ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)

ปริญญา

พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร — **สาขา**

พัฒนาผลิตภัณฑ์ — **ภาควิชา**

เรื่อง ผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ในการเอนแคปซูเลชันสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

Effect of Polyglycerol Polyricinoleate and Biopolymers on the Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract

นามผู้วิจัย นางสาวเบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(อาจารย์เทพกัญญา หาญศิลวัต, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิษฐิดา จันทราพรชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญอร ไหมสุทธิสกุล, ปร.ด.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์อนุวัตร แจ้งชัด, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน ..... เดือน ..... พ.ศ .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ใน การเอนแคปซูเลชันสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

Effect of Polyglycerol Polyricinoleate and Biopolymers on the Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract

โดย

นางสาวเบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์ 2557: ผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ในการเอนแคปซูเลชันสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร) สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์เทพกัญญา หาญศีลวัต, ปร.ด. 108 หน้า

สารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (mango seed kernel extract, MSKE) เป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน แต่สารสกัดเหล่านี้ไม่คงตัวต่อสภาวะแวดล้อม เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันสามารถช่วยแก้ปัญหาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบเอนแคปซูเลชัน MSKE ในอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) และทำเป็นผงเอนแคปซูเลท MSKE ด้วยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ในขั้นแรกศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของ MSKE พบว่า ปริมาณผลผลิตที่ได้ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของ MSKE มีค่าร้อยละ 6.27, 400.14 mg GAE/g และ 11.14 µg/ml ตามลำดับ ต่อมาศึกษาผลของเจลาตินและโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE โดยในสารละลายผสมประกอบด้วย เจลาติน (ร้อยละ 0-5), MSKE (ร้อยละ 1) และ NaCl (0 หรือ 100 mM) พบว่า ในทุกความเข้มข้นของสารละลายผสมที่ไม่เติม NaCl มีการละลายอย่างสมบูรณ์ แต่ในสารละลายผสมที่เติม NaCl ที่มีเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 มีตะกอนเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาในระบบอิมัลชัน พบว่า การเติม NaCl ในเฟสน้ำภายในมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน แต่ไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการ เอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency, EE) ในขณะที่อิมัลชันที่เฟสน้ำภายในมีเจลาตินร้อยละ 1, MSKE ร้อยละ 1 และมี NaCl มีอนุภาคขนาดใหญ่ และให้ค่า EE ต่ำ ต่อมาศึกษาผลของความเข้มข้นของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR) และไบโอพอลิเมอร์ (เจลาตินและโซเดียมอัลจิเนต) ในอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE พบว่า PGPR มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน และ EE การที่มีไบโอพอลิเมอร์ในเฟสน้ำภายในทำให้ค่า EE เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากความหนืดของสารละลายไบโอพอลิเมอร์ในเฟสน้ำภายในที่เพิ่มขึ้นหรืออันตรกิริยาระหว่างไบโอพอลิเมอร์กับ MSKE โดยระบบที่มีค่า EE มากกว่าร้อยละ 90 ประกอบด้วย อิมัลชันที่เฟสน้ำภายในมีเจลาตินร้อยละ 1-5 ร่วมกับ PGPR ร้อยละ 4-8 และอิมัลชันที่เฟสน้ำภายในมีโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 0.5-1.5 ร่วมกับ PGPR ร้อยละ 8 สุดท้ายได้คัดเลือกอิมัลชันที่มีเจลาตินร้อยละ 1 ในเฟสน้ำภายในและ PGPR ร้อยละ 4 มาศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโต-เดกซ์ตริน (ร้อยละ 10-30) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของอิมัลชันและผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อขนาดอนุภาคและความหนืดของอิมัลชัน แต่ไม่มีผลต่อค่า EE เมื่อพิจารณาผลของมอลโตเดกซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์-ตรินเพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความสามารถในการละลาย, ค่า L* และปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE เพิ่มขึ้น แต่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้, a*, b*, chroma, hue angle, สารประกอบทางชีวภาพทั้งหมด และ EE ลดลง

_____ _____ __/__/__

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Benjarat Tepsongkroh 2014: Effect of Polyglycerol Polyricinoleate and Biopolymers on the Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract. Master of Science (Agro-Industrial Product Development), Major Field: Agro-Industrial Product Development, Department of Product Development. Thesis Advisor: Mrs. Thepkunya Harnsilawat, Ph.D. 108 pages.

Mango seed kernel extract (MSKE) is a good source of phenolic antioxidants but it is unstable to environmental conditions. Encapsulation technology offers the opportunity to solve it**.** Therefore, the objective of this study was to develop a system for encapsulating MSKE in W/O/W emulsions and producing encapsulated MSKE powder by spray drying. Initially, physicochemical characteristics of MSKE were studied. It found that the yield, total phenolic content and IC_{50} of MSKE were 6.27 %, 400.14 mg GAE/g and 11.14 µg/ml, respectively. Second, the influence of gelatin and NaCl in W/O/W emulsions containing MSKE was studied. In the mixture solutions containing gelatin (0-5 %), MSKE (1 %) and NaCl (0 or 100 mM), it was found that in the absence of NaCl, all mixture solutions were completely dissolved while in the presence of NaCl, mixture solutions containing 1% gelatin had precipitates. Considering the emulsion systems, the results showed that the presence of NaCl in the inner aqueous phase affected the stability of emulsions but did not affect the encapsulation efficiency (EE) values while the emulsion with the inner aqueous phase containing 1 % gelatin, 1 % MSKE and NaCl showed large droplet sizes and gave low EE. Third, the influence of polyglycerol polyricinoleate (PGPR) and biopolymers (gelatin and sodium alginate) concentration in W/O/W emulsions containing MSKE was studied. The results showed that PGPR affected the stability of the emulsions and EE. The presence of biopolymers in the inner aqueous phase of W/O/W emulsions increased EE. This may be due to the increase in the viscosity of biopolymers solution in the inner aqueous phases or the interaction between biopolymers and MSKE. Higher EE (more than 90 %) could be obtained when W/O emulsions stabilized by 1-5 % gelatin in inner aqueous phases were incorporated with 4-8 % PGPR, while sodium alginate required by 0.5-1.5 % sodium alginate in inner aqueous phases were incorporated with 8 % PGPR. Finally, the emulsions which contained 1 % gelatin in the inner aqueous phase and 4 % PGPR was selected to study the effect of maltodextrin (MD) concentration (10-30 %) on physicochemical properties of emulsions and encapsulated MSKE powder. It was found that MD concentration had an effect on the droplet size and viscosity of emulsions but did not affect EE. When considering the effect of MD on physicochemical properties of encapsulated MSKE powder, the results showed that increasing MD increased water solubility, L* values and surface bioactive compound but decreased water activity, a*, b*, chroma, hue angle, total bioactive compound and EE.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ผศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล และ อาจารย์ ผศ.ดร. วิษฐิดา จันทราพรชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ผศ.ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ อาจารย์ ดร. วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ ประธานกรรมการสอบที่กรุณาตรวจแก้ไขและให้คำแนะนำเพิ่มเติม เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์เพื่อสนับสนุนงบประมาณในงานวิจัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องแลป 229 (พี่แอน เจ๊แยม น้องกิ๊ก น้องแอม) ที่คอยให้ความช่วยเหลือในรูปแบบต่างๆ คำชี้แนะและอยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจให้กัน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ปริญญาโท และรุ่นพี่ปริญญาเอกทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำที่ดีมากมาย

ขอขอบพระคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ กำลังใจ แรงใจและความเข้าใจ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอมอบส่วนดีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้แก่อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้เพียงผู้เดียว

เบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์

มีนาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	88
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	90
ภาคผนวก	105
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	108

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงแห้ง	6
2	ประเภทของสารประกอบฟีนอลิก	7
3	การประยุกต์ใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรม	11
4	การใช้อิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ไม่ขั้วในกระบวนการเอนแคปซูเลชัน	21
5	สมบัติของสารห่อหุ้ม (wall materials) ที่นิยมใช้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอย	30
6	ค่าทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์	52
7	ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และNaCl ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40X	59
8	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ในอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ NaCl	60
9	ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR	61
10	Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR	66
11	Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR	66
12	ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR	69
13	Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR	73
14	Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR	73
15	สมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย	84

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สารต้านอนุมูลอิสระประเภทพอลิฟีนอลและสารฟีนอลิกที่พบในเนื้อในเมล็ดมะม่วง	5
2	โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์	8
3	แผนภาพแสดงลักษณะการเอนแคปซูเลชัน	10
4	การเอนแคปซูเลชันด้วยวิธีอิมัลชันเชิงซ้อนก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย	11
5	อิมัลชันเชิงซ้อนชนิด W/O/W	12
6	การเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W	13
7	การสูญเสียความคงตัวทางกายภาพของอิมัลชัน	16
8	ลักษณะการรักษาความคงตัวโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในอิมัลชัน (ก) การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำและน้ำมัน (ข) การเกิดเจล และ (ค) การเกาะกลุ่ม	19
9	โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต	33
10	โครงสร้างทางเคมีของ PGPR	33
11	การศึกษาผลของ PGPR และไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ในอิมัลชันชนิด W/O/W และผงเอนแคปซูเลท MSKE	51
12	ความขุ่นของสารละลายผสมที่มีเจลาติน MSKE และNaCl	56
13	ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และNaCl	57
14	ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ NaCl	58
15	ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR	63
16	ความหนืดของสารละลายเจลาตินที่มีเจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}	64
17	ความหนืดปรากฏของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}	65

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100X (สเกลบาร์ 10 µm)	67
19	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR	68
20	ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชนิด W/O/W (ข) ที่มีโซเดียม-อัลจิเนต MSKE และ PGPR	70
21	ความหนืดของสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีโซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}	72
22	ความหนืดปรากฏของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}	72
23	ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100X (สเกลบาร์ 10 µm)	74
24	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียม-อัลจิเนต MSKE และ PGPR	76
25	ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	78
26	ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	79
27	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโต-เดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	80
28	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงเอนแคปซู-เลท MSKE ที่ความเข้มข้นมอลโตเดกซ์ตริน (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 20 (ค) ร้อยละ 30 ที่กำลังขยาย 1,000X	85
29	ปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมดของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	86

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ปริมาณสารประกอบชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	87
31	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ	87

ภาคผนวกที่

1	กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกสำหรับการตรวจสอบสมบัติต้านออกซิเดชันโดยเทคนิค total phenolic assay	106
2	ลักษณะการกระจายแบบปกติ (monomodal) ของอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O ที่มี (ก) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 4 ในเฟสน้ำมันและเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 ในเฟสน้ำภายใน (ข) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 ในเฟสน้ำมันและโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในเฟสน้ำภายใน	106
3	ลักษณะการกระจายแบบ polymodal ของอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี (ก) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 4 ในเฟสน้ำมันและเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 ในเฟสน้ำภายใน (ข) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 ในเฟสน้ำมันและโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในเฟสน้ำภายใน	107

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ใน การเอนแคปซูเลชันสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

Effect of Polyglycerol Polyricinoleate and Biopolymers on the Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract

คำนำ

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) นับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งในประเทศไทย โดยมีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากจีนและอินเดีย (FAOSTAT, 2011) มะม่วงที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ที่เป็นที่รู้จักกันดี โดยเฉพาะมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมนำไปแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถหาได้ในทุกฤดูกาล จากการศึกษางานวิจัย พบว่า มะม่วงมีส่วนที่เป็นเมล็ดประมาณร้อยละ 10 ถึง 25 จากผลมะม่วงทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์มะม่วง และมีเนื้อในเมล็ดมะม่วงประมาณร้อยละ 45 ถึง 75 จากเมล็ดมะม่วงทั้งหมด (Arogba, 1997; Hemavathy *et al.,*1998) โดยมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์จะมีน้ำหนักของเมล็ดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงพันธุ์ต่างๆ ทั้งนี้ได้มีการศึกษาสมบัติของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (mango seed kernel extract; MSKE) สายพันธุ์โชคอนันต์ พบว่า สารสกัดจากเนื้อในของเมล็ดมะม่วงประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกและเป็นแหล่งสารต้านออกซิเดชันจากธรรมชาติที่ดี (Abdalla *et al.,* 2007; Puravankara *et al.,* 2000) อีกทั้งสารสกัดที่ได้ยังมีความสามารถในการคีเลตกับโลหะและยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสได้ (Maisuthisakul and Gordon, 2009) ทั้งนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับสารสกัดจากพืชหรือสมุนไพรต่างๆ มักศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการสกัดสารเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตและมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด (Kähkönen *et al.,* 1999; Maisuthisakul and Gordon, 2009; Hirose *et al.,* 2010) แต่งานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาหรือการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อให้การนำสารสกัดไปใช้ได้ง่ายขึ้นยังมีน้อย (Maisuthisakul and Harnsilawat, 2010; Wanthong *et al.,* 2011) เนื่องจากสารสกัดเหล่านี้ไม่คงตัวต่อสภาวะแวดล้อม เช่น แสง ความร้อน ความชื้น เป็นต้น ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวนี้จึงมีแนวคิดในการแก้ไขปัญหา โดยใช้เทคโนโลยีการเอนแคปซูเลชันเพื่อปกป้องสารสกัดจากสภาวะแวดล้อมและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้ เอนแคปซูเลชัน (encapsulation) เป็นกระบวนการที่ใช้ห่อหุ้มสารที่ไวต่อการสลายตัว ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาสารเหล่านั้นได้ สามารถทำได้หลายวิธีแต่เทคนิคการเตรียมเป็นอิมัลชันเชิงซ้อนและการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการที่นิยมใช้ (Reineccius, 2004; Colmenero, 2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิมัลชันเชิงซ้อนชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (water-in-oil-in-water emulsions; W/O/W) มีลักษณะที่อนุภาคของเฟสที่กระจายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าหลายอนุภาคกระจายอยู่ในเฟสภายในแต่ละอนุภาคใหญ่จะมีโครงสร้างคล้ายถุงเล็กๆ (vesicular structure) ที่มีส่วนของเฟสของเหลวชนิดเดียวหรือหลายชนิดแยกจากกันโดยชั้นของเฟสน้ำมัน (Garti, 1997) การใช้อิมัลชันชนิด W/O/W มีเป้าหมายเพื่อใช้เฟสน้ำมันที่อยู่ระหว่างเฟสน้ำเป็นตัวป้องกันการแพร่ของสาร จึงสามารถควบคุมอัตราการปลดปล่อยสารภายในไปสู่ภายนอกได้ (Garti, 1997) โดยปกติในอิมัลชันชนิด W/O/W มักพบปัญหาในเรื่องความไม่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิกส์ มีการรวมตัวกันของอนุภาค และสารที่ถูกเอนแคปซูเลชันในเฟสน้ำภายในมีการปลดปล่อยออกมา ดังนั้นจึงมีการพัฒนาความคงตัวและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันให้ดีขึ้น (Pays *et al.,* 2001; Benichou *et al.,* 2004; Surh *et al*., 2007; Su *et al.,* 2008) โดยอาจเพิ่มความหนืดในเฟสน้ำภายใน ปรับเปลี่ยนองค์ประกอบในเฟสน้ำมัน เพิ่มความคงตัวในเฟสภายในและภายนอกโดยการเติมพอลิเมอริกอิมัลซิ-ไฟเออร์หรือไบโอพอลิเมอร์เพื่อให้มีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมัน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ทำการศึกษาการทำให้เฟสน้ำภายในมีความหนืด มีลักษณะเป็นเจล และลดการใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่เป็นสารสังเคราะห์ในเฟสน้ำมันโดยใช้ไบโอพอลิเมอร์ เช่น แซน-แทนกัม โซเดียมเคซิเนต เจลาติน แอลบูมิน เวย์โปรตีนไอโซเลท เป็นต้น (Evison *et al.,* 1995; Su *et al.,* 2006; Fechner *et al.,* 2007; Hemar *et al.,* 2010) นอกจากนี้การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dry) ก็เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการห่อหุ้ม โดยสามารถเปลี่ยนสารในสถานะของเหลวให้เป็นของแข็งได้ ทำให้นำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและสะดวกขึ้น สารที่นิยมใช้เป็นตัวห่อหุ้ม เช่น มอลโตเดกซ์ตริน และกัมอะราบิก ซึ่งมีสมบัติที่ละลายน้ำได้ง่าย มีความหนืดต่ำ นอกจากนี้กัมอะราบิกยังเป็นสารที่มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้ (Madene *et al*., 2006)

ดังนั้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการทำเอนแคปซูเลชัน MSKE งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบอิมัลชันชนิด W/O/W โดยเติมไบโอพอลิเมอร์ไว้ในเฟสน้ำภายในและใช้พอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลี-เอท (Polyglycerol polyricinoleate; PGPR) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในเฟสน้ำมัน เพื่อให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวและมีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันที่ดี จากนั้นจึงศึกษาผลของความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทที่ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

2. เพื่อทราบผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

3. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำและผงเอนแคปซูเลทที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

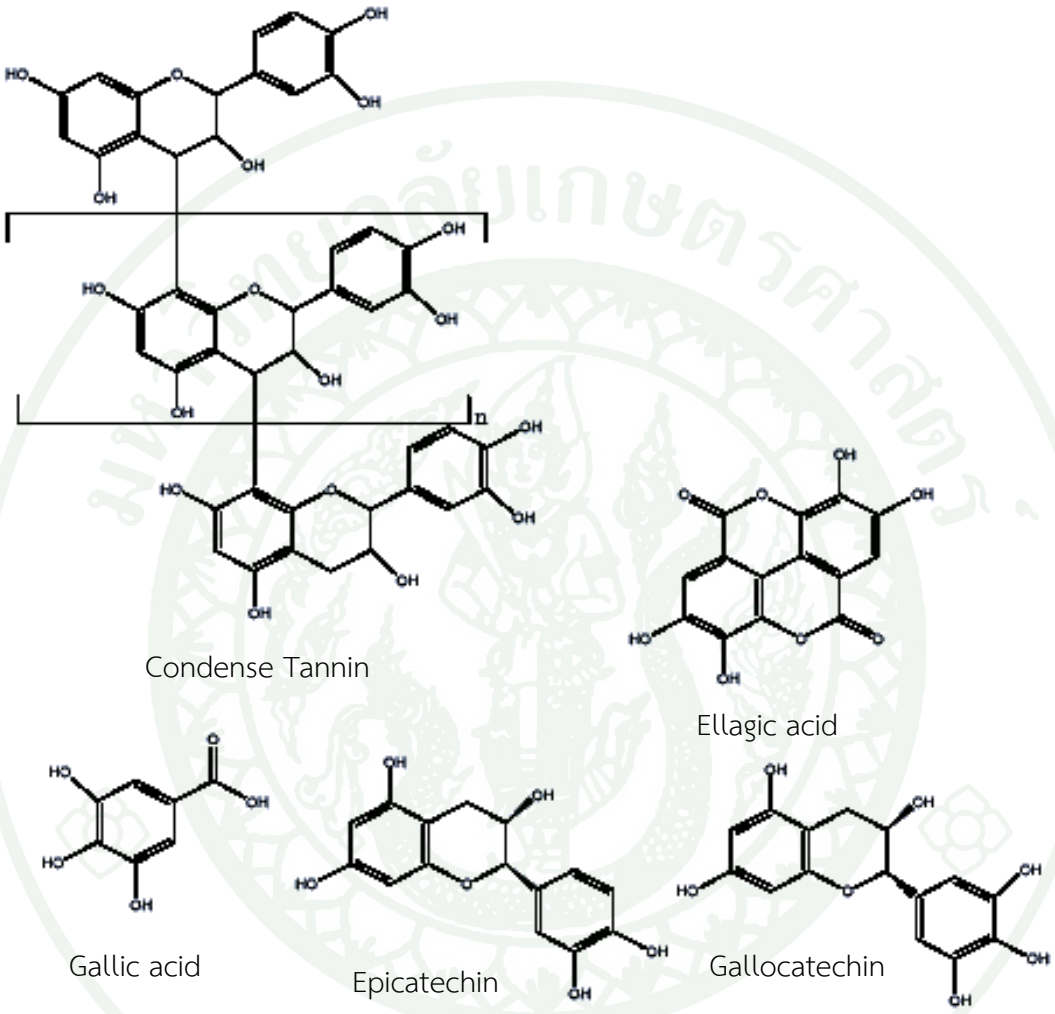
1. สารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (Mango seed kernel extract; MSKE)

มะม่วงนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย โดยมีปริมาณการผลิตมากเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากจีนและอินเดีย (FAOSTAT, 2011) มีปริมาณการผลิตประมาณ 572,000 เมตริกตันต่อปี มะม่วงทั่วโลกมีอยู่ประมาณ 793 พันธุ์ โดยมะม่วงที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ได้แก่ เขียวเสวย แรด น้ำดอกไม้ โชคอนันต์ อกร่อง ทั้งนี้การบริโภคและการแปรรูปมะม่วงในระดับอุตสาหกรรมได้ก่อให้เกิดปัญหาทางสภาพแวดล้อม อันเป็นผลมาจากการใช้เฉพาะส่วนเนื้อมะม่วงเท่านั้น ส่วนอื่นๆ ของผลมะม่วงจะถูกทิ้งเป็นขยะสูงถึงร้อยละ 40-60 โดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้แบ่งเป็นส่วนต่างๆ คือ เมล็ดมะม่วงร้อยละ 12-15 เปลือกมะม่วงร้อยละ 5-10 เศษเนื้อมะม่วงร้อยละ 5-10 เพื่อลดปัญหาขยะของเมล็ดมะม่วงจำนวนมากนี้ จึงมีการวิจัยนำเอาเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์ จากการศึกษางานวิจัย พบว่า มะม่วงมีส่วนที่เป็นเมล็ดประมาณร้อยละ 10-25 จากผลมะม่วงทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์มะม่วง และมีเนื้อในเมล็ดมะม่วงประมาณร้อยละ 45-75 จากเมล็ดมะม่วงทั้งหมด (Hemavathy *et al.,*1998; Arogba, 1997)

มะม่วงเป็นที่รู้จักเป็นอย่างดีสำหรับนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากมะม่วงมีคุณค่าทางสารอาหารสูงในทุกส่วนไม่ว่าจะเป็นใบ เปลือก ดอก ผล และเมล็ด โดยมีสารกลุ่มแทนนิน ฟลาโวนอยด์ พอลิฟีนอล และฟีนอลิก (ปราณี, 2552) (ภาพที่ 1) ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2552-2556) มีรายงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ โดยพบว่า สารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงเป็นแหล่งของสารประกอบพอลิฟีนอลที่ดี มีสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Kittiphoom, 2012) สมบัติการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส เอนไซม์นี้มีหน้าที่สร้างเม็ดสีให้ผิวหนังทำให้ผิวหนังสีเข้มขึ้น (Maisuthisakul and Gordon, 2009) สมบัติการต้านจุลินทรีย์ (Khammuang and Sarnthima, 2011) และสมบัติในการป้องกันตับจากสารพิษ (hepatoprotective activities) (Nithitanakool *et al.,* 2009) ทั้งนี้องค์ประกอบของเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูก สภาพภูมิอากาศ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพของมะม่วงพันธุ์นั้นๆ (Kalt, 2005; Yuri *et al.,* 2009) เมื่อกะเทาะเปลือกเมล็ดออกจะเห็นเนื้อในสีขาว เนื้อในของเมล็ดมะม่วงสดนั้นมีความชื้นประมาณร้อยละ 51 มีรสขม เมื่อนำไปละลายน้ำประมาณ 50 เท่าจะมีความเป็นกรดเล็กน้อย (พีเอช 5) และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลรวดเร็วเมื่อสัมผัสอากาศ แสดงถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารฟีนอลิกด้วยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิ-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เดส (Arogba *et al.,* 1998) เมื่อทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ เช่น ตากแดด หรืออบด้วยลมร้อนจะเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 9-12 และมีองค์ประกอบอื่นๆ ทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 สารต้านอนุมูลอิสระประเภทพอลิฟีนอลและสารฟีนอลิกที่พบในเนื้อในเมล็ดมะม่วง

ที่มา: ปราณี (2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะม่วงแห้ง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	5-6
ไขมัน	9-16
คาร์โบไฮเดรต	73-80
เส้นใย	2-3
เถ้า	2-3
แทนนิน	1

ที่มา: ดัดแปลงจาก Puravankara *et al.* (2000)

1.1 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารในกลุ่มสารประกอบทุติยภูมิ (secondary metabolite) (Balasundram and Sundram, 2006) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวน (aromatic ring) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เข้ามาแทนที่ ซึ่งอาจเข้ามาแทนที่ 1 หมู่ หรือมากกว่า สารประกอบฟีนอลิกสามารถจำแนกเป็นกลุ่มได้จากโครงสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ จำนวนคาร์บอน และหมู่ที่เข้ามาแทนที่ในตำแหน่งต่างๆ มีการจำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิกแล้วมากกว่า 8,000 ชนิด (Kris-Etherton *et al.*, 2002) สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ คือ กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกมักเกิดการรวมกันระหว่างโมโนและพอลิแซคคาไรด์ในลักษณะที่มีการเชื่อมต่อกัน 1 หรือ 2 กลุ่ม หรือเกิดในลักษณะเป็นอนุพันธ์กัน เช่น เอสเทอร์ และเมธิลเอสเทอร์ (Balasundram and Sundram, 2006) ผักและผลไม้เป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิก ผู้ที่บริโภคผักและผลไม้จึงได้รับประโยชน์ เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีสมบัติในการเป็นสารต้านสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้ จุลินทรีย์ การอักเสบ และอนุมูลอิสระ เป็นต้น นอกจากนี้ในส่วนของเมล็ดของผลไม้ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งยังพบว่าเป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิกจำนวนมาก เช่น ในเนื้อในของเมล็ดมะม่วงมีสารประกอบฟีนอลิกประเภทกรดแกลลิกและกรดเอลลาจิกเป็นส่วนใหญ่ (Puravankara *et al.*, 2000) ประเภทของสารประกอบฟีนอลิกสามารถจำแนกได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 ประเภทของสารประกอบฟีนอลิก

ประเภท	โครงสร้าง
Simple phenolic, benzoquinones	C_6
Hydroxybenzoic acid	C_6-C_1
Acethophenones, phelnylacetic acid	C_6-C_2
Hydroxycinnamic acid, phenylpropanoids (coumarins, isocoumains, chromones, chromenes)	C_6-C_3
Napthoquinones	C_6-C_4
Xanthones	C_6-C_1-C_6
Stilbenes, anthraquinones	C_6-C_2-C_6
Flavonoids, isoflavoniods	C_6-C_3-C_6
Lignans, neolignans	$(C_6$-$C_3)_2$
Biflavonoids	$(C_6$-C_3-$C_6)_2$
Lignins	$(C_6$-$C_3)_n$
Condensed tannins (proanthocynidins หรือ flavolans)	$(C_6$-C_3-$C_6)_n$

ที่มา: Balasundram and Sundram (2006)

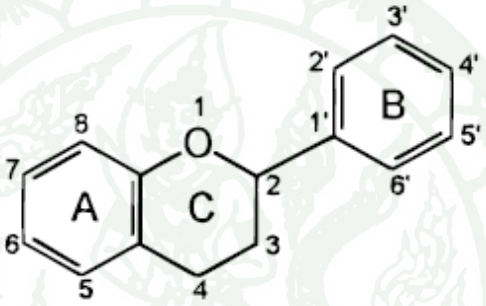
1.1.1 กรดฟีนอลิก

กรดฟีนอลิกประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อย คือ กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxybenzoic acid) และกรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acid) ซึ่งกรดไฮดรอกซี-ซินนามิกนี้ รวมถึงกรดแกลลิก (gallic acid) กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (p-hydroxybenzoic) กรดวานิลิก (vanillic acid) และกรดไซรินจิก (syringic acid) โดยปกติมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1-6 อะตอม ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารในกลุ่มกรดฟีนอลิกและเอสเทอร์ของกรดฟีนอลิกจะขึ้นกับจำนวนหมู่แทนที่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล สมบัติในการดึงอิเล็กตรอนของหมู่คาร์บอก-ซิลิกในกรดเบนโซอิกจะส่งผลให้ความสามารถในการให้ไฮโดรเจนของไฮดรอกซีเบนโซเอท (hydroxybenzoate) น้อยลง ดังนั้นจะพบว่าสารกลุ่มกรดไฮดรอกซีซินนามิกจะมีฤทธิ์ที่ดีกว่ากรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (โอภา, 2550)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1.2 ฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์เป็นสารกลุ่มหลักในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกที่พบได้ทั่วไปในผักและผลไม้ และเป็นสารที่มีผู้นิยมศึกษามากที่สุดในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก มีโครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลโพรเพน (diphenylpropane) ประกอบด้วยคาร์บอนทั้งหมด 10-15 อะตอม จัดเรียงตัวเป็นวงแหวน 3 วงเรียงต่อกัน (C6-C3-C6) ให้ชื่อว่าวงแหวน A, B และ C (Heim *et al.*, 2002) โดยฟลาโวนอยด์แต่ละกลุ่มจะมีโครงสร้างแตกต่างกันบริเวณวงแหวน C ในขณะที่สารแต่ละชนิดในกลุ่มจะมีโครงสร้างแตกต่างกันบริเวณวงแหวน A และ B (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์

ที่มา: Heim *et al.* (2002)

1.2 อนุมูลอิสระ

อนุมูลหรืออนุมูลอิสระ คือ อะตอม โมเลกุล หรือสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในออร์บิทัลวงนอกสุดที่มีระดับพลังงานสูง คำจำกัดความนี้หมายรวมถึงอะตอมของไฮโดรเจนและอิออนของโลหะทรานซิชันส่วนใหญ่ อนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเกิดโรค โดยเป็นต้นเหตุของการเกิดโรคและเป็นปัจจัยทำให้โรคมีการพัฒนาการอย่างรวดเร็วและมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวกับความเสื่อมและความบกพร่องของเซลล์ประสาทและระบบสื่อประสาทในสมอง นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการอักเสบ อนุมูลอิสระมีความไวสูงไม่คงตัวเนื่องจากมีอิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่ ดังนั้นจึงพยายามหาอิเล็กตรอนมาจับคู่เพื่อให้มีความคงตัวมากขึ้น (โอภา, 2550)

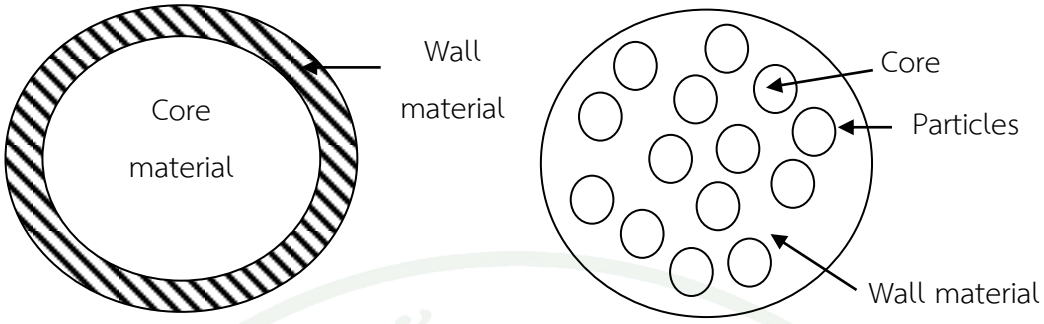
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารต้านอนุมูลอิสระหรือสารต้านออกซิเดชันจะไปยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของโมเลกุลอื่นให้ช้าลง โดยการให้อิเล็คตรอนแก่อนุมูลอิสระเพื่อให้อนุมูลอิสระเกิดความเสถียร ในขณะที่ตัวสารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดการสูญเสียอิเล็คตรอนจะยังคงความเสถียรในโครงสร้างอยู่ เนื่องจากเกิดการรีโซแนนซ์ของอิเล็คตรอนภายในโมเลกุล สารต้านอนุมูลอิสระแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น butylated hydroxyanisole (BHA) butylated hydroxytoluene (BHT) และ tertiary butyl hydroquinone (TBHQ) เป็นต้น และสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ สารพอลิฟีนอลที่พบได้ในพืชทั่วไป ซึ่งแบ่งย่อยตามลักษณะโครงสร้างภายในได้หลายชนิด ได้แก่ หมู่แทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งต่างกันทำให้สมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระต่างกัน โดยเรียงตามสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากมากไปน้อยได้ดังนี้ แทนนิน > ฟลาวานอล > ฟลาโวนอล > ฟลาโวน > กรดฟีนอลิกที่มีโครงสร้างอย่างง่าย (Kaur *et al.,* 2001)

