติของอิฐมวลขึ้น
และปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูลน้ำมันปลาทูน่า
และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เค็มและเค็ม
มอลโทเด็คซ์ทริน หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละ
โดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ
30 โดยน้ำหนัก

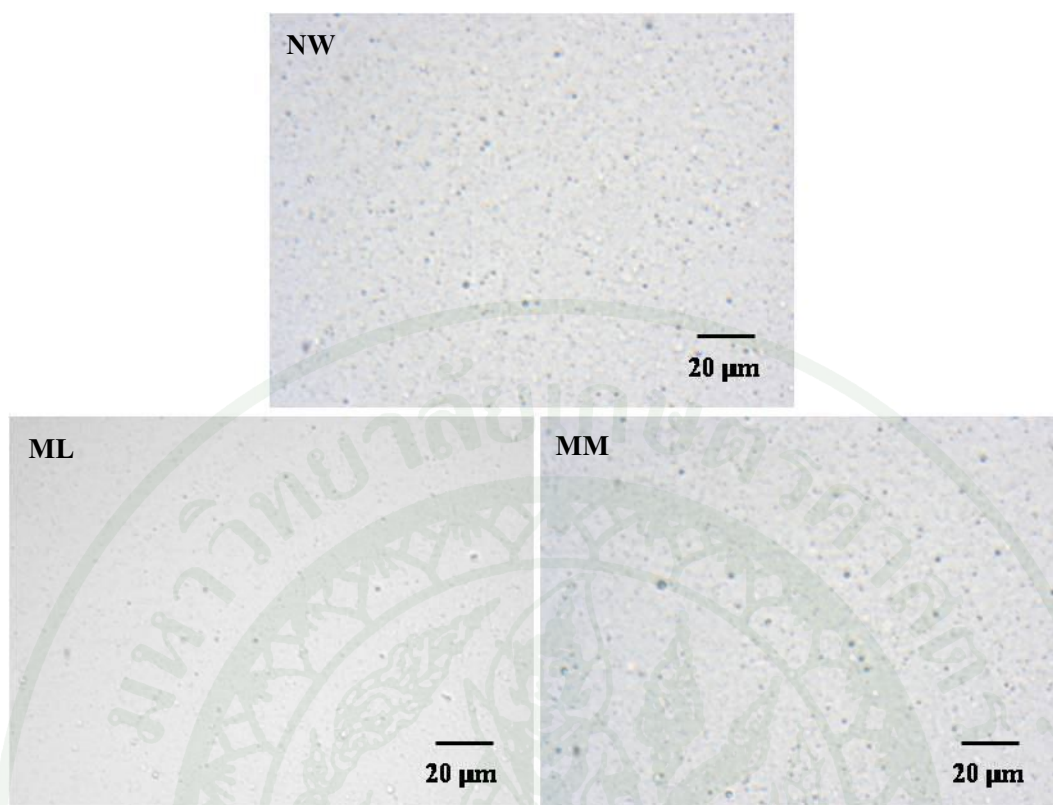
ชนิดวัตถุก่อผนัง	ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมัน (มิลลิโวลต์)
ไม่มีวัตถุก่อผนัง (NW)	55.77±0.37 ^a
มอลโทเด็คซ์ทริน (MD)	55.93±1.25 ^a
ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน (MS)	55.20±0.66 ^a
แล็กโทส -มอลโทเด็คซ์ทริน (ML)	54.48±0.23 ^a
หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน (MM)	48.41±1.12 ^b
โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน (MW)	44.38±1.13 ^c
กัมอะราบิก-มอลโทเด็คซ์ทริน (GA)	-9.75±1.04 ^d

หมายเหตุ ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เรียง
ตัวอักษรจากค่ามากไปน้อย

ตารางผนวกที่ ข2 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันทุติยภูมิน้ำมันปลาทูน่าที่ไม่เค็มและเค็มมอลโทเด็กซ์-
ทรินหรือมอลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก
เท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดย
น้ำหนัก

ชนิดวัตถุก่อผนัง	ขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน (ไมโครเมตร)
ไม่มีวัตถุก่อผนัง (NW)	0.80±0.04 ^b
มอลโทเด็กซ์ทริน (MD)	0.75±0.02 ^b
ซูโครส-มอลโทเด็กซ์ทริน (MS)	0.78±0.03 ^b
แล็กโทส -มอลโทเด็กซ์ทริน (ML)	0.82±0.02 ^b
หางนมผง-มอลโทเด็กซ์ทริน (MM)	0.91±0.03 ^b
โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็กซ์ทริน (MW)	1.13±0.08 ^a
กัมอะราบิก-มอลโทเด็กซ์ทริน (GA)	11.82±1.82 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษร a-b ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เรียง
ตัวอักษรจากค่ามากไปน้อย



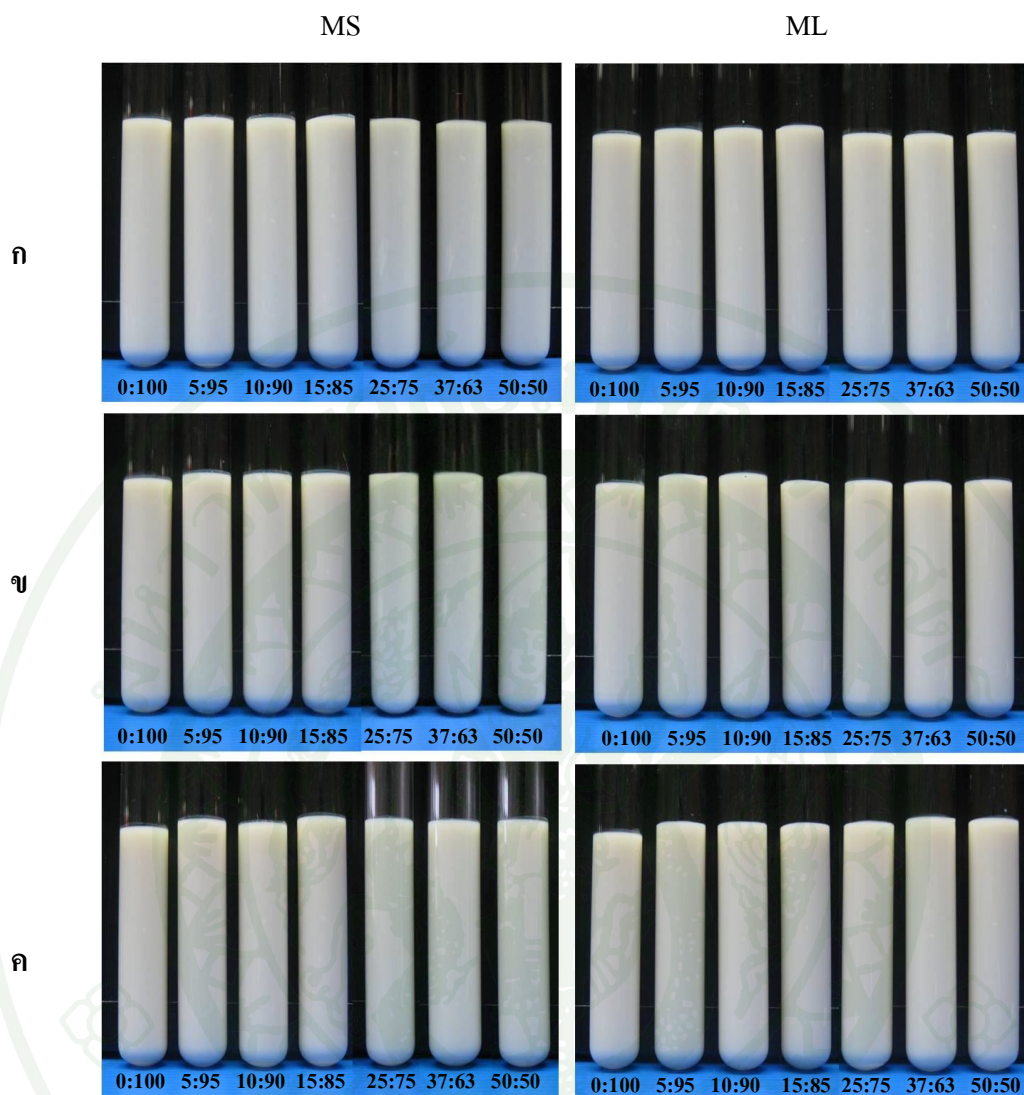
ภาพผนวกที่ ข1 โครงสร้างระดับจุลภาคของอีพอกซีเรซินที่เติมโมลโทเด็กซ์-
ทริน (NW) หรือโมลโทเด็กซ์ทรินร่วมกับแล็กโทส (ML) หรือหางนมผง (MM) ที่
ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของวัตถุดิบอื่นร่วมกับโมลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ
25:75 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอีพอกซีเรซินเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ข3 ปริมาณน้ำมันอิสระของไมโครแคปซูล ที่เตรียมจากอิมัลชันทุติยภูมิ น้ำมันปลา
 ที่เติมมอลโทเด็คซ์ทริน หรือมอลโทเด็คซ์ทรินร่วมกับวัตถุก่อผนังอื่นที่
 ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 75:25 และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน
 เท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ชนิดวัตถุก่อผนัง	ปริมาณน้ำมันอิสระ (กรัม/100 กรัมไมโครแคปซูล)
มอลโทเด็คซ์ทริน (MD)	1.53±0.06 ^c
ซูโครส-มอลโทเด็คซ์ทริน (MS)	1.15±0.03 ^d
แล็กโทส-มอลโทเด็คซ์ทริน (ML)	1.03±0.11 ^d
หางนมผง-มอลโทเด็คซ์ทริน (MM)	3.94±0.21 ^b
โปรตีนเวย์เข้มข้น-มอลโทเด็คซ์ทริน (MW)	4.37±0.15 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เรียง
 ตัวอักษรจากค่ามากไปน้อย





ภาพผนวกที่ ค1 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครส (MS) หรือ แล็กโทส (ML) ต่อโมลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน เท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก หลังจากเก็บไว้นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าศักย์ซีตาที่ผิวหยดน้ำมัน (มิลลิโวลต์) ในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