2. เอนแคปซูเลชัน (Encapsulation)

เอนแคปซูเลชัน คือ กระบวนการที่สารเพียงหนึ่งชนิดหรือหลายชนิดถูกห่อหุ้มด้วยสารอีกชนิดหนึ่ง สารที่ถูกห่อหุ้ม เรียกว่า active หรือ core material ซึ่งอาจเป็นอนุภาคของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ส่วนสารที่เป็นตัวห่อหุ้มจะเรียกว่า shell, wall material, carrier material หรือ encapsulant (Desai and Park, 2005; Madene *et al.,* 2006) เอนแคปซูเลชันเป็นกระบวนการที่ใช้ห่อหุ้มสารที่ไวต่อการสลายตัว ป้องกันสารจากสภาวะแวดล้อม (เช่น แสง ความร้อน ความชื้น เป็นต้น) ควบคุมอัตราการปลดปล่อยของสารจากภายในสู่ภายนอก ปกปิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ของสาร ลดความเข้มข้นของสารในกรณีที่ต้องนำไปใช้ในปริมาณที่น้อย และเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาสารได้ (Gharsallaoui *et al*., 2007) แผนภาพแสดงลักษณะการเอนแคปซูเลชัน แสดงดังภาพที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

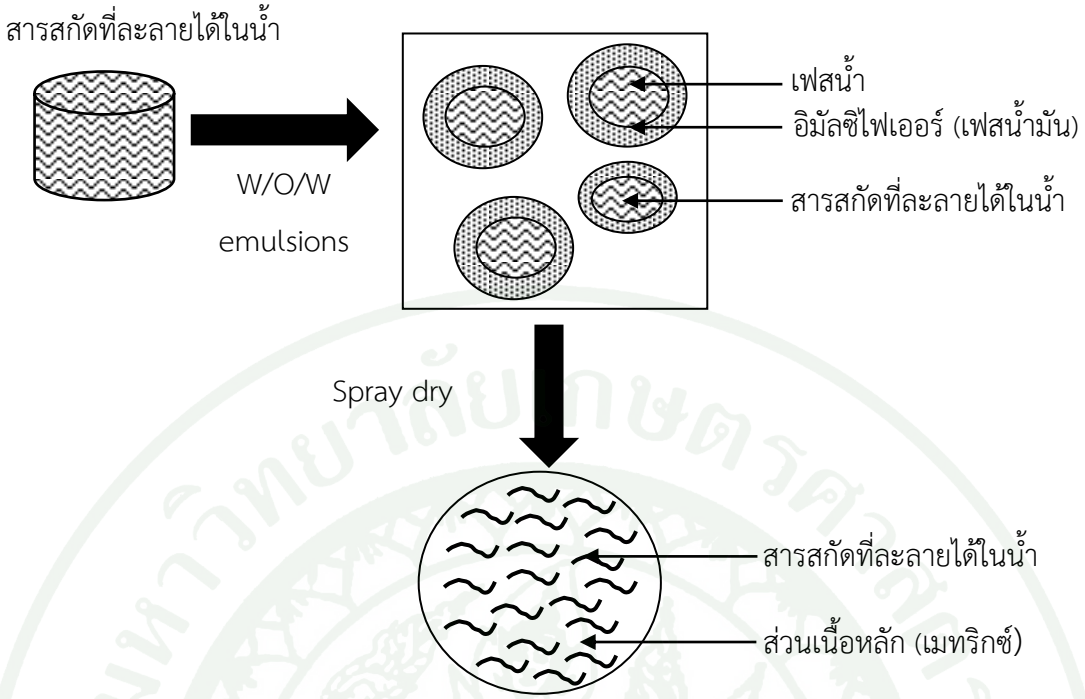


ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงลักษณะการเอนแคปซูเลชัน

ที่มา: Desai and Park (2005)

เทคนิคในการเอนแคปซูเลชันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การทำการอัดพอง (extrusion) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) การดูดซับ (adsorption) ไลโปโซม (liposome) การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dry) นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้ว เทคนิคอิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsions) ก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเช่นกัน โดยใช้ห่อหุ้มสารก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (ภาพที่ 4) การประยุกต์ใช้เทคนิคการเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 การเอนแคปซูเลชันด้วยวิธีอิมัลชันเชิงซ้อนก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Fang and Bhandari (2010)

ตารางที่ 3 การประยุกต์ใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรม

กระบวนการ	รูปแบบ	การนำไปใช้
Coacervation	Paste/ Powder/ Capsule	Chewing gum, toothpaste
Spray drying	Powder	Confectionery, milk powder, instant desserts, food flavors
Fluid bed drying	Powder/ granule	Prepared dishes, confectionery
Spray cooling/ chilling	Powder	Prepared dishes, ices
Extrusion	Powder/ granule	Instant beverage, confectionery, teas
Molecular inclusion	Powder	Confectionery, instant drinks

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madene *et al*. (2006)

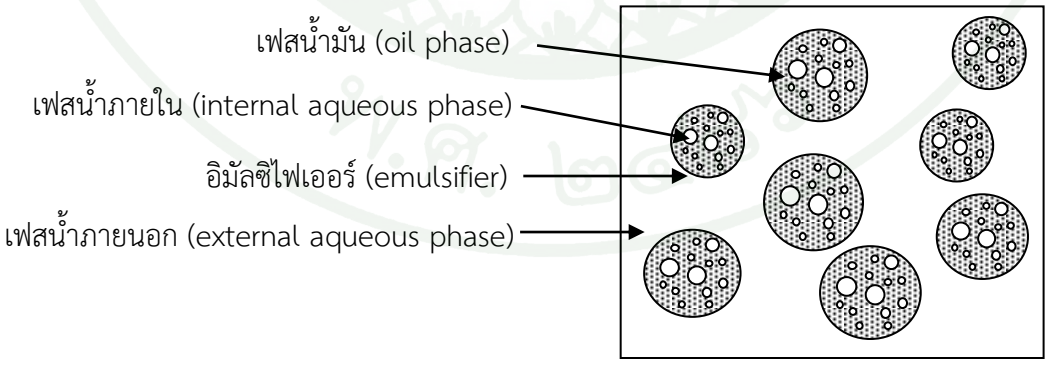
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 อิมัลชันเชิงซ้อน

2.1.1 อิมัลชัน

อิมัลชันเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในการห่อหุ้มสารสำคัญในสารละลาย ทั้งที่ละลายได้ในเฟสน้ำมันหรือเฟสน้ำโดยตรง และสามารถทำให้เป็นผงแห้งได้โดยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งหลังจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้น ระบบอิมัลชันจึงจัดได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเอนแคปซูเลชัน โดยระบบอิมัลชันจะประกอบด้วยของเหลว 2 ชนิดผสมกัน นั่นคือน้ำและน้ำมัน โดยมีของเหลวชนิดหนึ่งกระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง (McClements, 2005)

อิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsions) เป็นระบบที่ซับซ้อน เรียกอีกอย่างได้ว่าระบบอิมัลชันในอิมัลชัน (emulsion in emulsion) กล่าวคือ มีลักษณะที่อนุภาคของเฟสที่กระจายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าหลายอนุภาคกระจายอยู่ในเฟสภายใน (internal phase) แต่ละอนุภาคใหญ่จะมีโครงสร้างคล้ายถุงเล็กๆ (vesicular structure) ที่มีส่วนของเฟสของเหลวชนิดเดียวหรือหลายชนิดแยกจากกันโดยชั้นของเฟสน้ำมัน อิมัลชันเชิงซ้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (water-in-oil-in-water emulsions, W/O/W) และอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำในน้ำมัน (oil-in-water-in-oil emulsions, O/W/O) (Garti, 1997) ซึ่งลักษณะของอิมัลชันชนิด W/O/W แสดงดังภาพที่ 5

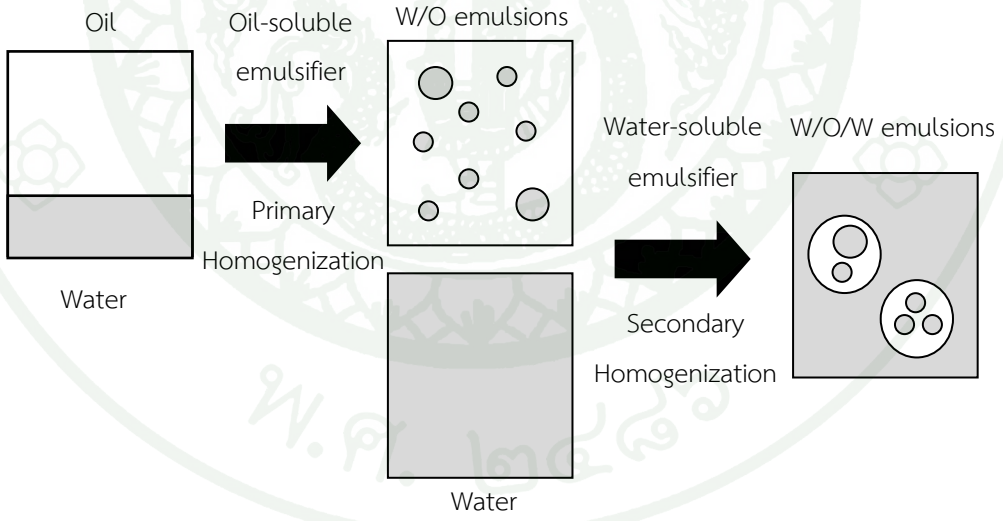


ภาพที่ 5 อิมัลชันเชิงซ้อนชนิด W/O/W

ที่มา: ดัดแปลงจาก Garti (1997)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W ประกอบด้วยวิธีการเตรียม 2 ขั้นตอน (ภาพที่ 6) ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O) มีวิธีการเตรียมโดยโฮโมจีไนซ์น้ำ น้ำมัน และอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายในน้ำมันได้เข้าด้วยกัน ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W เตรียมโดยโฮโมจีไนซ์อิมัลชันชนิด W/O น้ำและอิมัลซิไฟเออร์ที่ละลายน้ำได้เข้าด้วยกัน โฮโมจีไนซ์-เซอร์ที่ใช้เตรียมอิมัลชันมีหลายชนิด เช่น เครื่องผสมที่ใช้แรงเฉือนสูง (high shear mixer) โฮโมจีไนซ์เซอร์ชนิดวาล์วแรงดันสูง (high pressure valve homogenizer) เครื่องบด (colloid mill) โฮโมจีไนซ์เซอร์ชนิดใช้คลื่นความถี่สูง (ultrasonic homogenizer) และโฮโมจีไนซ์เซอร์ชนิดเมมเบรน (membrane homogenizer) แต่อย่างไรก็ตาม การเตรียมอิมัลชันในขั้นตอนที่ 2 ต้องใช้แรงในการโฮโมจีไนซ์น้อยกว่าในขั้นตอนแรกเพื่อป้องกันการแตกออกของอนุภาคน้ำภายในที่กระจายอยู่ในเฟสน้ำมัน ขนาดอนุภาคของน้ำในอิมัลชันชนิด W/O และขนาดอนุภาคของน้ำมันในอิมัลชันชนิด W/O/W สามารถควบคุมได้โดยการเลือกใช้ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์และสภาวะในการโฮโมจีไนซ์ ในการเตรียมอิมัลชันขั้นที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 (McClements *et al.,* 2007) โดยทั่วไป อิมัลชันชนิด W/O/W ประกอบด้วยอนุภาคชนิด W/O อยู่ภายใน ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.5-2 ไมโครเมตร และภายนอกเป็นอนุภาคชนิด W/O/W ซึ่งมีขนาด 10-60 ไมโครเมตร (Garti, 1997)



ภาพที่ 6 การเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W

ที่มา: McClements *et al.* (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของอิมัลชัน

อิมัลชันควรมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งโดยปกติอิมัลชันประกอบด้วยของเหลวสองชนิด (น้ำมันกับน้ำ) ที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าของเหลวทั้งสองชนิดนี้ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน อิมัลชันที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัวจึงต้องใช้อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคอิมัลชันรวมตัวกัน ทำให้อนุภาคอิมัลชันสามารถกระจายตัว และคงตัวอยู่ในตัวกลางได้ ความไม่คงตัวทางกายภาพของอิมัลชันมักเกิดจากเฟสกระจายในอิมัลชัน เช่น ขนาดอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในอาหารจะอยู่ในช่วง 0.1-100 ไมโครเมตร (McClements *et al.,* 2009) ดังนั้นการพิจารณาสมบัติทางกายภาพของอิมัลชันจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอิมัลชันมีดังนี้

ก. สมบัติทางรีโอโลจี (rheology)

อิมัลชันจะมีสมบัติทางรีโอโลจีที่หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ ลักษณะโครงสร้าง และการมีอัตรกิริยาระหว่างอนุภาคในอิมัลชัน อิมัลชันสามารถแสดงลักษณะคล้ายของแข็งได้ เช่น มีสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) และเป็นพลาสติก (plasticity) (McClements, 2005) เมื่อผสมน้ำมันกับน้ำเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดอิมัลชัน ความหนืดของอิมัลชันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเสียดสีกันของอนุภาคน้ำมัน ด้วยเหตุนี้ถ้าอนุภาคน้ำมันมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความหนืดของอิมัลชันก็จะเพิ่มขึ้น (ณรงค์, 2538) โดยทั่วไปแล้ว ความหนืดของอิมัลชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยความหนืดของอิมัลชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน (flocculate) ทำให้เฟสต่อเนื่องถูกกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างที่เกิดการรวมตัวกัน นอกจากนี้อิมัลชันมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning นั่นคือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดลดลงมักพบได้ในอิมัลชันที่มีอนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากขณะเพิ่มอัตราเฉือนจะเกิดการเสียสภาพโครงสร้างที่เกาะกลุ่มกัน (McClements, 2007) สำหรับอิมัลชันที่เข้มข้นมากความหนืดจะเป็นแบบนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian) ค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคในเฟสกระจายด้วย (ณรงค์, 2538)

ข. สมบัติทางการมองเห็น (optical properties)

สมบัติทางการมองเห็นที่สำคัญส่วนใหญ่ของอิมัลชัน คือ ลักษณะทึบแสงและค่าสี ซึ่งคุณลักษณะที่ใช้ในการอธิบายค่าสี เช่น ค่าในระบบ L* a* b* (McClements, 2005)

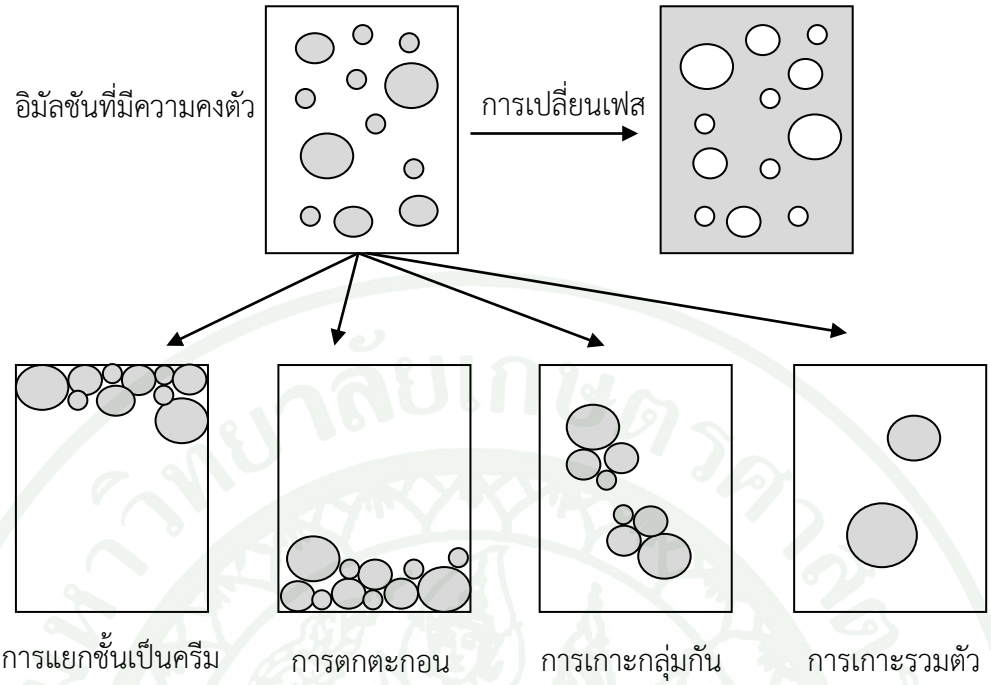
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่า L* แสดงค่าความสว่าง a* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีแดง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีเขียว และ b* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีเหลือง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีน้ำเงิน สำหรับลักษณะทึบแสงของอิมัลชันสามารถอธิบายได้ด้วยค่าความสว่าง ขณะที่ความเข้มของค่าสีอธิบายได้ด้วยค่าโครมา (chroma) : $C=(a^{*2}+ b^{*2})^{1/2}$ ค่าความเข้มของสีมักจะสวนทางกับค่าความสว่าง เช่น เมื่อค่าความสว่างเพิ่มขึ้นค่าโครมาจะลดลง สมบัติทางการมองเห็นของอิมัลชันส่วนใหญ่แล้ว สามารถพิจารณาได้จากค่าความสัมพันธ์ของดัชนีในการหักเหแสง (refractive index) ของความเข้มข้นของอนุภาคและขนาดอนุภาค(McClements, 2005) ค่าความสว่างของอิมัลชันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าดัชนีการหักเหแสงเพิ่มขึ้น สำหรับอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) จะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคน้ำมันจากความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นขึ้นจะมีผลต่อลักษณะปรากฏโดยรวมของอิมัลชัน ทำให้มีผลต่อการพิจารณาการนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารได้ ตัวอย่างอาหารที่มีลักษณะโปร่งใสหรือมีความขุ่นเพียงเล็กน้อย เช่น น้ำอัดลมและเครื่องดื่มน้ำผลไม้ ส่วนอาหารที่มีลักษณะทึบแสง เช่น น้ำสลัด ซอส มายองเนส (McClements, 2007)

ค. ความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability)

อิมัลชันเปนระบบที่ไมคงตัวทางเทอรโมไดนามิกส์ เนื่องจากระบบตองการพลังงานอิสระในการเพิ่มพื้นที่ผิวระหวางเฟสของน้ำและน้ำมัน ดังนั้นเมื่อเวลาผานไป ระบบอิมัลชันจะเกิดการแยกชั้นขึ้น ซึ่งประกอบดวยชั้นของน้ำมันที่ดานบนซึ่งเปนชั้นที่มีความหนาแนนต่ำ และชั้นของน้ำที่มีความหนาแนนสูงที่ดานลาง ดังนั้นความคงตัวของอิมัลชัน หมายถึง ความสามารถของอิมัลชันในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่างๆ ของระบบเมื่อเวลาผ่านไป (McClements, 2005) ตัวอย่างการสูญเสียความคงตัวด้านกายภาพแสดงดังภาพที่ 7 ได้แก่ การแยกชั้นครีม (creaming) การตกตะกอน (sediment) การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค (flocculation) การรวมกันของอนุภาค (coalescence) การเปลี่ยนเฟส (phase inversion) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 การสูญเสียความคงตัวทางกายภาพของอิมัลชัน

ที่มา: ดัดแปลงจาก McClements (2005)

ตัวอย่างความไม่คงตัวของอิมัลชันทางกายภาพ ได้แก่

1) การแยกเป็นชั้นครีม (creaming) และการตกตะกอน (sediment) เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคที่กระจายตัว และความหนาแน่นของของเหลวที่ล้อมรอบ โดยในระบบอิมัลชันชนิด O/W เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคของน้ำมันซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนเกิดเป็นชั้นครีมขึ้น ในขณะที่ระบบอิมัลชันชนิด W/O ส่วนที่กระจายตัว คือ อนุภาคน้ำซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะรวมตัวกันอยู่ด้านล่างของอิมัลชัน

2) การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค (flocculation) คือ การเกาะกันระหว่างอนุภาคตั้งแต่ 2 อนุภาคขึ้นไปโดยที่แต่ละอนุภาคยังคงลักษณะเดิมอยู่ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิมัลชัน โดยอาจทำให้เกิดลักษณะที่ต้องการหรือไม่ต้องการแก่ผลิตภัณฑ์ เช่น ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น ป้องกันการเกิดครีมและตะกอน เพิ่มเนื้อสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3) การรวมตัวกันของอนุภาค (coalescence) คือ การที่อนุภาคตั้งแต่ 2 อนุภาคขึ้นไปรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้อิมัลชันแยกชั้นเป็นครีมหรือตกตะกอนได้เร็วขึ้นเนื่องจากเป็นการเพิ่มขนาดให้กับอนุภาคในส่วนเฟสที่กระจายและยังเป็นการเร่งให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oiling off) ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำด้วย

4) การเปลี่ยนเฟส (phase inversion) เป็นกระบวนการที่มีเปลี่ยนแปลงจากอิมัลชันชนิด O/W เป็นอิมัลชนิด W/O หรือในทางกลับกันอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากอิมัลชันชนิด W/O เป็นอิมัลชันชนิด O/W การเปลี่ยนเฟสนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น เนยและมาการีน นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดอื่นๆ การเปลี่ยนเฟสเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากมีผลต่อลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส ความคงตัวและรสชาติ

2.1.3 การรักษาความคงตัวของอิมัลชัน

การรักษาความคงตัวของอิมัลชันหรือการคงขนาดของอนุภาคในอิมัลชันให้มีขนาดเล็ก สามารถทำได้โดยเพิ่มพื้นผิวของอนุภาคในอิมัลชัน การลดขนาดของอนุภาคระหว่างกระบวนการแปรรูปทำได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ซึ่งจะถูกดูดซับที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมันและลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสทั้งสอง การเติมสารลดแรงตึงผิวจะทำให้อนุภาคในเฟสที่กระจายมีขนาดเล็กลง นอกจากนั้นการที่อนุภาคในอิมัลชันมีโมเลกุลขนาดใหญ่หรือมีอนุภาคอื่นมาล้อมรอบจะช่วยรักษาความคงตัวของอิมัลชันได้ (ปาริฉัตร, 2555)

การขัดขวางการรวมตัวของอนุภาคอิมัลชันหรือเฟสกระจายตัว ไม่ว่าจะเป็นการเกาะกลุ่ม การรวมกลุ่ม หรือการรวม ตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นของเฟสกระจายตัวในระบบอิมัลชันยังทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสต่อเนื่อง โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความหนืด (thickener) ประเภทไบโอพอลิเมอร์ เช่น ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) เพื่อชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิมัลชันให้ช้าลง ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวในช่วงระยะเวลาที่นานขึ้น กลไกการรักษาความคงตัวของอิมัลชันมีหลายแบบ เช่น การรักษาความคงตัวโดยประจุบนพื้นผิวของอนุภาคอิมัลชัน การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่สัมผัสผิวร่วมระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง และการรักษาความคงตัวโดยอนุภาคที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง เป็นต้น (ปาริฉัตร, 2555)

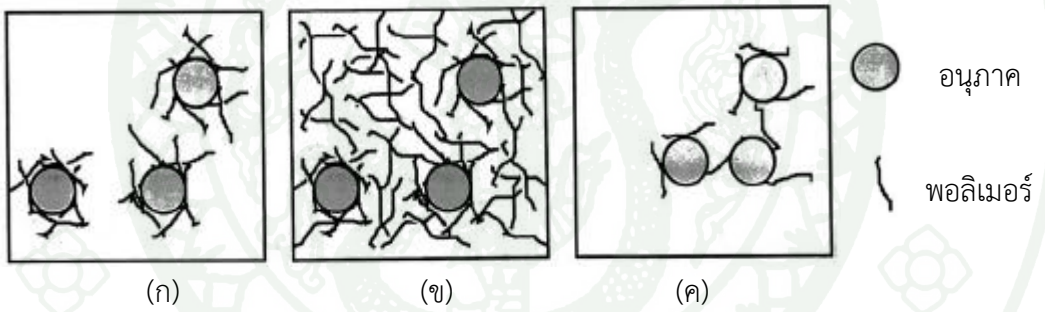
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิมัลซิไฟเออร์หรือเซอแฟคแทนต์ (emulsifier or surfactant) เป็นตัวช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำกับน้ำมันที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นสารที่มีความไวต่อการดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาคในเฟสกระจาย ทำให้สภาวะที่มีพลังงานที่ไม่สมดุลของระบบอิมัลชันนั้นลดลง สมบัติที่สำคัญของอิมัลซิไฟเออร์ คือ การเป็นโมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) ที่มีทั้งส่วนที่มีขั้วซึ่งชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งชอบน้ำมัน (lipophilic) ในโมเลกุลเดียวกัน ทำให้สามารถละลายได้ทั้งในเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง และช่วยลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่าง 2 เฟสลงได้ สารเหล่านี้จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ที่ผิวสัมผัสร่วม โดยจัดเรียงตัวให้ส่วนที่ชอบน้ำ เช่น กลุ่ม –OH และกลุ่ม $–CO_2H$ หันไปทางน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมัน เช่น โซ่ไฮโดรคาร์บอน หันไปทางน้ำมัน ทำให้อนุภาคน้ำหรืออนุภาคน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน ไม่สามารถเข้าใกล้กันได้ นอกจากนี้การจัดเรียงตัวกันของโมเลกุลเหล่านี้ยังทำให้อนุภาคน้ำหรืออนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ได้น้อยลง ความคงตัวของอิมัลชันจึงมีมากขึ้น อิมัลซิไฟเออร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ฟอสโฟไลปิด โมโนและไดกลีเซอไรด์ เป็นต้น และอิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีนและไบโอพอลิเมอร์บางชนิดที่มีทั้งส่วนที่มีขั้วซึ่งชอบน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งชอบน้ำมันอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล การใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในอาหารจะต้องไม่เป็นพิษ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่เป็นสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดทางกฎหมาย ข้อจำกัดทางการตลาดค่อนข้างมาก อิมัลซิไฟเออร์ที่ได้รับการอนุญาตให้ใช้มาก คือ เอสเทอร์ของกรดไขมันกับพอลิเวเลนท์ แอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล โพรพิลีนไกลคอล หรือ ซอร์บิทอล เป็นต้น (ปาริฉัตร, 2555; McClements, 2005)

การรักษาความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาวต้องใช้สารที่ทำให้เกิดความคงตัวส่วนใหญ่เป็นไบโอพอลิเมอร์ เช่น โปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ เป็นต้น โปรตีนและพอลิแซคคาไรด์เป็นอิมัลซิไฟเออร์และ/หรือสารให้ความคงตัวที่ดีจากธรรมชาติ นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารและทางเภสัชกรรม ในทางเภสัชกรรมมีการประยุกต์ใช้ไบโอพอลิเมอร์ในหลายรูปแบบ เช่น แคปซูล (เจลาติน) เม็ด (กัมอะราบิก ไคโตซาน ไฮโพรมิโลส) เป็นตัวช่วยในการแขวนลอย (กัมอะราบิก ไฮโพรมิโลส) (Rowe *et al.,* 2006) โมเลกุลขนาดใหญ่ของไบโอพอลิเมอร์ เช่น โปรตีน เป็นโมเลกุลแอมฟิฟิลิกจะทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวและกีดขวางการเกาะกลุ่มและการรวมกลุ่มของอนุภาคอิมัลชันได้ แม้ว่าโปรตีนจะไม่สามารถลดแรงตึงผิวได้มากเท่าสารลดแรงตึงผิวที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก แต่โปรตีนมีบทบาทสำคัญในการรักษาความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาว โปรตีนหลายชนิดมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมันจึงเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันได้ (McClements, 2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขณะที่พอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่ช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันโดยเพิ่มความหนืดให้กับเฟสต่อเนื่อง เนื่องจากโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นกิ่งก้านจึงสามารถสร้างและขยายการเชื่อมต่อกันได้มากในเฟสต่อเนื่อง (Dickinson, 2009) และสามารถเกิดเจลได้ การรวมกันระหว่างโปรตีนกับพอลิแซคคาไรด์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้น อัตราส่วนระหว่างโปรตีนกับพอลิแซคคาไรด์ พีเอช ไอออน และอุณหภูมิ สามารถช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันได้ (Dickinson, 2008) ลักษณะการรักษาความคงตัวโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในอิมัลชันมี 3 รูปแบบ คือ การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำและน้ำมัน (sterically stabilized system) การเกิดเจล (emulsion gel) และการเกาะกลุ่ม (flocculation) เนื่องจากการเกิดการเชื่อมข้ามของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (ภาพที่ 8) (Dickinson, 2003) นอกจากการเติมสารให้ความหนืดในระบบอิมัลชันทำให้อนุภาคน้ำมันมารวมกันยากแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันอีก เช่น ขนาดของอนุภาค โดยขนาดของอนุภาคเป็นผลจากแรงที่ให้ในการผสม ธรรมชาติของอิมัลซิไฟเออร์ที่มีอยู่ ความหนืดของเฟสต่อเนื่อง เป็นต้น



ภาพที่ 8 ลักษณะการรักษาความคงตัวโดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในอิมัลชัน (ก) การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำและน้ำมัน (ข) การเกิดเจล และ (ค) การเกาะกลุ่ม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Dickinson (2003)

มีการศึกษาการทำให้ระบบภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W มีความหนืดหรือมีลักษณะเป็นเจล โดยใช้ไบโอพอลิเมอร์ เช่น แซนแทนกัม โซเดียมเคซิเนต อัลจิเนต เจลาติน อะกา-โรส เวย์โปรตีนไอโซเลท แอลบูมิน เป็นต้น เพื่อเพิ่มความคงตัวของอิมัลชัน (Evison *et al.,* 1995; Su *et al*., 2006, 2008; Benichou *et al.,* 2007; Surh *et al.,* 2007) สารเหล่านี้จะทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดเป็นชั้นเจลที่ผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมัน โดยลักษณะแบบนี้จะเกิดได้ต้องอาศัยเอนไซม์ แคลเซียมไอออน หรือการได้รับความร้อน นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังทำให้เฟสน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภายในทนต่อการผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชันที่จะทำให้อนุภาคแตกออกหรือรวมกลุ่มกันระหว่างการโฮโมจีไนเซชัน และยังสามารถใช้ในระบบการห่อหุ้มสารเพื่อชะลอการปลดปล่อยได้ (Surh *et al.*, 2007)

2.1.4 การใช้อิมัลชันเชิงซ้อนในกระบวนการเอนแคปซูเลชัน

มีงานวิจัยที่ศึกษาการเอนแคปซูเลชันโดยใช้อิมัลชันชนิด W/O/W โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาระบบการเอนแคปซูเลชันและความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O/W ทั้งนี้งานวิจัยส่วนมากจะเน้นศึกษาการออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบที่ใช้ในอิมัลชัน ตัวอย่างการใช้อิมัลชันชนิด W/O/W ในกระบวนการเอนแคปซูเลชันแสดงดังตารางที่ 4 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ การศึกษาเกี่ยวกับการเอนแคปซูเลชันและการทำให้อิมัลชันมีความคงตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 การใช้อิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ไม่มีขั้วในกระบวนการเอนแคปซูเลชัน