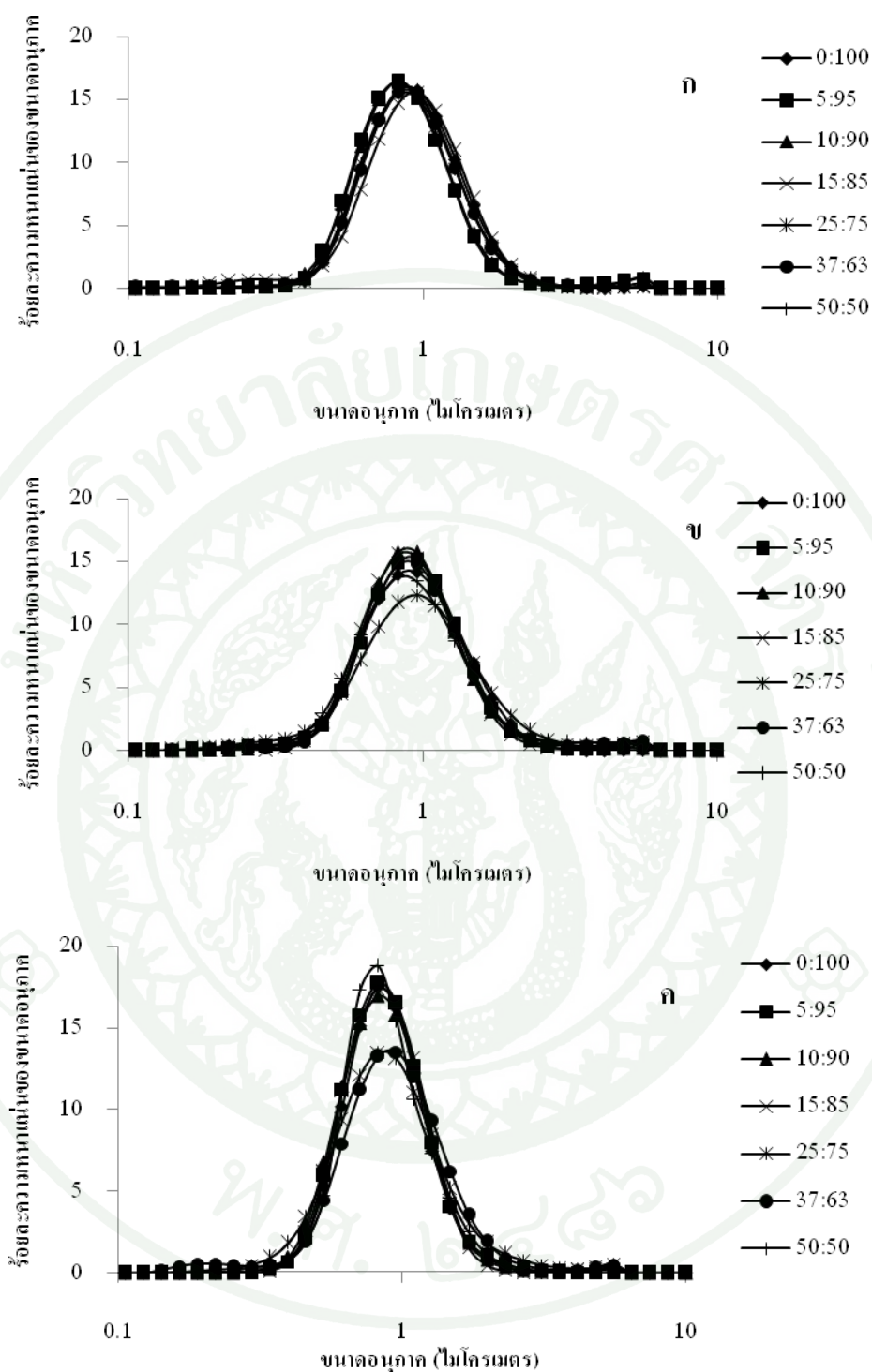
วัตถุอ่อนนึ่ง	ปริมาณร้อยละ			
	โดยน้ำหนักต่อมอลโทเด็คซ์ทริน	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		20 ^{ns}	30 ^{ns}	40 ^{ns}
ซูโครส	0:100 ^{ns}	54.01±0.95	54.70±0.31	54.48±0.52
	5:95 ^{ns}	54.28±0.49	54.10±0.44	54.35±0.19
	10:90 ^{ns}	54.50±0.83	54.14±0.64	55.15±0.58
	15:85 ^{ns}	54.40±1.23	54.68±0.74	54.08±0.21
	25:75 ^{ns}	55.14±0.83	55.20±0.66	54.13±0.80
	37:63 ^{ns}	55.81±1.27	54.73±1.28	54.62±1.53
	50:50 ^{ns}	54.25±0.85	54.80±0.74	55.08±2.09
แล็กโทส	0:100 ^{ns}	54.01±0.95	54.43±0.64	54.48±0.52
	5:95 ^{ns}	54.54±1.14	54.70±0.30	54.41±0.59
	10:90 ^{ns}	54.82±0.46	54.78±0.51	54.22±0.63
	15:85 ^{ns}	54.27±0.77	54.64±0.47	54.13±0.44
	25:75 ^{ns}	54.25±0.98	54.48±0.23	54.10±0.54
	37:63 ^{ns}	54.58±0.29	54.73±0.31	54.24±0.59
	50:50 ^{ns}	56.05±2.14	55.43±1.93	54.13±0.62

หมายเหตุ ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสหรือแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน) หรือที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

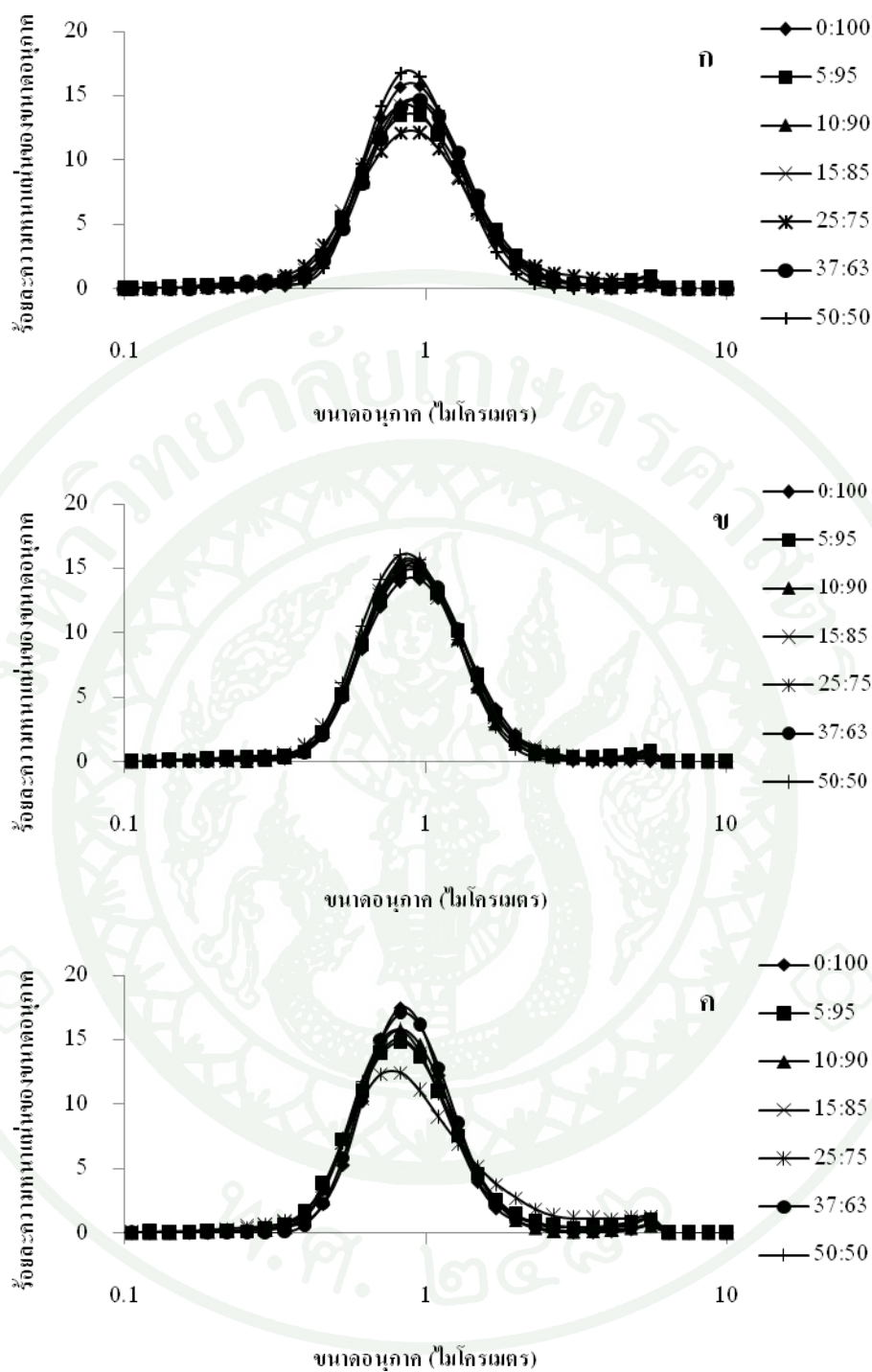
ตารางผนวกที่ ค2 ขนาดหยดน้ำมัน (ไมโครเมตร) ในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ
ซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดใน
อิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

วัตถุอ่อนนึ่ง	ปริมาณร้อยละ		ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	โดยน้ำหนักต่อ มอลโทเด็กซ์ทริน		ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
			20 ^{ns}	30 ^{ns}	40 ^{ns}
ซูโครส	0:100 ^{ns}		0.79±0.04	0.77±0.03	0.78±0.03
	5:95 ^{ns}		0.79±0.02	0.79±0.01	0.79±0.01
	10:90 ^{ns}		0.78±0.02	0.80±0.04	0.78±0.01
	15:85 ^{ns}		0.80±0.03	0.79±0.05	0.80±0.02
	25:75 ^{ns}		0.80±0.02	0.78±0.03	0.76±0.03
	37:63 ^{ns}		0.79±0.01	0.78±0.04	0.78±0.02
	50:50 ^{ns}		0.81±0.02	0.77±0.03	0.78±0.01
แลกโทส	0:100 ^{ns}		0.79±0.04	0.77±0.03	0.78±0.03
	5:95 ^{ns}		0.81±0.04	0.83±0.02	0.81±0.01
	10:90 ^{ns}		0.82±0.01	0.79±0.04	0.79±0.01
	15:85 ^{ns}		0.83±0.01	0.82±0.00	0.80±0.03
	25:75 ^{ns}		0.81±0.06	0.82±0.02	0.80±0.05
	37:63 ^{ns}		0.82±0.02	0.79±0.06	0.78±0.06
	50:50 ^{ns}		0.81±0.02	0.81±0.00	0.79±0.04

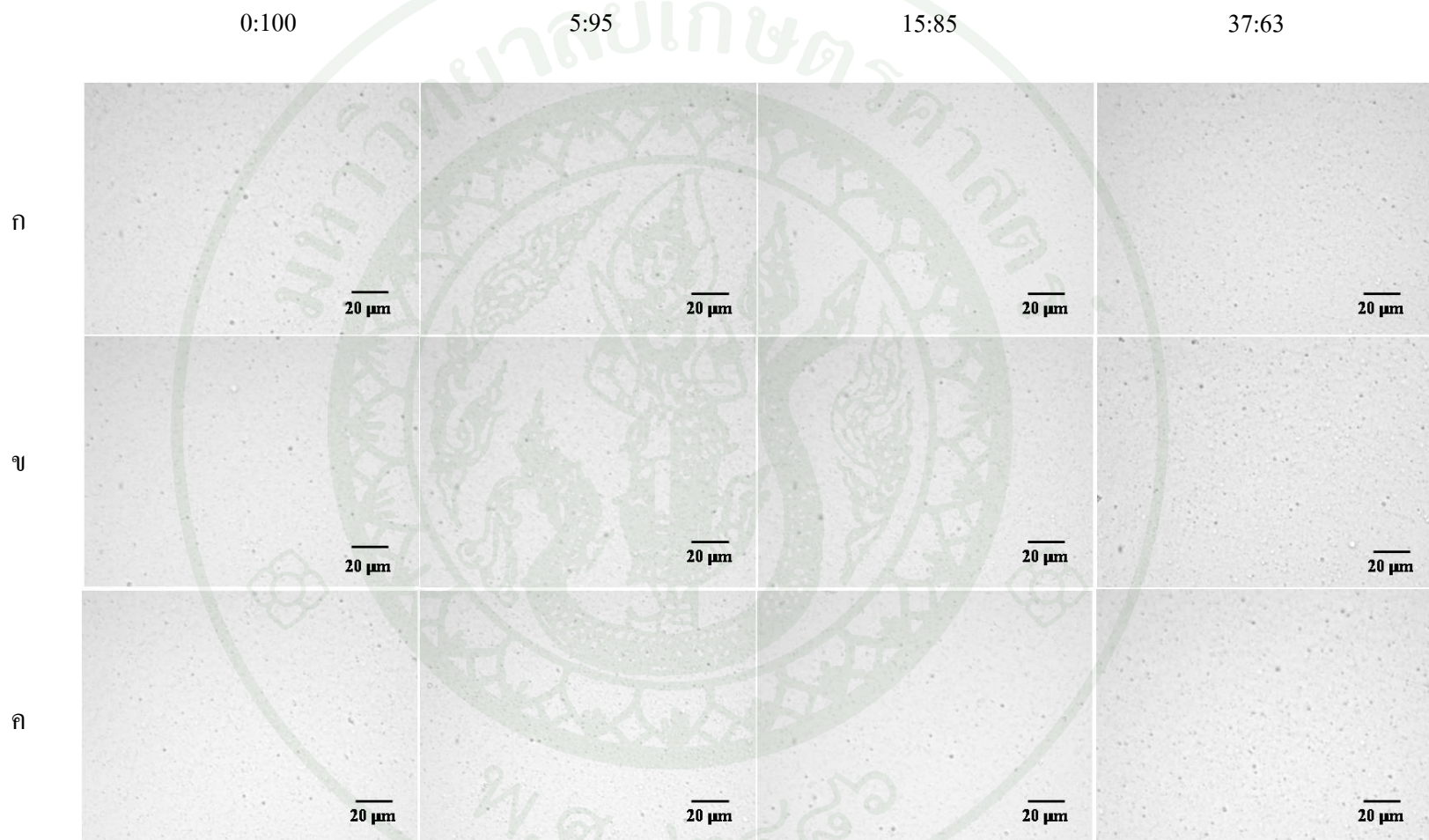
หมายเหตุ ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่ปริมาณร้อยละโดย
น้ำหนักของซูโครสหรือแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน) หรือที่ปริมาณ
ของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)