Main purpose	Inner aqueous solution	Lipid oil	Lipophilic emulsifier	Outer aqueous solution
1. การศึกษาเกี่ยวกับการเอนแคปซูเลชัน				
Encapsulation of carotenoids (Rodríguez-Huezo *et al.,* 2004)	Gellan gum, Panodan SDK and saponified oleoresin	Sunflower canola-cartamo oils with oleoresin	PGPR (6.4%)	Gum arabic (17%), mesquite gum (66%), and maltodextrin (17%) the W/O/W were spray dried
Encapsulation of L-tryptophan (Weiss *et al.,* 2005)	NaCl (0.1 M), gelatin (5%), L-tryptophan (0.05 M)	Semicrystalline oils (different oils with high melting points)	PGPR (2–8%)	WPI (1%) the W1/O/W2 were embedded in alginate gels
Encapsulation of V. B12 (Fechner *et al.,* 2007)	0.1 M NaCl + 5% gelatin +1.0% V. B12	MCT	PGPR (2, 8%)	0.7% SC or 2.1% SC–dextran conjugates
Encapsulation of V. B12 (Kukizaki and Goto, 2007)	V. B12 (1%), and NaCl (0.22%)	Tripalmitin	Tetraglycerin conde d ricinoloeic acid ester (10%)	Decaglycerin condensed stearic acid ester (1%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Main purpose	Inner aqueous solution	Lipid oil	Lipophilic emulsifier	Outer aqueous solution
Encapsulation of V.B12 (O'Reagan and Mulvihill, 2009, 2010)	5% gelatin+ NaCl 0.6% + V. B12 0.03%	MCT	PGPR (2%)	SC (1% protein) and/or SC–maltodextrin conjugate
Encapsulation of Mg (Bonnet *et al.,* 2009)	0.1 M $MgCl_2$	Olive oil, rapeseed oil, MCT	PGPR (5%)	0.3 M lactose + 12% SC
Encapsulation of resveratrol (Hemar *et al.,* 2010)	0.25% resveratrol in sol of 0.1 M NaCl,ethanol, 2.5% WPI	Canola oil	PGPR (8%)	0.5% SC, and 0.1 M NaCl
2. การทำให้อิมัลชันมีความคงตัว				
Formation of multiple emulsions (Scherze, *et al.,* 2005)	NaCl (0.1 M), gelatin (5%), and Poly R-478 (0.5%)	Sunflower oil	PGPR (4%)	WPI
Formation of multiple emulsions (Su *et al.,* 2006)	SC (0.5%), and Poly R-478	Soybean oil	PGPR (0.5–8%)	SC (0.03–2%), phosphate buffer (0.1 M)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Main purpose	Inner aqueous solution	Lipid oil	Lipophilic emulsifier	Outer aqueous solution
Formation of multiple emulsions (Surh *et al.*,2007)	0 and 15%WPI, without and with heating	Corn oil	PGPR (8%)	Tween 20 (0.5%)
Multiple emulsion (Su *et al.*, 2008)	SC (0.5%) or gum arabic, PolyR-478	Soybean oil	PGPR (0.5–2%)	SC (0.5%) or gum arabic (0–15%)
Formation of multiple emulsions (Mun *et al.*, 2010)	PTSA	Soybean oil	PGPR (4–8%)	WPI (2–6%)

หมายเหตุ MCT: medium chain triglyceride oil; Panodan SDK: esters of monoglycerides and diglycerides of diacetyl tartaric acid; PGPR: polyglycerol polyricinoleate; Poly R-478: water soluble dye marker; PTSA: 1,3,6,8-pyrenetetrasulfonic acid tetrasodium salt, used as a marker; SC: sodium caseinate and WPI: whey protein isolate; V.B12: vitamin B12; Mg: Magnesium

ที่มา: ดัดแปลงจาก Colmenero (2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ก. พฤติกรรมการป้องกันและห่อหุ้มของส่วนประกอบในอิมัลชัน

1) เฟสน้ำมัน

อิมัลชันชนิด O/W/O เป็นระบบที่สามารถช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเรตินอลในระบบอิมัลชันชนิด O/W/O ความคงตัวของเรตินอลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเฟสน้ำมันภายใน (Yoshida *et al.,* 1999) เนื่องจากมีอนุภาคน้ำมันที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมันช่วยในการรักษาความคงตัวสามารถป้องกันส่วนประกอบต่างๆ ภายในและการเกิดผลึกของเฟสน้ำมัน (Garti *et al.,* 1998) ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้ช่วยปรับปรุงพฤติกรรมในการปลดปล่อยได้ (Weiss *et al.,* 2005)

2) การป้องกันที่บริเวณผิวสัมผัสร่วม

ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีไกลซีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้โซเดียมเคซิเนตร่วมกับเดกซ์แทรนแทนที่จะใช้เพียงตัวเดียว เพื่อเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในอิมัลชันชนิด O/W (Shimizu and Nakane, 1995) การใช้โซเดียมเคซิเนตร่วมกับเดกซ์แทรนเพื่อเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในอิมัลชันชนิด O/W จะช่วยเพิ่มความคงตัวของอนุภาคน้ำมันในระหว่างกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน (หลังจากการปรับกรดและการให้ความร้อน) ทำให้อนุภาคน้ำมันที่มีอนุภาคน้ำภายใน มีขนาดเล็กในช่วงพีเอชที่เป็นกลาง (Fechner *et al.,* 2007) อนุภาคน้ำมันที่มีโซเดียมเคซิเนตร่วมกับเดกซ์แทรนล้อมรอบจะไม่เกิดการเกาะรวมกันในช่วงพีเอชที่เป็นกรด ผลของการใช้โซเดียมเคซิเนตร่วมกับเดกซ์แทรนต่อค่าการปลดปล่อยวิตามินบี 12 โดยวิธีการแพร่ผ่านเยื่อ (dialysis) เห็นได้อย่างชัดเจนในระบบอิมัลชันเชิงซ้อนที่ใช้ PGPR ร้อยละ 2 ในอิมัลชันชนิด W/O จากการศึกษาของ Benichou *et al.* (2004) พบว่า การใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทร่วมกับแซนแทนกัมในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชัน สามารถช่วยควบคุมการปลดปล่อยและความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O/W และ อิมัลชันชนิด O/W/O Su *et al.* (2008) พบว่า การมีโปรตีน (โซเดียมเคซิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5) ในเฟสน้ำภายนอกร่วมกับกัมอะราบิกความเข้มข้นร้อยละ 10 และมี PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในเฟสน้ำมันสามารถเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O/W และลดความไวในการเปลี่ยนแปลงต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ในช่วงพีเอชที่เป็นกรด ในขณะที่ Adachi *et al.* (2004) พบว่า อิมัลชันชนิด W/O/W ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยจะมีความคงตัว และมีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง เมื่อมีมอลโตเดกซ์ตรินความเข้มข้นร้อยละ 10 ในเฟสน้ำภายนอกมากกว่าการใช้กัมอะราบิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 หรือ 20 Scherze *et al.* (2007) เปรียบเทียบการใช้โปรตีน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลายชนิดเพื่อเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า การใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทจะช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัวดีที่สุด คือ มีอนุภาคขนาดเล็กและมีความคงตัว นอกจากนี้ยังมีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูงสุด

ข. การวัดค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันในอิมัลชันชนิด W/O/W

การวัดค่าประสิทธิการเอนแคปซูเลชันส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเหวี่ยงแยก (centrifugation) คือการแยกเฟสที่เป็นชั้นครีม (เฟสน้ำมันและเฟสน้ำภายใน) และเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W ออกจากกัน จากนั้นจะวัดค่าปริมาณสารที่เหลืออยู่ในเฟสน้ำภายนอกด้วยวิธีการต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน

มีงานวิจัยจำนวนมากวัดปริมาณของสารที่ถูกห่อหุ้มภายในภายหลังจากการเหวี่ยงแยก โดยจะวัดปริมาณสารที่เหลืออยู่ในบริเวณเฟสน้ำภายนอก เช่น Dickinson *et al.* (1994) วัดปริมาณพอลิพอร์ไพรี (Poly R-478) และ พอลิทาร์ทราซีน (Poly T-128) ที่ถูกห่อหุ้มในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W โดยวัดค่าการดูดกลืนแสง ใช้เตตร้าไฮโดรฟูเรนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำค่าที่วัดได้จากเฟสน้ำภายนอกมาคำนวณกลับเพื่อหาปริมาณสารที่ยังคงเหลืออยู่ในเฟสน้ำภายในของอิมัลชัน Weiss *et al.* (2005) ใช้กรดไตรคลอโรอะซิติก เพื่อตกตะกอนโปรตีนที่เหลือในเฟสน้ำภายนอก จากนั้นกรองตะกอนออกแล้วนำส่วนใสที่ได้ไปหาปริมาณทริปโตแฟน โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร Su *et al.* (2006) วัดปริมาณพอลิพอร์ไพรี (Poly R-478) ในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W Bonnet *et al.* (2009) วัดปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่อยู่ในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโคปี (flame atomic absorption spectroscopy) จากนั้นนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันจากปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมเริ่มต้นที่อยู่ในเฟสน้ำภายในของอิมัลชัน Maisuthisakul and Gordon (2012) ศึกษาการเอนแคปซูเลทสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และทำการวัดประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน โดยวัดปริมาณสารสกัดที่อยู่ในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันด้วยวิธีหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด จากนั้นนำค่าที่ได้มาเข้าสมการเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันจากปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดเริ่มต้นที่อยู่ในเฟสน้ำภายในของอิมัลชัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากวิธีการเหวี่ยงแยกแล้ว มีงานวิจัยจำนวนมากที่ไม่ได้ใช้วิธีการเหวี่ยงแยก (non-centrifugation method) ในการวัดประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W เช่น Owusu Apenten and Zhu (1996) เอนแคปซูเลทกลูโคสในอิมัลชันชนิด W/O/W และมี Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ วัดประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันโดยใช้วิธีการแยกสารผ่านเยื่อ (dialysis membrane) จากนั้นวัดปริมาณกลูโคสแพร่ผ่านเยื่อโดยใช้วิธีนีโอคูโพรอิน (oxidation-reduction) Fechner *et al.* (2007) ใช้วิธีการแยกสารผ่านเยื่อในการวัดประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันวิตามินบี 12 ในอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียมเคซิเนตและโซเดียมเคซิเนตร่วมกับเดกซ์แทรน วัดปริมาณวิตามินบี 12 ที่แพร่ผ่านเยื่อออกมาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 361 นาโนเมตร Sela *et al.* (1995) วัดประสิทธิภาพในการเอนแคป-ซูเลชัน NaCl ในอิมัลชันชนิด W/O/W โดยใช้วิธีวัดการนำไฟฟ้า (conductivity) ของ NaCl ในเฟสน้ำภายนอก

2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของไบโอพอลิเมอร์ในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ร่วมกับการใช้อิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชัน เช่น Fechner *et al.* (2007); O'Regan and Mulvihill, (2010) ใช้เจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ในการเอนแคปซูเลทวิตามินบี12 เพื่อช่วยในการรักษาความคงตัวและการปลดปล่อยของสารภายใน Weiss *et al.* (2005) ศึกษาระบบการเอนแคปซูเลชันแอลทริปโตแฟน โดยใช้แคลเซียมอัลจิเนตในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W และมีมอลโตเดกซ์ตริน (มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่ 6.5) เป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) ส่วนในเฟสน้ำมันใช้น้ำมันเซมิคริสตัลไลน์และแปรเปลี่ยนไขมันจากพืชและพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิ-โนลีเอท (PGPR) พบว่า เมื่อลดอุณหภูมิในการเก็บอิมัลชันจาก 23 ถึง 7 องศาเซลเซียส จะทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากขึ้น และการเพิ่มปริมาณไขมันจากพืชจะช่วยลดการแพร่ผ่านของสารที่ถูกเอนแคปซูเลชันภายใน โดยมีอัตราการแพร่ผ่านต่ำสุดหากใช้ไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดและสามารถเพิ่มปริมาณไขมันจากพืชได้ถึงร้อยละ 100 ขณะที่ PGPR ที่ความเข้มข้นต่ำในน้ำมันเซมิคริสตัลไลน์ (ไม่มีไขมันจากพืช) ไม่มีผลต่อการแพร่ผ่านแอลทริปโตแฟน Su *et al*. (2006) ศึกษาระบบการเอนแคปซูเลชันพอลิพอร์ไพรี (Poly R-478) โดยใช้โซเดียมเคซิเนตในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W และมี PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่า การใช้โซเดียมเคซิเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในเฟสน้ำภายในช่วยลดปริมาณการใช้ PGPR ได้ โดยสามารถใช้ PGPR ได้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวไม่มีผลต่อความคง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชัน เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่าง PGPR และโซเดียมเคซิเนต Surh *et al*. (2007) ศึกษาระบบการเอนแคปซูเลชัน 1,3,6,8-pyrenetetrasulfonic acid tetrasodium salt (PTSA) โดยใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W และมี PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนอิมัลชันที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้โปรตีนเกิดเจลกับระบบที่ไม่ให้ความร้อน พบว่า ในอิมัลชันที่มีเวย์โปรตีนไอโซเลททั้งที่เกิดเจลและไม่เกิดเจล และที่ไม่มีเวย์โปรตีนไอโซ-เลทจะมีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้ร่วมกับ PGPR ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 6 Schmidts *et al*. (2010) ศึกษากระบวนการเอนแคปซูเลชันโอลิโกนิวคลี-โอไทด์ โดยมีการใช้สารที่มีสมบัติเป็นแอคทีฟออสโมติก (active osmotic) เช่น กลูโคส ไกลซีน โซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟต และสารที่มีสมบัติในการให้ความหนืด เช่น อนุพันธ์ของเซลลูโลสและใช้ span 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ชนิดที่ไม่มีขั้วซึ่งชอบไขมัน และ PEG-40/50 stearate, steareth-20 and polysorbate 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ชนิดไฮโดรฟิลิก พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่มีสมบัติเป็นแอคทีฟออสโมติกจะทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กลงและอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่มีสมบัติในการให้ความหนืดทำให้ระบบมีความคงตัวเพียงเล็กน้อย

มีงานวิจัยศึกษาผลของไบโอพอลิเมอร์ในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W ร่วมกับการใช้อิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชัน เช่น Mun *et al*. (2010) ศึกษาการเอนแคปซูเลชัน 1,3,6,8-pyrenetetrasulfonic acid tetrasodium salt (PTSA) โดยใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทในเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W และมี PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่า อิมัลชันชนิด W/O/W มีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อเก็บเป็นเวลา 2 สัปดาห์ยังคงมีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากกว่าร้อยละ 90 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3.3-9.9 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ PGPR และเวย์โปรตีนไอโซเลท โดยขนาดอนุภาคส่วนใหญ่จะมีขนาดน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร และมีบางส่วนที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 20 ไมโครเมตร

นอกจากนี้มีงานวิจัยศึกษาผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อความคงตัวของอิมัลชัน เช่น Opawale and Burgess (1998) ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีขั้วซึ่งชอบไขมัน (span 20, 80, 83, และ 85) ต่อความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O พิจารณาผลจากการวัดความหนืดและแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมระหว่างน้ำกับน้ำมันพบว่า span 20, 80 และ 83 แสดงสมบัติวิสโค-อิลาสติก ยกเว้น span 85 โดยความสัมพันธ์ของน้ำกับน้ำมันที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมจะเกิดการผันกลับกันของไมเซลล์และ/หรือการเรียงตัวเป็นหลายชั้นของสารลดแรงตึงผิว นอกจากนี้การเติมเกลือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในเฟสน้ำและการเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลต่อสมบัติการเป็นวิสโคอิลาสติก โดยอิมัลชันจะมีความคงตัวจากการแยกชั้นเมื่อมีเกลือในระบบ Scherze *et al*. (2006) ศึกษาผลของกระบวนโฮโมจีไนเซชันและ NaCl ต่อความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O ที่มี PGPR และเลซิตินเป็นองค์ประกอบ เตรียมอิมัลชันชนิด W/O โดยใช้ PGPR และ/หรือเลซิตินเป็นอิมัลซิไฟเออร์ พบว่า อิมัลชันที่มีเลซิตินเป็นอิมัลซิไฟเออร์มีความตัวต่อกระบวนโฮโมจีไนเซชันมากกว่าอิมัลชันที่มี PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ แต่กระบวนโฮโมจีไนเซชันแบบใช้ rotor-stator ไม่เหมาะต่ออิมัลชันที่มีเลซิติน ในขณะที่ NaCl เป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยจะมีผลต่อการรวมกลุ่มกันของอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันที่มี PGPR เป็นอิมัลซิไฟ-เออร์และ NaCl ยังทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคน้ำและเกิดการแยกชั้นในอิมัลชันที่มีเลซิตินเป็นอิมัลซิไฟเออร์ด้วย Knoth *et al*. (2005) ศึกษาความคงตัวของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีเลซิตินเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในเฟสน้ำมันและมีโซเดียมเคซิเนต เวย์โปรตีนไอโซเลท เจลาตินและ/หรือแซนแทนกัมในเฟสน้ำ พบว่า ชนิดของไบโอพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันในเฟสน้ำจะมีผลต่อขนาดอนุภาค การเกาะกลุ่มกันและความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษาอิมัลชันที่มีเลซิติน โดยอิมัลชันที่มีเวย์โปรตีนไอโซเลทจะมีความคงตัวและมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าโซเดียมเคซิเนต เจลาตินและ/หรือแซนแทนกัม แต่ถ้าใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทร่วมกับแซนแทนกัมจะช่วยลดขนาดอนุภาคได้มากขึ้น ในขณะที่โซเดียมเคซิเนตและเจลาตินทำให้ขนาดอนุภาคน้ำใหญ่ขึ้นและเกิดตะกอน

2.2 เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย

การเอนแคปซูเลทสารโดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการใช้ในอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ปี 1950 เนื่องจาก มีต้นทุนต่ำ เครื่องมือหาได้ง่าย ผลผลิตที่ได้ออกมามีคุณภาพดี ทำให้การทำแห้งแบบพ่นฝอยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง แต่ข้อจำกัดของกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ วัสดุที่ใช้เป็นสารเคลือบนั้นควรมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีในระดับที่ยอมรับได้ (Desai and Park, 2005)

การใช้กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยในการห่อหุ้ม มีขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ (1) การเตรียมสารแขวนลอย หรือ อิมัลชันเพื่อเข้ากระบวนการ (2) การทำสารแขวนลอยให้เป็นเนื้อเดียวกัน และ (3) การฉีดละอองอนุภาคเข้าสู่ห้องทำแห้ง อย่างไรก็ตาม ยังมีขั้นตอนย่อยอื่นมากกว่าทั้งสามกระบวนการที่กล่าวมา เช่น การเอาน้ำออกจากละอองอนุภาค ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างอิมัลชันที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและทำให้สารที่ถูกห่อหุ้มมีความคงตัวสูง ของผสมที่จะถูกฉีดเป็นละอองอนุภาคเตรียมโดยการละลายสารที่จะถูกห่อหุ้มซึ่งโดยปกติจะไม่ชอบน้ำลงในสารละลายที่จะเป็นสารห่อหุ้มซึ่งไม่สามารถเข้ากันได้ สารแขวนลอยจะต้องถูกนำไปให้ความร้อนและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจมีการเติมอิมัลซิไฟเออร์หรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับสมบัติของอิมัลชันของสารห่อหุ้มนั้นๆ ในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย อนุภาคของอิมัลชันเริ่มต้นควรมีขนาด 1-100 ไมโครเมตร ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำแห้ง อิมัลชันจะต้องมีความคงตัวตามระยะเวลาที่กำหนด อนุภาคน้ำมันจะต้องมีขนาดเล็กและมีความหนืดต่ำเพียงพอที่จะป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค ความหนืดของอิมัลชันและขนาดการกระจายตัวของอนุภาคมีอิทธิพลอย่างสำคัญต่อการห่อหุ้มด้วยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย หากอิมัลชันมีความหนืดมากจะส่งผลเสียต่ออัตราการทำแห้ง ดังนั้นปัจจัยที่จะส่งผลต่อการกักเก็บสารที่ถูกห่อหุ้มระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ ส่วนประกอบต่างๆ ของอิมัลชัน สมบัติของอิมัลชันและสภาวะการทำแห้ง เมื่อได้อิมัลชันที่มีความคงตัวและเป็นเนื้อเดียวกันดีแล้วจะเข้าสู่กระบวนการฉีดเป็นละอองฝอย การทำให้ของเหลวเป็นละอองฝอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก สามารถทำได้ด้วยการใช้ความดันหรือแรงเหวี่ยง ซึ่งหัวฉีด (atomizer) ที่นิยมใช้ ได้แก่ หัวฉีดแบบใช้แรงลม (pneumatic atomizer) หัวฉีดความดัน (pressured atomizer) จานหมุนเหวี่ยง (spinning disk configuration) รวมถึงหัวฉีดแบบคู่ (two fluid nozzle) และหัวฉีดแบบใช้คลื่นเสียง (sonic nozzle) จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้เพื่อสร้างพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้มากที่สุดระหว่างลมร้อนกับของเหลว เพื่อให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนที่เหมาะสมในระหว่างการทำแห้งเมื่อของเหลวสัมผัสกับลมร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นส่งผลให้อนุภาคของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดคงที่ จากนั้นการระเหยน้ำจากอนุภาคของเหลวจะเกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ โดยอัตราการแพร่ของน้ำภายในสู่บริเวณผิวนั้นจะพิจารณาให้คงที่และมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำบริเวณผิว เมื่อปริมาณน้ำในอนุภาคของเหลวถึงจุดวิกฤตก็จะเกิดการสร้างเปลือกแข็ง (dry crust) ขึ้นบริเวณผิวและอัตราการทำแห้งก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทำแห้งทางทฤษฎีนั้นจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคของเหลวนั้นเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้นโดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนเป็นตัวเก็บผลิตภัณฑ์ที่ตกลงสู่ด้านล่าง (Gharsallaoui *et al.,* 2007)

2.2.1 สารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม (wall materials) ที่เหมาะสมนั้นควรมีความสามารถในการละลายสูงและมีความหนืดต่ำที่ระดับความเข้มข้นสูง สารที่นิยมในการนำมาเป็นสารห่อหุ้ม ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง แป้งไฮโดรไลซ์ (มอลโตเดกซ์ตริน) และกัม (ส่วนใหญ่เป็นกัมอะราบิก) สมบัติของสารห่อหุ้มที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 สมบัติของสารห่อหุ้ม (wall materials) ที่นิยมใช้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอย

สารห่อหุ้ม	สมบัติ
มอลโตเดกซ์ตริน	สมบัติในการสร้างแผ่นฟิล์ม
สตาร์ชดัดแปร	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์
กัมอะราบิก	สมบัติในการสร้างแผ่นฟิล์ม เป็นอิมัลซิไฟเออร์
เซลลูโลสดัดแปร	สมบัติในการสร้างแผ่นฟิล์ม
เจลาติน	สมบัติในการสร้างแผ่นฟิล์ม เป็นอิมัลซิไฟเออร์
ไซโคลเดกซ์ตริน	สมบัติในการห่อหุ้ม เป็นอิมัลซิไฟเออร์
เลซิติน	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์
เวย์โปรตีน	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madene *et al*. (2006)

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้สารที่ใช้ในการห่อหุ้มในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยสารห่อหุ้มที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ มอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิก จากการศึกษาของ Adachi *et al*. (2004) ได้ใช้ 1,3,6,8 pyrenetetrasulfonic acid tetrasodium salt (PTSA) เป็นสารที่ถูกห่อหุ้มภายใน ในอิมัลชันชนิด W/O/W และสารห่อหุ้มที่ใช้คือมอลโตเดกซ์ตริน (มวลโมเลกุล 3.2-7.5 x 10^3) และกัมอะราบิก ในส่วนของเฟสน้ำมันใช้น้ำมันมะกอก พบว่า ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเมื่อเตรียมโดยใช้มอลโตเดกซ์ตรินจะมีค่ามากกว่าการใช้กัมอะราบิก โดยความคงตัวในการเอนแคปซูเลชันพิจารณาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 12, 33 และ 75 Sansone *et al*. (2011) ศึกษาสมบัติของมอลโตเดกซ์ตรินและมอลโตเดกซ์ตรินร่วมกับเพคตินที่ใช้เป็นสารห่อหุ้มในกระบวนการเอนแคปซูเลชันสารสำคัญที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลินทรีย์จาก *Fadgia ancylantha, Melissa officinalis* และ *Tussilago farfara* โดยการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า การใช้มอลโตเดกซ์ตรินร่วมกับเพคตินในอัตราส่วน 10:1 เพื่อห่อหุ้มสารสำคัญความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำให้มีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันดีกว่าการใช้มอลโตเดกซ์ตรินเพียงชนิดเดียวและลักษณะผงแห้งที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความคงตัวดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากปัจจัยสารหุ่อหุ้มแล้วสภาวะในการทำแห้งแบบพ่นฝอยก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญ Quek *et al.* (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งแบบพ่นฝอย (อุณหภูมิขาเข้าที่ 145, 155, 165 และ 175 องศาเซลเซียส) และสารห่อหุ้ม คือ มอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 ต่อค่าทางเคมีกายภาพของน้ำแตงโมผง พบว่า มอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและช่วยลดความเหนียวของน้ำแตงโมผง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ พบว่า อุณหภูมิในสภาวะการทำแห้งมีผลต่อค่าสี ปริมาณความชื้นและค่าการละลาย โดยเมื่ออุณหภูมิขาเข้าสูงขึ้นจะทำให้มีปริมาณความชื้น ค่าการละลายลดลง แต่วอเตอร์แอคติวิตี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในทุกระดับอุณหภูมิ ค่าความสว่างและเนื้อสีจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียปริมาณไลโคปีนและแคโรทีนอยด์ที่อุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส ทำให้ได้น้ำแตงโมผงมีสีที่ดีที่สุด แต่ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 165 องศาเซลเซียส จะทำให้สูญเสียปริมาณไลโคปีน แคโรทีนอยด์และค่าสีได้ Kha *et al*. (2010) ศึกษาผลของสภาวะในการทำแห้งแบบพ่นฝอยของฟักข้าว (Gac friut) (เนื้อมีสีแดงส้มและมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูง มีสมบัติพิเศษในการต้านอนุมูลอิสระสูง) โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10, 20 และ 30 และอุณหภูมิขาเข้าในการทำแห้งแบบพ่นฝอยใช้ที่ 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ความหนาแน่น สี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินและสภาวะในการทำแห้งไม่มีผลต่อค่าต่างๆ ที่วัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่สภาวะในการทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่มีผลต่อค่าพีเอช วอเตอร์แอคติวิตี้และค่าความสามารถในการละลาย ผงแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้าที่ 120 องศาเซลเซียสและใช้มอลโต-เดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 มีค่าสี สมบัติในการต้าน อนุมูลอิสระและปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดสูงสุด

3. วัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัย (Main materials)

3.1 เจลาติน (gela atin)

เจลาติน เป็นโปรตีนได้มาจากกระบวนการไฮโดรไลซิส ผิวหนัง กระดูก หรือเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ ถ้าไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดจะเรียกเป็น type A ในขณะที่ไฮโดรไลซิสโดยใช้ด่างจะเรียกเป็น type B ลักษณะความแข็งของเจลในกระบวนการสกัดเจลาตินขึ้นอยู่กับค่า Bloom สมบัติที่สำคัญของเจลาติน คือ ละลายได้เร็วในน้ำอุ่นหรือน้ำร้อน ให้เป็นสารละลายที่มีความหนืดต่ำ และเกิดเจลที่สามารถคืนสภาพได้หลังจากผ่านความร้อน (thermoreversible gel) โดยเจลจะเริ่มหลอมเมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลว เจลาตินมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 37 องศาเซลเซียส จะต่ำกว่าอุณหภูมิ

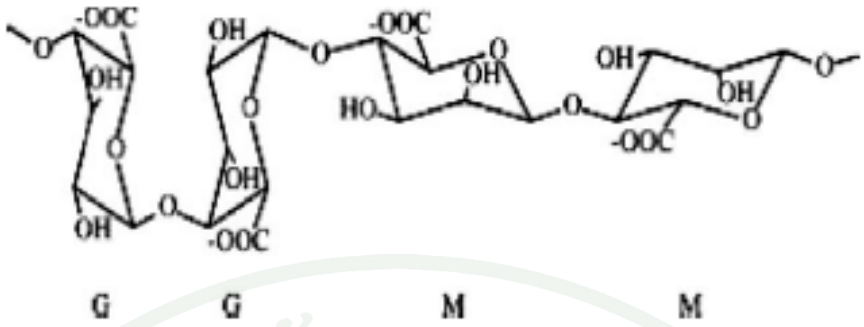
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่างกาย ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ในปากให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความเรียบเนียน ทำให้เกิดสมบัติที่เรียกว่า ละลายในปาก (melt in the mouth) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเจลาติน เจลาตินที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วและอยู่ในสภาพสายเปปไทด์แบบสุ่ม (random coil) เมื่ออุณหภูมิลดลง โครงสร้างดังกล่าวจะเกิดการขดตัวเพื่อปรับเข้าสู่โครงสร้างเริ่มต้นหรือทริปเปิลเฮลิก (triple helix) ส่งผลให้เกิดโครงข่ายสามมิติและทำให้เจลของเจลาตินมีความแข็งแรง นอกจากนี้เจลาตินยังมีสมบัติในการเกิดโฟมและวิ้ปปิงที่ดี ในอุตสาหกรรมลูกกวาดใช้ความเข้มข้นของเจลาตินมากกว่าร้อยละ 40 หลังจากที่สารละลายเจลาตินเย็นลงจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น เนื่องจากจะเกิดโครงร่างตาข่ายของสายพอลิเปปไทด์ เจลาตินนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในอาหารและยา ตัวอย่างอาหารที่ใช้เจลาติน เช่น เยลลี่ ลูกอม ลูกกวาด โยเกิร์ต ขนมหวานต่างๆ เป็นต้น อาหารประเภทอิมัลชัน เช่น ซุป ซอส เครื่องดื่ม โดยเจลาตินจะทำหน้าที่ให้ความข้นหนืด และเกิดเจล (Poppe, 1997; Mackie *et al.,* 1998; McClements, 2005; Stevens, 2010)

3.2 อัลจิเนต (alginate)

อัลจิเนต เป็นไฮโดรคอลลอยด์ประเภทพอลิแซคคาไรด์สายตรงที่ละลายน้ำได้ สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล อัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดสายตรงของกรดแมนนูโรนิก (1,4-β-D-mannuronic acid) (M) และกรดกูลูโรนิก (1,4-α-L-guluronic acid) (G) ได้เป็นพอลิยูโรไนด์ (polyuronide) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับ (ภาพที่ 9) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 32,000-200,000 ดาลตัน มี degree of polymerization (DP) อยู่ในช่วง 180-930 ในโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่เป็นพอลิ-เมอร์ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ของกรดแมนนูโรนิก กรดกูลูโรนิก และทั้งสองชนิดแรกสลับกัน สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดและโครงสร้างของพอลิเมอร์จะเป็นตัวบ่งชี้สมบัติของอัลจิเนต อัลจิเนตใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัวในอิมัลชัน สารทำให้เกิดเจลโดยเติมสารที่มีประจุบวกซึ่งเป็นเจลที่ทนความร้อนหรือไม่เปลี่ยนไปมาเมื่อได้รับความร้อน และสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง (นิตยา, 2551; Onsøyen, 1997; George and Abraham, 2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

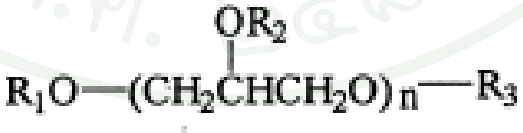


ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต

ที่มา: George and Abraham (2006)

3.3 พอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (polyglycerol ester of polyricinoleic acid;PGPR)

พอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท หรือเรียก PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ได้จากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ กรดริซิโนเลอิกจากน้ำมันละหุ่งและกลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) และเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) โครงสร้างทางเคมีของ PGPR แสดงดังภาพที่ 10 PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีสำหรับอิมัลชันชนิด W/O นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม (Wilson *et al.,* 1998) และนิยมใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับอิมัลชันชนิด W/O/W (Su *et al.,* 2006; Surh *et al.,* 2007; Hemar *et al.,* 2010; Mun *et al.,* 2010) โดยสามารถใช้เพียงตัวเดียวหรือใช้ร่วมกับโปรตีน เช่น โซเดียมเคซิเนต (Dickinson, 1994; Su *et al.,* 2006)



ภาพที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของ PGPR

ที่มา: Wilson *et al.* (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4 กัมอะราบิก (gum arabic)