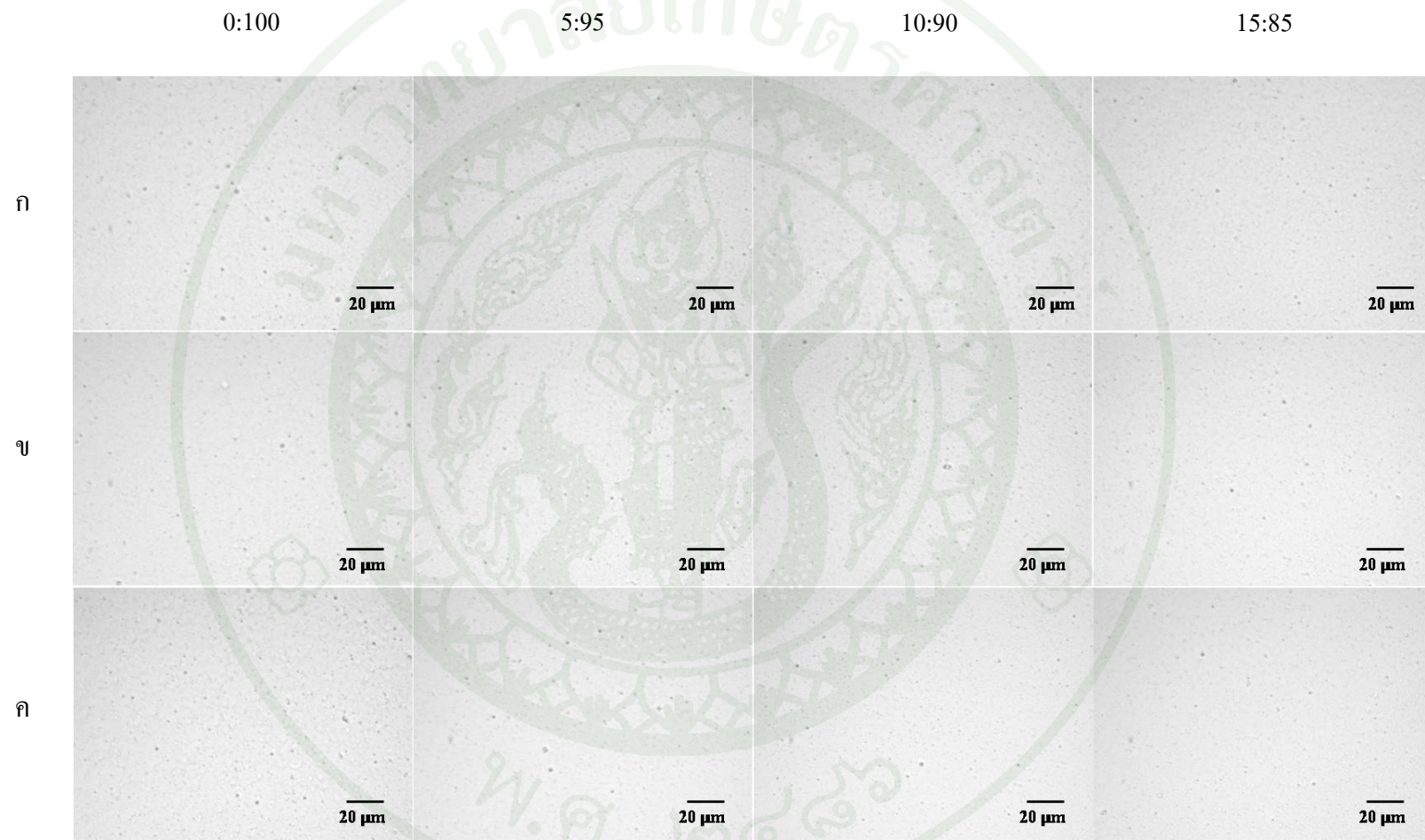
ภาพผนวกที่ ๒ การกระจายตัวของขนาดอนุภาคหดย่น้ำมันในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