กัมอะราบิก เป็นพอลิแซคคาไรด์ มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีการแตกสาขามาก กัมอะราบิกประกอบด้วย D-galactopyranose เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกซ์ เป็นส่วนใหญ่ กัมอะราบิกนิยมใช้เป็นสารห่อหุ้มในกระบวนการเอนแคปซูเลชันโดยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย กัมอะราบิกละลายน้ำได้ดีและมีความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดี เนื่องจากส่วนอะราบิโนกาแลคแทน (arabinogalactan) และส่วนไกลโคโปรตีน (glycoprotein) มีปริมาณโปรตีนมาก โดยโปรตีนเป็นตัวประสานระหว่างน้ำและน้ำมันให้เข้ากัน ส่วนอะราบิโนกาแลคแทน ให้ความหนืดสูงทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคช้าลง ป้องกันการกลับมารวมตัวกันของอนุภาคที่เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถกักเก็บสารให้กลิ่นรสและป้องกันการเข้าออกของออกซิเจนได้ และสามารถกักเก็บสารที่ถูกห่อหุ้มได้ดี ส่วนมากนิยมใช้กัมอะราบิกในการห่อหุ้มสารให้กลิ่น แต่ข้อจำกัดของกัมอะราบิกคือ ราคาสูงและหายาก ไมโครแคปซูลที่ได้จากการเอนแคปซูเลทสารต่างๆ โดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ส่วนผสมของมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิกเป็นสารเคลือบ จะมีขนาดตั้งแต่ 10-200 ไมโครเมตร และสามารถกักเก็บสารให้กลิ่นรสได้มากกว่าร้อยละ 80 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของอากาศร้อน ความเข้มข้นของอิมัลชัน ความหนืดและสัดส่วนของกัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตริน (Krishnan *et al.,* 2005; Madene *et al*., 2006; Gabas *et al.*, 2007)

3.5 มอลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin)

มอลโตเดกซ์ตริน ประกอบด้วย β-D-glucose เป็นส่วนใหญ่ โดย β-D-glucose เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกซ์ สามารถแบ่งประเภทของมอลโตเดกซ์ตรินได้จากค่า Dextrose Equivalent (DE) ซึ่ง DE เป็นการวัดระดับ (degree) ของการย่อยสลายพอลิเมอร์ของสตาร์ชและเป็นค่าที่สัมพันธ์กับมวลโมเลกุลของมอลโตเดกซ์ตริน มอลโตเดกซ์ตรินมีความหนืดต่ำ สามารถเกิดแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะมันวาวและสามารถป้องกันการผ่านเข้าออกของออกซิเจนได้ มอลโตเดกซ์ตรินที่มี DE สูงจะเกิดแผ่นฟิล์มได้ดีกว่าที่ DE ต่ำ เนื่องจากที่ DE ต่ำจะมีพอลิแซกคาไรด์ที่ไม่ละลายน้ำอยู่จำนวนมาก นอกจากนี้มอลโตเดกซ์ตรินยังช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัว โดยปกติมอลโตเดกซ์ตรินไม่มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์แท้จริง เนื่องจากขาดสมบัติของการเป็นสารชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ แต่สามารถทำให้อิมัลชันมีความคงตัวอยู่ได้ เนื่องจากมีส่วนที่เป็นโมเลกุลแซคคาไรด์สายยาว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยรักษาสภาพอิมัลชันไว้ได้ ดังนั้นถ้านำมอลโตเดกซ์ตรินมาผสมกับสารที่มีสมบัติเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิมัลซิไฟเออร์แท้จริง เช่น กัมอะราบิก จะสามารถปรับปรุงความคงตัวของอิมัลชันได้ดีกว่าใช้มอลโตเดกซ์ตรินเพียงอย่างเดียว (Kenyon and Anderson, 1988; Gabas *et al.*, 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมี

1.1 เมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ (สวนเนรัญชลา) (จังหวัดฉะเชิงเทรา, ประเทศไทย)

1.2 น้ำปราศจากไอออน

1.3 น้ำมันถั่วเหลือง (ตราองุ่น) (บริษัทน้ำมันพืชไทย จำกัด, ประเทศไทย)

1.4 เจลาติน type A (bloom 100) (บริษัทคาร์ติโน เจลาติน จำกัด, ประเทศไทย)

1.5 โซเดียมอัลจิเนต (FMC BioPolymer, USA)

1.6 มอลโตเดกซ์ตริน (DE 18) (Tate & Lyle, USA)

1.7 กัมอะราบิก (TIC Gums, USA)

1.8 พอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR 4125) (Palsgaard, Denmark) HLB~1.5

1.9 พอลิออกซีเอทิลีน ซอร์บิแทน โมโนโอลีเอท (Tween 80) (Rankem, India) HLB 15

1.10 โฟลิน-ซีโอเคาทูล (Folin-Ciocalteu Reagent) (Loba Chemie, India)

1.11 2, 2-ไดฟีนิล-1-ไพคริลไฮดราซิล (DPPH) (Sigma- Aldrich, USA)

1.12 โซเดียมเอไซด์ (NaN_3) (Lab chem, Australia)

1.13 โซเดียมไฮดรอไซด์ (NaOH) (Ajax Finechem, Australia)

1.14 โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($NaH_2PO_4.2H_2O$) (Fisher Scientific, USA)

1.15 ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (Na_2HPO_4) (Fisher Scientific, USA)

1.16 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) (Ajax Finechem, Australia)

1.17 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (Merck, USA)

1.18 เมทานอล (CH_3OH) (Sigma- Aldrich, USA)

1.19 เอทานอล (C_2H_5OH) (Sigma- Aldrich, USA)

1.20 กรดแอซิติก (CH_3COOH) (Sigma- Aldrich, USA)

1.21 น้ำมันแร่ (mineral oil) (Sigma-Aldrich, USA)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 เครื่องชั่งแบบ 2 ตำแหน่ง (adventurerTM OHAUS, Ohaus, USA)
2.2 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (ED 224S, Sartorius, Germany)
2.3 เครื่องผสมสาร (R560E, Scientific Industry, USA)
2.4 เครื่องโฮโมจีไนซ์ชนิดความเร็วสูง (Ultra-Turrax T25, IKA, Germany)
2.5 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (ED 224S, Sartorius, Germany)
2.6 เครื่องระเหยสารแบบหมุน (R-200, Buchi, Germany)
2.7 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Lyolab 3000, Heto, Denmark)
2.8 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zen 3600, Malvern, UK)
2.9 กล้องจุลทรรศน์ (Axiolab®, Carl Zeiss GmbH, Germany)
2.10 เครื่องเหวี่ยงแยกควบคุมอุณหภูมิ (Rotina 380R, Hettich, Germany)
2.11 เครื่องวัดความหนืด (Physica MCR 300, Anton Paar, Germany)
2.12 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Helios Alpha, Thermo Spectronic, UK)
2.13 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (A/S, Niro, Denmark)
2.14 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (WB 14, Memmert, Germany)
2.15 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (Docu-pH, Sartorius, Germany)
2.16 เครื่องวัดสี (CM – 3500d, Minolta, Japan)
2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (JSM 5600LV, JEOL, Japan)
2.18 ตู้อบลมร้อน (FD115, Binder, Germany)
2.19 เครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตี้ (AquaLab series 3TE, Decagon Devices, USA)

3. อุปกรณ์สำหรับประมวลผล

3.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ® เวอร์ชั่น 12 (บริษัท SPSS จำกัด, ประเทศไทย)
3.2 เครื่องคอมพิวเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. การศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

1.1 การเตรียมสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

การสกัดสารจากเมล็ดมะม่วงเตรียมโดยใช้เนื้อในเมล็ดของผลมะม่วงสุกสายพันธุ์โชค-อนันต์มาปั่นละเอียด โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเนื้อในเมล็ดมะม่วงต่อน้ำปราศจากไอออนเท่ากับ 1:3 ปั่นเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปกวนผสมในที่มืดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที นำมากรองด้วยผ้าขาวบางและกระดาษกรอง Whatman No.4 นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 6,683 ×g เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนใสที่ได้ไประเหยน้ำด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน (rotary evaporator) ภายใต้สุญญากาศ ที่อุณภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดไปทำแห้งแบบเยือกแข็ง แล้วเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนทำการวิเคราะห์ต่อไป (ดัดแปลงจาก Maisuthisakul and Gordon, 2009; Khammuang and Sarnthima, 2011) ทำการศึกษาค่าทางเคมีกายภาพดังนี้

1.1.1 ปริมาณผลผลิตที่ได้

คำนวณปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ (Yield) จากการสกัดสารจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงตามสมการที่ 1

$$\text{Yield } (\%) = (W_1/W_2) \times 100 \quad (1)$$

W_1 =น้ำหนักสารสกัดที่ได้หลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
W_2 =น้ำหนักของเนื้อในเมล็ดมะม่วงเริ่มต้น

1.1.2 ปริมาณความชื้น

คำนวณปริมาณความชื้น (ร้อยละ) โดยชั่งสารสกัดประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาอะลูมิเนียมระหว่างอบตัวอย่าง อบตัวอย่างจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างออกมาใส่เดสิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1.3 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Total phenolic content

คำนวณปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Total phenolic content โดยดัดแปลงวิธีการจาก Kähkönen *et al.* (1999) และ Maisuthisakul and Gordon (2009) นำสารสกัดมาละลายในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ จากนั้นนำสารละลายของสารสกัดปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมโฟลิน 1 มิลลิลิตร และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ผสมให้เข้ากัน เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก จะได้เป็นปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัดเมล็ดมะม่วงแห้ง 1 กรัม, mg GAE/g)

1.1.4 ปริมาณการต้านอนุมูลอิสระ 2, 2-diphenly-1-picrylhydrazyl (DPPH) (DPPH radical-scavenging capacity)

คำนวณปริมาณการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) โดยดัดแปลงวิธีการMaisuthisakul and Gordon (2009) นำสารสกัดและกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆมาปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายอนุมูลอิสระ DPPH 0.2 มิลลิโมลาร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองผสมให้เข้ากัน เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้คำนวณเป็นร้อยละของ DPPH radical-scavenging activity ตามสมการที่ 2 และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของ DPPH radical-scavenging activity ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กับค่าความเข้มข้นของสารสกัดและ/หรือกรดแกลลิก (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นสารสกัดและ/หรือกรดแกลลิกที่สามารถทำให้ค่าร้อยละของ DPPH radical-scavenging activity ลดลงร้อยละ 50 (IC_{50})

$$\text{DPPH radical} - \text{scavenging activity (\%)} = \frac{[A_{DPPH} - (A_1 - A_S)]}{A_{DPPH}} \times 100 \qquad (2)$$

A_{DPPH} = ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH

A_1 = ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH + สารสกัด

A_s = ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การศึกษาผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมี กายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

2.1 การศึกษาผลของเจลาตินและ NaCl ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

2.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. สารละลายสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (MSKE)

สารละลาย MSKE เตรียมโดยละลาย MSKE ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7 คนจนละลายจนหมด

ข. สารละลายเจลาติน

สารละลายเจลาตินเตรียมโดย ละลายเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนักและ/หรือเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที รอให้เย็นจากนั้นผสมกับสารละลาย MSKE ข้างต้น

ค. สารละลาย Tween 80

สารละลาย Tween 80 เตรียมโดยละลาย Tween 80 ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7 คนจนละลายจนหมด

ง. สารละลายกัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตริน

สารละลายกัมอะราบิกความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและสาร ละลายมอลโตเดกซ์ตรินความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยละลายกัมอะราบิกและมอลโต-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เดกซ์ตรินในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7 คนจนสาร ละลายจนหมดเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

จ. สารละลายพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR)

สารละลาย PGPR เตรียมโดยนำ PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ละลายในน้ำมันถั่วเหลืองและให้ความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

2.1.2 การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O)

เตรียมอิมัลชันชนิด W/O โดยเตรียมส่วนผสมเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นเฟสน้ำ ประกอบด้วยสารละลายเจลาติน สารละลาย NaCl และสารละลายของ MSKE เฟสน้ำมัน ประกอบด้วยสารละลาย PGPR ในน้ำมันถั่วเหลือง นำเฟสน้ำและเฟสน้ำมันผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ชนิดความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที (ปริมาตรรวมของตัวอย่างที่โฮโมจีไนซ์ คือ 125 มิลลิลิตร) จะได้ตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O ที่มีปริมาณเฟสที่กระจาย (เฟสน้ำ) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.1.3 การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W)

นำอิมัลชันชนิด W/O จากข้อ 2.1.2 มาผสมกับเฟสน้ำภายนอก ซึ่งประกอบด้วยละลายของอิมัลซิไฟเออร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Tween 80) สารละลายกัมอะราบิกและสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน นำทั้งสองส่วนมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ชนิดความเร็วสูงโดยใช้ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที (ปริมาตรรวมของตัวอย่างที่โฮโมจีไนซ์ คือ 200 มิลลิลิตร) จะได้ตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีปริมาณเฟสที่กระจาย (อิมัลชันชนิด W/O) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่เตรียมได้จะเก็บเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาวัดค่าคุณภาพต่างๆ เช่น การแยกชั้นเป็นครีม ขนาดอนุภาค ความหนืด การตรวจสอบลักษณะอนุภาคอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ก. การวัดความขุ่น

ความขุ่นของสารละลายผสมวัดที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ บรรจุสารละลายผสมในหลอดวัดค่าการดูดกลืนแสงขนาดระยะแสงส่องผ่าน (optical path length) 1 เซนติเมตร

ข. การแยกชั้นเป็นครีม

การแยกชั้นเป็นครีมเป็นค่าที่แสดงถึงความไม่คงตัวของอิมัลชัน ซึ่งถ้ามีค่าสูงแสดงว่าอิมัลชันไม่มีความคงตัว แต่ถ้ามีค่าต่ำหรือเท่ากับ 0 แสดงว่าอิมัลชันมีความคงตัวดีหลังจากเก็บอิมัลชันไว้จะเกิดชั้นครีมขึ้นด้านบนของอิมัลชันและด้านล่างจะเกิดส่วนใสที่แสงผ่านได้หรือส่วนที่ขุ่นซึ่งเรียกว่าซีรั่ม การวัดค่าการแยกชั้นเป็นครีมสามารถทำได้โดยนำอิมัลชันชนิด W/O/W จำนวน 10 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง ปิดฝาให้สนิทจากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าการแยกชั้นเป็นครีมที่เวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเวลาผ่านไปอิมัลชันจะแยกชั้น โดยส่วนครีมจะอยู่ด้านบน และด้านล่างจะเป็นซีรั่ม (มีลักษณะโปร่งใสหรือขุ่น) ซึ่งการแยกชั้นเป็นครีมสามารถคำนวณได้จากร้อยละการแยกชั้น = 100 x (H_S/H_E) โดยที่ H_E คือส่วนสูงทั้งหมดของอิมัลชันและ H_S คือส่วนสูงทั้งหมดของซีรั่ม (ดัดแปลงจาก Surh *et al.,* 2007)

ค. การวัดขนาดอนุภาค

วัดขนาดอนุภาคอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยเจือจางอิมัลชันชนิด W/O/W ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้อนุภาคมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำอิมัลชันที่ได้บรรจุลงในเซลล์ DTS-0012 disposable sizing cuvette โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น dispersant ซึ่งมีค่า reflective index 1.330 และความหนืดเท่ากับ 0.8872 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวัดค่าขนาดอนุภาค โดยวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (d_{50}) โดยใช้หลักการกระเจิงแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering) คำนวณโดยใช้สมการสโตกส์และไอสไตน์ (Stokes-Einstein equation) ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยึดตาม Cumulants mean หรือ เรียกว่า Z-average (Malvern Instruments, 2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ง. การวัดความหนืด

วัดความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ นำตัวอย่างอิมัลชันใส่ลงในกระบอกวัดแบบทรงกระบอก (concentric cylinder, CC27) ทำการวัดโดยเพิ่มอัตราเฉือน (shear rate) 1-1000 s^{-1} ควบคุมอุณหภูมิระหว่างการวัดที่ 25 องศาเซลเซียส สังเกตและบันทึกค่าความหนืด

จ. การตรวจสอบลักษณะอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์

ตรวจสอบลักษณะอิมัลชันชนิด W/O/W ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยดัดแปลงจากวิธีของ Surh *et al.* (2007) โดยเขย่าอิมัลชันให้อิมัลชันเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นหยดอิมัลชันบนแผ่นสไลด์และปิดทับด้วยแผ่นกระจก (cover glass) แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า

ฉ. ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency, EE)

นำตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ทั้งที่มีและไม่มี MSKE มาเหวี่ยงแยกเอาส่วนเฟสน้ำภายนอกแยกออกจากส่วนครีมด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกที่ 13,640 ×g เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นใช้หลอดฉีดยาดูดสารละลายส่วนใสของอิมัลชันปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมโฟลิน 1 มิลลิลิตร และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ร้อยละ 7.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองผสมให้เข้ากัน เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก จะได้เป็นปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัดเมล็ดมะม่วงแห้ง 1 กรัม, mg GAE/g) จากนั้นนำปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้จากการเหวี่ยงแยกมาคำนวณค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันจากสมการที่ 3 และ 4 (ดัดแปลงจาก Maisuthisakul and Gordon, 2012)

$$TP_s = [TP_e - TP_o] \quad (3)$$

โดย TPs = ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้

TPe = ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของอิมัลชันที่มีส่วนผสมของ MSKE

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

TPo = ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของอิมัลชันที่ไม่มีส่วนผสมของ MSKE

$$\text{EE}\ (\%) = \left[1\text{-}\left(\frac{\text{TP}_\text{s}}{\text{TP}_\text{p}}\right)\right] \times 100 \qquad (4)$$

โดย TPp = ปริมาณฟีนอลิกเริ่มต้นของ MSKE ในเฟสน้ำภายใน

2.2 การศึกษาผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

ในที่นี้ ไบโอพอลิเมอร์ที่ศึกษา ได้แก่ เจลาตินและโซเดียมอัลจิเนต เนื่องจากมีรายงานการวิจัย พบว่า ทั้งเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันและจากสมบัติที่แตกต่างกัน คือ เจลาตินเป็นสารประเภทโปรตีน มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เกิดเจลเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัว ขณะที่โซเดียมอัลจิเนตเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรต มีสมบัติในการเป็นสารที่ทำให้เกิดความข้นหนืด เกิดเจลและทำให้อิมัลชันมีความคงตัว

2.2.1 การเตรียมสารละลาย

สารละลายเจลาติน สารละลาย MSKE สารละลาย PGPR สารละลาย Tween 80 สารละลายกัมอะราบิกและสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน เตรียมเหมือนข้อที่ 2.1.1 (ก, ข, ค, ง, จ) สารละลายโซเดียมอัลจิเนตเตรียมโดยละลายโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนัก ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ พีเอช 7 คนจนโซเดียมอัลจิ-เนตละลายจนหมดเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นผสมกับสารละลาย MSKE

2.2.2 การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O)

เตรียมอิมัลชันชนิด W/O โดยเตรียมส่วนผสมเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นเฟสน้ำประกอบด้วย สารละลายเจลาตินและ/หรือสารละลายโซเดียมอัลจิเนตและสารละลาย MSKE เฟสน้ำมันประกอบด้วยสารละลาย PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนัก ในน้ำมันถั่วเหลือง นำเฟสน้ำและเฟสน้ำมันผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ชนิดความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 15,000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รอบต่อนาที นาน 5 นาที (ปริมาตรรวมของตัวอย่างที่โฮโมจีไนซ์ คือ 125 มิลลิลิตร) จะได้ตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O ที่มีปริมาณเฟสที่กระจาย (เฟสน้ำ) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.2.3 การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W)

นำอิมัลชันชนิด W/O จากข้อ 2.2.2 มาผสมกับเฟสน้ำภายนอก ซึ่งประกอบด้วยสารละลายของอิมัลซิไฟเออร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Tween 80) สารละลายกัมอะราบิก และสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ชนิดความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที (ปริมาตรรวมของตัวอย่างที่โฮโมจีไนซ์ คือ 200 มิลลิลิตร) จะได้ตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีปริมาณเฟสที่กระจาย (อิมัลชันชนิดW/O) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่เตรียมได้จะเก็บเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาวัดค่าคุณภาพต่างๆ เช่น การแยกชั้นเป็นครีม ขนาดอนุภาค ความหนืด การตรวจสอบลักษณะอนุภาคอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์ และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ดังนี้

ก. การแยกชั้นเป็นครีม

วัดค่าการแยกชั้นเป็นของอิมัลชันชนิด W/O/W ตามวิธีการในข้อ 2.1.3 (ข)

ข. การวัดขนาดอนุภาค

วัดขนาดอนุภาคอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยเจือจางอิมัลชันชนิด W/O ด้วยน้ำมันแร่ (mineral oil) ให้ขนาดอนุภาคภายในมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก นำอิมัลชันที่ได้บรรจุลงในเซลล์ DTS-0012 disposable sizing cuvette ใช้น้ำมันแร่เป็น dispersant ซึ่งมีค่า reflective index 1.467 และความหนืดเท่ากับ 57 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวัดค่าขนาดอนุภาค สำหรับอิมัลชันชนิด W/O/W วัดขนาดอนุภาคในอิมัลชัน โดยเจือจางอิมัลชันชนิด W/O/W ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้อนุภาคมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำอิมัลชันที่ได้บรรจุลงในเซลล์ DTS-0012 disposable sizing cuvette โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น dispersant ซึ่งมีค่า reflective index 1.330 และความหนืดเท่ากับ 0.8872 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นทำการวัดค่าขนาดอนุภาค รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยึดตาม Cumulants mean หรือ เรียกว่า Z-average (Malvern Instruments, 2003)

ค. การวัดความหนืด

วัดความหนืดของสารละลายเจลาติน สารละลายโซเดียมอัลจิเนตอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W ตามวิธีในข้อ 2.1.3 (ง) และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ของความหนืดอิมัลชันได้ด้วย 2 พารามิเตอร์ของสมการ power law จากสมการที่ 5

$$\tau = K\sigma^{n} \quad (5)$$

โดย τ = คือ ค่า shear stress

σ = คือ ค่า shear rate

K = คือ ค่า consistency index

n = คือ ค่า flow index

n = 1 คือ อิมัลชันแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian)

n < 1 คือ อิมัลชันแสดงพฤติกรรมการไหลแบบแบบ shear thinning

n > 1 คือ อิมัลชันแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thickening

ง. การตรวจสอบลักษณะอิมัลชันด้วยกล้องจุลทรรศน์

ตรวจสอบลักษณะอิมัลชันชนิด W/O/W ตามวิธีในข้อ 2.1.3 (จ) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จ. ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (EE)

วัดค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ตามวิธีในข้อ 2.1.3 (ฉ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำและผงเอนแคปซูเลทที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย

เตรียมตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ได้คัดเลือกความชนิดและเข้มข้นของ PGPR และไบโอพอลิเมอร์จากตอนที่ 2 โดยการทดลองในตอนที่ 3 เริ่มจากศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในอิมัลชันชนิด W/O/W โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในเฟสน้ำภายนอก 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่เตรียมได้จะเก็บแป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำมาวัดค่าคุณภาพต่างๆ คือ ขนาดอนุภาค ความหนืด และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ตามวิธีการในข้อ 2.1.3 (ค), 2.1.3 (ง) และ 2.1.3 (ฉ) ตามลำดับ

จากนั้นเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้น 3 ระดับมาศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยกำหนดอุณหภูมิลมเข้าและลมออกที่ 180 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อัตราการไหลของตัวอย่างเข้าเครื่อง 11-12 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง นำตัวอย่างที่ได้ใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อเตรียมสำหรับการวิเคราะห์ค่าต่อไป โดยค่าคุณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความชื้น วอเตอร์แอคติวิตี้ ความสามารถในการละลาย สี ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพทั้งหมด ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิว และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ดังนี้

3.1 ความชื้น

ชั่งผงเอนแคปซูเลท MSKE ประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาอะลูมิเนียมระหว่างอบตัวอย่าง อบตัวอย่างจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างออกมาใส่เดสิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

3.2 วอเตอร์แอคติวิตี้

นำผงเอนแคปซูเลท MSKE อย่างใส่ภาชนะพลาสติกประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะเพื่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างถึงสมดุล รอประมาณ 2-3 นาที จึงอ่านค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

3.3 ความสามารถในการละลาย

นำผงเอนแคปซูเลท MSKE 1.25 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ผสมกันในหลอดขนาด 85 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 13,640 ×g นาน 20 นาที นำส่วนที่ลอยอยู่ที่ผิวด้านบนของน้ำมาใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นร้อยละดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index) ตามสมการที่ 6 (Anderson *et al.*, 1969; Kha *et al.,* 2010)

$$\text{ดัชนีการละลายน้ำ} = \left(\text{น้ำหนักหลังอบแห้ง}/\text{น้ำหนักเริ่มต้น}\right) \times 100 \qquad (6)$$

3.4 ค่าสีของตัวอย่าง

ตักผงเอนแคปซูเลท MSKE ใส่จานแก้วใส (plate) ประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะ ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสี Spectrophotometer โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมอง 10° แสดงผลเป็นค่า L*, a*, b*, chorma และ hue angle (Obon *et al.,* 2009)

3.5 ลักษณะของอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ตักผงเอนแคปซูเลท MSKE มาวางบนเทปกาวสองหน้าชนิดบางที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub ใช้ลูกยางเป่าลมให้ตัวอย่างกระจายทั่วบนเทปกาวสองหน้า นำแท่ง aluminium stub ที่ติดตัวอย่างเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อช่วยนำประจุอิเล็กตรอน หลังจากนั้นนำแท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองใส่ในช่องสำหรับวางแท่ง aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตรวจดูขนาดและการกระจายของอนุภาคผงเอนแคปซูเลท MSKE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เลือกบริเวณที่ต้องการถ่ายภาพ ปรับโฟกัสของภาพให้ชัด บันทึก ภาพลงแผ่นซีดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.6 ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพทั้งหมด (Total bioactive compound; TB)

นำผงเอนแคปซูเลท MSKE มาทำลายโครงสร้างการห่อหุ้ม โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Robert *et al.* (2010) เริ่มจากนำผงเอนแคปซูเลท 200 มิลลิกรัม มาละลายในสารละลายผสมของเอทานอล:อะซิตริก:น้ำ ในอัตราส่วน 50:8:42 โดยปริมาตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่าสาร (vortex) นาน 3 นาที จากนั้นนำไปผ่าน ultrasonicator 2 ครั้ง นานครั้งละ 20 นาที เมื่อครบ 2 ครั้ง นำไปเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 13,640 ×g เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นใช้หลอดฉีดยาดูดสารละลายส่วนใส (ด้านล่าง) และนำไปผ่านการกรองโดยใช้ตัวกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร ดูดสารละลายส่วนใสหลังจากผ่านตัวกรอง ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมโฟลิน 1 มิลลิลิตร และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองผสมให้เข้ากัน เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก จะได้เป็นปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัดเมล็ดมะม่วงแห้ง 1 กรัม, mg GAE/g)

3.7 ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิว (Surface bioactive compound; SB) และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation efficiency; EE)

การหาปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิวดัดแปลงจากวิธีการของ Robert *et al.* (2010) โดยนำผงเอนแคปซูเลชัน 200 มิลลิกรัม มาละลายในสารละลายผสมของเอทานอล:เมทานอล ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่าสาร (vortex) นาน 3 นาที ใช้หลอดฉีดยาดูดสารละลายออกมาและกรองผ่านตัวกรองโดยใช้ตัวกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร จากนั้นดูดสารละลายส่วนใสที่ได้ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมโฟลิน 1 มิลลิลิตร และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองผสมให้เข้ากัน เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก จะได้เป็นปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัดเมล็ดมะม่วงแห้ง 1 กรัม, mg GAE/g) จากนั้นนำปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้มาคำนวณค่าปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิว (surface bioactive compound; SB) ตามสมการที่ 7 และคำนวณประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency; EE) ตามสมการที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

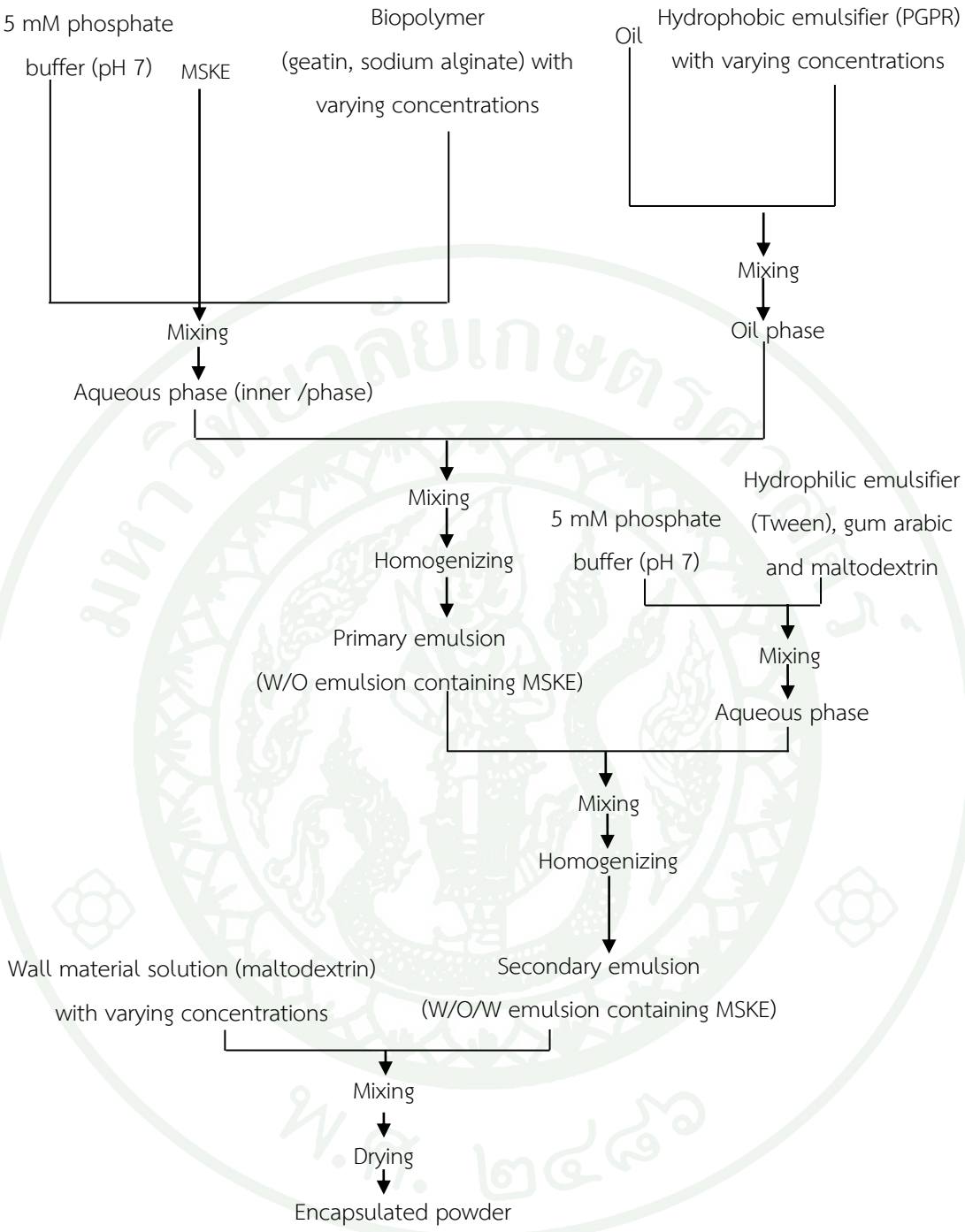
$$\text{SB}\ (\%) = \frac{\text{SB}}{\text{TB}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{EE}\ (\%) = 100 - \text{SB}\ (\%) \quad (8)$$

4. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองตอนที่ 1 และ 3 ทำการทดลองอย่างน้อย 3 ซ้ำ (replications) และการทดลองที่ 2 วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design) นำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ® เวอร์ชั่น 12

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 การศึกษาผลของ PGPR และไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิ-ภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ในอิมัลชันชนิด W/O/W และผงเอนแคปซูเลท MSKE