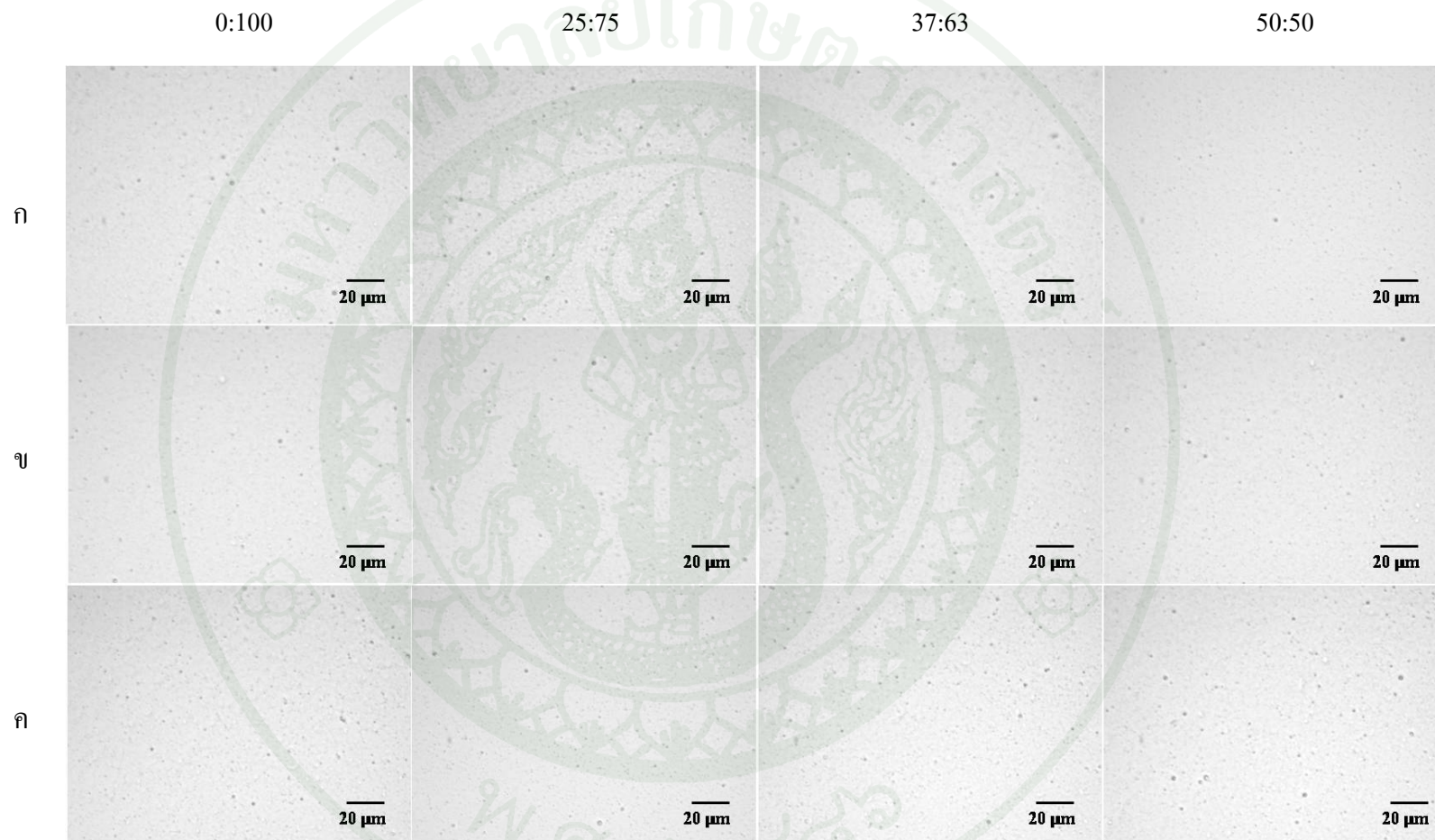
ภาพผนวกที่ 3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินต่างๆ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



ภาพผนวกที่ ค4 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 5:95, 15:85 และ 37:63 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



ภาพผนวกที่ ค5 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 5:95, 10:90 และ 15:85 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก



ภาพผนวกที่ ค6 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็คซ์ทรินเท่ากับ 0:100, 25:75, 37:63 และ 50:50 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) และ 40 (ค) โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ๓ ค่า L^* ของไม้โครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนผสมที่มี ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า L^* (ค่าความสว่างของสี)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30 ^{ns}	40
0:100	94.08±0.03 ^{Aab}	94.08±0.60 ^A	93.74±0.32 ^{Ab}
5:95	94.22±0.18 ^{Aa}	93.91±0.18 ^{AB}	93.75±0.23 ^{Bb}
10:90	93.83±0.14 ^{Bbc}	94.02±0.20 ^{AB}	94.24±0.36 ^{Aa}
15:85	93.87±0.07 ^{Abc}	94.06±0.18 ^A	94.26±0.45 ^{Aa}
25:75	93.89±0.32 ^{Abc}	93.85±0.24 ^A	93.51±0.12 ^{Ab}
37:63	93.79±0.10 ^{Ac}	93.84±0.21 ^A	93.40±0.12 ^{Bb}
50:50	93.40±0.18 ^{Ad}	93.70±0.18 ^A	93.68±0.28 ^{Ab}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๓4 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็คซ์ทริน	ค่า a^* ($-a^*$ คือค่าความเป็นสีเขียว และ $+a^*$ คือค่าความเป็นสีแดง) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30 ^{ns}	40
0:100	-0.15 ± 0.01^{Ab}	-0.19 ± 0.04^A	-0.02 ± 0.19^{Aab}
5:95	-0.05 ± 0.03^{Aab}	-0.03 ± 0.23^A	0.11 ± 0.18^{Aa}
10:90	-0.03 ± 0.03^{Aab}	-0.09 ± 0.07^{AB}	-0.12 ± 0.04^{Bb}
15:85	-0.09 ± 0.14^{Aab}	-0.05 ± 0.11^A	-0.14 ± 0.02^{Ab}
25:75	-0.10 ± 0.08^{Aab}	-0.06 ± 0.10^A	0.00 ± 0.17^{Aab}
37:63	-0.08 ± 0.12^{Aab}	-0.07 ± 0.09^A	0.04 ± 0.08^{Aab}
50:50	0.02 ± 0.07^{Aa}	-0.15 ± 0.06^B	-0.03 ± 0.11^{ABab}

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

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

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๕ ค่า L^* ของไม้โครเคปชูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า L^* (ค่าความสว่างของสี)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40 ^{ns}
0:100	94.08±0.03 ^{Aab}	94.08±0.60 ^{Ab}	93.74±0.32 ^A
5:95	94.43±0.23 ^{Aa}	93.60±0.10 ^{Cc}	94.04±0.26 ^B
10:90	94.08±0.16 ^{Bab}	94.33±0.11 ^{Ab}	94.11±0.09 ^B
15:85	94.34±0.22 ^{Aab}	94.69±0.07 ^{Aa}	93.81±1.11 ^A
25:75	94.13±0.13 ^{Aab}	94.10±0.16 ^{Ab}	93.92±0.41 ^A
37:63	93.96±0.26 ^{Bb}	94.18±0.12 ^{ABb}	94.44±0.29 ^A
50:50	93.93±0.45 ^{Ab}	94.07±0.03 ^{Ab}	93.87±0.44 ^A