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (mango seed kernel extract; MSKE) ซึ่งมะม่วงที่ใช้ศึกษาคือ มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในระยะสุก ส่วนที่สองเป็นส่วนหลักของงานวิจัยในครั้งนี้ คือ การศึกษาผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR) และไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) ที่มี MSKE และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย

1. ลักษณะทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (MSKE)

จากการเตรียม MSKE โดยใช้มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ และน้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย พบว่า MSKE ที่ได้มีสีเหลือง และมีปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ ค่าความชื้น (ร้อยละ) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัดเมล็ดมะม่วงแห้ง 1กรัม, mg GAE/g) และปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถทำให้ค่าร้อยละ radical scavenging activity ลดลงร้อยละ 50 (IC_{50}) (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร, µg/ml) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

ค่าทดสอบ	ค่าที่ได้
ปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้	6.27 ± 0.75
ความชื้น (ร้อยละ)	11.51 ± 1.97
ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	400.14 ± 5.98
ความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ50 (IC_{50}) (µg/ml)	11.14 ± 3.82

การวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิก พบว่า ถ้าค่าที่วัดได้มีปริมาณมากแสดงว่ามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูง ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ MSKE ที่ได้คือ 400.14 mg GAE/g ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khammuang and Sarnthima (2011) ที่ศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 399.8 mg GAE/g แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่น คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

น้ำดอกไม้ ฟ้าลั่นและแก้ว พบปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 377.2, 265.7 และ 107.4 mg GAE/g ตามลำดับ ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากงานวิจัยในครั้งนี้ อาจเนื่องมาจากชนิดของมะม่วงแต่ละพันธุ์มีสมบัติทางเคมี กลไกในการต้านอนุมูลอิสระ และโครงสร้างทางสรีรวิทยาที่แตกต่างกัน (Kalt *et al.,* 2005) ดังนั้นแสดงว่า MSKE ที่ได้จากการทดลองมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุด นอกจากนี้มีการศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ผ่านการตากแดดและผ่านการอบแห้ง โดยใช้เอทานอลร้อยละ 95 เป็นตัวทำละลายและกรดแทนนิก (tannic acid; TAE) เป็นสารมาตรฐาน พบว่า มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 44.5-89.9 mg TAE/g (Maisuthisakul and Gordon, 2009) เมื่อพิจารณาผลของกระบวนการสกัด มีรายงานการวิจัยของ Maisuthisakul and Gordon (2009) ได้ศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ผ่านการตากแดดและใช้การเขย่าและย่อยด้วยกรดในการสกัด พบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 90.0-286.0 mg TAE/g ค่าความแตกต่างของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการสกัด ความหลากหลายของมะม่วง แหล่งที่ปลูก (Yuri *et al.,* 2009) ความแก่อ่อน (Jiang *et al.,* 2006) ปีที่เก็บเกี่ยว (Jiang *et al.,* 2006) และสภาวะในการเก็บ (Rössle *et al.,* 2009) เป็นต้น

จากการตรวจสอบหาความเข้มข้นของ MSKE ที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) พบว่า MSKE มีค่า IC_{50} เท่ากับ 11.14 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร การรายงานผลเป็นค่า IC_{50} หมายถึง ค่าที่มีค่าน้อยจะแสดงความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงกว่าค่าที่มีค่ามาก จากงานวิจัยของ Maisuthisakul and Gordon (2009) ที่ศึกษาโดยใช้เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ผ่านการตากแดด พบว่า มีค่า IC_{50} เท่ากับ 2.61 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และจากงานวิจัยของ Khammuang and Sarnthima (2011) ที่ศึกษาโดยใช้เนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ พบว่า มีค่า IC_{50} เท่ากับ 2.45 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และศึกษาโดยใช้มะม่วงพันธุ์อื่น คือ น้ำดอกไม้ ฟ้าลั่นและแก้ว พบว่า มีค่า IC_{50} เท่ากับ 7.74, 4.06 และ 9.31 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังนั้นค่า IC_{50} ของเนื้อในเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์จากงานวิจัยของ Khammuang and Sarnthima (2011) มีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสารมาตรฐาน พบว่า ค่า IC_{50} ของ MSKE มีค่าน้อยกว่าสารมาตรฐาน เช่น กรดแกลลิกมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.82 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร butylated hydro-xylanisole (BHA) มีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร 6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic Acid (Trolox) มีค่า IC_{50} เท่ากับ 4.82 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และวิตามินซี มีค่า IC_{50} เท่ากับ 8.85 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Khammuang and Sarnthima, 2011) ค่า IC_{50} ที่แตกต่างนี้อาจมาจากการที่สารสกัดแต่ละชนิดมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาณและโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกในที่แตกต่างกันทำให้ส่งผลต่อความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนได้ (Maisuthisakul and Gordon, 2009)

2. ผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอทและไบโอพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง

ในการศึกษาตอนที่ 2 นี้ได้นำ MSKE ที่เตรียมในข้อ 1 มาทำการเอนแคปซูเลชัน โดยใช้อิมัลชันชนิด W/O/W ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของไบโอพอลิเมอร์ที่ใช้คือ เจลาติน (ความเข้มข้นร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก) และโซเดียมอัลจิเนต (ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนัก) เติมไบโอ-พอลิเมอร์ในส่วนของเฟสน้ำภายใน โดยจะทำการศึกษาร่วมกับไฮโดรโฟบิกอิมัลซิไฟเออร์ นั่นคือ พอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (PGPR) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนักในเฟสน้ำมัน เพื่อทราบสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันที่เตรียมได้ ขั้นแรกก่อนที่จะศึกษาผลของ PGPR และไบโอพอลิเมอร์ (เจลาตินและ/หรือโซเดียมอัลจิเนต) ทำการศึกษาผลของเจลาตินและ NaCl ต่อความขุ่นในสารละลาย MSKE สมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE ดังนั้นในตอนที่ 2 จะแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ (1) ศึกษาผลของเจลาตินและ NaCl (2) ผลของ PGPR และเจลาติน และ (3) ผลของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนต ดังนี้

2.1 ผลของเจลาตินและ NaCl ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE

ในส่วนผลของเจลาติน เนื่องจากมีรายงานวิจัยที่ทำการเติม NaCl ในสารละลายเจลาติน เพื่อช่วยในการเกิดเจล (Fechner *et al.,* 2007; Surh *et al.,* 2007) ในเบื้องต้นจึงทำการศึกษาเพื่อทราบผลของ NaCl ต่อความขุ่นของสารละลายผสมระหว่างเจลาตินและ MSKE รวมทั้งสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันที่เตรียมได้ โดยเจลาตินใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก NaCl ความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิโมลาร์ ในเฟสน้ำภายใน และ PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำมัน ได้ผลดังนี้

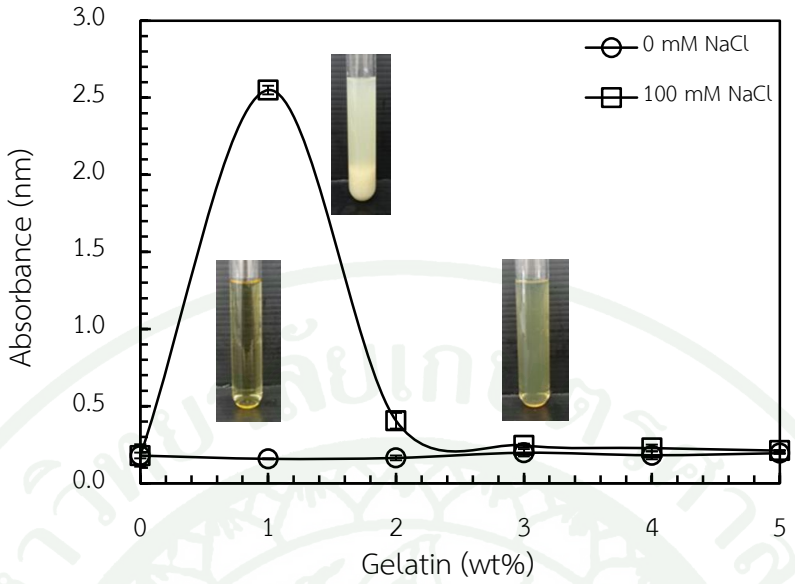
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.1 ความขุ่นของสารละลายผสม

ความขุ่นของสารละลายผสมระหว่างเจลาติน และ MSKE ที่มีการเติมและไม่เติม NaCl แสดงดังภาพที่ 12 เมื่อพิจารณาในระบบที่ไม่มีการเติม NaCl พบว่า สารละลายผสมระหว่างเจลาตินและ MSKE มีความขุ่นใกล้เคียงกันในทุกช่วงความเข้มข้นของเจลาติน แต่เมื่อพิจารณาในระบบที่มีการเติม NaCl พบว่า ในระบบที่มีการเติม NaCl มีความขุ่นขึ้นชัดเจน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของเจลาตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะมีความขุ่นและมีตะกอนสีขาวเกิดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินมากขึ้นไม่พบตะกอนและความขุ่นมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิด cross-link กันระหว่างโปรตีน (เจลาติน) กับสารประกอบฟีนอลิก (MSKE) ซึ่งจะทำให้ลักษณะของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Strauss and Gibson, 2004) ความขุ่นที่เกิดขึ้นอาจขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารฟีนอลิกและโปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yi *et al.* (2006) ที่ศึกษาการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างเจลาตินและแทนนิน พบว่า เจลาตินและแทนนินสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันทำให้ได้สารละลายที่มีความขุ่น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของแทนนินจะจับกับกลุ่มที่มีขั้วในโมเลกุลของเจลลาตินด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ แต่ถ้าในกรณีที่ความเข้มข้นของสารฟีนอลิกมากกว่าโปรตีน สารฟีนอลิกจะสามารถจับกับโปรตีนได้ 2 ตัวเกิดเป็นไบพอลิเมอร์หรือไตร-พอลิเมอร์ที่จับกันแน่นจนเกิดการตกตะกอนได้ ในกรณีที่สารละลายผสมมี NaCl จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนแม้ว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพโปรตีนน้อย (Totosaus *et al.,* 2002) แต่เมื่อละลายในสารละลายเจลาตินที่ความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) อาจทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพโปรตีนมาก จึงเหลือโปรตีนที่เป็นอิสระน้อยลง เมื่อผสมกับสารละลาย MSKE จึงเกิดตะกอนได้

การศึกษาในส่วนนี้ทำให้ทราบว่าการเตรียมสารละลายผสมระหว่างเจลาตินและ MSKE ในระบบที่มีการเติม NaCl และไม่มีการเติม NaCl มีผลต่อลักษณะและการละลายของสารละลายผสม ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกความเข้มข้นของเจลาตินที่ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และ NaCl ความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิโมลาร์ มาศึกษาต่อในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

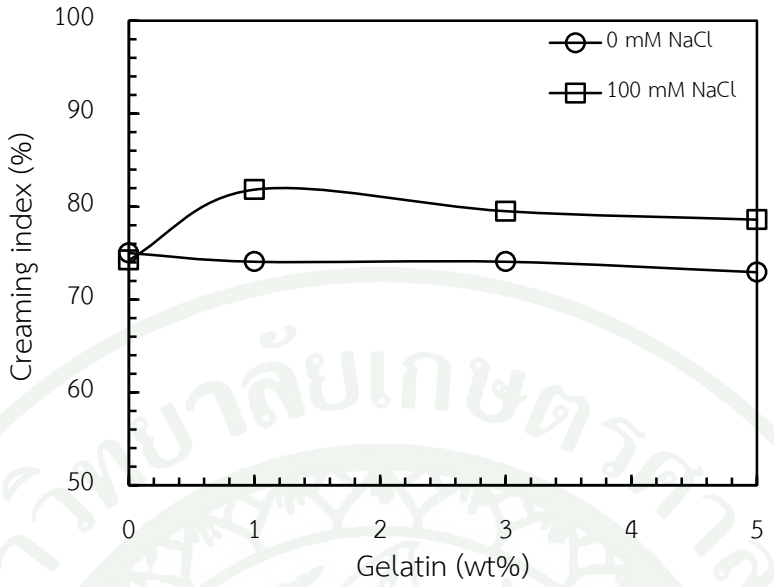


ภาพที่ 12 ความขุ่นของสารละลายผสมที่มีเจลาติน MSKE และNaCl

2.1.2 การแยกชั้นเป็นครีม (creaming) ของอิมัลชัน

อิมัลชันชนิด W/O/W ประกอบด้วยอิมัลชันชนิด W/O ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับน้ำมันร้อยละ 20:80 โดยน้ำหนัก ซึ่งในเฟสน้ำประกอบด้วยไบโอพอลิเมอร์ และในเฟสน้ำมันประกอบด้วย PGPR จากนั้นนำอิมัลชันชนิด W/O รวมกับเฟสน้ำภายนอกที่มี Tween 80 มอลโต-เดกซ์ตริน และกัมอะราบิก โดยอัตราส่วนที่ใช้ คือ อิมัลชันชนิด W/O ต่อเฟสน้ำภายนอก เท่ากับร้อยละ 10:90 โดยน้ำหนัก เมื่อเก็บอิมัลชันชนิด W/O/W ในหลอดทดลองที่อุณหภู มิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าการแยกชั้นเป็นครีม พบว่า เกิดการแยกชั้นเป็นครีมมากขึ้นเมื่อตั้งทิ้งไว้นานขึ้น โดยมีส่วนชั้นครีมด้านบนและชั้นของเหลวใสด้านล่าง การแยกชั้นนี้เป็นผลจากแรงโน้มถ่วง เนื่องจากค่าความหนาแน่นของไขมันต่ำกว่าความหนาแน่นของน้ำในเฟสต่อเนื่อง (McClements, 2005) จากการทดลองเมื่อพิจารณาผลของเจลาตินและ NaCl ต่อค่าการแยกชั้นเป็นครีม (ภาพที่ 13) พบว่าเจลาตินและ NaCl มีผลต่อค่าการแยกชั้นเป็นครีม โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินจะมีค่าแยกชั้นเป็นครีมลดลง และในอิมัลชันที่ไม่มีการเติม NaCl จะมีการแยกชั้นเป็นครีมน้อยกว่าอิมัลชันที่มีการเติม NaCl อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และNaCl

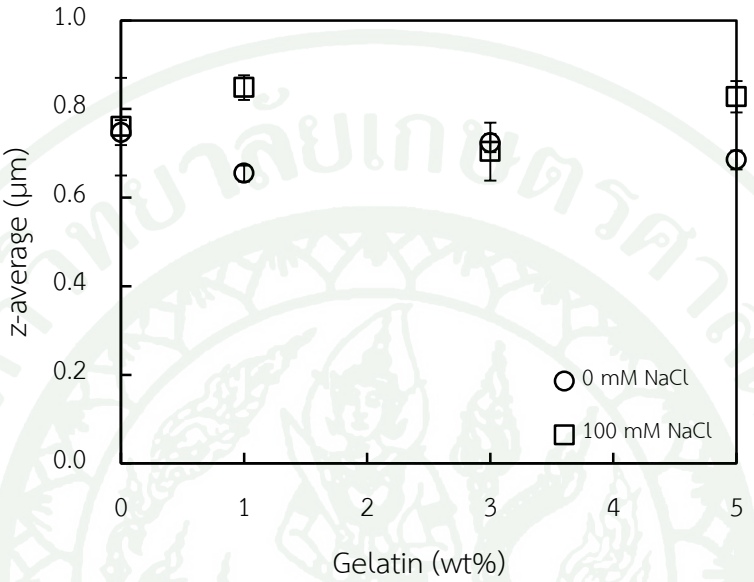
2.1.3 ขนาดอนุภาคของอิมัลชัน

เมื่อตรวจสอบขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า อนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบ polymodal distribution คือขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวสูง มีขนาดไม่สม่ำเสมอ (ภาคผนวกที่ 3) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (z-average) ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.60-0.80 ไมโครเมตร โดยอิมัลชันที่มีการเติม NaCl จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.70-0.85 ไมโครเมตร และอิมัลชันที่มีไม่มีการเติม NaCl ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.65 – 0.75 ไมโครเมตร นั่นคือ อิมัลชันที่มีการเติม NaCl มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าอิมัลชันที่ไม่มีการเติม NaCl (ภาพที่ 14) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชัน (ภาพที่ 13)

จากการพิจารณาค่าการแยกชั้นเป็นครีมและขนาดของอนุภาคอิมัลชันร่วมกัน พบว่า การเติม NaCl ในอิมัลชันทำให้อิมัลชันเสียความคงตัวมากกว่าอิมัลชันที่ไม่เติม NaCl นั่นคือ มีค่าการแยกชั้นเป็นครีมมากกว่าและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ทั้งนี้ค่าการแยกชั้นเป็นครีมสามารถคำนวณได้จากสมการของสโตกส์ (Stoke's law) โดยพบว่า ถ้าอนุภาคอิมัลชันมีขนาดใหญ่จะทำให้อัตราการแยกชั้นเป็นครีมเร็วขึ้น (McClement, 2005) และ NaCl อาจส่งผลต่อความสมดุลของแรงดันออสโมติกระหว่างเฟสน้ำภายในและเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันชนิด W/O/W ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rosano *et al,* (1998) นอกจากนี้อาจจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ Ostwald ripening ที่พบว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ามารวม เนื่อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากมีการส่งถ่ายมวลของเฟสที่กระจายตัวจากอนุภาคหนึ่งไปสู่อีกอนุภาคหนึ่งโดยแทรกผ่านทางเฟสต่อเนื่อง ทำให้อนุภาคน้ำในเฟสน้ำภายในและอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O ในอิมัลชันชนิด W/O/W มีขนาดใหญ่ขึ้น (Rosano *et al,*. 1998)



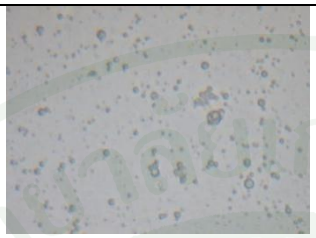
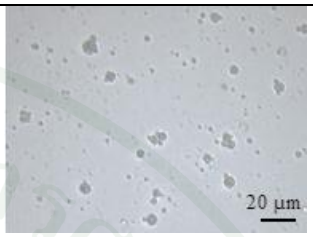
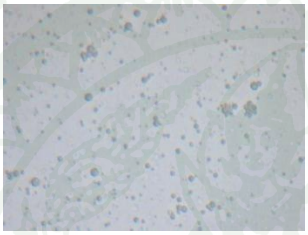
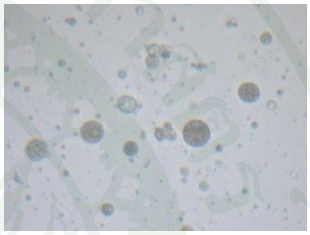
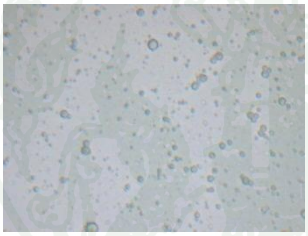
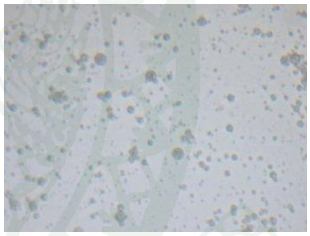
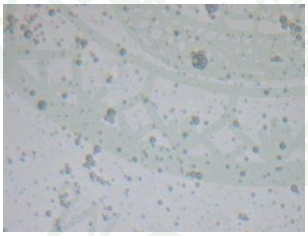
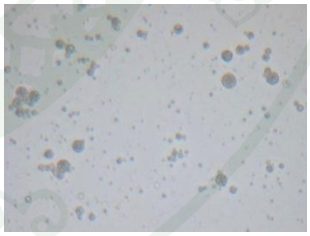
ภาพที่ 14 ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ NaCl

2.1.4 ลักษณะโครงสร้างภายในอิมัลชัน (microstructure)

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายแสดงลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่เตรียมได้ดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า ลักษณะโครงสร้างภายในอิมัลชันมีการกระจายตัวที่ดี โดยอิมัลชันมีลักษณะที่อนุภาคของเฟสที่กระจายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าหลายอนุภาคกระจายอยู่ภายในไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่าง แต่เมื่อพิจารณาผลของ NaCl พบว่า ในอิมัลชันที่มีการเติม NaCl ลักษณะของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าในอิมัลชันที่ไม่มีการเติม NaCl และในอิมัลชันที่มีการเติม NaCl และเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะของอนุภาคมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคของอิมัลชันดังแสดงภาพที่ 14

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และNaCl ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40X

Gelatin (%)	0 mM NaCl	100 mM NaCl
0		
1		
3		
5		

2.1.5 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency)

ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE พิจารณาจากการเหวี่ยงแยกอิมัลชันชนิด W/O/W ให้ MSKE ที่อยู่ในเฟสน้ำภายในเคลื่อนที่ผ่านเฟสน้ำมันมาอยู่ในเฟสน้ำภายนอก จากนั้นหาปริมาณของ MSKE ที่อยู่ในเฟสน้ำภายนอก โดยการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันคำนวณจากสมการที่ 4 จากการทดลอง พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเจลาตินเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการเอนเคปซูเลชันเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 8) ทั้งนี้อาจเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลจากการที่สารประกอบประเภทฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สามารถเกิด cross-link กับโมเลกุลของเจลาตินได้ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่มีขนาดเล็กและแข็งแรง (Strauss and Gibson, 2004) นอกจากนี้ เจลาตินยังสามารถเพิ่มความหนืดและเกิดเจลได้ในเฟสน้ำภายในทำให้ชะลอการเคลื่อนที่ของ MSKE ในเฟสน้ำภายในให้เคลื่อนที่ผ่านเฟสน้ำมันออกมายังเฟสน้ำภายนอกช้าลงได้ (Surh *et al.,* 2007) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับในหลายงานวิจัยที่ใช้เจลาตินในเฟสน้ำภายในเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันได้ (Fechner *et al.*, 2007; O'Regan *et al.,* 2010) เมื่อพิจารณาผลของ NaCl พบว่า การเติมหรือไม่เติม NaCl ในอิมัลชันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ยกเว้นที่ความเข้มข้นของเจลาตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในอิมัลชันที่มี NaCl จะมีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการรวมตัวกันของสารละลายผสมระหว่าง MSKE เจลาตินและ NaCl ที่เป็นตะกอน (ผลจากการทดสอบเบื้องต้นข้อ 2.1.1)

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ในอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ NaCl

Gelatin (wt %)	0 mM NaCl	100 mM NaCl
0	$84.92^{bA} \pm 1.11$	$82.63^{bA} \pm 2.98$
1	$92.53^{aA} \pm 0.81$	$78.30^{bB} \pm 2.15$
3	$92.54^{aA} \pm 1.91$	$96.03^{aA} \pm 0.76$
5	$95.13^{aA} \pm 1.10$	$95.17^{aA} \pm 1.03$

หมายเหตุ a-b/ A-B หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง/แนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เนื่องจากในการทดลองในตอนที่ 2.1.5 พบว่า การเติม NaCl หรือไม่เติม NaCl ในเฟสน้ำภายในไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ยกเว้นที่ความเข้มข้นเจลาตินร้อยละ 1 ที่มีการเติม NaCl แต่การเติม NaCl มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2.2 และ 2.3 จึงไม่เติม NaCl ในเฟสน้ำภายใน โดยในการทดลองตอนที่ 2.2 และ 2.3 เป็นการศึกษาความคงตัวและการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ดังนั้นจึงศึกษาผลของ PGPR และไบโอพอลิเมอร์ (เจลาติน, โซเดียมอัลจิเนต) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ผลของ PGPR และเจลาตินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE

การทดลองตอนที่ 2.2 นี้ ได้ทำการศึกษาผลของ PGPR ในเฟสน้ำมันและเจลาตินในเฟสน้ำภายในต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของอิมัลชันที่เตรียมได้ ได้แก่ การแยกชั้นเป็นครีม ขนาดอนุภาค ความหนืด ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชัน รวมทั้งประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ได้ผลดังนี้

2.2.1 การแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชัน (creaming)

จากตารางที่ 9 พบว่า ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W เมื่อพิจารณาจากการสังเกตด้วยตา (ไม่แสดงข้อมูล) พบว่า มีความใกล้เคียงกันในทุกๆ ความเข้มข้นของ PGPR และเจลาติน แต่เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติ พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 70.59-74.38 โดยความเข้มข้นของ PGPR มีผลต่อค่าการแยกชั้นเป็นครีมมากกว่าเจลาติน

ตารางที่ 9 ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR

Gelatin (wt%)	PGPR (wt%)			
	2	4	6	8
0	$71.55^{bA} \pm 0.58$	$74.23^{aA} \pm 0.02$	$73.74^{aA} \pm 0.71$	$74.38^{aA} \pm 1.11$
1	$70.59^{cA} \pm 1.08$	$72.15^{bAB} \pm 0.71$	$72.80^{bAB} \pm 0.12$	$74.15^{aA} \pm 0.19$
3	$70.71^{cA} \pm 0.51$	$73.23^{aB} \pm 0.51$	$71.60^{abB} \pm 0.99$	$73.09^{aA} \pm 1.15$
5	$71.04^{aA} \pm 1.27$	$72.29^{aB} \pm 0.75$	$72.10^{aB} \pm 0.55$	$72.68^{aA} \pm 1.24$

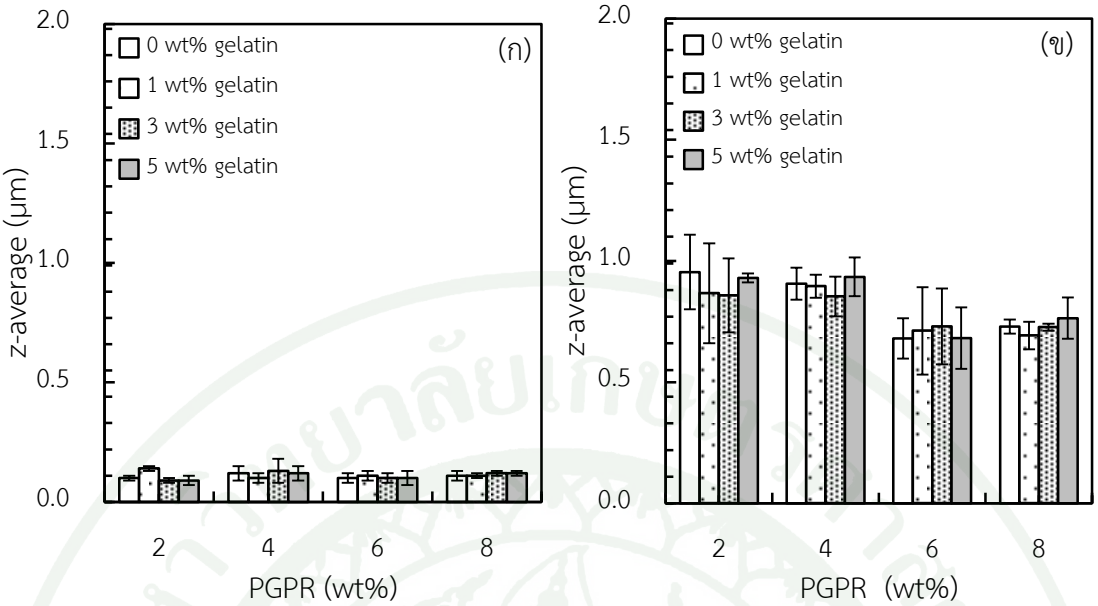
หมายเหตุ a-b/ A-B หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอน/แนวตั้งที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2.2 ขนาดอนุภาคของอิมัลชัน

เมื่อตรวจสอบขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า อนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O มีการกระจายตัวของอนุภาคแบบปกติ (monomodal distribution) คือ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดสม่ำเสมอกัน โดยมีฐานการกระจายขนาดอนุภาคแคบอยู่ในช่วง 0.1 ไมโครเมตร (ภาคผนวกที่ 2) ส่วนอิมัลชันชนิด W/O/W มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบ polymodal distribution คือขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวสูง มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1 ไมโครเมตร (ภาคผนวกที่ 3) การทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (z-average) ของอิมัลชันชนิด W/O มีขนาดเล็กกว่า 0.12 ไมโครเมตร (ภาพที่ 15ก) และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของอิมัลชันชนิด W/O/W มีขนาดอยู่ในช่วง 0.66-0.99 ไมโครเมตร (ภาพที่ 15ข) เมื่อพิจารณาผลของเจลาติน พบว่า เจลาตินมีผลต่อขนาดอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O/W เมื่อมีความเข้มข้นของ PGPR ในเฟสน้ำมันร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบผลของ PGPR และเจลาติน พบว่า PGPR มีผลต่อขนาดอนุภาคอิมัลชันมากกว่าเจลาติน เพราะ PGPR มีสมบัติเป็นอิมัล-ซีไฟเออร์ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PGPR ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงอาจเนื่องจากมีปริมาณ PGPR ที่เพียงพอในการรักษาความคงตัวบริเวณผิวสัมผัสร่วมของอนุภาคในอิมัลชันชนิด W/O (Su *et al.,* 2006) แต่ทั้ง PGPR และเจลาตินมีผลต่อขนาดอนุภาคของอิมัลชันน้อย เนื่องจากปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับชนิดและแรงในการโฮโมจีไนเซชันมากกว่า (Surh *et al.,* 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



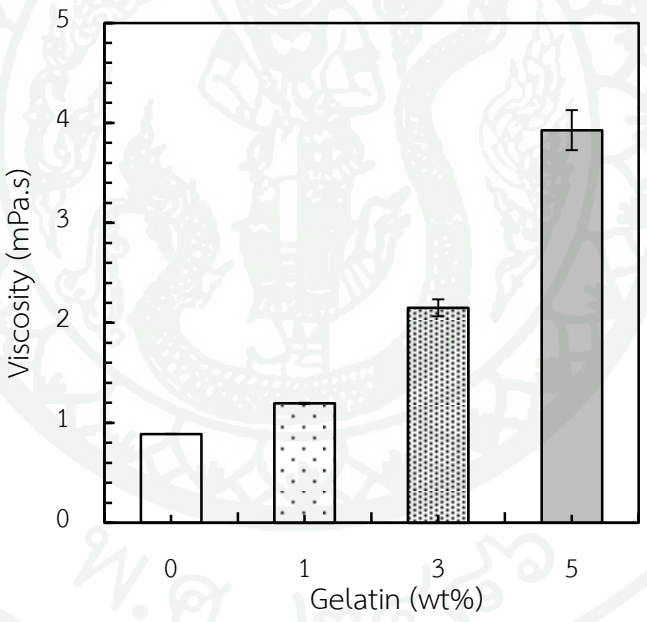
ภาพที่ 15 ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR

2.2.3 ความหนืดของเจลาตินและอิมัลชัน (viscosity)

ความหนืดของสารละลายเจลาตินที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1} แสดงดังภาพที่ 16 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินทำให้มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1} แสดงดังภาพที่ 17 พบว่า การเติมเจลาตินไม่มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน แต่การเติม PGPR มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน โดยพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PGPR จากความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O เพิ่มขึ้นจาก 88.73 mPa.s เป็น 115.00 mPa.s (ภาพที่ 17ก) เนื่องจากความหนืดของอิมัลชันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเสียดสีกันของอนุภาคน้ำมัน ด้วยเหตุนี้ถ้าความเข้มข้นของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นความหนืดของอิมัลชันจะเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้ว ความหนืดของอิมัลชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน (flocculate) ทำให้เฟสต่อเนื่องถูกกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างที่เกิดการรวมตัวกัน (McClements, 2007) และจากงานวิจัยของ Su *et al.* (2006) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PGPR จะทำให้มีปริมาณ PGPR เพียงพอที่จะดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมจึงช่วยสร้างความคงตัวให้กับอนุภาคได้ ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น และเมื่อพิจารณาความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า อิมัลชันมีความหนืดในช่วง 29.95-34.60 mPa.s (ภาพที่ 17ข)