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

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

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๑๖ ค่า a^* ของไม้โครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิมวัตถุก่อนแห้งผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ค่า a^* ($-a^*$ คือค่าความเป็นสีเขียว และ $+a^*$ คือค่าความเป็นสีแดง) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20 ^{ns}	30	40
0:100	-0.15 ± 0.01^A	-0.19 ± 0.04^{Ac}	-0.02 ± 0.19^{Aa}
5:95	-0.14 ± 0.14^A	-0.06 ± 0.06^{Aa}	-0.14 ± 0.09^{Aab}
10:90	-0.05 ± 0.10^A	-0.19 ± 0.04^{Bc}	-0.12 ± 0.09^{ABab}
15:85	-0.13 ± 0.09^A	-0.18 ± 0.05^{Ac}	-0.10 ± 0.10^{Aab}
25:75	-0.15 ± 0.08^A	-0.08 ± 0.05^{Aab}	-0.13 ± 0.03^{Aab}
37:63	-0.14 ± 0.07^A	-0.15 ± 0.02^{Ac}	-0.20 ± 0.07^{Ab}
50:50	-0.09 ± 0.11^A	-0.14 ± 0.01^{Abc}	-0.15 ± 0.05^{Aab}

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

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

ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๗ ปริมาณน้ำมันที่คำนวณได้ (oil load) ของไมโครแคปซูลจากการทำแก๊สอิมัลชัน ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณของแข็งทั้งหมดใน อิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณน้ำมันที่คำนวณได้ (กรัม/100 กรัม ไมโครแคปซูล)
20	24.50
30	16.33
40	12.25

หมายเหตุ ปริมาณน้ำมัน (oil load) ที่คำนวณได้จาก

$$oil\ load = \left[\frac{\text{น้ำหนักน้ำมัน}}{\text{น้ำหนักผงที่ได้จากการทำแก๊ส}} \right] \times 100$$

โดยที่ ปริมาณน้ำมันในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และน้ำหนักผงไมโครแคปซูล (ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 2) ที่ได้จากการทำแก๊สอิมัลชัน 100 กรัม ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 20.41, 30.61, 40.82 กรัม ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ ๑๘ ประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติมวัตถุ
ก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน และ
ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ประสิทธิภาพในการกักเก็บ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	87.34±0.51 ^{Cd}	91.41±0.33 ^{Bd}	94.46±0.14 ^{Ad}
5:95	87.32±0.57 ^{Cd}	92.97±0.10 ^{Bc}	94.74±0.33 ^{Ad}
10:90	87.67±0.79 ^{Cd}	93.09±0.25 ^{Bc}	95.13±0.27 ^{Ac}
15:85	87.56±0.50 ^{Cd}	93.48±0.83 ^{Babc}	95.20±0.19 ^{Ac}
25:75	89.41±0.27 ^{Cc}	93.28±0.17 ^{Bbc}	95.73±0.25 ^{Ab}
37:63	90.55±0.95 ^{Cb}	93.74±0.17 ^{Bab}	96.25±0.23 ^{Aa}
50:50	92.36±0.46 ^{Ca}	94.04±0.12 ^{Ba}	96.47±0.35 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ
โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง
ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๑๙ ประสิทธิภาพในการกักเก็บของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เติม
วัตถุก่อผนังผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์-
ทริน และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของแลกโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	ประสิทธิภาพในการกักเก็บ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	87.34±0.51 ^{Ca}	91.41±0.33 ^{Bc}	94.46±0.14 ^{Ac}
5:95	88.20±1.23 ^{Ca}	91.14±0.91 ^{Bc}	94.68±0.33 ^{Ac}
10:90	89.20±0.63 ^{Ca}	92.66±1.25 ^{Bb}	94.78±0.33 ^{Abc}
15:85	88.59±1.70 ^{Ba}	93.78±0.46 ^{Aab}	94.50±0.10 ^{Ac}
25:75	89.48±1.26 ^{Ba}	94.18±0.64 ^{Aa}	94.98±0.38 ^{Abc}
37:63	89.15±2.38 ^{Ba}	93.66±0.71 ^{Aab}	95.26±0.47 ^{Ab}
50:50	88.95±1.15 ^{Ca}	93.50±0.91 ^{Bab}	96.01±0.37 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ
โดยน้ำหนักของแลกโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง
ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ 10 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิม
วัตถุอ่อนนุ่มผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทริน
และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละ โดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	การกระจายตัวของไมโครแคปซูล (ร้อยละ)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	41.99±1.68 ^{Ce}	61.82±0.32 ^{Bc}	77.60±2.06 ^{Ae}
5:95	52.27±0.25 ^{Cd}	73.51±0.15 ^{Bb}	80.49±0.69 ^{Ad}
10:90	58.29±0.48 ^{Cc}	74.24±0.36 ^{Bb}	90.11±1.41 ^{Ac}
15:85	62.28±0.65 ^{Cb}	77.22±2.52 ^{Bb}	91.67±0.70 ^{Abc}
25:75	63.47±0.21 ^{Cab}	81.36±1.80 ^{Ba}	93.50±1.23 ^{Ab}
37:63	65.13±3.35 ^{Cab}	82.31±0.70 ^{Ba}	95.61±1.86 ^{Aa}
50:50	66.36±5.54 ^{Ca}	84.81±6.23 ^{Ba}	96.68±0.41 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ
โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)

ตัวอักษร a-e หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง
ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)

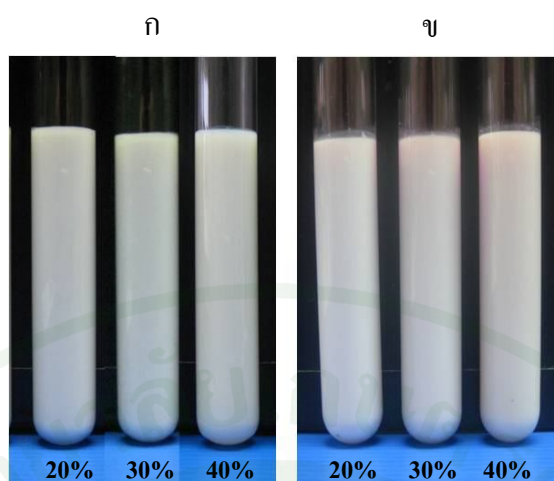
ตารางผนวกที่ ค11 การกระจายตัว (Dispersibility) ของไมโครแคปซูลจากการทำแห้งอิมัลชันที่เดิม
วัตถุอ่อนนุ่มผสมที่มีปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์-
ทรินและปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ