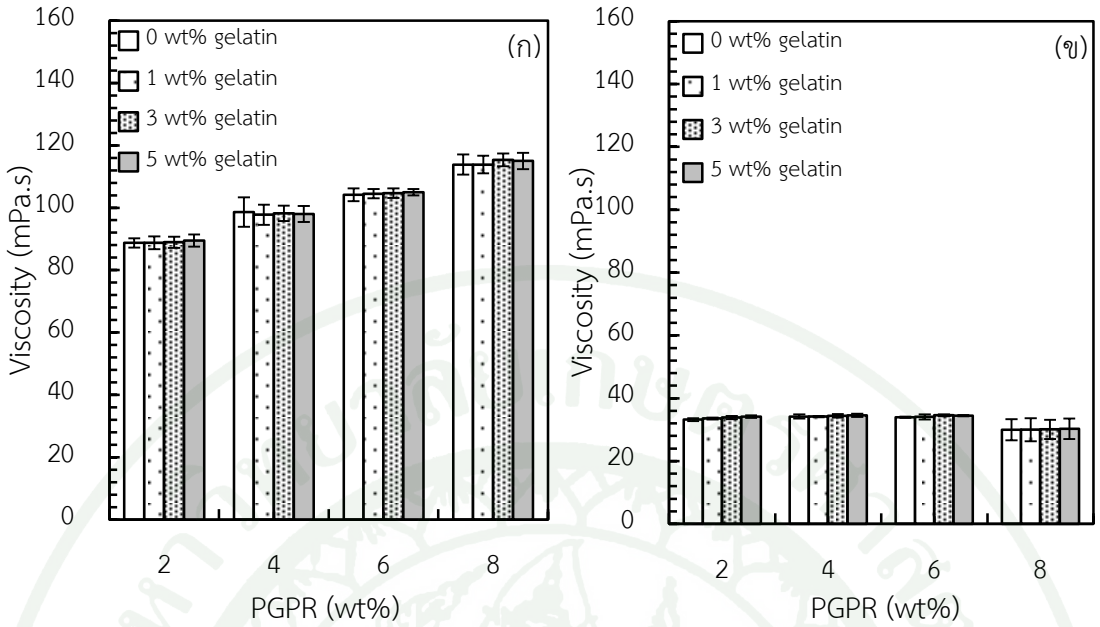
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการ power-law (สมการที่ 5) พบว่าในทุกความเข้มข้นของ PGPR และเจลาตินมีค่า regression coefficients (r^2) มากกว่า 0.98 โดยในอิมัลชันชนิด W/O มีค่า n ประมาณ 1 ในทุกความเข้มข้นของ PGPR และเจลาติน (ตารางที่ 10) ขณะที่อิมัลชันชนิด W/O/W n มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกความเข้มข้นของ PGPR และเจลาติน (ตารางที่ 11) นั่นคือ อิมัลชันชนิด W/O จะมีพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian คือ ความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน ขณะที่อิมัลชันชนิด W/O/W จะมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดลดลง โดยอิมัลชันที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning จะพบได้ในอิมัลชันที่มีอนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากขณะเพิ่มอัตราเฉือนจะเกิดการสูญเสียและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (McClements, 2007) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า K ของอิมัลชันชนิด W/O มีค่ามากกว่าอิมัลชันชนิด W/O/W ในทุกความเข้มข้นของ PGPR และเจลาติน แสดงให้เห็นว่าเฟสต่อเนื่องของอิมัลชันชนิด W/O มีความหนืดมากกว่าเฟสต่อเนื่องของอิมัลชันชนิด W/O/W



ภาพที่ 16 ความหนืดของสารละลายเจลาตินที่มีเจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 ความหนืดปรากฏของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR

Gelatin	2 wt% PGPR		4 wt% PGPR		6 wt% PGPR		8 wt% PGPR	
(wt%)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)
0	$0.918^{dA} \pm 0.00$	$0.121^{aA} \pm 0.00$	$0.942^{cB} \pm 0.00$	$0.122^{aA} \pm 0.01$	$0.939^{bB} \pm 0.01$	$0.130^{aA} \pm 0.01$	$0.980^{bC} \pm 0.01$	$0.122^{aA} \pm 0.01$
1	$0.948^{cC} \pm 0.01$	$0.107^{bAB} \pm 0.00$	$0.995^{bB} \pm 0.00$	$0.099^{bC} \pm 0.00$	$1.000^{aB} \pm 0.00$	$0.104^{bBC} \pm 0.00$	$1.006^{aA} \pm 0.00$	$0.111^{bA} \pm 0.00$
3	$0.991^{bC} \pm 0.00$	$0.091^{cD} \pm 0.00$	$1.001^{aB} \pm 0.00$	$0.098^{bC} \pm 0.00$	$1.004^{aB} \pm 0.00$	$0.103^{bB} \pm 0.00$	$1.005^{aA} \pm 0.00$	$0.113^{bA} \pm 0.00$
5	$1.002^{aC} \pm 0.00$	$0.089^{cD} \pm 0.00$	$1.002^{aA} \pm 0.00$	$0.097^{bC} \pm 0.00$	$1.004^{aA} \pm 0.00$	$0.103^{bB} \pm 0.00$	$1.006^{aA} \pm 0.00$	$0.112^{bA} \pm 0.00$

a-d/A-D หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง/แนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 11 Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR

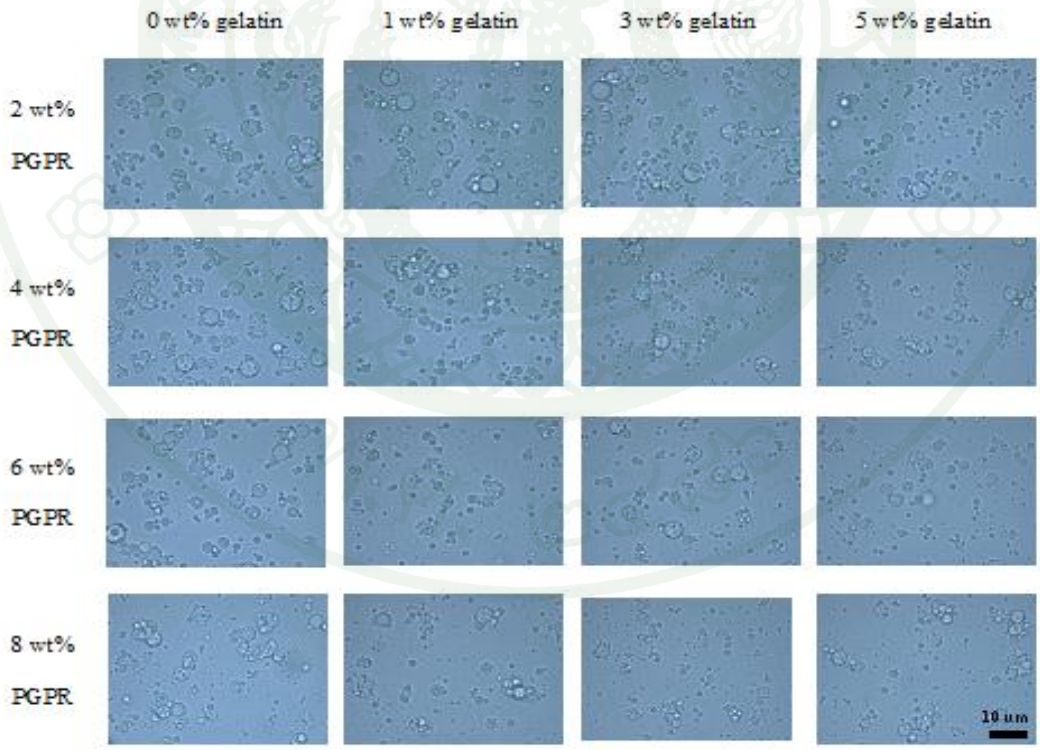
Gelatin	2 wt% PGPR		4 wt% PGPR		6 wt% PGPR		8 wt% PGPR	
(wt%)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)
0	$0.788^{aA} \pm 0.00$	$0.080^{aA} \pm 0.00$	$0.782^{aA} \pm 0.00$	$0.085^{aA} \pm 0.00$	$0.771^{aB} \pm 0.00$	$0.088^{bA} \pm 0.00$	$0.763^{aC} \pm 0.00$	$0.081^{aA} \pm 0.01$
1	$0.787^{aA} \pm 0.00$	$0.081^{aA} \pm 0.00$	$0.772^{aB} \pm 0.00$	$0.088^{aA} \pm 0.00$	$0.767^{aAB} \pm 0.00$	$0.090^{abA} \pm 0.00$	$0.763^{aC} \pm 0.00$	$0.081^{aA} \pm 0.01$
3	$0.787^{aA} \pm 0.01$	$0.082^{aA} \pm 0.00$	$0.778^{aB} \pm 0.00$	$0.087^{aA} \pm 0.00$	$0.769^{aC} \pm 0.00$	$0.091^{aA} \pm 0.00$	$0.759^{aD} \pm 0.00$	$0.082^{aA} \pm 0.01$
5	$0.793^{aA} \pm 0.00$	$0.081^{aB} \pm 0.00$	$0.777^{aB} \pm 0.01$	$0.087^{aAB} \pm 0.00$	$0.770^{aBC} \pm 0.00$	$0.090^{aA} \pm 0.00$	$0.760^{aC} \pm 0.00$	$0.083^{aAB} \pm 0.01$

a-d/A-D หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง/แนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2.4 ลักษณะโครงสร้างภายในอิมัลชัน (microstructure)

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างภายในของอนุภาคอิมัลชัน (ภาพที่ 18) พบว่า อนุภาคของอิมัลชันมีการกระจายตัวที่ดี โดยอิมัลชันมีลักษณะที่อนุภาคของเฟสที่กระจายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าหลายอนุภาคกระจายอยู่ในเฟสน้ำภายในไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่าง โดยจะสังเกตเห็นชัดเจนที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 4-8 โดยน้ำหนัก พบว่า มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและมีลักษณะเป็นอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีความสมบูรณ์ อาจเนื่องจากมีปริมาณ PGPR ที่เพียงพอในการรักษาความคงตัวที่ผิวสัมผัสร่วมของอนุภาคน้ำในอิมัลชันชนิด W/O (Su *et al.*, 2006) ทำให้อนุภาคอิมัลชันทนต่อแรงในการโฮโมจีไนซ์ครั้งที่ 2 ได้ ขณะที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีลักษณะเป็นอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ไม่มีความสมบูรณ์ คือ มีอนุภาคน้ำในเฟสน้ำภายในของอิมัลชันเคลื่อนที่ออกมายังเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชัน อาจเนื่องจากมีปริมาณ PGPR ที่ไม่เพียงพอในการรักษาความคงตัวที่ผิวสัมผัสร่วมของอนุภาคในอิมัลชันชนิด W/O ทำให้เมื่อถูกแรงในการโฮโมจีไนซ์ครั้งที่ 2 จะเกิดการเสียสภาพได้ง่าย

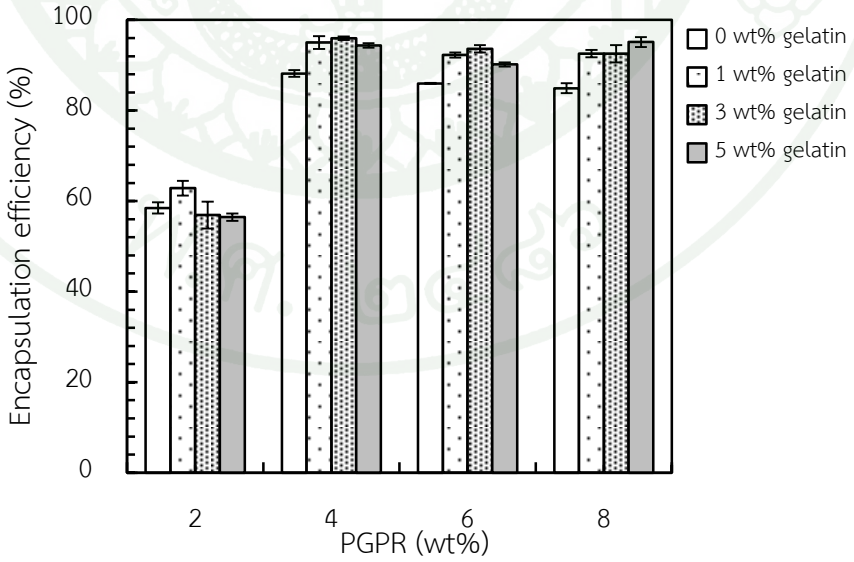


ภาพที่ 18 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100X (สเกลบาร์ 10 µm)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2.5 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency)

ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE แสดงในภาพที่ 19 พบว่า ความเข้มข้นของ PGPR และเจลาตินมีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน โดยเมื่อพิจารณาผลของเจลาติน พบว่า อิมัลชันที่มีเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำภายในจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90) เนื่องจากเจลาตินช่วยเพิ่มความหนืดในเฟสน้ำภายในทำให้ MSKE เคลื่อนที่ออกมายังเฟสน้ำภายนอกช้าลงและอาจเป็นผลจากการที่สารประกอบประเภทฟีนอลิกและฟลาโนยด์สามารถเกิด cross-link กับโมเลกุลของเจลาตินได้ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่มีขนาดเล็กและแข็งแรง (Strauss and Gibson, 2004) เมื่อพิจารณาผลของ PGPR พบว่า ที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพในการเอน-แคปซูเลชันต่ำ (ค่าที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 56-63) กว่าที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 4-8 โดยน้ำหนัก (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของ PGPR ไม่เพียงพอต่อการรักษาความคงตัวของอนุภาคอิมัลชันระหว่างการเหวี่ยงแยกจึงไม่สามารถกักเก็บ MSKE ได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE จะขึ้นอยู่กับความคงตัวของอนุภาคอิมัลชันซึ่งสามารถควบคุมได้โดยอิมัลซิไฟเออร์นั่นคือ PGPR ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ไบโอพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ คือ เจลาตินในเฟสน้ำภายในยังช่วยให้การเคลื่อนที่ของ MSKE จากเฟสน้ำภายในมายังเฟสน้ำภายนอกช้าลงได้



ภาพที่ 19 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเจลาติน MSKE และ PGPR

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 ผลของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนตต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี MSKE

การทดลองตอนที่ 2.3 เป็นการศึกษาผลของ PGPR ในเฟสน้ำมันและโซเดียมอัลจิเนตในเฟสน้ำภายในต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของอิมัลชันที่เตรียมได้ ได้แก่ การแยกชั้นเป็นครีม ขนาดอนุภาค ความหนืด ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชัน รวมทั้งประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ได้ผลดังนี้

2.3.1 ค่าการแยกชั้นเป็นครีม (creaming)

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W เมื่อพิจารณาจากการสังเกตด้วยตา (ไม่แสดงข้อมูล) พบว่า มีความใกล้เคียงกันในทุกๆ ความเข้มข้นของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนต แต่เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติ พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 71.21-76.01 โดยความเข้มข้นของ PGPR มีผลต่อค่าการแยกชั้นเป็นครีมมากกว่าโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของ PGPR และเจลาตินในตอนที่ 2.2.1

ตารางที่ 12 ค่าการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR

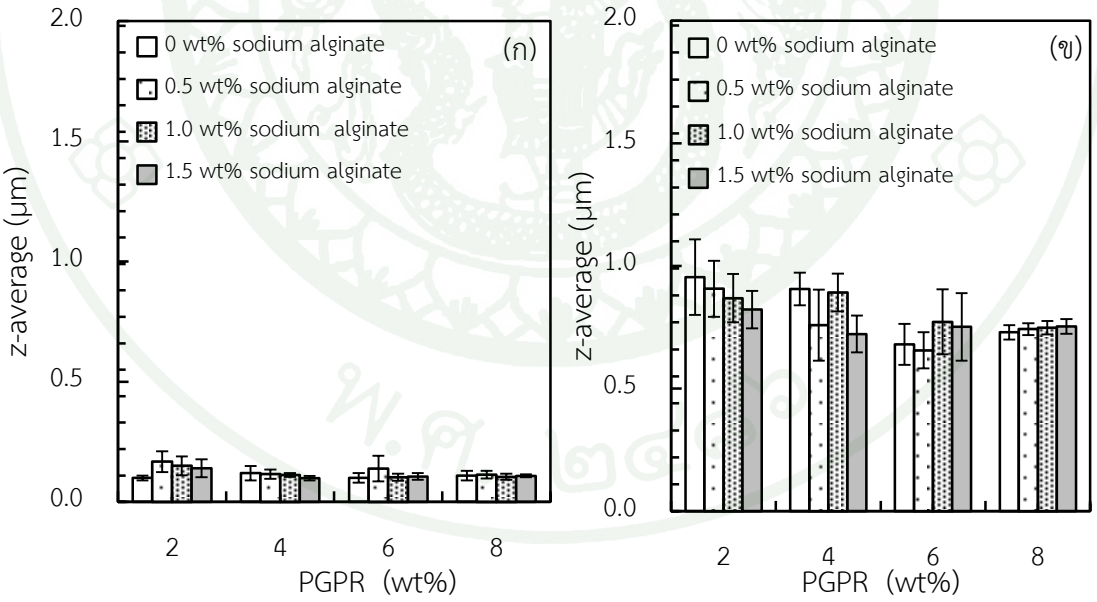
sodium alginate	PGPR (wt%)			
(wt%)	2	4	6	8
0.0	71.55^{bAB} ±0.58	74.23^{aA} ±0.02	73.90^{aA} ±0.71	74.92^{aAB} ±1.11
0.5	72.08^{cA} ±0.00	72.73^{bB} ±0.00	72.48^{bB} ±0.42	75.36^{aAB} ±0.09
1.0	71.21^{cB} ±0.00	72.73^{bB} ±0.00	72.73^{bB} ±0.00	74.75^{aB} ±0.27
1.5	71.21^{cB} ±0.00	72.22^{bB} ±0.87	72.56^{bB} ±0.29	76.01^{aA} ±0.00

หมายเหตุ a-b/ A-B หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอน/แนวตั้งที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3.2 ขนาดอนุภาคของอิมัลชัน

เมื่อตรวจสอบขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า อนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O มีการกระจายตัวของอนุภาคแบบปกติ (monomodal distribution) คือ อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดสม่ำเสมอกัน โดยมีฐานการกระจายขนาดอนุภาคแคบอยู่ในช่วง 0.1 ไมโครเมตร (ภาคผนวกที่ 2) อิมัลชันชนิด W/O/W มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบ polymodal distribution คือขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวสูง มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1 ไมโครเมตร (ภาคผนวกที่ 3) จากการทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (z-average) ของอิมัลชันชนิด W/O มีขนาดเล็กกว่า 0.17 ไมโครเมตร (ภาพที่ 20ก) และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของอิมัลชันชนิด W/O/W มีขนาดอยู่ในช่วง 0.66-0.95 ไมโครเมตร (ภาพที่ 20ข) เมื่อพิจารณาผลของโซเดียมอัลจิเนต พบว่า โซเดียมอัลจิเนตจะมีผลต่อขนาดอนุภาคอิมัลชันเมื่อมีความเข้มข้นของ PGPR ในเฟสน้ำมันร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบผลของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนต พบว่า PGPR จะมีผลต่อขนาดอนุภาคอิมัลชันมากกว่าโซเดียมอัลจิเนตเช่นเดียวกับผลของ PGPR และเจลาตินในตอนที่ 2.2.2



ภาพที่ 20 ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชนิด W/O/W (ข) ที่มีโซเดียม-อัลจิเนต MSKE และ PGPR

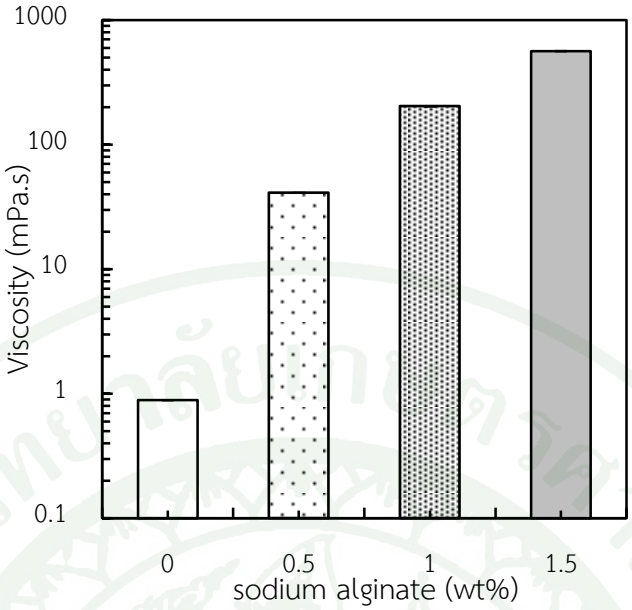
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3.3 ความหนืดของโซเดียมอัลจิเนตและอิมัลชัน (viscosity)

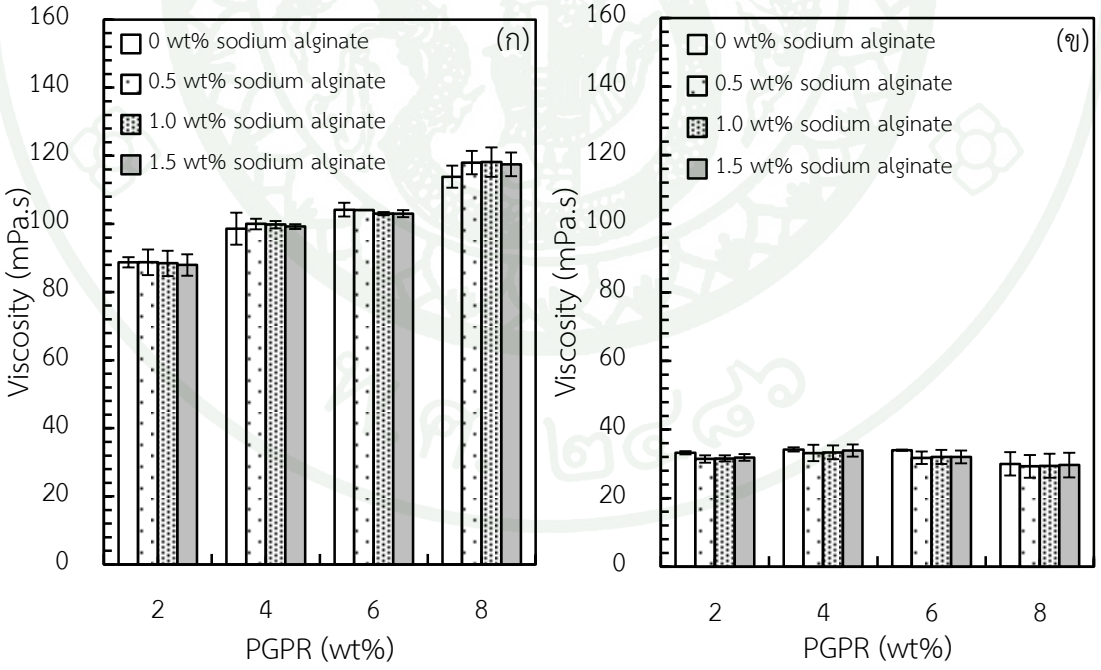
ความหนืดของสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1} แสดงดังภาพที่ 21 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตจะทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1} แสดงดังภาพที่ 22 พบว่า การเติมโซเดียมอัลจิเนตไม่มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน แต่การเติม PGPR มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน โดยพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PGPR จากความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนักจะทำให้ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O เพิ่มขึ้นจาก 88.73 mPa.s เป็น 118.17 mPa.s (ภาพที่ 22ก) และเมื่อพิจารณาความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า อิมัลชันมีความหนืดในช่วง 29.27-34.20 mPa.s (ภาพที่ 22ข) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของ PGPR และเจลาตินในตอนที่ 2.2.3

จากสมการ power-law (สมการที่ 5) พบว่าในทุกความเข้มข้นของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนตมีค่า regression coefficients (r^2) มากกว่า 0.98 โดยในอิมัลชันชนิด W/O และอิมัลชันชนิด W/O/W มีค่า n มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกความเข้มข้นของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนต (ตารางที่ 10, 11) นั่นคือ อิมัลชันชนิดจะมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดลดลง โดยอิมัลชันที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning จะพบได้ในอิมัลชันที่มีอนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากขณะเพิ่มอัตราเฉือนจะเกิดการสูญเสียและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (McClements, 2007) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า K ของอิมัลชันชนิด W/O มีค่ามากกว่าอิมัลชันชนิด W/O/W ในทุกความเข้มข้นของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนต แสดงให้เห็นว่าเฟสต่อเนื่องของอิมัลชันชนิด W/O มีความหนืดมากกว่าเฟสต่อเนื่องของอิมัลชันชนิด W/O/W ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของ PGPR และเจลาตินในตอนที่ 2.2.3 เช่นเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 21 ความหนืดของสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีโซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้นต่างๆที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}



ภาพที่ 22 ความหนืดปรากฏของอิมัลชันชนิด W/O (ก) และอิมัลชันชนิด W/O/W (ข) ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1}

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR

sodium alginate	2 wt% PGPR		4 wt% PGPR		6 wt% PGPR		8 wt% PGPR	
(wt%)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)
0.0	0.918^{cA} ±0.00	0.121^{aA} ±0.00	0.942^{bB} ± 0.00	0.122^{abA} ±0.01	0.939^{cB} ±0.01	0.130^{aA} ±0.01	0.980^{aC} ±0.01	0.122^{cA} ±0.01
0.5	0.954^{bA} ±0.01	0.105^{bC} ±0.01	0.940^{bA} ±0.01	0.125^{aB} ±0.01	0.949^{bcA} ±0.00	0.124^{abB} ±0.00	0.952^{bA} ±0.00	0.140^{aA} ±0.01
1.0	0.966^{bA} ±0.01	0.100^{bcC} ±0.01	0.948^{bC} ±0.01	0.121^{abB} ±0.00	0.958^{abAB} ±0.01	0.119^{bcB} ±0.00	0.957^{bAB} ±0.00	0.138^{aA} ±0.01
1.5	0.987^{aA} ±0.01	0.092^{cC} ±0.00	0.966^{aB} ±0.01	0.113^{cB} ±0.00	0.970^{aB} ±0.00	0.114^{cB} ±0.00	0.973^{aB} ±0.00	0.129^{abA} ±0.01

a-d/A-C หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง/แนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

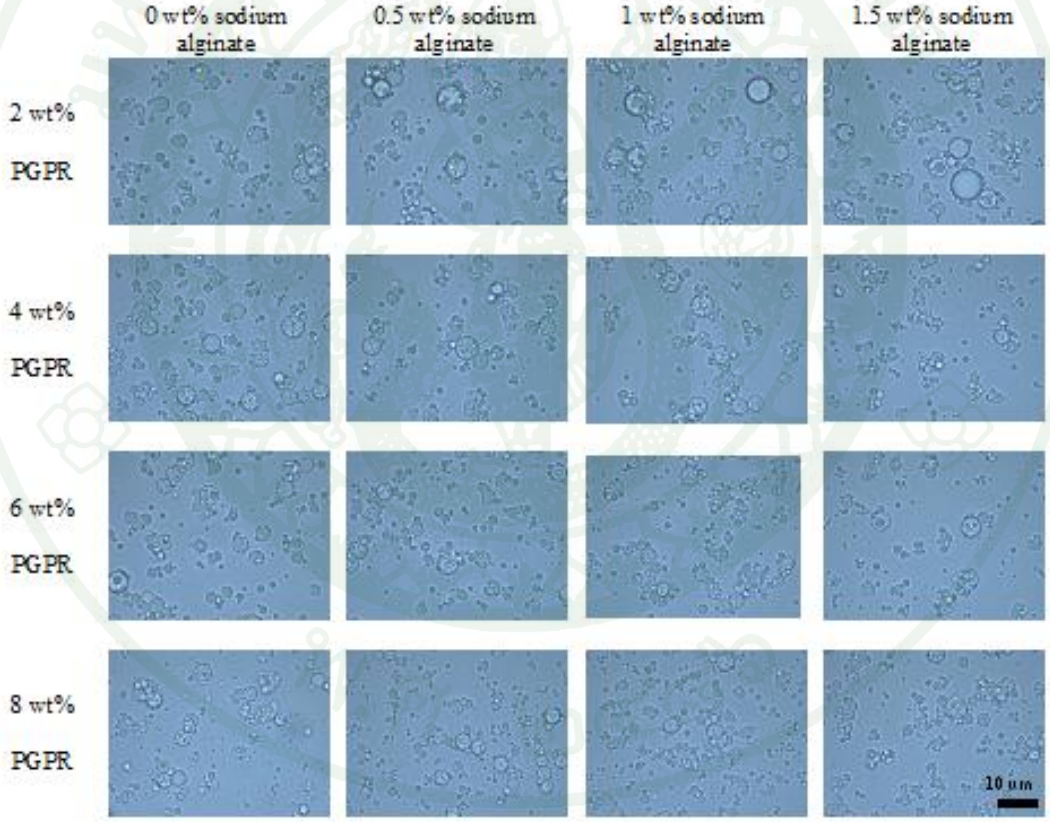
ตารางที่ 14 Power-law model ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR

sodium alginate	2 wt% PGPR		4 wt% PGPR		6 wt% PGPR		8 wt% PGPR	
(wt%)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)	n	K (Pa.s)
0.0	0.788^{aA} ± 0.00	0.080^{aA} ± 0.00	0.782^{aA} ±0.00	0.085^{aA} ± 0.00	0.771^{aB} ±0.00	0.088^{aA} ±0.00	0.763^{aC} ± 0.00	0.081^{aA} ± 0.01
0.5	0.795^{aA} ±0.00	0.074^{bA} ±0.00	0.781^{aB} ±0.00	0.083^{aA} ±0.01	0.775^{aC} ±0.00	0.081^{aA} ±0.01	0.772^{aC} ±0.01	0.079^{aA} ±0.01
1.0	0.795^{aA} ±0.01	0.074^{bA} ±0.00	0.780^{aB} ±0.00	0.084^{aA} ±0.00	0.773^{aB} ±0.00	0.083^{aA} ±0.01	0.771^{aB} ±0.01	0.079^{aA} ±0.01
1.5	0.795^{aA} ±0.01	0.076^{abB} ±0.00	0.777^{aB} ±0.01	0.086^{aB} ±0.00	0.773^{aB} ±0.01	0.082^{aB} ±0.00	0.770^{aB} ±0.00	0.081^{aB} ±0.01

a-d/A-C หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง/แนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.3.4 ลักษณะโครงสร้างภายในอิมัลชัน (microstructure)

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างภายในของอนุภาคในอิมัลชัน (ภาพที่ 23) พบว่า อิมัลชันมีลักษณะที่อนุภาคของเฟสที่กระจายประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าหลายอนุภาคกระจายอยู่ในเฟสน้ำภายในไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่าง โดยเห็นชัดเจนที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 4-8 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและมีความสมบูรณ์ของอนุภาค W/O แต่ที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีลักษณะของอนุภาค W/O ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของ PGPR และเจลาตินในตอนที่ 2.2.4



ภาพที่ 23 ลักษณะโครงสร้างภายในของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียมอัลจิเนต MSKE และ PGPR ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100X (สเกลบาร์ 10 µm)

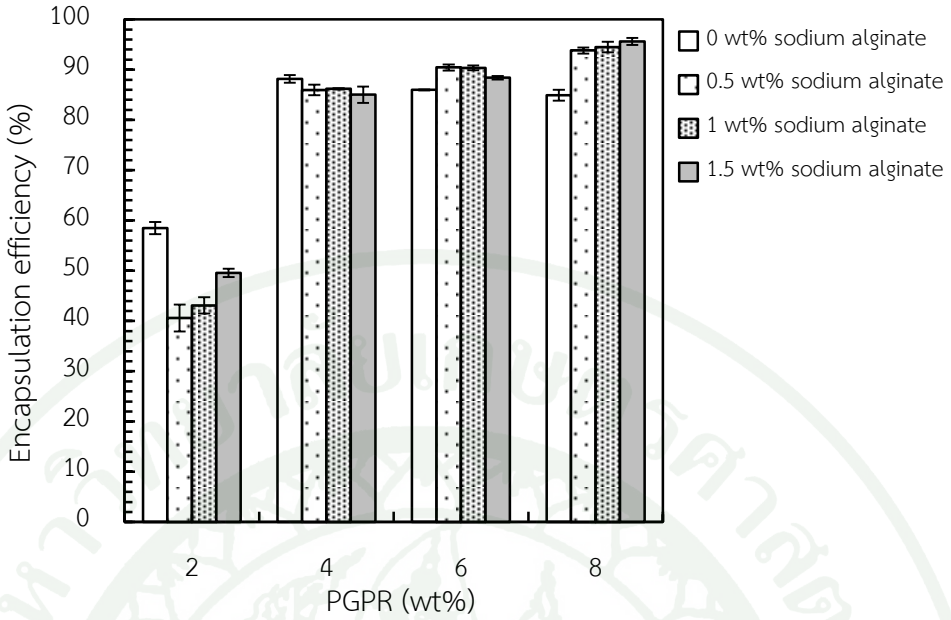
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3.5 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency)

ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE แสดงดังภาพที่ 24 พบว่า ความเข้มข้นของ PGPR และโซเดียมอัลจิเนตมีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน โดยเมื่อพิจารณาผลของโซเดียมอัลจิเนต พบว่า อิมัลชันที่มีโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนักในเฟสน้ำภายในและความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 6 และ 8 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำมัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันได้ (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90) เนื่องจากสารละลายของโซเดียมอัลจิเนตมีความหนืด ทำให้อาจช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของ MSKE จากเฟสน้ำภายในมายังเฟสน้ำภายนอกได้ เมื่อพิจารณาผลของ PGPR พบว่า ที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันต่ำ (ค่าที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 40-50) กว่าที่ความเข้มข้นของร้อยละ PGPR ที่ 4 และ 6 โดยน้ำหนัก (ค่าที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 85-90) แต่ค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันยังน้อยกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของ PGPR อาจไม่เพียงพอต่อการสร้างความคงตัวแก่อนุภาคอิมัลชันระหว่างการเหวี่ยงแยกทำให้ไม่สามารถกักเก็บ MSKE ได้สมบูรณ์ ส่วนที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ PGPR ที่ความเข้มข้นสูงจะช่วยลดผลกระทบจากแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการโฮโมจีไนเซชันครั้งที่ 2 จึงลดการทำลายอนุภาคอิมัลชัน (Evision *et al*., 1995) ดังนั้น ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ขึ้นอยู่กับความคงตัวของอนุภาคอิมัลชันซึ่งสามารถควบคุมได้โดยอิมัลซิไฟเออร์นั่นคือ PGPR นอกจากนี้ ไบโอ-พอลิเมอร์ที่เลือกใช้ คือ โซเดียมอัลจิเนตในเฟสน้ำภายในช่วยให้การเคลื่อนที่ของ MSKE จากเฟสน้ำภายในมายังเฟสน้ำภายนอกช้าลงได้

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อเทียบกับเจลาตินในการทดลองตอนที่ 2.2.5 พบว่าการเติมเจลาตินในเฟสน้ำภายในทำให้ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ดีกว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนตในเฟสน้ำภายใน อาจเป็นผลจากการที่เจลาตินสามารถเกิด cross-link กับ MSKE ได้จึงสามารถจับกับ MSKE ได้มากกว่าโซเดียมอัลจิเนตนั่นเองและการเลือกใช้เจลาตินในเฟสน้ำภายในยังช่วยลดปริมาณการใช้ PGPR ในเฟสน้ำมันได้มากกว่าโซเดียมอัลจิเนต นั่นคือ ใช้เจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและ PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จะทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90) ในขณะที่โซเดียมอัลจิเนตต้องใช้ PGPR ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักจึงจะทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง (ค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 90)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีโซเดียม-อัลจิเนต MSKE และ PGPR

3. ผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำและผงเอนแคปซูเลทที่มีสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย

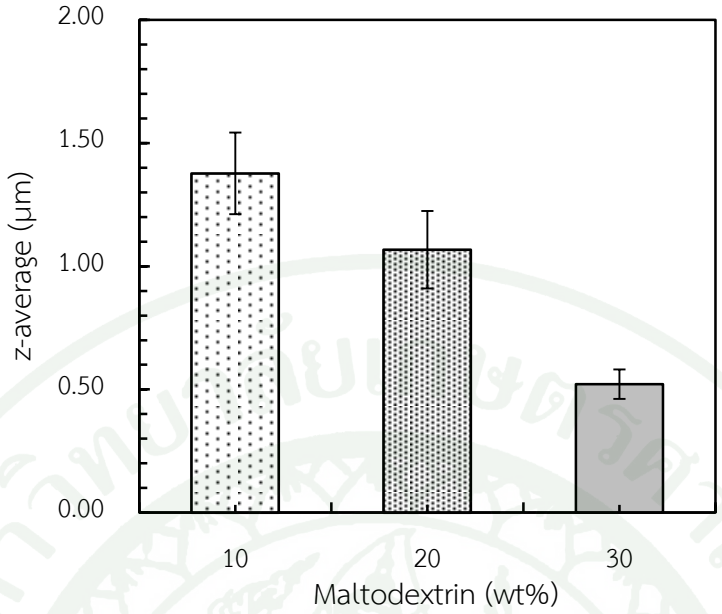
ในการทดลองตอนที่ 3 ได้คัดเลือกสภาวะในการเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ดีที่สุดจากการทดลองตอนที่ 2 คือ เลือกที่ความเข้มข้นของ PGPR ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำมันและความเข้มข้นของเจลาตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในเฟสน้ำภายใน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง (มากกว่าร้อยละ 90) และยังเป็นสภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของสาร (PGPR และไบโอพอลิเมอร์) น้อยแต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูง (มากกว่าร้อยละ 90) เช่นกัน เริ่มแรกศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในเฟสน้ำภายนอกในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W ก่อนนำอิมัลชันไปผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยนำตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ได้มาศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในเฟสน้ำภายนอกที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณภาพต่างๆ ของอิมัลชัน ได้แก่ ขนาดอนุภาค ความหนืด และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน ได้ผลดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 ขนาดอนุภาค (droplet size)

ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินและลักษณะโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตรินที่มีส่วนที่เป็นโมเลกุลพอลิแซคคาไรด์สายยาวจะส่งผลต่อสมบัติทางรีโอโลจีและความคงตัวของอิมัลชัน โดยในอิมัลชันที่มีทั้งสารลดแรงตึงผิวและไฮโดรคอลลอยด์อยู่ในระบบจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารทั้งสองซึ่งจะส่งผลต่ออนุภาคของอิมัลชัน (Dickinson, 2003) ในการทดลองนี้ส่วนของเฟสน้ำภายนอกของอิมัลชันประกอบด้วย Tween 80 และกัมอะราบิกที่ความเข้มข้นคงที่ แต่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จากการวัดขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจากร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนัก จะทำให้อิมัลชันมีขนาดอนุภาคเล็กลง คือ มีขนาด 1.38, 1.07 และ 0.52 ไมโครเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 25) ทั้งนี้อาจมาจากผลของมอลโตเดกซ์ตริน เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินมีส่วนที่เป็นโมเลกุลแซคคาไรด์สายยาว ทำให้ความหนืดในเฟสต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชะลอการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (brownian motion) ของอนุภาคได้ ดังนั้นจึงสามารถลดความถี่ในเคลื่อนที่เข้าหากันการชนกันของอนุภาคอิมัลชันและช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัวดีขึ้น (McClement, 2005; Appelqvist *et al.,* 2007) และมอลโตเดกซ์ตรินอาจแสดงสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ได้ ซึ่งจะสามารถดูดซับได้ที่บริเวณผิวสัมผัสร่วมของอนุภาคอิมัลชันจึงป้องกันการเคลื่อนที่มาเกาะกลุ่มกัน (McClement, 2005) นอกจากนี้การนำมอลโตเดกซ์ตรินมาผสมกับสารที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์แท้จริง เช่น กัมอะราบิกจะสามารถปรับปรุงความคงตัวของอิมัลชันได้ดีกว่าใช้มอลโตเดกซ์ตรินเพียงอย่างเดียว (Kenyon and Anderson, 1988; Gabas *et al.*, 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

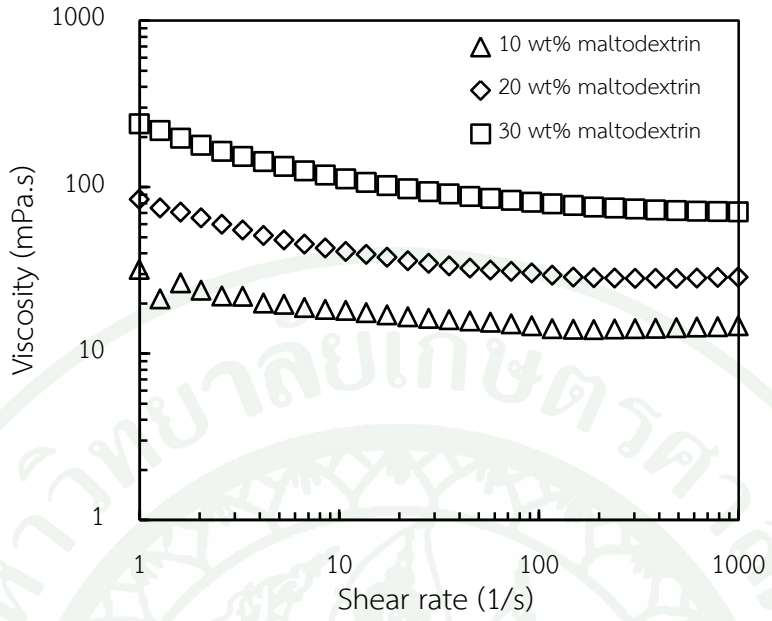


ภาพที่ 25 ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2 ความหนืด (viscosity)

การเติมมอลโตเดกซ์ตรินนอกจากจะมีผลต่อขนาดอนุภาคในเฟสกระจายแล้วยังส่งผลต่อสมบัติรีโอโลจีด้วย จากการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจากร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักจะทำให้มีอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตริน 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ shear rate ประมาณ 100 s^{-1} คือ 14.10, 29.63 และ 79.29 mPa.s ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินเป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของมอลโตเดกซ์ตรินในสารละลาย และจากโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตรินที่มีสายสั้นๆ ของกลูโคสจำนวนมากทำให้เพิ่มแรงต้านในการไหล (Ibanglu, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Udomrati *et al.* (2013) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจะทำให้มีความหนืดมากขึ้น จากภาพที่ 26 แสดงให้เห็นว่าอิมัลชันชนิด W/O/W มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน (shear rate) ความหนืดจะลดลง ทั้งนี้อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (reversible) โดยอนุภาคน้ำมันที่เกาะกลุ่มกันไม่แข็งแรง และ/หรือการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคน้ำมันกับไฮโดรคอลลอยด์ที่ไม่แข็ง แรงกระจายตัวออกจากกันจึงทำให้มีความหนืดในระบบลดลงได้ (Bernard *et al*., 2011)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

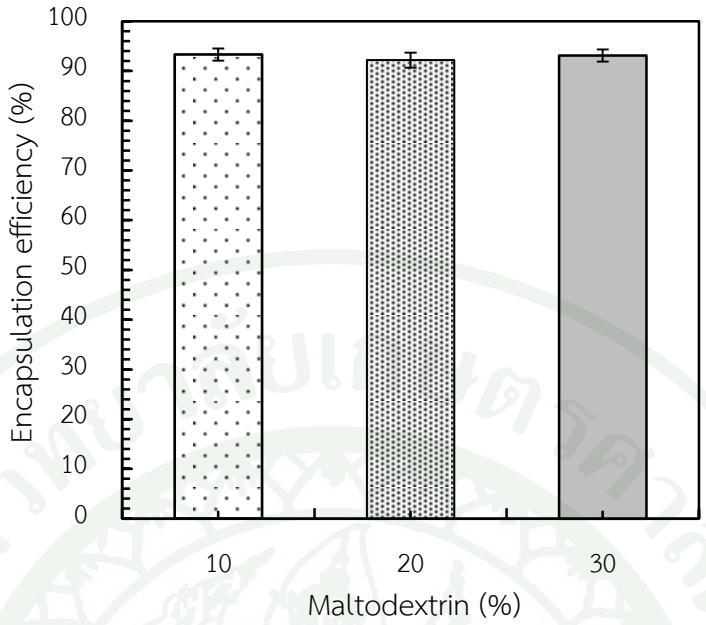


ภาพที่ 26 ความหนืดของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.3 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation efficiency)

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 92.19-93.11 (ภาพที่ 27) มีรายงานการวิจัย พบว่า การใช้กัมอะราบิกร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของสารประกอบฟีนอลิก โดยมักใช้กัมอะราบิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 เพื่อเป็นสารห่อหุ้ม (Yoshii *et al.,* 2001; Krishnan *et al.,* 2005) กัมอะราบิกจะมีความสามารถในการใช้เป็นสารห่อหุ้มได้ดีกว่ามอลโตเดกซ์ตริน เนื่องจากสามารถดูดซับได้ที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาค อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในมอลโตเดกซ์ตริน (Matsumura *et al*., 2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์-ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

ต่อมาได้ศึกษาลักษณะตัวอย่างที่เป็นผงเอนแคปซูเลท โดยนำตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีมอลโตเดกซ์ตรินในเฟสน้ำภายนอกความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 มาเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ใช้อุณหภูมิขาเข้าและขาออกในการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 180 และ 90 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของตัวอย่างเข้าเครื่อง 11-12 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการศึกษาคุณภาพทางด้านเคมีกายภาพต่างๆ ได้แก่ ความชื้น วอเตอร์แอคติวิตี้ ความสามารถในการละลาย สี ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเอนแคปซูเลท MSKE ปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมด ปริมาณสารประกอบชีวภาพที่พื้นผิว และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของผงเอนแคปซูเลท MSKE ได้ผลดังนี้

3.4 ความชื้นและวอเตอร์แอคติวิตี้ (moisture and water activity)

จากการวิเคราะห์ความชื้นของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 15) ค่าความชื้นของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.46-2.69 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Loksuwan (2007) และ Tonon *et al.* (2008) พบว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผงเอนแคปซูเลทที่ใช้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มจะมีความชื้นอยู่ที่ 2.11 และอยู่ในช่วงร้อยละ 0.64-2.89 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jafari *et al.* (2008), Botrel *et al.* (2012), Caliskan and Dirim (2013) และ Fernandes *et al.* (2014) อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อความชื้นของผงเอนแคปซูเลทที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมักจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและอัตราเร็วในการนำตัวอย่างเข้า (Gharsallaoui *et al.,* 2007; Tonon *et al.,* 2008) เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างมากขึ้น มีรายงานการวิจัยของ Quek *et al.* (2007), Rattes and Oliveira (2007) และ Grabowski *et al.* (2006) พบว่า เมื่ออุณหภูมิขาเข้าในการทำแห้งแบบพ่นฝอยมากขึ้นจะทำให้มีค่าความชื้นลดลง

วอเตอร์แอคติวิตี้เป็นอัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นและปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Quek *et al.,* 2007) วอเตอร์แอคติวิตี้จะมีความสำคัญต่อผงเอนแคปซูเลท เนื่องจากมีผลต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษา วอเตอร์แอคติวิตี้แตกต่างจากความชื้น คือวอเตอร์แอคติวิตี้เป็นน้ำที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในขณะที่ความชื้นเป็นปริมาณน้ำที่อยู่ในส่วนประกอบของอาหาร (Quek *et al., 2007*) โดยทั่วไปในอาหารที่มีวอเตอร์แอคติวิตี้น้อยกว่า 0.6 จะป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้และถ้ามีการเน่าเสียใดๆ เกิดขึ้นจะมาจากปฏิกิริยาทางเคมีมากกว่าจากเชื้อจุลินทรีย์ (Tang and Yang, 2004) จากตารางที่ 15 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมอลโต-เดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของผงเอนแคปซูเลท MSKE จะมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.11-0.13 แสดงว่าผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ได้สามารถลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Quek *et al.* (2007) และ Kha *et al.* (2010) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินและอุณหภูมิขาเข้าในการทำแห้งแบบพ่นฝอยในการทำแห้งน้ำแตงโมและน้ำฟักข้าวมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ลดลง

3.5 ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility)

ความสามารถในการละลายเป็นขั้นตอนสุดท้ายและถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะบ่งบอกคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ (Cano-Chauca *et al.,* 2005; Fang *et al.,* 2008) โดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงจะสามารถนำไปละลายน้ำได้ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงที่ดีคือจะต้องมีความสามารถในการละลายที่ดี ต้องกระจายตัวในน้ำได้ดีและทั่วถึงในทุกอนุภาค มีความสามารถในการจมมากกว่าลอยตัว (Hogekamp and Schubert, 2003) ความสามารถในการละลายเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงแห้ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะต้อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ละลายได้ดีจึงจะนำไปใช้ได้ง่าย ความสามารถในการละลายของผงเอนแคปซูเลทขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ส่วนประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้น สารห่อหุ้ม การบีบอัด อัตราการไหลของอากาศ และอัตราการนำตัวอย่างเข้า (Bhandari *et al.,* 1993; Al-Asheh *et al.,* 2003; Goula *et al.,* 2004) มอลโตเดกซ์ตรินนิยมนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มสารสกัดต่างๆ จากพืช เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการละลายน้ำสูง (Cano-Chauca *et al.,* 2005)

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อความสามารถในการละลาย นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้นจะมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการละลายอยู่ในช่วงร้อยละ 86.51-89.45 แต่ที่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และที่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน (ตารางที่ 15) ทั้งนี้เนื่องมาจากมอลโตเดกซ์ตรินสามารถลดชั้นที่ห่อหุ้มภายนอกและปรับเปลี่ยนพื้นผิวอนุภาคที่มีความหนืดให้มีลักษณะเป็นของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว (glassy state) (Adhikari *et al.,* 2003) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้สามารถลดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคกับอนุภาคด้วยกันเอง (cohesion) และระหว่างอนุภาคกับพื้นผิว (adhesion) ซึ่งจะทำให้ลดการจับกันเป็นก้อนและการอุ้มน้ำได้ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Grabowski *et al.* (2006) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์-ตรินจะทำให้ผงมะเขือเทศหวานมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

3.6 สี (color)

สีเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพที่สำคัญที่จะส่งผลต่อค่าทางประสาทสัมผัสและคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Quek *et al.,* 2007) ในการทดลองนี้ได้นำผงเอนแคปซูเลท MSKE มาวิเคราะห์ในระบบ CIE L* a* b* ซึ่งค่า L* แสดงค่าความสว่าง a* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีแดง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีเขียว และ b* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีเหลือง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีน้ำเงิน chroma เป็นค่าที่แสดงความเข้มของสี มาจากสมการ $\text{chroma} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ และค่า hue angle เป็นค่าที่ระบุถึงสีใดสีหนึ่ง เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่าง b* กับ a* คือ $\text{hue} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินและอุณหภูมิในการทำแห้งมีผลต่อค่าสีของผงแห้งที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Kha *et al.,* 2010)

จากการวิเคราะห์ค่าสีของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้นจะมีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้น แต่ค่าสีเขียว (a*) ค่าสีเหลือง (b*) ค่า chroma และค่า hue angle ลดลง โดยมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าความสว่าง ค่าสีเขียว ค่าสีเหลือง และค่า chroma ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 15) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินทำให้ผงเอนแคปซูเลท MSKE มีค่าความสว่างเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากมอลโตเดกซ์ตริน คือ สีขาวของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลโดยตรงต่อค่าความสว่างของผงแอนแคปซูเลท MSKE นั่นคือค่าความสว่างจะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Grabowski *et al.* (2006) และ Abadio *et al.* (2004) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Nadeem *et al.* (2011) และ Caliskan and Dirim (2013) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจะทำให้มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าสีแดงและสีเหลืองลดลง Mishra *et al.* (2013) พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อค่าความสว่างเมื่อใช้อุณหภูมิขาเข้าในการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ขณะเดียวกันความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อค่า chroma ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ kha *et al.* (2010) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจากร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ทำให้มีค่า chroma ลดลงส่วนค่า hue angle ที่ได้ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 90.52-92.06 ซึ่งสีที่อยู่ในช่วงค่าดังกล่าวนี้ คือ สีเหลืองถึงสีเหลืองเขียว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 สมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Physicochemical properties	Maltodextrin (wt %)		
	10	20	30
Moisture content (% dry basis)^{NS}	2.62 ± 0.12	2.46 ± 0.04	2.69 ± 0.18
Water activity	0.13^{a} ± 0.00	0.11^{c} ± 0.00	0.12^{b} ± 0.00
Water solubility (%)	86.51^{b} ± 0.18	88.32^{ab} ± 0.17	89.45^{a} ± 1.75
Color L^{*}	88.43^{b} ± 0.27	90.65^{a} ± 0.40	91.12^{a} ± 1.02
a^{*}	-0.29^{b} ± 0.05	-0.13^{a} ± 0.02	-0.05^{a} ± 0.02
b^{*}	7.82^{a} ± 0.19	5.49^{b} ± 0.26	5.29^{b} ± 0.20
Chorma	7.80^{a} ± 0.14	5.49^{b} ± 0.26	5.29^{b} ± 0.20
Hue angle (^{o})	92.06^{a} ± 0.24	91.38^{a} ± 0.28	90.52^{b} ± 0.23

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

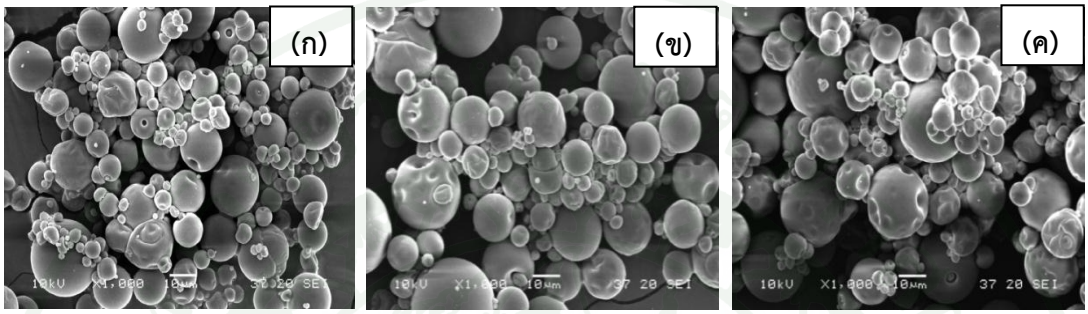
^{NS} หมายถึง ไม่แตกต่าง

3.7 ลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology)

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า ลักษณะผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยจะมีหลายขนาดและมีรูปร่างแตกต่างกันไป โดยพบวา มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกัน ส่วนใหญ่มีลักษณะกลม ผิวเรียบ มีรูปร่างแบบเหี่ยวย่นบ้างและมีรอยยุบที่บริเวณผิวเป็นบางส่วน (ภาพที่ 28) รอยยุบบริเวณผิวนั้นอาจเกิดจากการหดตัว (shrinkage) ของอนุภาคในระหวางขั้นตอนการทำแหง (Saenz *et al*., 2009) เมื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตริน พบว่า ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินไม่มีผลต่อความแตกต่างทางลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเอนแคปซูเลท แต่จะมีความแตกต่างกันในเรื่องขนาด นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมากขึ้นผงเอนแคปซูเลทจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีแรงต้านในการนำตัวอย่างเข้ามากขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jinapong *et al.* (2008) และจากการที่อิมัลชันมีความหนืดมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของละอองฝอยจาก atomizer นั้นมีประสิทธิภาพนอยลง (Gharsallaoui *et al*., 2007) อย่างไรก็

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตามปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเอนแคปซูเลท คืออุณหภูมิในการทำแห้ง นั่นคือ ถ้าอุณหภูมิขาเข้าในการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่ำ ผงเอนแคปซูเลทจะมีผิวที่เหี่ยวย่นแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีผิวที่เรียบขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วจึงทำให้มีลักษณะของพื้นผิวอนุภาคที่เรียบและมีเปลือกที่แข็ง (Tonon *et al.,* 2008)



ภาพที่ 28 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ความเข้มข้นมอลโตเดกซ์ตริน (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 20 (ค) ร้อยละ 30 ที่กำลังขยาย 1,000X

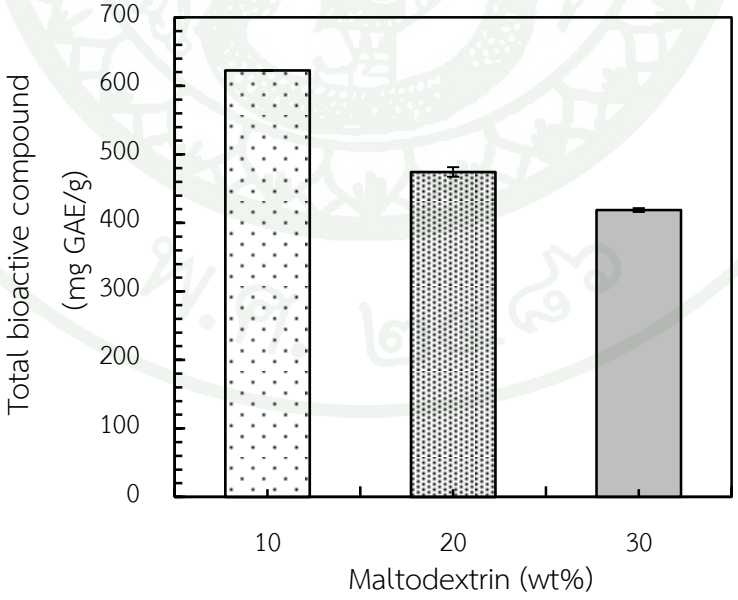
3.8 ปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมด (total bioactive compound) ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิว (surface bioactive compound) และประสิทธิภาพในการเอน-แคปซูเลชัน (encapsulation efficiency)

สารที่ใช้ในการห่อหุ้มจะส่งผลค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันรวมถึงความคงตัวของสารที่ถูกเอนแคปซูเลชันในระหว่างการจัดเก็บ การเอนแคปซูเลชันด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม (Gharsallaoui *et al*., 2007) ซึ่งจะส่งผลต่อการสร้างชั้นหุ้มอนุภาคที่ผ่านการทำแห้ง มอลโตเดกซ์ตรินมีสมบัติเป็นสารห่อหุ้มที่ดีเนื่องจากมีน้ำหนักมวลโมเลกุลของน้ำตาลต่ำ เช่น น้ำตาลฟรักโตสและกรดอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินมากเกินไปจะทำให้ได้ผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากสมบัติของสารที่มีประโยชน์จะถูกเจือจางด้วยความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินที่เพิ่มขึ้น (Quek *et al.,* 2007) มีงานวิจัยของ Caliskan and Dirim (2013) ศึกษาการเอนแคปซูเลชันสารสกัดซูมัก (sumac extract) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 10-25 จะทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลง โดยสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งคืออุณหภูมิขาเข้าและขาออกในการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ 180 และ 90 องศา-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

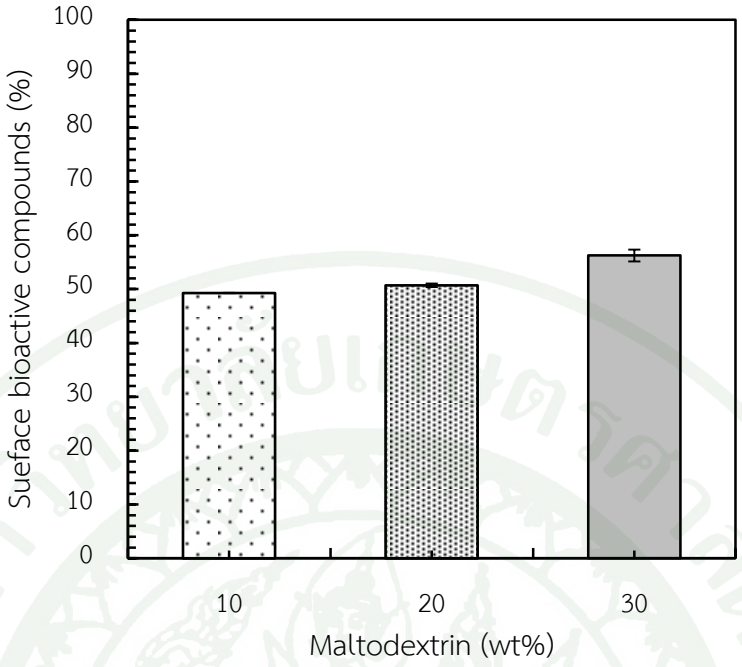
เซลเซียส และมีงานวิจัยของ Pérez-Serradilla and Luque de Castro (2011) ศึกษาประสิทธิ-ภาพของผงเอนแคปซูเลทสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดมาจาก wine lees พบว่า การเพิ่มปริมาณสารที่ใช้ในการห่อหุ้มจะส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในผลิตภัณฑ์สุดท้ายลดลง อย่างไรก็ตามการลดลงที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากปริมาณฟีนอลิกถูกเจือจางด้วยปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารห่อหุ้ม

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมดของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมดลดลง (ภาพที่ 29) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตริน ทำให้ MSKE ที่ถูกห่อหุ้มในระบบอิมัลชันถูกเจือจางไปตามปริมาณความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตริน (Pérez-Serradilla and Luque de Castro, 2011; Nadeem *et al.,* 2011; Mishra *et al.,* 2013) และจากการวิเคราะห์ค่าปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจะมีค่าปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 30) และค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอล-โตเดกซ์ตรินจะมีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ลดลง แต่ที่มอลโตเดกซ์ตรินความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 31)

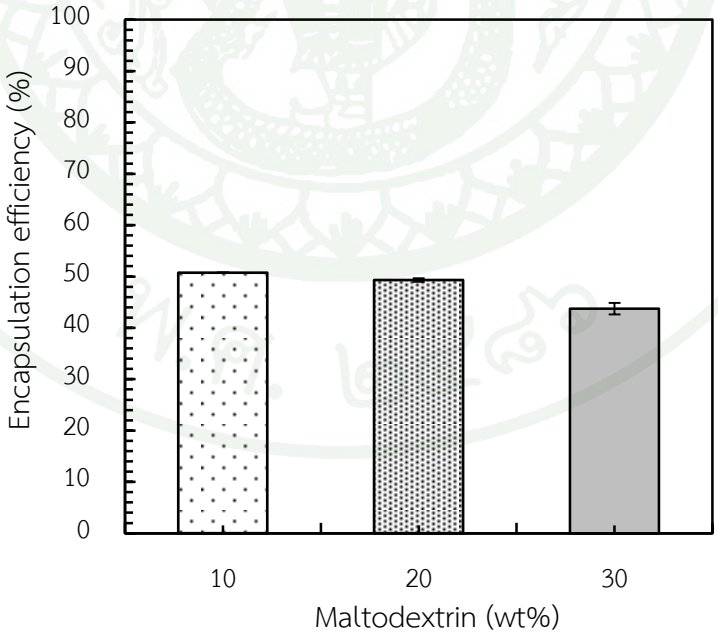


ภาพที่ 29 ปริมาณสารประกอบชีวภาพทั้งหมดของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 ปริมาณของสารประกอบทางชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของผงเอนแคปซูเลท MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีมอลโตเดกซ์ตรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (mango seed kernel extract; MSKE) พบว่า MSKE ที่ได้มีสีเหลือง มีปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ ค่าความชื้น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณความเข้มข้นของ MSKE ที่สามารถทำให้ค่าร้อยละ radical scavenging activity ลดลงร้อยละ 50 (IC_{50}) คือ ร้อยละ 6.27, ร้อยละ 11.51, 400.14 mg GAE/g และ 11.14 µg/ml ตามลำดับ

2. จากการศึกษาผลของพอลิกลีเซอรอล พอลิริซิโนลีเอท (polyglycerol polyricinoleate; PGPR) และไบโอพอลิเมอร์ (เจลาติน, โซเดียมอัลจิเนต) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มี MSKE ได้ผลดังนี้

2.1 การเติมเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับ NaCl ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในเฟสน้ำภายในทำให้อิมัลชันมีการแยกชั้นเป็นครีมมากกว่าและมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอิมัลชันที่ไม่มีการเติม NaCl แต่การเติม NaCl ไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE ยกเว้นที่ความเข้มข้นของเจลาตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้มีค่าประสิทธิภาพในเอนแคปซูเลชันต่ำ

2.2 เมื่อพิจารณาผลของ PGPR ในเฟสน้ำมันและไบโอพอลิเมอร์ (เจลาติน, โซเดียมอัลจิเนต) ในเฟสน้ำภายใน พบว่า อิมัลชันที่มีไบโอพอลิเมอร์ทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากกว่าไม่มีไบโอพอลิเมอร์ PGPR มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชันมากกว่าไบโอพอลิเมอร์ เนื่องจาก PGPR เป็นอิมัลซิไฟเออร์ทำให้อิมัลชันมีขนาดอนุภาคเล็กและในอิมัลชันที่มีเจลาตินในเฟสน้ำภายในที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับ PGPR ความเข้มร้อยละ 4-8 โดยน้ำหนัก หรืออิมัลชันที่มีโซเดียมอัลจิเนตในเฟสน้ำภายในที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับ PGPR ความเข้มร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบผลของเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนต พบว่า การใช้เจลาตินจะทำให้ใช้ PGPR ในเฟสน้ำมันน้อยกว่าการใช้โซเดียมอัลจิเนตและยังคงทำให้ค่ามีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE มากกว่าร้อยละ 90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินในเฟสน้ำภายนอกต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำและผงเอนแคปซูเลทที่มี MSKE ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้ผลดังนี้

3.1 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจากความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก ทำให้อิมัลชันมีขนาดอนุภาคเล็กลงและมีความหนืดมากขึ้น แต่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน MSKE

3.2 เมื่อพิจารณาคุณภาพของผงเอนแคปซูเลท MSKE พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินจากความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่า L*, ค่าความสามารถในการละลายและปริมาณสารประกอบชีวภาพที่พื้นผิวของผงเอนแคปซูเลท MSKE มากขึ้น แต่ค่า a*, b*, chroma, hue angle, วอเตอร์แอคติวิตี้, ปริมาณสารประกอบทางชีวภาพทั้งหมด และค่าประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันลดลง ขณะที่ค่าความชื้นไม่แตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538. **องค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ฟอร์แมทพริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2551. **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ปราณี อินประโคน. 2552. เนื้อในเมล็ดมะม่วง ของดีที่ถูกมองข้าม. **วิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนา.** รวมบทความวิชาการ ฉลองครบรอบ 50 ปีแห่งการสถาปนาคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. บริษัท เอเอ็นที ออฟฟิศ เอ็กซ์เพรส, กรุงเทพฯ.

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2555. **ระบบคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ธนาเพรส จำกัด, กรุงเทพฯ.

โอภา วัชระคุปต์, ปรีชา บุญจูง, จันทนา บุญยะรัตน์ และมาลีรักษ์ อัตต์สินทอง. 2550. **สารต้านอนุมูลอิสระ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท นิวไทยมิตรการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

Abdalla, A.E.M., S.M. Darwish, E.H.E. Ayad and R.M. El-Hamahmy. 2007. Egyptian mango by-product 1. compositional quality of mango seed kernel. **Food Chem**. 103: 1134-1140.

Abadio, F.D.B., A.M. Domingues, S.V. Borges and V.M. Oliveira. 2004. Physical properties of powdered pineapple (*Ananas comosus*) juice effect of maltodextrin concentration and atomization speed. **J. Food Eng**. 64: 285–287.

Adachi, S., H. Imaoka, H. Ashida, H. Maeda and R. Matsuno. 2004. Preparation of microcapsules of W/O/W emulsions containing a polysaccharide in the outer aqueous phase by spray-drying. **Lipid Sci. Technol.** 106: 225-231.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Adhikari B, T. Howes, B.R. Bhandari and V.Truong. 2003. Characterization of the surface stickiness of fructose-maltodextrin solutions during drying. **Drying Technol**. 21: 17–20.

Al-asheh, S., R. Jumah, F. Banat and S. Hammad. 2003. The use of experimental factorial design for analysing the effect of spray dryer operating variables on the production of tomato powder. **Food Bioprod. Process**. 81: 81–88.

Anderson, R.A., H.F. Conway, V.F. Pfeifer and J.R. Griffin. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. **Cereal Sci. Today.** 14: 4–11.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis of AOAC International.** 18th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.

Appelqvist, I.A.M., M. Golding, R. Vreeker and N.J. Zuidam. 2007. Emulsions as delivery systems in foods. pp 41–81. *In* J.M. Lakkis Jr., eds. **Encapsulation and Controlled Release Technologies in Food Systems.** Blackwell Publishing Professional, USA.

Arogba, S.S. 1997. Physical, chemical and functional properties of nigerian mango (*Mangifera indica*) kernel and its processed flour. **J. Sci. Food Agric**. *73*: 321-328.

_____, O.L. Ajiboye, L.A. Ugboko, S.Y. Essiennette and P.O. Afolabi. 1998. Properties of polyphenol oxidase in mango (*Mangifera indica*) kernel. **J. Sci. Food Agric**. 77: 459-462.

Balasundram, N and K. Sundram. 2006. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. **Food Chem**. 99: 191-203.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bernard, C., S. Regnault, S. Gendreau, S. Charbonneau and P. Relkin. 2011. Enhancement of emulsifying properties of whey proteins by controlling spray-drying parameters. **Food Hydrocoll**. 25: 758-763.

Benichou, A., A. Aserin and N. Garti. 2004. Double emulsions stabilized with hybrids of natural polymers for entrapment and slow release of active matters. **Adv. Colloid Interface Sci**. 108–109: 29–41.

_____,_____and_____. 2007. W/O/W double emulsions stabilized with WPI–polysaccharide complexes. **Colloids Surf. A**. 294: 20-23.

Bhandari, B.R., A. Senoussi, E.D. Dumoulin and A. Lebert. 1993. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying Technol**. 11: 33–41.

Bonnet, M., M. Cansell, A. Berkaoui, M.H. Ropers, M. Anton and F. Leal-Calderon, 2009. Release rate profiles of magnesium from multiple W/O/W emulsions. **Food Hydrocoll**. 23: 92–101.

Botrel, D.A., S.V. Borges, R.V.B. Fernandes, A.D. Viana, J.M.G. Costa and G.R. Marques. 2012. Evaluation of spray drying conditions on properties of microencapsulated oregano essential oil. **Int. J. Food Sci. Technol.** 47: 2289–2296.

Caliakan, G. and S.N. Dirim. 2013. The effects of the different drying conditions and amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. **Food Bioprod. Process**. 91: 539-548.

Cano-Chauca, M., P.C. Stringheta, A.M. Ramos and J. Cal-Vidal. 2005. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Sci. Emerg. Technol**. 6: 420–428.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Colmenero, F.J. 2013. Potential applications of multiple emulsions in the development of healthy and functional foods. **Food Res. Int.** 52: 64-74.

Desai, K.G.H and H. J. Park. 2005. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. **Drying Technol.** 23: 1361-1394.

Dickinson, E. 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. **Food Hydrocoll**. 17: 25–39.

_____. 2008. Emulsification and emulsion stabilization with protein- polysaccharide complexes. pp. 221–232. *In* P.A. Williams and G.O. Phillips, eds. **Gums and Stabilizers for The Food ndustry**. Royal Society, Cambridge, UK.

_____. 2009. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. **Food Hydrocoll.** 23: 1473–1482.

_____, J. Evison, J.W. Gramshaw and D. Schwope. 1994. Flavor release from a protein-stabilized water-in-oil-in-water emulsion. **Food Hydrocoll.** 8: 63-67.

Evison, J., E. Dickinson., R.K. Owusu-Apenten and A. William. 1995. Formulation and properties of protein stabilized water-in-oil-in-water multiple emulsions, p. 235. *In* E. Dickinson and D. Lorient eds. **Food Macromolecules and Colloids.** Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

Fang, Y., C. Selomulya and X.D. Chen. 2008. On measurement of food powder reconstitution properties. **Drying Technol**. 26: 3–14.

Fang, Z and B. Bhandari. 2010. Encapsulation of polyphenols – a review. **Trends Food Sci. Technol.** 21: 510-523.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

FAOSTAT. 2011. **Food and Agricultural Commodities Production**. Available Source: http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx. November 4, 2013.

Fechner, A., A. Knoth, I. Scherze and G. Muschiolik. 2007. Stability and release properties of double-emulsions stabilized by caseinate–dextran conjugates. **Food Hydrocoll.** 21: 943-952.

Fernandes, R.V.B., S.V. Borges and D.A. Botrel. 2014. Gum arabic/starch /maltodextrin/inulin as wall materials on the microencapsulation of rosemary essential oil. **Carbohydr. Polym.** 101: 524–532.

Gabas, A. L., V.R.N. Telis, P.J. A. Sobral and J. Telis-Romero. 2007. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. **J. Food Eng.** 82: 246-252.

Garti, N. 1997. Double emulsions -scope, limitations and new achievements. **Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.** 123-124: 233-246.

_____, H. Binjamin and A. Aserin. 1998. Stabilization of water-in-oil emulsions by submicrocrystalline **α**-form fat particles. **J. Am Oil Chem. Soc**.75: 1825–31.

George M and T.E. Abraham. 2006. Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: Alginate and chitosan - a review. **J. Control. Release**. 114: 1-14.

Gharsallaoui, A., G. Roudaut, O. Chambin, A. Voilley and R. Saurel. 2007. Application of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: an overview. **Food Res. Inter**. 40: 1107-1121.

Goula, A.M., K.G. Adamopoulos and N.A. Kazakis. 2004. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. **Drying Technol**. 22: 1129–1151.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Grabowski, J.A., V.D. Truong and C.R. Daubert. 2006. Spray drying of amylase hydrolyzed sweetpotato puree and physicochemical properties of powder**. J. Food Sci**. 71: E209–E217.

Heim, K. E., A.R. Tagliaferro and D.J. Bobilya. 2002. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships: A reviews. **Nutr. Biochem.** 13: 572-584.

Hemar, Y., L.J. Cheng, C.M. Oliver, L. Sanguansri and M. Augustin. 2010. Encapsulation of resveratrol using water-in-oil-in-water double emulsions. **Food Biophys**. 5: 120-127.

Hemavathy, J., J.V. Prabhakar and D.P. Sen. 1988. Drying and storage behavior of mango (*Mangifera indica*) and composition of kernel fat. **Asian Food J**. 4: 59–63.

Hirose, Y., T. Fujita, T. Ishii and N. Ueno. 2010. Antioxidative properties and flavonoid composition of Chenopodium quinoa seeds cultivated in japan. **Food Chem**. 119: 1300–1306.

Hogekamp S and H. Schubert. 2003. Rehydration of food powders**. Food Sci. Techol. Int.** 9: 223–35.

Ibanoglu, E. 2002. Rheological behaviour of whey protein stabilized emulsions in the presence of gum Arabic. **J. Food Eng**. 52: 273–277.

Jafari, S.M., E. Assadpoor, Y. He and B. Bhandari. 2008. Encapsulation efficiency of food flavors and oils during spray drying. **Drying Technol**. 26: 816–835.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jiang, H., B. Ji, J. Liang, F. Zhou, Z. Yang and G. Zhang. 2006. Changes of contents and antioxidant activities of polyphenols during fruit development of four apple cultivars. **Eur. Food Res. Technol.** 223: 743-748.

Jinapong, N., M. Suphantharika and Jamnong, P. 2008. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. **J. Food Eng**. 84: 194–205.

Kähkönen, M.P., A.I. Hopia, H.J. Vuorela, J.P. Rauha, K. Pihlaja, T.S. Kujala and M. Heinonen. 1999. Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. **J. Agric. Food Chem.** 47: 3954-3962.

Kalt, W. 2005. Effects of production and processing factors on major fruit and vegetable antioxidants. **J. Food Sci**. 70: R11-R19.

Kaur, C and H.C. Kapoor. 2001. Antioxidants in fruits and vegetables in the millennium's health. **Int. J. Food Sci. Tech**. 36: 703-725.

Kenyon, M.M and R.J. Anderson. 1988. Maltodextrin and low dextrose equivalence corn syrup solid. pp.7-11. *In* S.J. Rish and G.A. Reineccius Jr., eds. **Flavor Encapsulation**, ACS Symposium series, Washington, D.C.

Kha, T.C., M.H. Nguyen and P.D. Roach. 2010. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (Momordica cochinchinensis) fruit aril powder. **J. Food Eng**. 98: 385-392.

Khammuang, S and R. Sarnthima. 2011. Antioxidant and antibacterial activities of selected varieties of Thai mango seed extract. **Pak. J. Pharm. Sci**. 24: 37-42.

Kittiphoom, S. 2012. Utilization of mango seed. **Int. Food Res. J.** 19: 1325-1335.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Knoth, A., L. Scherze, and G. Muschiolik. 2005. Stability of water-in-oil-emulsions containing phosphatidylcholine-depleted lecithin.**Food Hydrocoll.** 19: 635-640.

Kris-Etherton, P.M., K.D. Hecker, A. Bonanome, S.M. Coval, A.E. Binkoski, K.F. Hilpert, A.E. Griel and T.D. Etherton. 2002. Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. **Am. J. Med.** 113 (9B): 71-88.

Krishnan, S., A.C. Kshirsagar and R.S. Singhal. 2005. The use of gum arabic and modified \starch in the microencapsulation of a food flavoring agent. **Carbohydr. Polym**. 62: 309-315.

Kukizaki, M. and M. Goto. 2007. Preparation and evaluation of uniformly sized solid lipid microcapsules using membrane emulsification. **Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects**. 293: 87–94.

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

Mackie, A. R., A.P. Gunning, M. L. Ridout and V. J. Morris. 1998. Gelation of gelatin, observation in the bulk and at the air-water interface. **Biopolymer.** 46: 245-252.

Madene, A., M. Jacquot, J. Scher and S. Desobry. 2006. Flavor emcapsulation an controlled release: a review. **Int. J. Food Sci.** 41: 1-21.

Maisuthisakul, P. and M.H. Gordon. 2009. Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of mango seed kernel by product. **Food Chem**. 117: 332-341.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

_____and T. Harnsilawat. 2010. Encapsulation by spray drying of bioactive compounds from mango seed kernels. 30: 88-100.

_____and M.H. Gordon. 2012. Influence of polysaccharides and storage during processing on the properties of mango seed kernel extract (microencapsulation). **Food Chem**. 134: 1453-1460.

Malvern Instruments. 2003. **Zetasizer Nano Series User Manual**. Malvern Instruments Ltd., England.

Márquez, A.L., A. Medrano, L.A. Panizzolo and J.R. Wagner. 2010. Effect of calcium salts and surfactant concentration on the stability of water-in-oil emulsions pre-pared with polyglycerol polyricinoleate, **J. Colloid Interface Sci.** 341: 101–108.

Matsumura, C., M. Satake and T. Mori. 2000. Interaction of gum arabic, maltodextrin and pullulan with lipids in emulsion. **Biosci. Biotechnol. Biochem**. 64: 1827–1835.

McClements, D.J. 2004. Protein-stabilized emulsions. **Curr. Opin. Colloid Interface Sci**. 9: 305–313.

_____. 2005. **Food Emulsions: Principles, Practice, and Techniques**. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton.

_____, E.A. Decker and J. Weiss. 2007. Emulsion-based delivery systems for Lipophilic bioactive components. **J. Food Sci**. 72: 109-124.

_____,_____, Y. Park and J. Weiss. 2009. Structural design principles for delivery of bioactive components in nutraceutical and functional foods. **Crit. Rev. Food Sci**. 49: 577–606.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Mishra, P., S. Mishra and C.L. Mahanta. 2013. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblica officinalis*) juice powder. **Food Bioprod. Process.** (In press).

Mun, S., Y. Choi, S.-J. Rho, C.-G. Kang, C.-H. Park and Y.-R. Kim. 2010. Preparation and characterization of water/oil/water emulsions stabilized by polyglycerol polyricinoleate and whey protein isolate. **J. Food Sci**. 75: E116-E125.

Nadeem, H.S., M. Torun and F., Ozdemir. 2011. Spray drying of the mountain tea (*Sideritis strica*) water extract by using different hydrocolloid carriers. **LWT Food Sci. Technol**. 44: 1626–1635.

Nithitanakool, S., P. Pithayanukul and R. Bavovada. 2009. Antioxidant and hepatoprotective activities of thai mango seed kernel extract. **Planta Med.** 75: 1118-1123.

Obon, J. M., M. R. Castellar, M. Alacid and J. A. Fernandez-Lopez. 2009. Production of a redpurple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. **J. Food Eng**. 90: 471-479.

Onsøyen, E. 1997. Alginate. pp 22-44. *In* A. Imeson, eds. **Thickening and Gelling Agents for Food**. Blackie Academic and Professional, London.

Opawale, F.O. and D. J. Burgess. 1998. Influence of interfacial properties of lipophilic surfactants on water-in-oil emulsion stability. **J. Colloid Interface Sci.** 197: 142-150.

O'Reagan, J. and D. M. Mulvihill. 2009. Water soluble inner aqueous phase markers as indicators of encapsulation properties of water-in-oil-in-water emulsions stabilized with sodium caseinate**. Food Hydrocoll**. 23: 2339–2345.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

_____ and_____. 2010. Sodium caseinate–maltodextrin conjugate stabilized double emulsions: encapsulation and stability. **Food Res. Inter.** 43: 224–231.

Owusu Apenten, R. K and Q.-H. Zhu. 1996. Interfacial parameters for spans and tweens in relation to water-in-oil-in-water multiple emulsion stability. **Food Hydrocoll**. 10: 245–250.

Pays, K., J. Giermanska-Kahn, B. Pouligny, J. Bibette and F. Leal-Calderon. 2001. Coalescence in surfactant-stabilized double emulsions. **Langmuir.** 17: 7758–7769.

Pérez-Serradilla, J.A and M.D. Luque de Castro. 2011. Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from wine lees and spray drying of the extract. **Food Chem.** 124: 1652-1659.

Poppe, J. 1997. Gelatin. pp. 144-168. *In* A. Imeson, eds. **Thickening and Gelling Agents for Food**. Blackie Academic and Professional, London.

Puravankara, D., V. Bohgra and R. S. Sharma. 2000. Effect of antioxidant principles isolated from mango (*Mangifera indica* L.) seed kernels on oxidative stability of buffalo ghee (butter–fat). **J. Sci. Food Agric.** 80: 522–526.

Quek, S.Y., N.K.. Chok and P. Swedlund. 2007. The physicochemical properties of spray dried watermelon powders. **Chem. Eng. Process**. 46: 386–392.

Rattes, A.L.R and W.P. Oliveira. 2007. Spray drying conditions and encapsulating composition effects on formation and properties of sodium diclofenac microparticles. **Powder Technol.** 171: 7–14.

Reineccius, G.A. 2004. Spray drying of food flavors**. Drying Technol.** 22: 1289-1324.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Robert, P., T. Gorena, N. Romero, E. Sepulveda, J. Chavez and C. Saenz. 2010. Encapsulation of polyphenols and anthocyanins from pomegranate (*Punica granatum*) by spray drying. **Int. J. Food Sci. Technol.** 45: 1386–1394.

Rodríguez-Huezo, M. E., R. Pedroza-Islas, L. A. Prado-Barragán, C. I. Beristain and E. J. Vernon-Carter. 2004. Microencapsulation by spray drying of multiple emulsions containing carotenoids. **J. Food Sci**. 69: E351–E359.

Rosano, H. L., F.G. Gandolfo and J.-D. P. Hidrot. 1998. Stability of W1/O/W2 multiple emulsions: Influence of ripening and interfacial interactions. **Coll. Surf. A.** 138: 109-121.

Rossle, C., H.H. Wijngaard, R.T. Gormley, F. Butler and N. Brunton. 2009. Effect of storage on the content of polyphenols of minimally processed skin-on apple wedges from ten cultivars and two growing seasons. **J. Agric. Food Chem**. 58: 1609-1614.

Rowe, R.C., P.J. Sheskey and S.C. Owen. 2006. **Handbook of Pharmaceutical Excipients**. 5th ed. Pharmaceutical Press and the American Pharmacists Associationc, London.

Saenz, C., S. Tapia, J. Chavez and P. Robert. 2009. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). **Food Chem**. 14: 616-622.

Sansone, F., T. Mencherini, P. Picerno, M. d'Amore, R.P. Aquino and M.R. Rlauro. 2011. Maltodextrin/pectin microparticles by spray drying as carrier for nutraceutical extracts. **J. Food Eng.** 105: 468-476.

Scherze, I., R. Knöfel and G. Muschiolik. 2005. Automated image analysis as a control tool for multiple emulsions. **Food Hydrocoll**. 19: 617–624.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

_____, A. Knoth, and G. Muschiolik. 2006. Effect of emulsification method on the properties of lecithin- and PGPR-stabilized water-in-oil-emulsions. **J. Dispers. Sci. Technol.** 27: 427-434.

_____, Fechner. 2007. A: Biopolymere als Emulgatoren zum Disgtpergieren von W1/O in W2. pp. 105–36. *In*. G, Muschiolik and H, Bunjes eds. **Multiple Emulsionen**. Hamburg, Behr's Verlag.

Schmidts, T., D. Dobler, P. Schlupp, C. Nissing, H.Garn, H. and F. Runkel. 2010. Development of multiple W/O/W emulsions as dermal carrier system for oligonucleotides: Effect of additives on emulsion stability. **Int. J. Pharm.** 398: 107-113.

Sela, Y., S. Magdassi and N. Garti. 1995. Release of markers from the inner water phase of W/O/W emulsions stabilized by silicone based polymeric surfactants**. J. Control. Release.** 33: 1–12.

Shimizu M and Y. Nakane.1995. Encapsulation of biologically active proteins in a multiple emulsion**. Biosci Biotechnol Biochem**. 59: 492–6.

Stevens, P. 2010. Gelatin, pp. 116-143. *In* A. Imeson eds. **Food stabilisers, thickener and gelling agent.** Wiley-Blackwell, United Kingdom.

Strauss, G. and S.M. Gibson. 2004. Plant phenolics as cross-linkers of gelatin gels and gelatin-based coacervates for use as food ingredients. **Food Hydrocoll**. 18: 81-89.

Surh, J., G.T. Vladisavljevic., S. Mun and D. J. McClements. 2007. Preparation and characterization of water/oil and water/oil/water emulsions containing biopolymer-gelled water droplets. **Food Chem.** 55: 175-184.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Su, J., J. Flanagan., Y. Hemar and H. Singh. 2006. Synergistic effects of polyglycerol ester of polyricinoleic acid and sodium caseinate on the stabilization of water-oil-water emulsions. **Food Hydrocoll.** 20: 261–268.

_____ and H. Singh. 2008. Improving encapsulation efficiency and stability of water-in-oil-in-water emulsions using a modified gum Arabic (Acacia (sen) SUPER GUM™). **Food Hydrocoll.** 22: 112-120.

Tang, J and T. Yang. 2004. Dehydrated vegetables: principles and systems. *In* Y.H. Hui, S. Ghazala, D.M. Graham, K.D. Murrell and W.-K. Nip eds. **Handbook of Vegetable Preservation and Processing.** Marcel Dekker, New York.

Tonon, R.V., C. Brabet and M.D., Hubinger. 2008. Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpeoleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **J. Food Eng**. 88: 411–418.

Totosaus A., J.G. Montejano, J.A. Salazar and I. Guerrero. 2002. A review of physical and chemical protein-gel induction. **Int. J. Food Sci. Technol**. 37: 589–601.

Udomrati, S., S. Ikeda and S. Gohtani. 2013. Rheological properties and stability of oil-in-water emulsions containing tapioca maltodextrin in the aqueous phase. **J. Food Eng.** 116: 170–175.

Wanthong, T., T. Harnsilawat and P. Maisuthisakul. 2011. Effect of tamarind seed kernel flour, gum arabic and maltodextrin on encapsulation efficiency and stability of W/O/W emulsion. **Presented at 5th Tropical & Sub-Tropical Crops Research Symposium** on July 21-22, 2011, Bangkok, Thailand.

Weiss, J., I. Scherze and G. Muschiolik. 2005. Polysaccharide gel with multiple emulsions. **Food Hydrocoll.** 19: 605-615.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wilson, R., B.J. van Schie, and D. Howes. 1998. Overview of the preparation, use and biological Studies on polyglycerol polyricinoleate (PGPR). **Food Chem. Toxicol**. 36: 711-718.

Yi, K., G., Cheng and F. Xing. 2006. Gelatin/tannin complex nanospheres via molecular assembly. **J. Appl. Polym. Sci.** 101: 3125-3130.

Yoshii, H., A. Soottitantawat, X-D. Liu, T. Atarashi, T. Furuta, S. Aishima, M. Ohgawara, and P. Linko. 2001. Flavor release from spray-dried maltodextrin/gum arabic or soy matrices as a function of storage relative humidity. **Inn. Food Sci. Emerg. Technol.** 2: 55-61.

Yoshida K., T. Yanaki, M. Yamaguchi, H. Watanabe, T. Kurosawa and K. Ito. 1999. O/W/O type multiple emulsion and method of preparing the same. US 5985177.

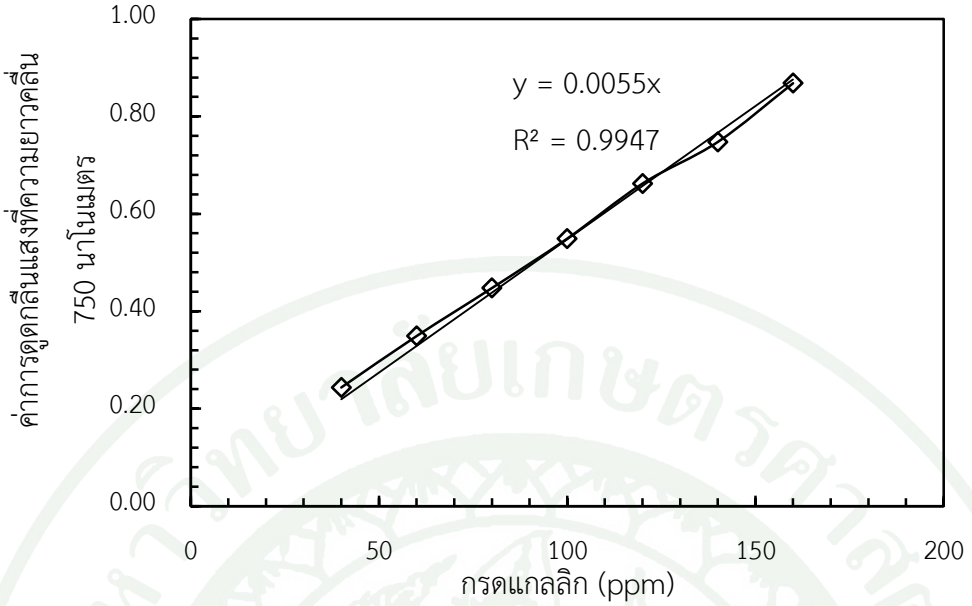
Yuri, J.A., A. Neira, A. Quilodran, Y. Motomura and I. Palomo. 2009. Antioxidant activity and total phenolics concentration in apple peel and flesh is determined by cultivar and agroclimatic growing regions in Chile. **J. Food Agric. Environ**. 7: 3-4.

.

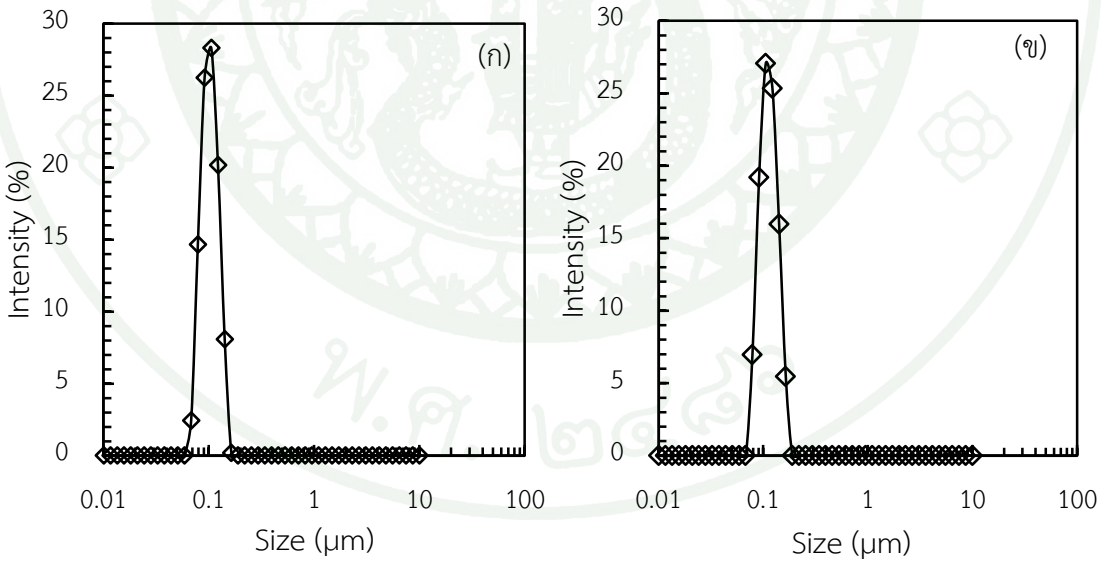
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

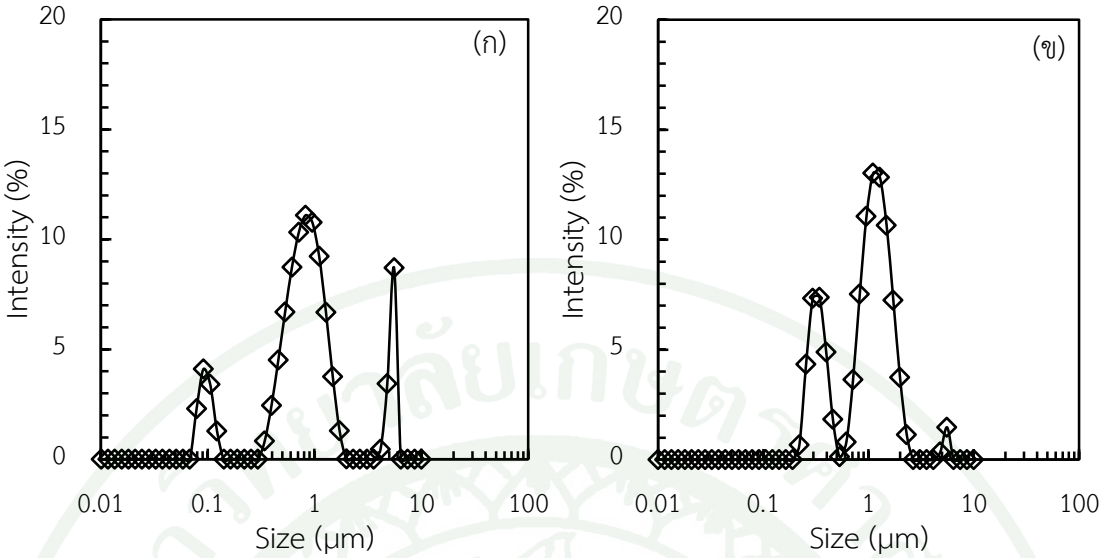


ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกสำหรับการตรวจสอบสมบัติต้านออกซิเดชันโดยเทคนิค total phenolic assay



ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะการกระจายแบบปกติ (monomodal) ของอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O ที่มี (ก) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 4 ในเฟสน้ำมันและเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 ในเฟสน้ำภายใน (ข) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 ในเฟสน้ำมันและโซเดียมอัลจิ-เนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในเฟสน้ำภายใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 3 ลักษณะการกระจายแบบ polymodal ของอนุภาคอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี (ก) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 4 ในเฟสน้ำมันและเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 1 ในเฟสน้ำภายใน (ข) PGPR ความเข้มข้นร้อยละ 8 ในเฟสน้ำมันและโซเดียมอัลจิ-เนตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในเฟสน้ำภายใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวเบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 สิงหาคม พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	จังหวัด สงขลา
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (พ.ศ. 2553)
ผลงานทางวิชาการ	Harnsilawat T., B. Tepsongkroh, P. Maisuthisakul and W. Chantrapornchai. 2012. Physical characterizations of W/O/W emulsions containing different hydrocolloids. Presented at International Seminar on Food and Agricultural Science 2012 on September 4-6, 2012, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia. Tepsongkroh B., T. Harnsilawat, P. Maisuthisakul and W. Chantrapornchai. 2013. Influence of gelatin and NaCl on physical properties and encapsulation efficiency of multiple emulsion containing mango seed kernel extract. Presented at Asean Food Conference 2013 on September 9-11, 2013, Max Atrix, Singapore Expo.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์