ปริมาณร้อยละ โดย น้ำหนักของแล็กโทส ต่อมอลโทเด็กซ์ทริน	การกระจายตัวของไมโครแคปซูล (ร้อยละ)		
	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	20	30	40
0:100	41.99±1.68 ^{Ce}	61.82±0.32 ^{Bc}	77.60±2.06 ^{Ae}
5:95	52.27±0.25 ^{Cd}	73.51±0.15 ^{Bb}	80.49±0.69 ^{Ad}
10:90	58.29±0.48 ^{Cc}	74.24±0.36 ^{Bb}	90.11±1.41 ^{Ac}
15:85	62.28±0.65 ^{Cb}	77.22±2.52 ^{Bb}	91.67±0.70 ^{Abc}
25:75	63.47±0.21 ^{Cab}	81.36±1.80 ^{Ba}	93.50±1.23 ^{Ab}
37:63	65.13±3.35 ^{Cab}	82.31±0.70 ^{Ba}	95.61±1.86 ^{Aa}
50:50	66.36±5.54 ^{Ca}	84.81±6.23 ^{Ba}	96.68±0.41 ^{Aa}

หมายเหตุ ตัวอักษร A-C หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ
โดยน้ำหนักของแล็กโทสต่อมอลโทเด็กซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)
ตัวอักษร a-c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง
ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวตั้ง)



ภาคผนวก ง
สมบัติของอิมัลชันน้ำมันปลาท่อนำก่อนการทำแห้ง
และอิมัลชันคืนรูปจากไมโครแคปซูล (Reconstituted emulsion)
และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ



ภาพผนวกที่ ๑1 ลักษณะปรากฏของอิมัลชันก่อนการทำให้แห้ง (ก) และอิมัลชันคืนรูปจากการละลาย ไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์-ทรินเท่ากับ 25:75

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าศักย์รีดักซ์ที่ผิวของน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันที่ขึ้นรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเดกซ์ทริน ^{ns}	ค่าศักย์รีดักซ์ที่ผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน (มิลลิโวลต์)	
	ก่อนการทำแห้ง ^{ns}	ขึ้นรูปจาก ไมโครแคปซูล ^{ns}
0:100	54.70±0.31	53.30±2.22
5:95	54.10±0.44	53.22±2.74
10:90	54.14±0.64	53.31±1.51
15:85	54.68±0.74	53.13±1.74
25:75	55.20±0.66	53.25±2.29
37:63	54.73±1.28	53.09±1.93
50:50	54.80±0.74	53.17±1.37

หมายเหตุ ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน) และที่อิมัลชันชนิดเดียวกัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๑๒ ค่าศักย์รีดักซ์ที่ผิวของน้ำมันของอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคืนรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 25:75

ปริมาณของแข็งทั้งหมด ในอิมัลชัน ^{ns} (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าศักย์รีดักซ์ที่ผิวอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน (มิลลิโวลต์)	
	ก่อนการทำแห้ง ^{ns}	คืนรูปจาก ไมโครแคปซูล ^{ns}
20	55.14±0.83	53.90±2.07
30	55.20±0.66	53.04±1.30
40	54.13±0.80	53.74±1.43

หมายเหตุ ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวนอน) และที่อิมัลชันชนิดเดียวกัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ 33 ขนาดหยดน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั่นรูปจากการละลาย ไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทริน ต่างๆ ได้แก่ 0:100 5:95 10:90 15:85 25:75 37:63 และ 50:50 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของซูโครส ต่อมอลโทเดกซ์ทริน	ขนาดอนุภาคหยดน้ำมันในอิมัลชัน (ไมโครเมตร)	
	คั่นรูปจาก	
	ก่อนการทำแห้ง ^{ns}	ไมโครแคปซูล ^{ns}
0:100	0.77±0.03 ^B	0.89±0.07 ^A
5:95	0.79±0.01 ^B	0.88±0.08 ^A
10:90	0.80±0.04 ^B	0.83±0.02 ^A
15:85	0.79±0.05 ^B	0.86±0.06 ^A
25:75	0.78±0.03 ^B	0.85±0.08 ^A
37:63	0.78±0.04 ^B	0.86±0.02 ^A
50:50	0.77±0.03 ^B	0.87±0.09 ^A

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเดกซ์ทรินเดียวกัน (แนวนอน)
ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่อิมัลชันชนิดเดียวกัน (แนวตั้ง)

ตารางผนวกที่ ๔๔ ขนาดหยคน้ำมันในอิมัลชันก่อนการทำแห้ง (ก) และอิมัลชันคั้นรูปจากการละลาย ไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโท-เด็คซ์ทรินเท่ากับ 25:75

ปริมาณของแข็งทั้งหมด ในอิมัลชัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ขนาดอนุภาคหยคน้ำมันในอิมัลชัน (ไมโครเมตร)	
	คั้นรูปจาก	
	ก่อนการทำแห้ง ^{ns}	ไมโครแคปซูล ^{ns}
20	0.80±0.02 ^B	1.03±0.05 ^A
30	0.78±0.03 ^B	0.85±0.08 ^A
40	0.76±0.03 ^B	0.87±0.06 ^A

หมายเหตุ ตัวอักษร A-B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในอิมัลชันเท่ากัน (แนวนอน)
ตัวอักษร ns หมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่อิมัลชันชนิด เดียวกัน (แนวตั้ง)



ภาพผนวกที่ ๓2 โครงสร้างระดับจุลภาคของอีพ็อกซีก่อนการทำแข็ง (ก) และอีพ็อกซีคืนรูปจากการละลายไมโครแคปซูล (ข) ที่ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซูโครสต่อมอลโทเด็คซ์ทริน เท่ากับ 0:100 และ 25:75 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในอีพ็อกซีเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิรพร สวัสดิการ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 กรกฎาคม 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	พนักงานมหาวิทยาลัย (สายวิชาการ)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุน มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี