



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)

ปริญญา

พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร

พัฒนาผลิตภัณฑ์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

เอนแคปซูเลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงและการประยุกต์ใช้

Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract and Its Application

นามผู้วิจัย

นางสาวธนวรรณ วันทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์เทพกัญญา หาญศิลาวัต, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อนุวัตร แจ่มชัด, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญอร ไหมสุทธิสกุล, ปร.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนุวัตร แจ่มชัด, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เอนแคปซูลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงและการประยุกต์ใช้

Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract and Its Application

โดย

นางสาวธนวรรณ วันทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธนวรรธน์ วันทอง 2555: เอนแคปซูเลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงและการประยุกต์ใช้ ปริญา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร) สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
เกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์เทพกัญญา หาญสีลวัต,
ปร.ด. 93 หน้า

สารสกัดเมล็ดมะม่วงเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปมะม่วง เป็นแหล่งที่ดีของสารประกอบ
ฟีนอลิก ซึ่งมีประโยชน์ในการช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคต่างๆ นอกจากนี้ในสารสกัดเมล็ดมะม่วงยังมีฤทธิ์
ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสซึ่งมีผลในการป้องกันการเกิดสารเมลานินในชั้นผิวหนัง แต่ข้อจำกัดในการใช้สารสกัดเมล็ด
มะม่วงคือปัญหาเรื่องการละลายสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ
แก้ปัญหการละลายของสารโดยการเตรียมเป็นผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา
ผลของส่วนผสมต่อคุณภาพต่างๆ ของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง และผลของ
กระบวนการทำแห้งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลทที่เตรียมได้ เริ่มจากการศึกษาผลของ
ส่วนผสมที่ใช้ในการเอนแคปซูเลชัน (กัมอะราบิกร้อยละ 0-20 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 0-30 และแป้งเมล็ด
มะขามร้อยละ 0-3) ต่อคุณภาพในด้านต่างๆ ของอิมัลชัน พบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ กัมอะราบิกร้อยละ
10.00 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 15.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.75 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีเมทิลแอล-
เลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีค่าสูงกว่า
เมทิลแอลเลท ต่อมาศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัด
เมล็ดมะม่วง พบว่า กระบวนการทำแห้งมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง
โดยความสามารถในการละลาย วอเตอร์แอกติวิตี้ ความสว่าง และค่าสีแดงของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ด
มะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าสูงกว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ขณะที่ความชื้น
ค่าสีเหลืองและปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย
มีค่าต่ำกว่าผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เมื่อศึกษาการ
เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20, 4
องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยเก็บตัวอย่างไว้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ พบว่า
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ความชื้นและค่าสีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่
ความสามารถในการละลายลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในการประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัด
เมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์ไอซิ่ง พบว่า ไอซิ่งที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีความคงตัว
และสมบัติเคมีกายภาพที่ดี จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่า ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ไอซิ่งที่มี
ส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงร้อยละ 95

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Tanawan Wanthong 2012: Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract and Its Application. Master of Science (Agro-Industrial Product Development), Major Field: Agro-Industrial Product Development, Department of Product Development. Thesis Advisor: Mrs. Thepkunya Harnsilawat, Ph.D. 93 pages.

Mango seed kernel (MSK), by-product obtained from mango industry, has been shown to be a good source of phenolic compounds that are beneficial to reduce the risk of various diseases. Moreover MSK acts as potent tyrosinase inhibitors to prevent overproduction of melanin in epidermal layers. The limitation of using MSK is low solubility for using it as product ingredient. Therefore, the objective of this research was to solve the solubility problem of the ingredient by preparing the encapsulated MSK. This research was conducted to investigate the effect of ingredients on qualities of water in oil in water emulsion containing MSK and the effect of drying processes on physicochemical properties of encapsulated powder. The influence of ingredients for encapsulation (gum arabic (GA) 0-20wt%, maltodextrin (MD) 0-30 wt% and tamarind kernel powder (TKP) 0-3wt%) on qualities of emulsion were studied. The results revealed that the optimum formulation was 10.00 wt% GA, 15.00 wt% MD and 2.75 wt% TKP. When compared the systems containing whether methyl gallate or MSK extract, the results showed that encapsulating MSK extract gave higher EE than that of methyl gallate. Second, the effect of drying method on physicochemical properties of encapsulated MSK powder was studied. The results showed that the drying methods had an effect on physicochemical properties of encapsulated powder. Water solubility index, water activity, lightness and redness of spray dried powder showed higher values than those of freeze dried powder, while moisture content, yellowness and total phenolic content of spray dried powder were lower than those of freeze dried powder. Third, the changes in physical properties of encapsulated MSK powder during storage at -20, 4 °C and room temperatures were monitored for 8 weeks. The MSK powder were packed in aluminium foil during storage. Water activity, moisture content and color of encapsulated MSK powder slightly changed while the water solubility index decreased during storage. Finally, the application of encapsulated MSK powder for lotion showed that the lotion containing encapsulated MSK powder had good stability and physicochemical properties. Result of acceptability test indicated that 95% of consumers accepted lotion containing encapsulated MSK powder product.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.เทพกัญญา หาญศิลาวัต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชญูร ไหมสุทธิสกุล และ รศ.ดร.อนุวัตร แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความดูแลเอาใจใส่ ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภาณี ด้านวิริยะกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ รศ.ดร.ธงชัย สุวรรณสิขินน์ ประธานกรรมการสอบ ที่กรุณาตรวจแก้ไขและให้คำแนะนำเพิ่มเติม เพื่อให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการค้นคว้า และวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์เพื่อสนับสนุนงบประมาณในงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อน ๆ ปริญญาโททุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเบญจรัตน์ เทพสงเคราะห์ และ ปริณดา ศักดิ์ธนากุล ที่คอยให้ความช่วยเหลือ อยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจให้ รวมถึงรุ่นพี่และรุ่นน้อง ในห้องแลปที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอ

ขอขอบพระคุณภาควิชาระบบอุตสาหกรรมอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย หอการค้าไทย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณแม่ คุณป้า และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ กำลังใจ และความเข้าใจ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับคำปรึกษา แรงผลักดัน ความรัก ความห่วงใย และกำลังใจที่ทุกท่านมีให้แก่ข้าพเจ้าโดยตลอด สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอมอบส่วนดี ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้แก่อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้เพียงผู้เดียว

ธนวรรณ วันทอง

สิงหาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	73
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก วิเคราะห์คุณภาพเคมี	86
ภาคผนวก ข แบบสอบถามการสำรวจผู้บริโภคและการทดสอบการยอมรับ	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดเมล็ดมะม่วง	4
2	โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกและอนุพันธ์ที่พบได้ทั่วไป	7
3	สมบัติของสารเคลือบที่ใช้ในการห่อหุ้ม	10
4	การประยุกต์ใช้เทคนิคการเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรมอาหาร	14
5	ระดับและปัจจัยในการออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD)	36
6	สูตรผลิตภัณฑ์โลชั่น	42
7	เกณฑ์ลักษณะความคงตัวของอิมัลชัน	43
8	ความเข้มข้นของส่วนผสมของอิมัลชันชนิด W/O/W	46
9	ผลของชนิดและความเข้มข้นของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อขนาดอนุภาค ศักย์ซีต้า ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W	46
10	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยศึกษากับค่าตอบสนอง	49
11	ค่าทางสถิติของขนาดอนุภาค ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W	50
12	การแยกชั้นเป็นครีมและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลทเมทิลกลอสและสารสกัดเมล็ดมะม่วงในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W	57
13	สมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	59
14	คุณภาพของโลชั่นตัวอย่างสูตรควบคุม สูตรที่มีการเติมผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง และสูตรที่มีการเติมสารสกัดเมล็ดมะม่วง	67
15	ข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภคในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค	69
16	ข้อมูลคะแนนความชอบเฉลี่ยที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงจากการทดสอบการยอมรับ	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง	71
18	การวิเคราะห์ McNemar test	72
19	ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในด้านการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์กับการยอมรับผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วง	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สัดส่วนของ free phenolic acid, esterified phenolic acid และ insoluble bound phenolic acid ในเมล็ดมะม่วง	5
2	โครงสร้างทางเคมีของกัมอะราบิก	11
3	โครงสร้างทางเคมีของมอลโตเดกซ์ตริน	12
4	ลักษณะของอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W)	15
5	อิมัลชันชนิด W/O/W	16
6	ลักษณะความไม่คงตัวของอิมัลชัน	19
7	แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของน้ำบริสุทธิ์	28
8	ผลของความเข้มข้นของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของอิมัลชันชนิด W/O/W	53
9	อันตรกิริยาของความเข้มข้นของกัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตรินต่อความหนืดที่อัตราการเฉือน 30.4 mPa.s ของอิมัลชันชนิด W/O/W	54
10	อันตรกิริยาของ (ก) กัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตริน (ข) มอลโตเดกซ์ตรินและแป้งเมล็ดมะขามต่อการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W	55
11	ผลของความเข้มข้นของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W	56
12	เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟ (Overlay Plot) ระหว่างค่าประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชัน ขนาดอนุภาค การแยกชั้นเป็นครีม และความหนืด เพื่อทำนายสถานะที่เหมาะสมของอิมัลชันที่มีกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามเป็นองค์ประกอบ โดยพื้นที่สีเหลือง คือ พื้นที่ที่ซ้อนทับกัน เป็นบริเวณที่ใช้คัดเลือกสถานะที่เหมาะสม	58
13	ลักษณะปรากฏและสีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง (ก) แบบพ่นฝอย (ข) แบบแช่เยือกแข็ง	61
14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง (ก) กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (ข) กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความชื้น (ข) วอเตอร์แอกติวิตี้ของผงเอนแคปซูเลท สารสกัดเมล็ดมะม่วงในสภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (\square) 4 องศาเซลเซียส และ (Δ) อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์	64
16	การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายน้ำของผงเอนแคปซูเลทสารสกัด เมล็ดมะม่วงในสภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (\square) 4 องศาเซลเซียส และ (Δ) อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์	65
17	การเปลี่ยนแปลงค่า L^* a^* และ b^* ของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงใน สภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (\square) 4 องศาเซลเซียส และ (Δ) อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 สัปดาห์	66
18	ตัวอย่างโลชั่น ก) สูตรควบคุม ข) ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง ค) สารสกัดเมล็ดมะม่วง	67

เอนแคปซูลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงและการประยุกต์ใช้

Encapsulation of Mango Seed Kernel Extract and Its Application

คำนำ

เมล็ดมะม่วงเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งในระดับอุตสาหกรรมนั้นมีวัสดุเหลือทิ้งสูงถึงร้อยละ 40-60 โดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้แบ่งเป็นเมล็ดมะม่วงร้อยละ 15-20 เปลือกร้อยละ 12-15 และเศษเนื้อมะม่วงร้อยละ 5-10 เพื่อลดปัญหาของขยะเมล็ดมะม่วงนี้ จึงมีการวิจัยเพื่อนำเอาเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์ทั้งเป็นอาหาร อาหารเสริม เครื่องสำอาง ยา และอาหารสัตว์ (Masibo and He, 2008) สารสกัดเมล็ดมะม่วงมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดร้อยละ 29.22 ประกอบด้วย free phenolic ร้อยละ 42-56 bound phenolic acids ร้อยละ 15-17 และ esterified phenolic acid ร้อยละ 10-19 (Maisuthisakul, 2008) องค์ประกอบหลักของฟีนอลิกในสารสกัดเมล็ดมะม่วงคือเมทิลแกลเลทร้อยละ 85.70 (Maisuthisakul and Gordon, 2012) นอกจากนี้ ยังพบว่าสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Maisuthisakul and Gordon, 2009) โดยเอนไซม์ไทโรซิเนสเป็นเอนไซม์สำคัญในการสังเคราะห์เมลานินของพืชและเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ดังนั้นจึงมีรายงานและทดสอบการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสในเครื่องสำอางเพื่อป้องกันการผลิตเมลานินที่มากเกินไปในชั้นผิวหนัง อย่างไรก็ตามการนำสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เป็นสารสกัดหยาบ (crude extract) มาใช้โดยตรงมักมีปัญหาเรื่องการละลายเนื่องจากมีสารประกอบหลายชนิดรวมกัน ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลแตกต่างกันจึงส่งผลให้ละลายยากขึ้น นอกจากนี้การนำสารสกัดที่ได้จากพืชมาใช้ในรูปสารสกัดหยาบจะพบสารออกฤทธิ์หลายกลุ่ม สารออกฤทธิ์เหล่านี้มีส่วนของสารชนิดที่ไม่ระเหยประกอบอยู่ ซึ่งจะมีการสลายตัวระหว่างกระบวนการต่างๆ

จากปัญหาเรื่องการละลายและความคงตัวของสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เกิดขึ้นจึงมีแนวคิดในการแก้ไขปัญหา โดยใช้เทคนิคเอนแคปซูลชันเพื่อทำให้สารสกัดมีความคงตัวและง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ โดยเอนแคปซูลชัน (encapsulation) คือ กระบวนการที่อนุภาคขนาดเล็กถูกล้อมรอบด้วยการเคลือบ (coat) หรือเก็บไว้ภายใน (embed) ในโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้ลักษณะอนุภาคที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ สารที่ถูกเคลือบ หรือที่เรียกว่า core นั้นอาจเป็นสารชนิดเดียว หรือมีส่วนประกอบหลากหลายก็ได้ ส่วนสารที่ใช้ห่อหุ้มหรือสารเคลือบ (wall/coat material) อาจอยู่ในรูปแบบชั้นเดียว หรือ

สองชั้น และมีหลายขนาด หลายรูปร่างขึ้นกับสารที่ใช้เป็นสารเคลือบ (Gharsallaoui *et al.*, 2007) เทคนิคเอนแคปซูลชั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อาหาร เครื่องสำอาง และยา โดยเทคนิคเอนแคปซูลชั้นทำได้หลายวิธี เทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ อิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsions) การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) อิมัลชันเชิงซ้อนเป็นระบบที่ซับซ้อน หรือสามารถเรียกได้ว่าเป็นอิมัลชันในอิมัลชัน (emulsions in emulsions) โดยอนุภาคของเฟสที่กระจายตัวอยู่นั้น ภายในยังมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ากระจายตัวอยู่ในอีกชั้นหนึ่งด้วย (Garti, 1997) ความคงตัวของระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ขั้นตอนการเตรียม ส่วนประกอบของอิมัลชัน เช่น เฟสน้ำ เฟสน้ำมัน ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ (Florence and Whitehill, 1985; Omotosho, 1986) และสมบัติของสารที่ใช้ห่อหุ้ม ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์ถูกนำมาใช้ในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W โดยอาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นเพื่อเพิ่มความคงตัวของเฟสน้ำภายนอกและเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูลชั้น

การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีหนึ่งที่เปลี่ยนสารในสถานะของเหลวให้เป็นผง นอกจากนั้นยังมีเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งเป็นกระบวนการทำแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ จึงช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงคุณค่าทางโภชนาการ สารอาหาร เนื้อสัมผัส โครงสร้าง สี กลิ่น และรสชาติ ให้ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์เดิม ซึ่งกระบวนการการทำแห้งทั้งสองกระบวนการเป็นการทำให้สารออกฤทธิ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายและง่ายขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยยืดอายุการเก็บของสารออกฤทธิ์และสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์อีกด้วย

ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาการเอนแคปซูลชั้นสารสกัดเมล็ดมะม่วงโดยเลือกใช้ระบบอิมัลชันชนิด W/O/W เพื่อให้สารสกัดมีความคงตัว จากนั้นเปรียบเทียบผลของกระบวนการทำแห้งเพื่อให้สามารถนำสารสกัดหรือสารออกฤทธิ์ไปใช้ในผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น และนำผงเอนแคปซูลสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ได้มาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลไกลโคเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลไกลโคเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง
2. เพื่อศึกษาผลของกระบวนการในการทำแห้งต่อคุณภาพและความคงตัวของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา
4. เพื่อประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์

การตรวจเอกสาร

1. สารสกัดจากเนื้อในเมล็ดมะม่วง (Mango seed kernel extract)

เมล็ดมะม่วงเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งในระดับอุตสาหกรรมนั้นมีวัสดุเหลือทิ้งสูงถึงร้อยละ 40-60 โดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้แบ่งเป็นเมล็ดมะม่วงร้อยละ 15-20 เปลือกร้อยละ 12-15 และเศษเนื้อมะม่วงร้อยละ 5-10 เพื่อลดปัญหาของขยะเมล็ดมะม่วงนี้ จึงมีการวิจัยเพื่อนำเอาเมล็ดมะม่วงมาใช้ประโยชน์ทั้งเป็นอาหาร อาหารเสริม เครื่องสำอาง ยา และอาหารสัตว์ (Masibo and He, 2008)

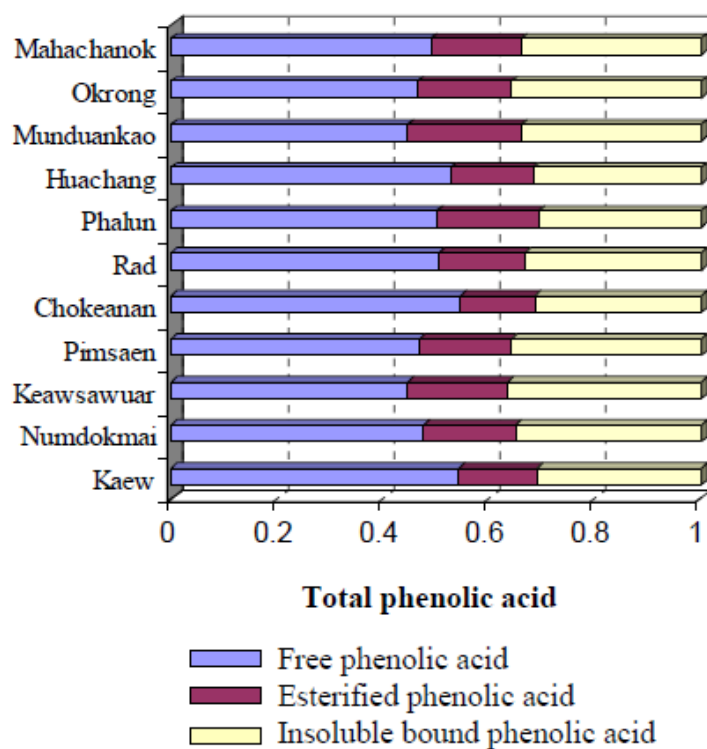
สารสกัดเมล็ดมะม่วงประกอบด้วยปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดร้อยละ 29.22 ซึ่งปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดประกอบด้วย free phenolic ร้อยละ 42-56 bound phenolic acids ร้อยละ 15-17 และ esterified phenolic acid ร้อยละ 10-19 (Maisuthisakul, 2008) (ภาพที่ 1) โดยมีเมทิลแกลเลทเป็นองค์ประกอบหลักของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดร้อยละ 85.70 (Maisuthisakul and Gordon, 2012) มีสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันและยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (Chen *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Fiuza *et al.*, 2004) ไทโรซิเนสเป็นเอนไซม์ที่พบในสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เอนไซม์นี้มีหน้าที่สร้างเม็ดสีให้ผิวหนังทำให้ผิวหนังสีเข้มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำสารสกัดเมล็ดมะม่วงมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางจึงอาจจะส่งผลให้ผิวแลดูกระจ่างใสขึ้น

ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดเมล็ดมะม่วง

สารประกอบฟีนอลิก	ปริมาณ (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิก/1 กรัม น้ำหนักแห้ง)
HHDP alkyl derivative	27.8 ^a ± 1.11
เมทิลแกลเลท	166.3 ^b ± 0.68
ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด	292.2 ^d ± 2.68

หมายเหตุ a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันแสดง
ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ที่มา: ดัดแปลงจาก Maisuthisakul and Gordon (2012)



ภาพที่ 1 สัดส่วนของ free phenolic acid, esterified phenolic acid และ insoluble bound phenolic acid ในเมล็ดมะม่วง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Maisuthisakul (2008)

องค์ประกอบของเนื้อในเมล็ดมะม่วงจะแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งภูมิศาสตร์ที่เพาะปลูกและสภาพภูมิอากาศ เมื่อกะเทาะเปลือกเมล็ดออกจะเห็นเนื้อในสีขาว เนื้อในของเมล็ดมะม่วงสดนั้นมีความชื้นประมาณร้อยละ 51 มีรสขม เมื่อนำไปละลายน้ำประมาณ 50 เท่าจะมีความเป็นกรดเล็กน้อย (pH 5) และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสอากาศ แสดงถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารฟีนอลิกด้วยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) (Arogba *et al.*, 1998) นอกจากนี้ เนื้อในเมล็ดมะม่วงแห้งยังประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 5-6 ไขมันร้อยละ 9-16 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 73-80 เส้นใยร้อยละ 2-3 เถ้าร้อยละ 2-3 และแทนนินร้อยละ 1 (Puravankara *et al.*, 2000; Zein *et al.*, 2005)

เนื้อมะพร้าวมีคุณค่าทางโภชนาการสูงเพราะอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน แป้ง และ เส้นใย มีความปลอดภัยสูงหากใช้บริโภค แป้งเนื้อมะพร้าวถึงแม้ว่าจะมีปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณโปรตีนในแป้งที่ใช้บริโภคทั่วไป แต่นับว่าเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญเนื่องจาก มีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่สูง คือ ร้อยละ 32 ของกรดอะมิโน ทั้งหมด และกรดอะมิโนจำเป็นที่พบในเนื้อมะพร้าวมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย FAO/WHO (Abdalla *et al.*, 2007) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการผลิตน้ำมันจากเนื้อมะพร้าว น้ำมันจากเนื้อมะพร้าวมีศักยภาพในการนำมาผลิตในระดับอุตสาหกรรมเพราะ มีปริมาณไขมันในระดับร้อยละ 11-18 ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมัน ชนิดอื่นๆ ที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบัน

นอกจากเนื้อมะพร้าวจะมีประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว เนื้อมะพร้าวยังใช้ เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอางที่ช่วยชะลอความแก่ได้ เพราะประกอบด้วยน้ำมันที่ให้ความชุ่มชื้น พิเศษต่อผิวหนัง และสารพอลิฟีนอลซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชัน สารต้านออกซิเดชันในเนื้อมะพร้าว สามารถจับกับอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีสารสกัดจากเนื้อมะพร้าวเป็นส่วนผสมจึงสามารถใช้เป็นเครื่องสำอางชะลอความชรา เป็นสารบำรุงผิว (Fox, 1997) และใช้เป็นอาหารเสริมที่ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันและป้องกันร่างกายจากพยาธิสภาพต่างๆ ที่เกิดจาก อนุมูลอิสระ เช่น โรคความจำเสื่อม โรคหัวใจ มะเร็ง เป็นต้น (Shahidi and Naczki, 1951) ด้วย ประโยชน์ต่างๆ มากมายจึงมีการนำไปขยายผลทางการค้า โดยบริษัท Snow Brand Milk Products ประเทศญี่ปุ่น มีลิขสิทธิ์การใช้สารสกัดเนื้อมะพร้าวเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งสามารถ ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Propionibacterium acnes* ที่ทำให้เกิดสิว และ *Streptococcus sanguinis* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ประจำถิ่นในคราบฟัน ดังนั้นสบู่ แชมพู ครีม และยาทาผิวที่มีสารสกัดเนื้อมะพร้าวเป็นส่วนประกอบจึงอาจจะช่วยป้องกันหรือรักษาสิวได้ ในขณะที่อาหารเสริมยาสีฟัน และน้ำยาบ้วนปากที่มีสารสกัดเนื้อมะพร้าวเป็นส่วนประกอบอาจช่วยป้องกันการเกิดคราบ หินปูนได้ โดยปริมาณที่แนะนำให้เติมในผลิตภัณฑ์คือร้อยละ 0.001-5 (Nakajima *et al.* 2000)

เมื่อพิจารณาความเสถียรของสารสกัดมะพร้าว พบว่าเป็นสารที่เสถียรต่อทั้งกระบวนการ ผลิตและต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางทั่วไป ทำให้สามารถเติมสารสกัดมะพร้าวในอาหารและเครื่องสำอางทั่วไปได้

สารพอลิฟีนอลเหล่านี้มีสัดส่วนของสารชนิดที่ไม่ระเหยประกอบอยู่ ซึ่งจะมีการสลายตัวระหว่างกระบวนการทำแห้งภายใต้แสงอาทิตย์ การสกัด และการทำให้เข้มข้น นอกจากนี้ในกระบวนการสกัดสารจากพืชหรือสมุนไพรให้ได้สารสกัดหยาบจะมีสารประกอบหลายชนิดรวมกันทำให้มีปัญหาในการละลาย เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันจึงทำให้ยากต่อการนำไปใช้ประโยชน์

1.1 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds)

สารประกอบฟีนอลิกคือสารประกอบที่มีหมู่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญ และอาจมีหมู่เคมีอื่นๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ โครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวน (aromatic ring) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เข้ามาแทนที่ ซึ่งอาจเข้ามาแทนที่ 1 หมู่ หรือมากกว่า สารประกอบฟีนอลิกสามารถจำแนกเป็นกลุ่มได้จากโครงสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ จำนวนคาร์บอน และหมู่ที่เข้ามาแทนที่ในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งมีการจำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิกแล้วมากกว่า 8,000 ชนิด (Kris-Etherton *et al.*, 2002) โดยจำแนกเป็นกลุ่มๆ ได้แก่ กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ลิกนิน (lignin) กรดไฮดรอกซีซินนามิกและอนุพันธ์ (hydroxycinnamic acid and derivatives) และฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกแต่ละกลุ่มมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันซึ่งพบได้ในผักหรือผลไม้ชนิดต่างๆ ฟีนอลจากพืชสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มหลักๆ โดยใช้จำนวนของคาร์บอนที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างหลักของสารประกอบฟีนอลิกเป็นเกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2 (Robards *et al.*, 1999)

ตารางที่ 2 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกและอนุพันธ์ที่พบได้ทั่วไป

Acid	R ₁	R ₂	R ₃
p-Hydroxybenzoic acid	H	OH	H
Protocatechuic acid	H	OH	OH
Vanillic acid	H	OH	OCH ₃
Gallic acid	OH	OH	OH
Syringic acid	OCH ₃	OH	OCH ₃

ที่มา: Robards *et al.* (1999)

สมบัติที่ได้รับความสนใจอย่างมากของสารประกอบฟีนอลิก คือการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และสารต้านการกลายพันธุ์ (antimutagens) ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระ (free radical) โดยสารประกอบฟีนอลิกจะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระและไอออนของโลหะที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่นๆ ด้วยการให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระอย่างรวดเร็ว (Rice-Evans *et al.*, 1996)

1.2 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ คือ กลุ่มของสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอกที่ไม่ได้จับคู่ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอน และมีอายุสั้นประมาณ 1 หรือ 10^{-3} – 10^{-10} วินาที ดังนั้นจึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในเซลล์ของร่างกาย อนุมูลอิสระส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในเซลล์ระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของออกซิเจนไปยังโมเลกุลของน้ำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอนุมูลอิสระของออกซิเจน (reactive oxygen species, ROS) ซึ่งสารกลุ่มนี้ ได้แก่ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, OH[•]) อนุพันธ์ของออกซิเจนบางตัว ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H₂O₂) นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของสารที่เรียกว่า อนุมูลอิสระของไนโตรเจน (reactive nitrogen species, RNS) ที่สำคัญ ได้แก่ เปอร์ออกซีไนไตร (peroxynitrite, ONOO⁻) ทั้งกลุ่มของ ROS และ RNS จัดเป็นแหล่งของอนุมูลอิสระที่สำคัญของร่างกาย (วัลยาและพัชรี, 2542)

1.2.1 สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant)

สารต้านออกซิเดชัน หมายถึง สารประกอบใดๆ ที่ใช้ในปริมาณเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีสมบัติยับยั้ง หรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พบในธรรมชาติแบ่งเป็น 4 ประเภท (Frankel and Meyer, 2000) คือ

1.2.1.1 สารต้านออกซิเดชันในกลุ่มของเอนไซม์ที่สร้างได้ในเซลล์ร่างกาย ได้แก่ คาตาเลส (catalase) ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (superoxide dismutase) และกลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) เป็นต้น

1.2.1.2 สารต้านออกซิเดชันในกลุ่มของวิตามิน ได้แก่ วิตามินอีในถั่ว ธัญพืช รำข้าวกล้อง งา และวิตามินซีในผลไม้ ผักสด

1.2.1.3 สารต้านออกซิเดชันในกลุ่มของแร่ธาตุ เช่น ซีลีเนียม และสังกะสีเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ต้านออกซิเดชัน

1.2.1.4 สารต้านออกซิเดชันในกลุ่มของสารเคมีจากพืช (phytochemicals) เป็นสารเคมีจากพืชที่ไม่ใช่วิตามินและสารอาหาร เช่น แคโรทีน ไลโคปีน แชนโทฟิลฟลาโวนอยด์ และแทนนิน เป็นต้น

2. เอนแคปซูลชัน (encapsulation)

เอนแคปซูลชัน คือ กระบวนการที่อนุภาคขนาดเล็กถูกล้อมรอบด้วยการเคลือบ (coat) หรือเก็บไว้ภายใน (embed) ในโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือไม่เนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้ลักษณะอนุภาคที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ สารที่ถูกเคลือบหรือที่เรียกว่า core นั้นอาจเป็นสารชนิดเดียวหรือมีส่วนประกอบหลากหลายก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นสารให้กลิ่นหรือ สารที่ไม่ละลายน้ำ แต่สารที่ละลายน้ำ รวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ ก็สามารถนำมาห่อหุ้มได้ ส่วนสารที่ใช้ห่อหุ้มหรือสารเคลือบ (wall/coat material) อาจอยู่ในรูปแบบชั้นเดียว หรือ สองชั้น และมีหลายขนาดหลายรูปร่างขึ้นกับสารที่ใช้เป็นสารเคลือบ (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

2.1 สารเคลือบ (wall material)

สารเคลือบส่งผลต่อประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม รวมถึงความคงตัวของสารที่ถูกห่อหุ้มในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้สารเคลือบที่นิยมใช้ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต เช่น สตาร์ช มอลโตเดกซ์ตริน อย่างไรก็ตาม สารเคลือบดังกล่าวมักขาดสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งอาจต้องทำการดัดแปรทางเคมีเพื่อเพิ่มสมบัติดังกล่าว ในขณะที่โปรตีนมีสมบัติดังกล่าว จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบเช่นเดียวกัน เช่น เวย์โปรตีน โซเดียมเคซิเนต เป็นต้น (Madene *et al.*, 2006)

สารเคลือบจะช่วยป้องกันสารที่ถูกกักเก็บ เช่น วิตามิน สารให้กลิ่นรส และน้ำมันหอมระเหย จากสภาวะแวดล้อมภายนอกและควบคุมการปลดปล่อยสารที่ถูกกักเก็บออกมาจากภายในขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคลือบ สารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเคลือบ แสดงในตารางที่ 3

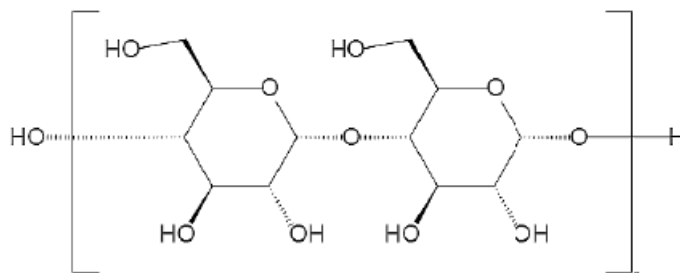
ตารางที่ 3 สมบัติของสารเคลือบที่ใช้ในการห่อหุ้ม

สารเคลือบ	สมบัติ
มอลโตเดกซ์ตริน (DE<20)	สมบัติในการสร้างฟิล์ม (film forming)
สตาร์ชดัดแปร	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์
กัมอะราบิก	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และสร้างฟิล์ม
เซลลูโลสดัดแปร	สมบัติในการสร้างฟิล์ม
เจลาติน	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และสร้างฟิล์ม
ไซโคลเดกซ์ตริน	สมบัติในการห่อหุ้ม และเป็นอิมัลซิไฟเออร์
เลซิติน	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์
เวย์โปรตีน	สมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

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

2.1.1 กัมอะราบิก (Gum arabic)

กัมอะราบิก เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากต้นอะคาเซีย (acacia) สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดีถึงร้อยละ 50 มีสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากส่วนอะราบินอกาแลคแทน (arabinogalactan) และส่วนไกลโคโปรตีน (glycoprotein) มีปริมาณโปรตีนมาก โดยโปรตีนทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างน้ำและน้ำมันเพราะโปรตีนประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) และไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สามารถยึดเกาะได้ทั้งส่วนที่เป็นน้ำและน้ำมัน ส่วนอะราบินอกาแลคแทน ให้ความหนืดสูงแก่ผลิตภัณฑ์ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคช้าลง และป้องกันการกลับมารวมตัวกันของอนุภาคที่เป็นไฮโดรโฟบิก (Williams and Phillips, 2009)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของมอลโตเดกซ์ตริน

ที่มา: Carareto *et al.* (2010)

2.1.3 ผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (Tamarind kernel powder)

ผงเนื้อในเมล็ดมะขามมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวนวล มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 55,000 ดาลตัน (Chakraverti, 1961) องค์ประกอบทางเคมีของผงเนื้อในเมล็ดมะขามประกอบด้วยสารพอลิแซคคาไรด์มากกว่าร้อยละ 65 โปรตีนร้อยละ 15-29 โดยประมาณ ไขมันร้อยละ 3.9-8.0 โดยประมาณ โดยองค์ประกอบต่างๆ จะมีปริมาณต่างๆ กันในแต่ละการทดลอง เนื่องจากขึ้นกับฤดูกาล ดินฟ้าอากาศ และสภาพดินที่ปลูก (Kumar and Bhattacharya, 2008) พอลิแซคคาไรด์จากผงเนื้อในเมล็ดมะขามเป็นชนิดไม่มีประจุประกอบด้วย D-glucose, D-xylose, D-galactose และ L-arabinose เมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายที่เป็นเมือก (mucilaginous) และเป็นเจลภายใต้สภาวะที่เป็นกรด และเป็นกลางได้ดี และมีสมบัติใกล้เคียงกับเพคติน (Rao and Srivastava, 1973; พวงเพ็ชร, 2521)

องค์ประกอบของผงเนื้อในเมล็ดมะขามสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนตามการละลายน้ำและการเกิดเจล คือ (Rao and Srivastava, 1973; พวงเพ็ชร, 2521)

ส่วนที่ 1 เป็นโปรตีนมีปริมาณร้อยละ 2-4 สามารถละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ได้ภายใน 2-3 นาที ส่วนนี้ไม่ใช่พอลิแซคคาไรด์ที่แท้จริงแต่เป็นพอลิยูโรไนด์ (polyuronide) ซึ่งไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

ส่วนที่ 2 เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง มีปริมาณร้อยละ 20-22 มีสมบัติในการเกิดเจลได้ดีในอาหาร

ส่วนที่ 3 เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่ละลายในน้ำเย็นมีปริมาณร้อยละ 30-35 มีสมบัติในการเกิดเจลและเป็นตัวประสานที่ดีมาก

พฤติกรรมการไหลของสารละลายของผงเนื้อในเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้นต่ำมากๆ จะแสดงสมบัติการไหลแบบนิวโตเนียน แต่เมื่อมีความเข้มข้นของผงเนื้อในเมล็ดมะขามมากขึ้น สารละลายจะแสดงสมบัติแบบนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian) โดยมีพฤติกรรมแบบ shear thinning (Khounvilay and Sittikijyothin, 2012) คือขณะที่เมื่อเพิ่ม shear rate ความหนืดของสารละลายจะลดลง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ผงเนื้อในเมล็ดมะขามได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากหาง่าย และราคาถูก สามารถนำมาใช้ทดแทนไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นได้ โดยผงเนื้อในเมล็ดมะขามเข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่ปี 1943 ได้มีการนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามมาเป็นสารเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของของเหลว หรือเป็นสารต้านการซึมน้ำในอุตสาหกรรมเส้นใยในประเทศอินเดีย (Marathe *et al.*, 2002) สำหรับอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำผงเนื้อในเมล็ดมะขามมาประยุกต์ใช้อย่างมากมาย เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหาร รสชาติ และเนื้อสัมผัส ให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะในญี่ปุ่น ผงเนื้อในเมล็ดมะขามได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์อาหารได้ ยกตัวอย่างเช่น ทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว (stabilizer) ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม มายองเนส และชีส เป็นต้น

2.2 เทคนิคเอนแคปซูลชัน (encapsulation techniques)

เทคนิคในการเอนแคปซูลชันทำได้หลายวิธี โดยเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) การดูดซับ (adsorption) รวมถึงอิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsion) ก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรมอาหาร

Encapsulation techniques	Encapsulated form	Application area
Coacervation	Paste/Powder/Capsule	Chewing gum, toothpaste, baked foods
Spray drying	Powder	Confectionery, milk powder, instant desserts, food flavors, instant beverages
Fluid bed drying	Powder/Granule	Prepared dishes, confectionery
Spray cooling/chilling	Powder	Prepared dishes, ices
Extrusion	Powder/Granule	Instant beverages, confectionery, teas
Molecular inclusion	Powder	Confectionery, instant drinks, extrude snack

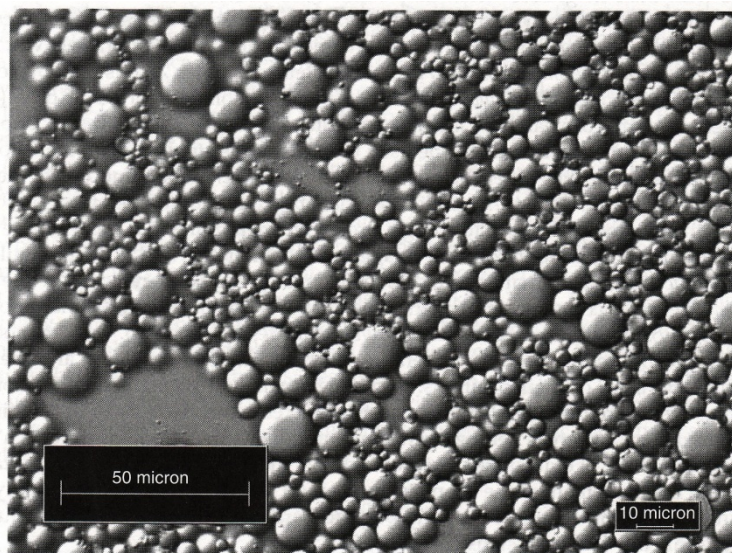
ที่มา: ดัดแปลงจาก Madene *et al.* (2006)

2.2.1 เทคนิคอิมัลชันเชิงซ้อน (multiple emulsion technique)

2.2.1.1 อิมัลชัน

อิมัลชันประกอบด้วยของเหลวสองส่วนที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (immiscible liquids) โดยปกติจะเป็นน้ำมันกับน้ำ ซึ่งของเหลวที่กระจายอยู่จะกระจายแบบอนุภาค (ภาพที่ 4) ในอาหารส่วนใหญ่จะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1–100 ไมครอน (Dickinson and Stainsby, 1982; Dickinson, 1992; Walstra, 1996) อิมัลชันสามารถแบ่งกลุ่มได้โดยใช้เฟสน้ำมัน และเฟสน้ำเป็นเกณฑ์ คือ ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคไขมันกระจายอยู่ในเฟสน้ำ เรียกระบบอิมัลชันนี้ว่า อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil in water, O/W) เช่น มายองเนส นม ครีม ซุป และซอส ในทางตรงกันข้าม ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคน้ำกระจายอยู่ในเฟสน้ำมัน เรียกระบบอิมัลชันนี้ว่า อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water in oil, W/O) เช่น มاکาโรน และเนยเหลว นอกจากนี้ยังมีระบบอิมัลชันเชิงซ้อน ซึ่งแบ่งเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำในน้ำมัน (oil in water in oil, O/W/O) และ

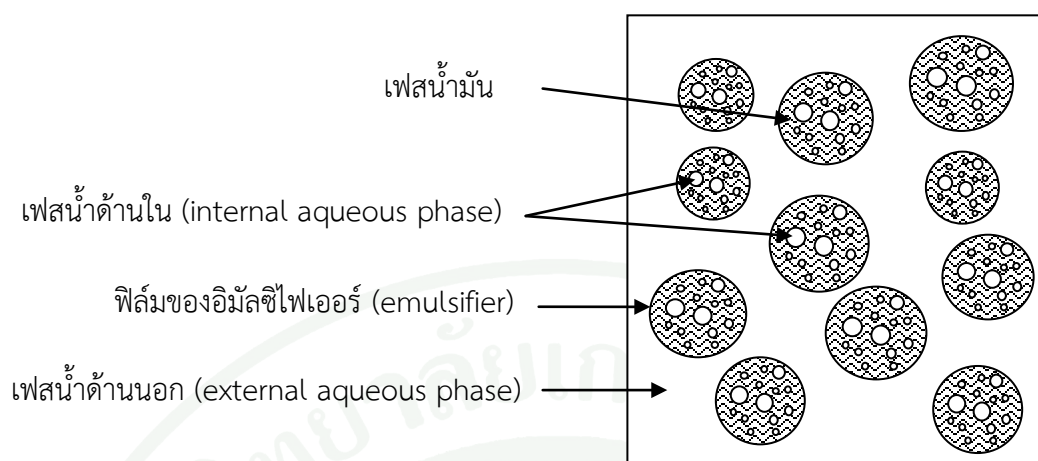
อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (water in oil in water, W/O/W) (Dickinson and McClements, 1995) ยกตัวอย่างเช่น ระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำจะประกอบด้วยอนุภาคของน้ำกระจายตัวอยู่ภายในอนุภาคของน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่าและกระจายอยู่ในเฟสต่อเนื่องที่ประกอบด้วยน้ำ



ภาพที่ 4 ลักษณะของอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W)

ที่มา: McClements (2005)

อิมัลชันเชิงซ้อนเป็นระบบที่ซับซ้อนสามารถเรียกอีกอย่างได้ว่าระบบอิมัลชันในอิมัลชัน (emulsions in emulsions) กล่าวคือ เป็นระบบที่อนุภาคของเฟสที่กระจายตัวมีอนุภาคขนาดเล็กกว่ากระจายตัวอยู่ในอีกชั้นหนึ่ง (Garti, 1997) อิมัลชันเชิงซ้อนสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (water-in-oil-in-water emulsion, W/O/W) และอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำในน้ำมัน (oil-in-water-in-oil emulsions, O/W/O) (Garti, 1997) ซึ่งลักษณะของอิมัลชันเชิงซ้อนชนิด W/O/W แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 อิมัลชันชนิด W/O/W

ที่มา: ดัดแปลงจาก Garti (1997)

โดยทั่วไปวิธีการที่นิยมในการทำอิมัลชันเชิงซ้อน คือ การใช้กระบวนการผลิตอิมัลชันสองขั้นตอน (two-step emulsification) โดยใช้อิมัลซิไฟเออร์ 2 ชนิดด้วยกัน โดยชนิดแรกเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ชอบน้ำมัน (lipophilic emulsifier) ที่มีค่า HLB (hydrophilic lipophilic balance) ต่ำซึ่งใช้ในขั้นตอนการสร้างอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil, W/O) และชนิดที่สองเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic emulsifier) ที่มีค่า HLB สูง ซึ่งใช้ในขั้นตอนการสร้างอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water, O/W) โดยอิมัลชันเตรียมด้วยการใช้แรงเฉือนที่สูงโดยอาจใช้วิธีอัลตราโซนิค (ultrasonification) หรือการโฮโมจีไนเซชัน (homogenization) ส่วนขั้นตอนถัดมาที่ใช้สร้างอิมัลชันเชิงซ้อนนั้นจะใช้แรงเฉือนที่น้อยกว่าเพื่อป้องกันการแตก (rupture) ของอนุภาคอิมัลชัน (Garti, 1997; Sugiura *et al.*, 2004)

อิมัลชันเชิงซ้อน ประกอบด้วยอนุภาคอิมัลชันขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดแตกต่างกัน (polydispersed) ส่งผลให้เกิดความไม่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamically unstable) มีแนวโน้มเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค (flocculation) การรวมตัวกันของอนุภาค (coalescence) และการแยกชั้นเป็นครีม (Benichou *et al.*, 2004) โดยการสูญเสียความคงตัวของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำนั้นสามารถเป็นไปได้จากหลายกลไกด้วยกัน ได้แก่ การรวมตัวกันของอนุภาคของน้ำเฟสภายใน (internal aqueous phase) จนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไขมันจนแขวนลอยบนเฟสน้ำด้านนอก (external

aqueous phase) การแตกของอนุภาคไขมันที่กั้นระหว่างเฟสน้ำภายในและเฟสน้ำภายนอก และ การเคลื่อนของน้ำจากเฟสน้ำภายในผ่านแผ่นฟิล์มของอนุภาคไขมันออกมาสู่เฟสน้ำภายนอก ซึ่งอาจ เกิดจากการแพร่ของน้ำผ่านผิวอนุภาคไขมันบริเวณฟิล์มที่ห่อหุ้มรอบอนุภาคไขมัน (Sugiura *et al.*, 2004; Van der Graaf *et al.*, 2005)

2.2.1.2 ความคงตัวของอิมัลชัน

ความคงตัวของอิมัลชัน หมายถึง ความสามารถของอิมัลชันที่จะต้านทาน การเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป เช่น กรณีที่อิมัลชันมีความคงตัวสูงจะทำให้ การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ อาทิ การแยกชั้นเป็นไปได้ช้า ซึ่งกลไกการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน ประกอบด้วย

2.2.1.2.1 การรักษาความคงตัวโดยประจุบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (charge stabilization)

ความคงตัวของระบบคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค คอลลอยด์ซึ่งสามารถเกิดพันธะต่อกันได้ พันธะที่เกี่ยวข้องนี้เป็นพันธะในกลุ่มของแรงช่วงยาว ซึ่ง ได้แก่ แรงดึงดูดแวน เดอ วาลส์ และแรงผลักระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีประจุเหมือนกัน (electrical repulsion) ผลรวมของแรงดึงดูดและแรงผลักซึ่งแสดงเป็นศักย์ไฟฟ้า (electrical potentials) ขึ้นอยู่กับระยะห่างอนุภาคของคอลลอยด์ เมื่ออนุภาคของคอลลอยด์อยู่ห่างกันถึงแม้ ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ คือ แรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักอนุภาคจะไม่เกิดการเกาะกลุ่ม เนื่องจากอนุภาคอยู่ไกลกันเกินกว่าจะเกิดพันธะในกลุ่มของแรงช่วงสั้น เช่น พันธะโคเวเลนต์ เมื่อ อนุภาคของคอลลอยด์เข้ามาใกล้กันมากขึ้น ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก คือ แรงผลัก มากกว่าแรงดึงดูด อนุภาคคอลลอยด์จะไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันหรือรวมตัวกัน ทำให้ระบบคอลลอยด์ รักษาความคงตัวไว้ได้ไม่เกิดการตกตะกอนหรือแยกชั้น เมื่อมีการเติมไอออนลงในระบบคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าของไอออนจะไปเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าของระบบคอลลอยด์ทั้งในเฟสที่กระจายตัวและเฟส ต่อเนื่อง ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์จะเปลี่ยนไปทำให้แรงผลักลดลง ที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์สั้นๆ ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ คือ แรงดึงดูด มากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดการเกาะกลุ่มและทำให้ระบบคอลลอยด์เสียความคงตัว ผลของการลดแรงผลักจากการเติมไอออนจะขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่สามารถทำให้ประจุบนพื้นผิว

ของอนุภาคเป็นกลาง (charge neutralization) ความเข้มข้นของไอออนที่เติม และ pH ของระบบ คอลลอยด์นั้นๆ ที่จะทำให้ประจุรวมของอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนไป (ปารีฉัตร, 2545)

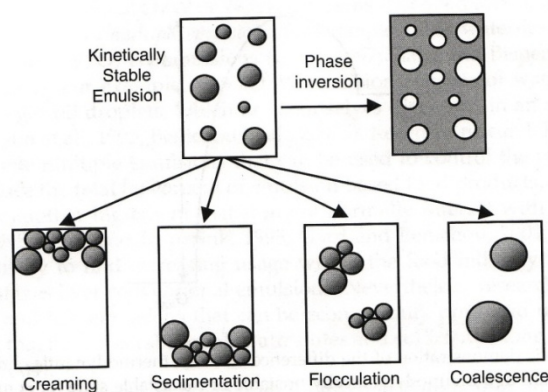
2.2.1.2.2 การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวร่วมระหว่างเฟสที่กระจายตัว กับเฟสต่อเนื่อง (steric stabilization)

การรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดยโมเลกุลที่ผิวร่วม เกิดขึ้นได้เนื่องจากสารประกอบที่มีส่วนของโมเลกุลที่ละลายได้ทั้งในเฟสที่กระจายตัวและเฟสต่อเนื่อง มีขนาดโมเลกุลใหญ่เพียงพอที่จะกีดขวางการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ ยกตัวอย่างเช่น โปรตีน ซึ่งมีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่จะถูกดูดซับหรือละลายได้ในเฟสของน้ำมัน (oil phase) และมีส่วนที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในเฟสของน้ำ (aqueous phase) ดังนั้นที่ผิวร่วมระหว่างน้ำมันกับน้ำ (oil-water interface) จึงเกิดโครงสร้างซึ่งสามารถทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวกันของเม็ดไขมัน เพราะโปรตีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่พอที่จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง (barrier) ไม่ให้อนุภาค คอลลอยด์เกาะกลุ่มกันได้ (ปารีฉัตร, 2545)

2.2.1.2.3 การรักษาความคงตัวโดยโมเลกุลที่ผิวร่วมระหว่างเฟสที่กระจายตัว กับเฟสต่อเนื่อง (particle stabilization)

ความสามารถในการรักษาความคงตัวของระบบคอลลอยด์โดย อนุภาค (particle) จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดเรียงตัวของอนุภาคนั้นๆ ที่ผิวสัมผัสระหว่าง เฟสที่กระจายตัวกับวัฏภาคต่อเนื่อง การที่อนุภาคคอลลอยด์ เช่น อนุภาคน้ำมัน (oil droplet) ถูก ล้อมรอบด้วยอนุภาค จะทำให้การรวมตัวของอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้นได้ยากเมื่อมีการชนกัน เพราะ อนุภาคจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวาง ความสามารถในการรักษาความคงตัวโดยกลไกนี้ จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของอนุภาคและมุมที่อนุภาคสัมผัสกับผิวร่วม ซึ่งเรียก มุมสัมผัส (contact angle) ถ้าอนุภาค ละลายได้ง่ายในน้ำมัน อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมันมากกว่าในน้ำ (มุมน้อยกว่า 90°) ประสิทธิภาพ ในการเป็นเครื่องกีดขวางจะไม่มากเท่าอนุภาคที่สามารถละลายในน้ำและน้ำมันเท่าๆ กัน (มุม = 90°) และถ้าอนุภาคละลายในน้ำได้ดี อนุภาคจะมีส่วนที่อยู่ในน้ำมากกว่าน้ำมัน (มุมมากกว่า 90°) ทำให้ เป็นเครื่องกีดขวางได้ไม่ดีเท่ากับเมื่อมีมุม 90° เพราะอนุภาคจะหลุดออกจากส่วนที่เป็นน้ำมันได้ง่าย (ปารีฉัตร, 2545)

อิมัลชันเป็นระบบที่ไม่คงตัวทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากระบบต้องการพลังงานอิสระในการเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างเฟสของน้ำและน้ำมัน เมื่อเวลาผ่านไป ระบบอิมัลชันจะเกิดการแยกชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นของน้ำมันที่อยู่ด้านบน (มีความหนาแน่นต่ำ) และชั้นของน้ำอยู่ด้านล่าง (มีความหนาแน่นสูง) ความคงตัวของอิมัลชันเกี่ยวข้องกับสมดุลระหว่างแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค โดยแรงดึงดูดซึ่งเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) จะเป็นแรงที่ทำให้เกิดความไม่คงตัวของอิมัลชัน ในขณะที่แรงผลักจะช่วยให้เกิดความคงตัว โดยทำให้อนุภาคแยกจากกัน (St. Angelo, 1989) การเกิดความไม่คงตัวของอิมัลชันนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคของเหลวหรืออนุภาคน้ำมัน ในกรณีที่อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำเปลี่ยนไปเป็นลักษณะอื่น โดยขั้นแรกจะเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคน้ำมัน (aggregation หรือ flocculation) และเชื่อมรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น (coalescence) ตามด้วยการแยกชั้นเป็นครีม (creaming) และสุดท้ายทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำและน้ำมัน ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะความไม่คงตัวของอิมัลชัน

ที่มา : McClements (2005)

2.2.1.4 ประเภทของความไม่คงตัวของอิมัลชัน

2.2.1.4.1 การแยกชั้นจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Separation)

โดยทั่วไปแล้วอนุภาคในอิมัลชันจะมีความหนาแน่นต่างกันถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคก็จะลอยขึ้นสู่ด้านบน (Dickinson and Stainsby, 1982; Dickinson, 1992; Walstra, 1996) ในทางกลับกัน ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นสูง

กว่าของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ อนุภาคนั้นก็จะลงไปอยู่ด้านล่างของของเหลว นั่น ซึ่งการแยกชั้นจากแรงโน้มถ่วงนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันภายใต้แรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกชั้นโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาค (Dickinson, 1992) อาหารโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นของน้ำมันต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นน้ำมันจะรวมตัวและลอยขึ้นด้านบนของอิมัลชันเป็นชั้นครีม (cream layer) ส่วนของน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะอยู่ด้านล่าง (serum layer) อาหารที่เป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำจึงมีลักษณะของครีมที่ผิวด้านบน การแยกชั้นเป็นครีมมีผลต่อคุณภาพของอาหาร เนื่องจากผู้บริโภคต้องการให้มีลักษณะปรากฏเป็นเนื้อเดียวกัน และยังมีผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหารโดยส่วนของครีมจะมีความหนืดสูงกว่าส่วนของเหลว ดังนั้นรสชาติในส่วนของครีมจึงมีความมันกว่าเพราะมีไขมันสูง การแยกชั้นเป็นครีมจัดเป็นลักษณะความไม่คงตัวที่สามารถผันกลับได้โดยการผสม (Dickinson, 1992)

2.2.1.4.2 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค (Flocculation)

เกิดจากอนุภาคเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นตามปกติในธรรมชาติ เนื่องมาจากผลของพลังงานความร้อน แรงโน้มถ่วง หรือแรงทางกล โดยการเคลื่อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการปะทะระหว่างกัน ส่งผลให้อนุภาคแยกออกจากกันหรือรวมตัวกัน ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดหรือแรงผลักที่มีอยู่ในระบบ โดยการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเป็นกระบวนการที่อนุภาคหลาย ๆ อนุภาคมาเกาะกัน โดยแต่ละอนุภาคยังคงลักษณะอนุภาคแต่ละอนุภาคไว้ โดยยังคงขนาดและรูปร่างของอนุภาคเดิม สำหรับอิมัลชันเจือจาง ซึ่งมีความเข้มข้นของอนุภาคไม่เกินร้อยละ 0.05 การเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคจะเร่งการแยกชั้นอันเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงซึ่งเป็นที่ไม่ต้อง การ เพราะทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บสั้นลง (McClements, 2005) และยังเป็นสาเหตุให้ความหนืดของอิมัลชันเพิ่มขึ้น

2.2.1.4.3 การรวมตัวกันของอนุภาค (Coalescence)

เป็นลักษณะความไม่คงตัวของอิมัลชันที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการแตกของชั้นฟิล์มบาง ๆ (lamella) ระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน การเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคจะเกิดขึ้นได้เฉพาะกรณีที่อนุภาคอยู่ใกล้กัน และฟิล์มที่ผิวร่วมมีการแตกออกจากกัน (McClements, 2005)

เมื่ออนุภาค 2 อนุภาคอยู่ใกล้กัน ผิวที่นูนโค้งจะบิดทำให้เกิดการผิดรูปได้ โดยการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคทำให้อิมัลชันเกิดคริมหรือตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขนาดของอนุภาคในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ ซึ่งทำให้เกิดชั้นของน้ำมันส่วนบนที่เรียกว่า oiling off และเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (McClements, 2005)

2.2.1.4.4 การรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาค (Partial coalescence)

เป็นการที่อนุภาคน้ำมันที่เป็นผลึกบางส่วนอย่างน้อย 2 อนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันและจัดเรียงตัวเป็นรูปร่างที่ผิดปกติ โดยการเกาะตัวยังคงรูปร่างของอนุภาคไว้ เนื่องจากโครงสร้างผลึกไขมันภายในอนุภาคจะป้องกันการรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์ พบว่า อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำจะถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิหนึ่ง และจะเกิดการเปลี่ยนสถานะของน้ำมันเป็นของแข็ง ซึ่งจะยังคงเห็นรูปร่างของอนุภาคไขมัน (oil droplet) เป็นอนุภาคชัดเจน การลดอุณหภูมิจะทำให้ไขมันบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งเชื่อมต่อเม็ดไขมันเข้าด้วยกัน ทำให้อนุภาคเกิดผลึกบางส่วน และมีแรงเฉือนในระบบจะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคบางส่วน (McClements, 2005) โครงสร้างของอนุภาคไขมันที่เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคบางส่วนนี้นิยมทำให้เกิดในผลิตภัณฑ์ที่มีการตีอัดอากาศ เช่น ไอศกรีม และวิปครีม เพื่อให้โครงสร้างของอนุภาคไขมันอุ้มน้ำให้อากาศไว้

การทำให้อิมัลชันของอาหารมีความคงตัวสูงทำได้โดยการลดขนาดของเฟสที่กระจายหรือเพิ่มความหนืดของเฟสต่อเนื่อง ซึ่งการลดขนาดของเฟสที่กระจายทำได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant หรือ emulsifier) ซึ่งสารนั้นจะถูกดูดซับระหว่างผิวสัมผัสของเฟสที่กระจายและเฟสต่อเนื่อง การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ขนาดอนุภาคของเฟสที่กระจายลดลง ดังนั้นจึงทำให้การโฮโมจีไนซ์เป็นไปได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การเติมสารเพิ่มความหนืด เป็นการทำให้ความหนืดของเฟสต่อเนื่องเพิ่มขึ้น และทำให้การเคลื่อนที่ของเฟสที่กระจายช้าลง ดังนั้นอนุภาคจึงรวมตัวกันได้ยากขึ้น แต่วิธีการนี้ไม่สามารถทำได้ในอาหารที่ต้องการให้มีความหนืดต่ำ

2.2.1.5 อิมัลซิไฟเออร์

การรักษาความคงตัวของอิมัลชันในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม จำเป็นต้องมีการใช้สารให้ความคงตัว เช่น การเติมอิมัลซิไฟเออร์ก่อนการผสมหรือการโฮโมจีไนซ์ การเติมอิมัลซิไฟเออร์ในขณะที่ทำให้เกิดเป็นอิมัลชัน จะช่วยลดแรงตึงผิวของเฟสที่กระจายและเฟสต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้

เกิดเป็นอิมัลชันได้ง่ายขึ้น อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารที่จะเกาะบริเวณพื้นผิวของอนุภาคที่กระจายอยู่ เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคเข้ามาอยู่ใกล้กัน จนเกิดการรวมตัวกัน (Coupland and McClements, 1996) อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในอาหารจะต้องไม่เป็นพิษ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่เป็นสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้

อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารซึ่งมีทั้งส่วนที่มีขั้ว (polar group) และไม่มีขั้ว (nonpolar group) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ส่วนที่มีขั้วได้แก่ -COOH, -CHO, -OH กลุ่มเหล่านี้จะรวมกับน้ำได้ดี เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก ส่วนที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ ส่วนที่เป็นสายไฮโดรคาร์บอน ส่วนนี้จะรวมกับน้ำมันได้ดี แต่ไม่รวมกับน้ำ เรียกว่า ไฮโดรโฟบิกหรือไลโฟฟิลิก จากสมบัติดังกล่าวจึงเป็นสารที่มีแรงดูดซับที่ผิวระหว่างน้ำและน้ำมันได้ดี หรือถูกดูดซับอยู่บนผิวอนุภาคน้ำมัน สำหรับอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ โดยส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิกของโมเลกุลจะสัมผัสอยู่กับน้ำซึ่งอยู่รอบนอก อนุภาคน้ำมันและส่วนไฮโดรโฟบิกจะสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันภายใน

อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในอาหารเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากความเป็นพิษ กฎหมาย และข้อจำกัดทางการตลาด การใช้อิมัลซิไฟเออร์ในอาหารจึงมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก อิมัลซิไฟเออร์ที่ได้รับการอนุญาตให้ใช้มาก คือ เอสเทอร์ของกรดไขมัน กับ polyvalent alcohols เช่น กลีเซอรอล โพรพิลีนไกลคอล หรือ ซอร์บิทอล และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอิมัลซิไฟเออร์ โมเลกุลเหล่านี้จึงถูกนำไปทำปฏิกิริยากับเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) หรือทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับกรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก หรือ กรดแลคติก (Dickinson, 1992)

2.2.1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำโดยศึกษาความคงตัวของระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันมากมาย อาทิเช่น

Su *et al.* (2006) ศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่น้อยที่สุดที่ส่งผลให้ระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำมีความคงตัวและมีปริมาณผลผลิตสูง โดยใช้ polyglycerol ester of polyricinoleate acid (PGPR) ผสมกับโซเดียมเคซิเนต (NaCN) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในเฟสแรกของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน และ NaCN ในเฟสที่สองของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ พบว่าความเข้มข้นของ PGPR (ร้อยละ 0.5-8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เพียงอย่างเดียวไม่ทำให้ขนาดของอนุภาคของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำแตกต่างกัน นอกจากนี้การเติม NaCN ที่ระดับความเข้มข้น

ต่ำ (ร้อยละ 0.03-0.5) ในอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และมีค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเพิ่มขึ้น (น้อยกว่าร้อยละ 90) นอกจากนี้การผสมร้อยละ PGPR 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับ NaCN ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในเฟสแรกของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตและความคงตัวของอิมัลชันไม่แตกต่างจากการเติม PGPR เพียงอย่างเดียวในเฟสแรกของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ

Choi *et al.* (2009) ศึกษาผลของการกักเก็บเหล็ก (Fe^{3+}) ภายในเฟสของน้ำภายในของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำต่อการเกิดออกซิเดชันของไขมัน โดยใช้ PGPR ในเฟสของน้ำมันและเวย์โปรตีนไอโซเลต (whey protein isolate: WPI) ในเฟสของน้ำภายนอก พบว่าขนาดอนุภาคของไขมันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บไว้ 7 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเหล็กเข้าไปในอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำที่มีน้ำมันปลาผสมอยู่จะเกิดออกซิเดชันของไขมันเป็นที่น่าสนใจว่าการไม่เติมเหล็กลงไปน้ำมันปลาทำให้การเกิดออกซิเดชันช้าลง ดังนั้นความแตกต่างของคุณลักษณะและความเข้มข้นของเหล็กจึงมีผลต่อขนาดของอนุภาคน้ำในน้ำมันภายในเฟสของน้ำ

Muschiolik *et al.* (2006) ศึกษาการเตรียมอิมัลชันและความเสถียรของอิมัลชันเชิงซ้อน พบว่า การเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเจลาติน ในเฟสน้ำภายในสามารถป้องกันการรวมตัวของอนุภาคน้ำ โดยการเติมเจลาตินนั้น เจลของเจลาตินจะเป็นตัวป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำภายใน นอกจากนี้โซเดียมคลอไรด์และเจลาตินยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการห่อหุ้ม สารและเพิ่มความเสถียรของอนุภาคไขมันในอิมัลชันเชิงซ้อน

O'Regan *et al.* (2010) ศึกษาผลของการใช้โซเดียมเคซิเนต (NaCN) ร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเอนแคปซูลชัน โดยทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ NaCN, NaCN ร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินชนิด Maltrin 040 (Md40) และ NaCN ร่วมกับมอลโตเดกซ์ตริน ชนิด Maltrin 100 (Md100) ซึ่งความคงตัวของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำพิจารณาจากขนาดของอนุภาคความหนืด และลักษณะภายในของอิมัลชัน ส่วนความคงตัวของของเฟสภายในนั้นพิจารณาจากประสิทธิภาพในการห่อหุ้มวิตามินบี 12 ผลการทดลอง พบว่า การใช้ NaCN ร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินทำให้ประสิทธิภาพในการห่อหุ้มวิตามินบี 12 ดีกว่าการใช้ NaCN เพียงอย่างเดียว

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W เพื่อใช้ในการเอนแคปซูลชั้นสารออกฤทธิ์มีการใช้สารจากธรรมชาติมากขึ้น นอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้ระบบอิมัลชันชนิด W/O/W ในการป้องกันสารออกฤทธิ์จากสิ่งแวดล้อม ทำให้สารออกฤทธิ์มีความคงตัวและนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น

2.2.2 เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) ในการเอนแคปซูลสารด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) เกี่ยวข้องกับขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมของเหลว สารละลาย หรืออิมัลชัน ขั้นตอนการผสมให้เข้ากัน ขั้นตอนการฉีดให้เป็นละอองฝอย และสุดท้ายขั้นตอนการระเหยแห้ง (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นหน่วยปฏิบัติการที่ของเหลวถูกฉีดให้เป็นละอองฝอยผ่านเข้าไปยังกระแสมร้อณ จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ทั้งนี้ หม้อร้อณที่ใช้โดยทั่วไปมักเป็นอากาศร้อณตามปกติ อาจมีบ้างที่ใช้ก๊าซเฉื่อย (inert gas) เช่น ก๊าซไนโตรเจน ส่วนของเหลวที่ฉีดเข้าไปอาจอยู่ในรูปของสารละลาย อิมัลชัน หรือสารแขวนลอยก็ได้ ผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยอาจมีขนาดผงละเอียด (10-50 ไมครอน) หรือขนาดใหญ่ (2-3 มิลลิเมตร) ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ และสภาวะในการทำแห้ง (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

ในขั้นตอนแรกของการเตรียมอิมัลชัน ซึ่งต้องการอิมัลชันที่มีขนาดเล็ก และมีความคงตัวของสารที่ถูกเคลือบภายในสารเคลือบ ทั้งนี้สารที่ถูกเคลือบมักเป็นสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ และต้องละลายอยู่ในสารละลายที่ไม่เข้ากัน โดยอาจมีหรือไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเคลือบนั้น ๆ ทั้งนี้อนุภาคของอิมัลชันโดยทั่วไปอยู่ที่ 1-100 ไมครอน โดยก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยอิมัลชันดังกล่าวต้องมีความคงตัวที่ดีในระยะเวลาหนึ่ง มีขนาดเล็ก และความชื้นหนืดที่ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้พบว่าความหนืด และอนุภาคของอิมัลชันส่งผลต่อการห่อหุ้มอย่างมาก โดยความหนืดที่สูงจะส่งผลรบกวนในขั้นตอนการฉีดให้เป็นละอองฝอยทำให้เกิดขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ซึ่งส่งผลเสียต่ออัตราการทำแห้ง

2.2.2.1 การฉีดเป็นละอองฝอย

ของเหลวที่เป็นละอองฝอยมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (droplet) สามารถทำได้ด้วยการใช้ความดันหรือแรงเหวี่ยง หัวฉีด (atomizer) ที่นิยมใช้ ได้แก่ หัวฉีดแบบใช้แรงลม (pneumatic atomizer) หัวฉีดความดัน (pressured atomizer) จานหมุนเหวี่ยง (spinning disk configuration) รวมถึง หัวฉีดแบบคู่ (two fluid nozzle) และหัวฉีดแบบใช้คลื่นเสียง (sonic nozzle) จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้เพื่อสร้างพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงที่สุด ระหว่างลมร้อนที่แห้งกับของเหลว เพื่อให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนมวล และความร้อนที่เหมาะสม ปัจจัยที่นำมาใช้ในการเลือกหัวฉีดขึ้นกับลักษณะ และความหนืดของวัตถุดิบ รวมถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ หากมีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นก็จะได้ลักษณะผงที่ละเอียดมากขึ้น ในกรณีที่ใช้พลังงานเท่ากัน ขนาดอนุภาคของผงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนสูงมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าอนุภาคของผงจะใหญ่ขึ้นเมื่อความข้นหนืด และความตึงผิวของของเหลวนั้นสูงขึ้น (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

2.2.2.2 การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของเหลวกับลมร้อน

การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของเหลวกับลมร้อนเกิดขึ้นในระหว่างการฉีดให้เป็นละอองฝอย ในช่วงแรกของการทำแห้ง เมื่อพิจารณาการติดตั้งหัวฉีด และจุดปล่อยลมร้อน สามารถแบ่งลักษณะการทำแห้งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบทิศทางเดียวกัน (co-current flow) และแบบสวนทิศทาง (counter current flow) ในกระบวนการแบบทิศทางเดียวกัน ของเหลวจะถูกฉีดให้เป็นละอองฝอยลงมาในทิศทางเดียวกันกับกระแสของลมร้อนที่อุณหภูมิ 150-220 องศาเซลเซียส โดยการระเหยแห้งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และผงที่ได้มีอุณหภูมิอยู่ในระดับปานกลาง ประมาณ 50-80 องศาเซลเซียส ซึ่งจำกัดการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากความร้อนได้ ในขณะที่การทำแห้ง แบบสวนทิศทางของเหลวจะถูกฉีดให้เป็นละอองฝอยในทิศทางตรงข้ามกับกระแสของลมร้อน และผงที่ได้ก็จะสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูง จึงเป็นข้อจำกัดของกระบวนการนี้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน อย่างไรก็ตาม ข้อดีของการทำแห้งแบบสวนทิศทางก็คือประหยัด และคุ้มค่ามากกว่าในแง่ของการใช้พลังงาน (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

2.2.2.3 การระเหยแห้งของอนุภาคของเหลว

ในช่วงเวลาที่อนุภาคของเหลวสัมผัสกับลมร้อน ความสมดุลระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไอถูกสร้างขึ้นระหว่างส่วนของของเหลว และส่วนของก๊าซ ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากลมร้อนไปสู่ตัวผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในขณะที่การถ่ายเทน้ำจะเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามเนื่องจากแรงดันไอที่ต่างกัน ในระหว่างการทำให้แห้งเมื่อของเหลวสัมผัสกับลมร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นส่งผลให้อนุภาคของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดคงที่ จากนั้นการระเหยน้ำจากอนุภาคของเหลวก็เกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิกึ่งที่ โดยอัตราการแพร่ของน้ำบริเวณแกนกลางสู่บริเวณผิวนั้นจะพิจารณาให้คงที่ และมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำบริเวณผิว เมื่อปริมาณน้ำในอนุภาคของเหลวถึงจุดวิกฤตก็จะเกิดการสร้างเปลือกแข็ง (dry crust) ขึ้นบริเวณผิวและอัตราการทำให้แห้งก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทำให้แห้งทางทฤษฎีนั้นจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคของเหลวนั้นเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ (Gharsallaoui *et al.*, 2007) ทั้งนี้ ระยะเวลาในขั้นตอนต่าง ๆ นั้นจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ รวมถึงอุณหภูมิของลมร้อนขาเข้า (inlet temperature) พบว่า ถ้าอุณหภูมิลมร้อนขาเข้ายิ่งสูง การสร้างเปลือกแข็งก็จะเกิดขึ้นเร็วเพราะอัตราการระเหยน้ำที่เร็ว อีกทั้งอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของของเหลวที่ผ่านการทำให้เป็นละอองฝอยนั้นมีมาก การทำให้แห้งอนุภาคของเหลวดังกล่าวในลมร้อนจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อากาศร้อนเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดการระเหยของของเหลวจากบริเวณผิวหน้า และการหดตัวของอนุภาคของเหลว เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของน้ำสู่บริเวณผิวในอัตราที่คงที่กับอัตราการระเหยแห้ง โดยการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยนี้สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้การทำให้แห้งแบบดั้งเดิมที่ทำได้ เนื่องจากการเสื่อมคุณภาพที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วระยะเวลาในการทำให้แห้งของการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยอยู่ที่ 5-100 วินาที อย่างไรก็ตามในระบบที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดี ระยะเวลาในการทำให้แห้งอาจลดลงเหลือ 15-30 วินาที (Gharsallaoui *et al.*, 2007)

Kha *et al.* (2010) ศึกษาผลของสภาวะในการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยของผักข้าวซึ่งมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูง และมีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ทรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 อุณหภูมิขาเข้าในการทำให้แห้งแบบพ่นฝอย 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติในการต้านออกซิเดชัน ความหนาแน่น สี ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน พบว่าความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ทรินและอุณหภูมิขาเข้าในการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมีอิทธิพลต่อค่าคุณภาพต่างๆ เช่น pH วอเตอร์แอกติวิตี และความสามารถในการละลายน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า ผักข้าวที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โดยใช้มอลโตเดกซ์-

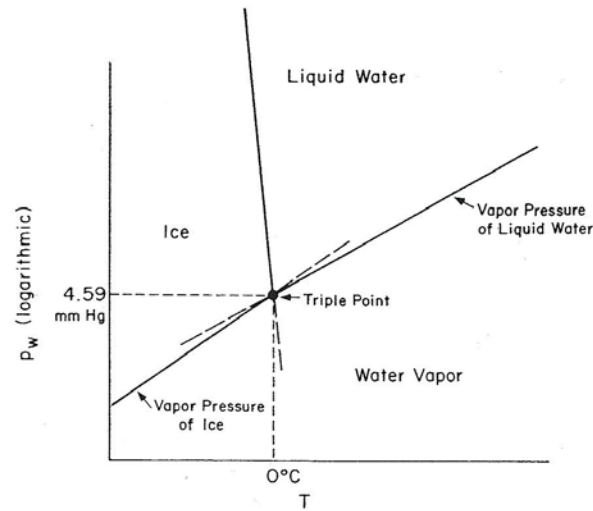
ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 มีค่าสี สมบัติในการต้านออกซิเดชัน และปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สูงสุด

Shu *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเอนแคปซูลเล-
ชันไลโคพีนโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทำแห้ง
แบบพ่นฝอยสำหรับการเอนแคปซูลเลชันไลโคพีนด้วยเจลาตินและซูโครส พบว่า สภาวะที่เหมาะสม
ในการเอนแคปซูลเลชันไลโคพีน คือ อัตราส่วนระหว่างเจลาตินต่อซูโครสเท่ากับ 3 ต่อ 7 อัตราส่วน
ระหว่างสารที่ถูกเคลือบต่อสารที่เคลือบเท่ากับ 1 ต่อ 4 อุณหภูมิที่ใช้พ่น เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิอากาศร้อนที่เข้าเครื่องเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส ความดันของการโฮโมจีไนซ์เท่ากับ 40
mPa.s และได้ไลโคพีนบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 52

Desobry *et al.* (1997) ได้นำเบต้า-แคโรทีนมาทำเป็นผงด้วยกระบวนการ-
ทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยนำเบต้า-แคโรทีน บริสุทธิ์ 0.5 กรัม มาผสมกับสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน
ที่มีค่าสมมูลเดกซ์โตรส 25 ความเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาณ 1,000 กรัม จากนั้นทำให้เป็นเนื้อ
เดียวกันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์แล้วนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและลมร้อน
ขาออกในช่วง 170 ± 5 องศาเซลเซียส และ 95 ± 5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ได้ผงเบต้า-แคโรทีนที่มี
ค่าสี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 66.7, 0.29 และ 17.8

2.2.3 เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีในการกำจัดน้ำโดยการระเหิด การระเหิด
จะเกิดขึ้นเมื่อความดันไอ และอุณหภูมิที่ผิวหน้าน้ำแข็งมีค่าต่ำกว่าจุดซึ่งเฟสของก๊าซ ของเหลว และ
ของแข็งของน้ำอยู่ในสภาวะสมดุล จุดทริปเปิล คือ 4.59 ทอร์ (610.606 ปาสคาล) และ 0 องศา-
เซลเซียส



ภาพที่ 7 แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของน้ำบริสุทธิ์

ที่มา: Van Arsdel *et al.* (1973)

กระบวนการทำแท้งแบบแช่เยือกแข็งจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (Snowman, 1996)

2.2.3.1 การแช่เยือกแข็ง

กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่ดึงพลังงานความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร โดยการลดอุณหภูมิลงให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ พลังงานความร้อนที่ดึงออกจะเป็นความร้อนแฝงที่ใช้ในการเปลี่ยนน้ำให้เป็นน้ำแข็ง การเกิดผลึกน้ำแข็งของสารละลายอาหารไม่ได้มีน้ำเป็นส่วนประกอบอย่างเดียว ดังนั้นในการดึงความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ ต้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของน้ำ ในช่วงแรกผลิตภัณฑ์จะถูกดึงความร้อนออกจนอุณหภูมิกายในต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่าสภาวะอิมตัวยวดยิ่ง เป็นสภาวะที่น้ำยังเป็นของเหลวอยู่ เมื่อดึงความร้อนต่อไปอีก ผลึกน้ำแข็งจะเริ่มก่อตัวขึ้น และเกิดการปล่อยพลังงานที่เรียกว่า ความร้อนแฝงของการตกผลึกของน้ำออกมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปอยู่ที่ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นความร้อนจะถูกกำจัดออกในอัตราที่เร็วกว่าเดิม น้ำจะเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งบริสุทธิ์ที่ละน้อยขณะที่มีการกำจัดความร้อนแฝงออกไปทำให้สารละลายที่เหลืออยู่มีความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งลดลง ในที่สุดจะกลายเป็นสารละลายอิมตัวที่จุด Supercooling of

liquid การตกผลึกของตัวถูกละลายจะมีความร้อนของการตกผลึกเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง เรียกว่า Freezing of eutectic solution หรือ Cryohydric point เป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่น้ำและตัวถูกละลายเกิดการตกผลึกได้มากที่สุด คำว่า Cryohydric point จะใช้เมื่อตัวทำละลายในระบบเป็นน้ำ ส่วนตัวทำละลายที่เป็นสารอื่น ๆ จะใช้คำว่า Eutectic point (รุ่งนภา, 2535; วิไล, 2545)

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงไปจนถึงสภาวะที่ผลึกน้ำแข็งก่อตัวเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน จะทำให้เกิดการยุบสลายของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ สำหรับสารละลายที่หนาไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร สามารถทำการลดอุณหภูมิกง่าย ๆ โดยเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งปกติจะใช้อุณหภูมิต่ำในการแช่เยือกแข็งประมาณ -40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งควรจะต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำสุดอย่างน้อย 5 องศาเซลเซียส (Snowman, 1996)

2.2.3.2 การทำแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวหน้าของอาหาร และผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ไปยังบริเวณการระเหิด นั่นคือความร้อนแฝงของการระเหิดจะถ่ายเทจากแหล่งให้ความร้อนไปยังบริเวณการระเหิดภายในชั้นอาหาร และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องควบแน่นของเครื่องเย็น

2.2.3.2.1 การทำแห้งขั้นต้น (Primary Drying) หลังจากการแช่เยือกแข็งแล้วจะเกิดการระเหิดได้เมื่อทำการลดความดันย่อยของไอน้ำให้ต่ำกว่าที่จุดทรีเปิล ซึ่งในขั้นนี้จะเป็นการกำจัดน้ำอิสระออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร ถ้าอุณหภูมิของการทำแห้งสูงเกินไป ผลิตภัณฑ์จะเกิดการละลาย การหดตัว หรือการพองตัวได้

ถ้า อุณหภูมิการทำแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำสุด (collapse temperature) ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะโครงสร้างที่ดี ความร้อนจะถ่ายเทจากผิวหน้าของอาหาร และผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ไปยังบริเวณการระเหิด และไอน้ำจะเคลื่อนย้ายออกจากผลิตภัณฑ์โดยการถ่ายเทมวล การระเหิดของน้ำแข็งขึ้นอยู่กับระดับสุญญากาศในเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และปริมาณความร้อน (Snowman, 1996)

2.2.3.2.2 การทำแห้งชั้นที่สอง (Secondary Drying) เป็นการนำน้ำเกาะติด (bound water) ออกจากอาหาร ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะสุญญากาศ อุณหภูมิในการให้ความร้อนจะอยู่ระหว่าง 20 – 40 องศาเซลเซียส การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เกิดการยุบตัวของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งการที่โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เกิดการยุบตัวจะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความหนาแน่นสูง และลดความสามารถในการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ (Snowman, 1996)

Mehrnoush *et al.* (2011) ศึกษาผลของความสัมพันธ์ระหว่างซีรีนโปรตีเอส (serine protease) (9–50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) กัมอะราบิก (ร้อยละ 0.2–10 โดยมวล) และมอลโตเดกซ์ตริน (ร้อยละ 2–5 โดยน้ำหนัก) ต่อการเอนแคปซูลเซชันซีรีนโปรตีเอส ซึ่งในการศึกษาใช้กัมอะราบิก และมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารเอนแคปซูลเซชันซีรีนโปรตีเอส โดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ซีรีนโปรตีเอส 29.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร กัมอะราบิกร้อยละ 5.1 และมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 3.5 ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูลเซชันร้อยละ 92 นอกจากนี้ยังพบว่าสารที่มีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูลเซชันได้ดีคือกัมอะราบิก ดังนั้นจึงควรที่จะเคลือบซีรีนโปรตีเอสด้วยกัมอะราบิกโดยใช้กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Kaushik and Roos (2007) ศึกษาผลของการผสมเจลาติน ซูโครส และกัมอะราบิก ต่อการเอนแคปซูลเซชันลิโมนีน โดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการผสมเจลาตินต่อซูโครสต่อกัมอะราบิกในอัตราส่วน 0.66:0.17:0.17 สามารถเอนแคปซูลเซชันลิโมนีนสูงสุด ซึ่งใช้อัตราส่วนของปริมาณของแข็งต่อลิโมนีน 8.5:1.5

3. การประยุกต์ใช้การเอนแคปซูลเซชันในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้การเอนแคปซูลเซชันสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย อาทิเช่น อาหาร เครื่องสำอาง ยา และอุตสาหกรรมสิ่งทอ

Bonnet *et al.* (2009) ศึกษาผลของชนิดน้ำมันจากธรรมชาติต่ออัตราการปลดปล่อยแมกนีเซียมที่ถูกห่อหุ้มในอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ โดยทำการทดสอบกับน้ำย่อยจากตับอ่อน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ PGPR ในเฟสของน้ำมัน และใช้โซเดียมเคซิเนตในเฟสของน้ำภายนอก พบว่าชนิดของน้ำมันจากธรรมชาติมีผลต่อประสิทธิภาพในการห่อหุ้มแมกนีเซียม กล่าวคือ ถ้าน้ำมันมีความหนืดต่ำและสัดส่วนของไขมันอิ่มตัวมากจะทำให้แมกนีเซียมถูกปลดปล่อยออกมามาก และ

แมกนีเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้นจะไม่เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ซึ่งผลของการทดลองที่ได้นี้สามารถนำระบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำไปประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์อาหารได้ต่อไป

Harris *et al.* (2011) ศึกษาการใช้โคโคซานในการเอนแคปซูลชั้นสารสกัดธรรมชาติจาก yerba mate เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ซึ่งอนุภาคนาโนของ yerba mate เตรียมโดยการทำเจลไอออนของโคโคซานไฮโดรคอลลอยด์และโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟส สารออกฤทธิ์ถูกเติมลงในสารละลายโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟสและหยดลงในสารละลายโคโคซานไฮโดรคอลลอยด์ จากนั้นนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอย นำผงเอนแคปซูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความคงตัวของสารออกฤทธิ์ และการความสามารถในการปลดปล่อย จากนั้นนำผงเอนแคปซูลของสารออกฤทธิ์ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ทางยาและเครื่องสำอาง

Rodrigues *et al.* (2008) ศึกษาการทำไมโครแคปซูลที่บรรจุกลีโกลินิน และการนำส่งเข้าสู่เส้นใยผ้า ขั้นตอนการเตรียมไมโครแคปซูลใช้พอลิเมอร์ชนิด polyurethane-urea ที่เตรียมด้วยวิธี interfacial polymerization โดยกระบวนการในขั้นแรกจะเริ่มจากการผสมเฟสของน้ำมัน (ซึ่งประกอบไปด้วย limonene และ hexamethylene diisocyanate) ลงในเฟสน้ำที่ 1 ซึ่งมี polyvinylalcohol เป็นองค์ประกอบอยู่และทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว นำส่วนผสมดังกล่าวไปผสมด้วยเครื่องผสมที่ความเร็วรอบ 11,000 รอบต่อนาที นาน 3 นาที ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาต่อโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผสมด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ในระหว่างนี้เติม polyethylene glycol, dibuthyltindilaurate, ethylenediamine และ hydrazine จากนั้นนำไปปั่นแยกโดยเครื่องเซนตริฟิวจ์และชะด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 30 และน้ำกลั่นอีก 2 รอบ เพื่อขจัดสิ่งตกค้างจากการทำปฏิกิริยาไมโครแคปซูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มี Triton CA เป็น wetting agent อยู่

ขั้นตอนที่สองคือการนำส่งไมโครแคปซูลเข้าสู่เส้นใยผ้า (ใช้วิธี Pad-thermofixed) โดยผสมไมโครแคปซูลที่บรรจุกลิ่นหอมแล้วเข้ากับ Binder และระเหยน้ำออกไป จะทำให้ไมโครแคปซูลถูกฝังเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเส้นใยเนื้อผ้า ดังนั้นผ้าจึงมีกลิ่นหอม

Wang and Chen (2005) ศึกษาการใช้ไซโคลเดกซ์ทรินเพื่อช่วยดักจับกลิ่นเหม็นและการใช้เพื่อช่วยในการนำสารหอมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยไซโคลเดกซ์ทรินเป็นโมเลกุลของ Cyclic Oligosaccharides สมบัติหลักของไซโคลเดกซ์ทริน คือ ช่วยลดความดันไอของสารหอม ทำให้อัตราการระเหยลดลงและช่วยเพิ่มความมีเสถียรภาพให้ทนต่อแสง อากาศและสิ่งแวดล้อมภายนอก

นอกจากนี้ยังไม่เป็นพิษ ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองกับผิวหนัง และไม่เป็นสารก่อมะเร็ง การใช้ไซโคลเดกซ์ตรินและไมโครแคปซูล คือ สารภายในโมเลกุลของไซโคลเดกซ์ตรินสามารถเข้าและออกได้ ในขณะที่ไมโครแคปซูลสารที่บรรจุข้างในจะไม่สามารถออกมาได้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดที่ใช้เทคโนโลยีของไซโคลเดกซ์ตรินในการขจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น Febreze ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบสเปรย์ใช้สเปรย์ลงบนสิ่งทอ มีหลักการทำงาน คือ โมเลกุลของกลิ่นอันไม่พึงประสงค์จะถูกดักจับไว้ที่โพรงตรงกลางของไซโคลเดกซ์ตริน เพราะเป็นโมเลกุลที่มีความไม่ชอบน้ำ และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการล้างโมเลกุลของกลิ่นจะฟอร์มตัวกับสารทำความสะอาดเป็นไมเซลล์ และถูกขจัดออกไป

สำหรับการใช้ไซโคลเดกซ์ตรินในการนำส่งสารหอมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้น ไซโคลเดกซ์ตรินที่บรรจุสารหอมจะถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลายแอลกอฮอล์ผสมน้ำโดยใช้อัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 3 จากนั้นสเปรย์ลงบนผืนผ้า โดยมีตัวเชื่อมเป็นตัวทำให้ติดกับสิ่งทอ ซึ่งจะทำให้กักเก็บสารหอมได้เป็นระยะเวลาจนถึง 1 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้ใช้ไซโคลเดกซ์ตรินกักเก็บกลิ่นหอม กลิ่นหอมจะติดสิ่งทอได้เพียง 1-2 อาทิตย์เท่านั้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมี

1.1 สารสกัดเมล็ดมะม่วง (ได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. พิชญูร ไหมสุทธิสกุล เป็นสารสกัดที่ได้จากการสกัดเมล็ดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ มีปริมาณเมทิลแกลเลทร้อยละ 85.70 จากปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดร้อยละ 29.22 ซึ่งสารสกัดเมล็ดมะม่วงสกัดด้วยกรดและเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์)

1.2 เมทิลแกลเลท (methyl gallate; $C_8H_8O_5$) (Fluka, Switzerland)

1.3 น้ำปราศจากไอออน

1.4 น้ำมันถั่วเหลือง ตรารุ่ง บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด นครปฐม

1.5 polyglycerol polyricinoleate (PGPR 4125, HLB ~1.5, Palsgaard, Denmark) บริษัท ดี พี โอ (ไทยแลนด์) จำกัด

1.6 polyoxyethylene sorbitan monooleate (Tween 80, HLB 15.0) (Rankem, India)

1.7 เจลาติน (Type A: Bloom 100, pl 5.2) บริษัท คาร์ติโน เจลาติน จำกัด

1.8 มอลโตเดกซ์ทริน (DE 20) บริษัท คอร์น โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด

1.9 กัมอะราบิก บริษัท บรอนสัน แอนด์ จากอบส์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

1.10 แป้งเมล็ดมะขาม (75 μ m mesh sieve, MW 2.413×10^6 g/mole) บริษัท ยี. เอ็ม. อีชีฮาร่า (ประเทศไทย)

1.11 โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride; NaCl) (Sigma- aldrich, Germany)

1.12 โซเดียมเอไซด์ (sodium azide; NaN_3) (Lab-chem, Australia)

1.13 โฟลิน-ซีโอเคาทูล (Folin-Ciocalteu Reagent) (Carlo Erba, Sweden)

1.14 โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate anhydrous; Na_2CO_3)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 เครื่องปั่นผสมแบบมือถือ (hand homogenizer) (IKA-Ultra-Turrax T25, IKA, Germany)

- 2.2 เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ชนิดความดันสูง (High pressure homogenizer) (FT9, Armfield, UK)
- 2.3 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) (A/S, Niro, Denmark)
- 2.4 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer) (Lyolab Model G, American Lyophilizer, USA)
- 2.5 เครื่องผสมสาร (vortex mixer)
- 2.6 เครื่องชั่งแบบ 2 ตำแหน่ง (adventurer™ OHAUS, Ohaus, USA)
- 2.7 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (ED 224S, Sartorius, Germany)
- 2.8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (WB 14, Memmert scientific, Thailand)
- 2.9 เครื่องวัด pH (Docu-pH, Sartorius, Germany)
- 2.10 เครื่องวัดขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้าของอิมัลชัน (Zetasizer nano-ZS instruments) (Zen 3600, Malvern, United Kingdom)
- 2.11 กล้องจุลทรรศน์ (CH 30RF200, Olympus Optical, Japan)
- 2.12 เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) (CM – 3500d, Minolta, Japan)
- 2.13 เครื่องเหวี่ยงแยกแบบควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated Centrifuge) (Rotina 380R, Hettich, Germany)
- 2.14 เครื่องเหวี่ยงแยกแบบควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated Centrifuge) (Sorvall® Super T21, Kondro, USA)
- 2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (Philips: XL30 & EDAX, F.E.I., USA)
- 2.16 เครื่องวัดคอเตอร์แอกติวิตี (AquaLab series 3TE, Decagon Devices, USA)
- 2.17 เครื่องวัดความหนืด (Rheometer) (Physica MCR 300, Anton Paar, Austria)
- 2.18 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield) (model DV-III, USA)
- 2.19 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) (Model 1601, Shimadzu, Japan)

3. อุปกรณ์สำหรับประมวลผล

- 3.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS® for Windows Version 12.0 จากบริษัท SPSS (Thailand) จำกัด ประเทศไทย

3.2 โปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert version 6.0.2 (Trial version) (Statease Inc., Minneapolis, USA)

วิธีการ

1. การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลไกลเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลไกลเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง

1.1 การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (W/O)

เตรียมอิมัลชันชนิด W/O โดยใช้อัตราส่วนเฟสน้ำต่อเฟสน้ำมัน 1:4 โดยน้ำหนัก เฟสน้ำมันเตรียมโดยนำ PGPR ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มาละลายในน้ำมันถั่วเหลือง นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที เฟสน้ำเตรียมโดยละลายเจลาตินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก กับโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเมทิลไกลเลทร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในสารละลาย ผสมเฟสน้ำและเฟสน้ำมันเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องปั่นผสมแบบมือถือ (hand homogenizer, IKA-Ultra-Turrax T25, IKA, Germany) ที่ระดับความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที จากนั้นนำอิมัลชันแบบหยาบเข้าเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดควาล์วความดันสูง ที่ความดัน 3000 psi (Armfield, model FT9, UK) 3 รอบ จะได้อิมัลชันชนิด W/O

1.2 การเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W

นำอิมัลชันชนิด W/O จากข้อ 1.1 ร้อยละ 10 ผสมกับเฟสน้ำภายนอกร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก เฟสน้ำภายนอกประกอบด้วย Tween 80 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก กัมอะราบิกร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก โมลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำการวางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) จากนั้นผสมอิมัลชันชนิด W/O กับเฟสน้ำภายนอกด้วยเครื่องปั่นผสมแบบมือถือที่ระดับความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที นำอิมัลชันที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและนำอิมัลชันที่ได้ไปวัดขนาดอนุภาค ค่าศักย์ซีต้า ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน

นอกจากนั้นเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W 20 สิ่งทดลอง โดยไม่ใส่เมทิลแอลกอฮอล์ในเฟสน้ำ ภายใ้เพื่อใช้ในการหาประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลแอลกอฮอล์ในระบบ อิมัลชันชนิด W/O/W มี 3 ปัจจัย คือ กัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขาม โดยแบ่ง ระดับปัจจัยที่ศึกษาออกเป็น 5 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) ระดับบลู แอลฟา ($-\alpha$) และระดับบวกแอลฟา ($+\alpha$) (ตารางที่ 5) จะได้สิ่งทดลองทั้งหมด 20 สิ่งทดลอง

ตารางที่ 5 ระดับและปัจจัยในการออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD)

ตัวแปรอิสระ	สัญลักษณ์	ระดับ (code factor level)				
		-1.68	- 1	0	+ 1	+ 1.68
กัมอะราบิก (ร้อยละ)	X_1	0.00	4.00	10.00	16.00	20.00
มอลโตเดกซ์ตริน (ร้อยละ)	X_2	0.00	6.00	15.00	24.00	30.00
แป้งเมล็ดมะขาม (ร้อยละ)	X_3	0.00	0.61	1.50	2.39	3.00

นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าคุณภาพและ ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของสิ่งทดลอง 20 สิ่งทดลอง โดยวิธีพินผิวตอบสนอง สร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$Y_n = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1^2 + b_8X_2^2 + b_9X_3^2 \quad (1)$$

จากสมการ (1) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดอนุภาค (Y_1) ศักย์ซีต้า (Y_2) ความหนืด (Y_3) การแยกชั้นเป็นครีม (Y_4) และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (Y_5) กับปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของกัมอะราบิก (X_1) มอลโตเดกซ์ตริน (X_2) และแป้งเมล็ดมะขาม (X_3) และนำสมการ ที่ได้ไปสร้างกราฟสองมิติ (Contour Plot) ที่แสดงค่าของปัจจัยและค่าตอบสนองในแนวระนาบ หรือ กราฟสามมิติ (Response Surface Plot) ที่แสดงค่าของปัจจัยที่ต้องการศึกษาในแนวระนาบและให้ ค่าตอบสนองในแนวแกนตั้ง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของปัจจัย ต่อค่าคุณภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันที่เหมาะสมในการเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W

ประเมินผลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) ด้วยโปรแกรม Design-Expert version 6.0.2 (Trial version) (Statease Inc., Minneapolis, USA) ซึ่งกำหนดค่าตอบสนองเป็นขนาดอนุภาค ศักย์ซีต้า ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน

เมื่อทราบความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มี ส่วนผสมของเมทิลแอลกอฮอล์ นำความเข้มข้นที่ได้มาเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีส่วนผสมของ สารสกัดเมล็ดมะม่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.17 (จากการคำนวณความเข้มข้นของสารสกัดเมล็ด มะม่วง โดยสารสกัดเมล็ดมะม่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.17 เทียบเท่ากับเมทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น ร้อยละ 1) เปรียบเทียบค่าคุณภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันอิมัลชันที่มีส่วนผสมของ เมทิลแอลกอฮอล์กับสารสกัดเมล็ดมะม่วง สาเหตุที่ใช้เมทิลแอลกอฮอล์ในขั้นตอนการคัดเลือก ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมนั้นเพราะว่าสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีเมทิลแอลกอฮอล์เป็น องค์ประกอบร้อยละ 85.70

1.3 การวัดค่าคุณภาพของอิมัลชันชนิด W/O/W

1.3.1 ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W

ทำการเจือจางตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W โดยใช้น้ำปราศจากไอออน เป็น dispersant ให้อนุภาคภายในมีความเข้มข้นร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก จากนั้นใส่ตัวอย่างอิมัลชันที่ เจือจางแล้วปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ลงใน DTS-0012 disposable sizing cuvette ทำการวัดค่า ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zetasizer nano) โดยวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยของอนุภาค (d_{50}) โดยใช้หลักการกระเจิงแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering) คำนวณ โดยใช้สมการสโตกส์และไอสไตน์ (Stokes-Einstein equation) ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับ ความเร็วในการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ยึดตาม Cumulants mean หรือ เรียกว่า Z-average (Malvern Instruments, 2003)

1.3.2 ค่าศักย์ซีต้า

วัดค่าประจุที่พื้นผิวอนุภาคโดยใช้เทคนิค laser doppler velocimetry (LDV) หลักการของเทคนิคนี้ คือ การวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ภายใต้อิทธิพลของ สนามไฟฟ้าคำนวณจากการวัดการเคลื่อนที่ทางอิเล็กโทรโฟรีติก (electrophoretic mobility) โดย

อาศัยความสัมพันธ์ทางทฤษฎีตามสมการของเฮนรี (Henry equation) โดยยิงลำแสงเวเซอร์ (He-Ne 633 นาโนเมตร) ให้อยู่ตรงบริเวณ stationary layer ของเซลล์ที่บรรจุตัวอย่าง นำตัวอย่างอิมัลชัน W/O/W ที่ต้องการวิเคราะห์มาเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้ความเข้มข้นของอนุภาคร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก นำมาบรรจุในเซลล์บรรจุตัวอย่าง ใส่ตัวอย่างให้เต็มเซลล์บรรจุตัวอย่าง นำตัวอย่างเข้าเครื่อง หากอนุภาคมีค่าประจุที่ผิวอนุภาคมากกว่า ± 30 mV อนุภาคนั้นจะมีแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดการผลักกันทางประจุของประจุที่เหมือนกัน อนุภาคไม่เคลื่อนมาใกล้กัน ทำให้ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค (Malvern Instruments, 2003)

1.3.3 ความหนืด

วัดความหนืดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer; Physica MCR 300, Anton Paar, Austria) นำตัวอย่างอิมัลชันปริมาตร 3.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกวัดแบบช่องว่างคู่ (Double Gap Cylinder: DG 26.7) ทำการวัดโดยเพิ่มอัตราเฉือน (shear rate) 0.1-1000 วินาที⁻¹ ควบคุมอุณหภูมิระหว่างการวัดที่ 25 องศาเซลเซียส บันทึกค่าความหนืด

1.3.4 การแยกชั้นเป็นครีม

การแยกชั้นเป็นครีมเป็นค่าที่แสดงถึงความไม่คงตัวของอิมัลชัน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าอิมัลชันไม่มีความคงตัว แต่ถ้ามีค่าต่ำหรือเท่ากับ 0 แสดงว่าอิมัลชันมีความคงตัวดี หลังจากเก็บอิมัลชันไว้จะเกิดชั้นครีมขึ้นด้านบนของอิมัลชันและด้านล่างจะเกิดส่วนใสที่แสงผ่านได้หรือส่วนที่ขุ่นซึ่งเรียกว่าซีรัม การวัดค่าการแยกชั้นเป็นครีมสามารถทำได้โดยนำอิมัลชันชนิด W/O/W จำนวน 10 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง ปิดฝาให้สนิท จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าการแยกชั้นทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากเวลาผ่านไปอิมัลชันจะแยกชั้น โดยส่วนครีมจะอยู่ด้านบน และด้านล่างจะเป็นส่วนใส (มีลักษณะโปร่งใสหรือขุ่น) ซึ่งการแยกชั้นเป็นครีมสามารถคำนวณได้จากร้อยละการแยกชั้น = $100 \times (H_S/H_E)$ โดย H_E คือส่วนสูงทั้งหมดของอิมัลชัน และ H_S คือส่วนสูงทั้งหมดของซีรัม (ดัดแปลงจาก Surh *et al.*, 2007)

1.3.5 ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน

นำตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเมทิลแอลกอฮอล์ในเฟสน้ำภายในและอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ไม่มีเมทิลแอลกอฮอล์ในเฟสน้ำภายใน มาเหวี่ยงแยกเอาส่วนน้ำเฟสออก (W_2) ออก

จากส่วนครีม (W₁/O) ด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกที่ 4,000 g เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นใช้หลอดฉีดยาดูดสารละลายส่วนใสของอิมัลชันจากนั้นทำการเจือจางตัวอย่างนำตัวอย่างปริมาตร 3.5 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร และโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก 0.8 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของเมทิลกลอสเท จากนั้นนำปริมาณฟีนอลิกของอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีเมทิลกลอสเทในระบบ ลบกับอิมัลชันชนิด W/O/W ที่ไม่มีเมทิลกลอสเทในระบบจะได้ประสิทธิภาพแอนติออกซิเดชัน (ดัดแปลงจาก Maisuthisakul and Gordon, 2011)

2. การศึกษาผลของกระบวนการในการทำแห้งต่อคุณภาพและความคงตัวของผงแอนติออกซิเดชันสารสกัดเมล็ดมะม่วง

เตรียมตัวอย่างอิมัลชันชนิด W/O/W ที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วงตามผลที่ได้ในข้อ 1 นำมาศึกษาผลของกระบวนการในการทำแห้งคือกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยกำหนดอุณหภูมิลมเข้าและลมออก 180±5 และ 90±5 องศาเซลเซียส (Nilsang *et al.*, 2005) อัตราการไหลของตัวอย่างเข้าเครื่อง 11-12 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำการแช่เยือกแข็งตัวอย่างที่อุณหภูมิ -45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนาน 48 ชั่วโมง (Cilek *et al.*, 2012) ตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีลักษณะเป็นแผ่นดังนั้นจึงต้องบดตัวอย่าง นำตัวอย่างที่ได้ใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์เพื่อเตรียมสำหรับการวิเคราะห์ค่าต่อไป โดยค่าคุณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ผงแอนติออกซิเดชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ ความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ความสามารถในการละลาย สี ปริมาณฟีนอลิก และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

2.1 ความชื้น

ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.000 กรัม ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาอะลูมิเนียมระหว่างอบตัวอย่าง อบตัวอย่างจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างออกมาใส่เตลิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

2.2 วอเตอร์แอกทิวิตี

นำผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงใส่ภาชนะพลาสติกประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะเพื่อวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (AquaLab series 3TE, Decagon Devices, USA) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างถึงสมดุลรอประมาณ 2-3 นาที จึงอ่านค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ก่อนการวัดค่า validate ด้วยการอ่านค่า a_w ของสารละลายเกลือมาตรฐาน LiCl ($a_w = 0.113$) และ $MgCl_2$ ($a_w = 0.328$) (Kha *et al.*, 2010)

2.3 ความสามารถในการละลาย

นำผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง 0.75 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร มาผสมกันในหลอดเซนตริฟิวจ์ขนาด 85 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 8,730 g นาน 20 นาที นำส่วนที่ลอยอยู่ที่ผิวด้านบนของน้ำมาใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นร้อยละดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index) ตามสมการที่ 2 (Kha *et al.*, 2010)

$$\text{ดัชนีการละลายน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังอบแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \quad (2)$$

2.4 ค่าสีของตัวอย่าง

ตักผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงใส่จานแก้วใส (plate) ประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะ ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer) (CM – 3500d, Minolta, Japan) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมอง 10° แสดงผลเป็นค่า L^* , a^* , b^* (Obon *et al.*, 2009)

2.5 ปริมาณฟีนอลิก

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกในผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงหลังจากเก็บรักษานาน 3 เดือน โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Kähkönen *et al.* (1999) นำสารละลายผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง 200 ไมโครลิตร ใส่หลอดทดลอง เติม Folin-Ciocalteu reagent

1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 7.5 ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของเมทิลแกลเลท ดังแสดงในภาคผนวก ก แล้วคำนวณค่าเป็น มิลลิกรัมเมทิลแกลเลท ต่อ 1 กรัมน้ำหนักแห้ง

2.6 ลักษณะของอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ตัดตัวอย่างปริมาณน้อยมาวางบนเทปกาวสองหน้าชนิดบางที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub ใช้ลูกยางเป่าลมให้ตัวอย่างกระจายทั่วบนเทปกาวสองหน้า นำแท่ง aluminium stub ที่ติดตัวอย่างเข้าเครื่องเคลือบทอง เพื่อช่วยนำประจุอิเล็กตรอน หลังจากนั้นนำแท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองใส่ในช่องสำหรับวางแท่ง aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตรวจสอบขนาด และการกระจายของอนุภาคผงเอนแคปซูเลทของสารสกัดเมล็ดมะม่วงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เลือกบริเวณที่ต้องการถ่ายภาพ ปรับโฟกัสของภาพให้ชัด บันทึกภาพลงแผ่นซีดี

3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บ-รักษา

เตรียมตัวอย่างอิมัลชันที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงในสภาวะที่ได้จากการทดลองข้อ 1 และทำแห้งเป็นผงด้วยวิธีการที่คัดเลือกได้ในข้อ 2 นำผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเก็บในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่อุณหภูมิ -20, 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำตัวอย่างมาวัดคุณภาพต่างๆ คือ ความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี้ ค่าสี ความสามารถในการละลาย ตามวิธีการที่อธิบายมาแล้วในข้อ 2 โดยวัดทุกสัปดาห์ นาน 8 สัปดาห์

4. การประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์

ทำการประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดยการเติมในผลิตภัณฑ์โลชั่นที่เตรียมโดยละลาย SIMULGEL FL (SIMUGEL FL ประกอบด้วย Hydroxyethyl Acrylate, Sodium Acryloyldimethyl Taurate Copolymer, Isohexadecane and Polysorbate 60 มีลักษณะปรากฏเป็นของเหลวใส สามารถเทได้ง่าย) ใน Mineral oil คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทเฟสน้ำมันลงในเฟสน้ำที่มีส่วนผสมของผงที่ไม่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง (สูตรที่ 1) ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง (สูตรที่ 2) และผงสารสกัดเมล็ดมะม่วง (สูตรที่ 3) ซึ่งสารสกัดเมล็ดมะม่วงใช้

ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ผงที่ไม่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วงและผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงใช้ความเข้มข้นร้อยละ 3.45 โดยความเข้มข้นของสารคำนวณจากปริมาณฟีนอลิกที่มีอยู่ในผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง จากนั้นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมแบบมือถือที่ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที นำโลชั่นที่ได้มาตรวจสอบค่าคุณภาพ คือ ลักษณะปรากฏ สี ความหนืด ความคงตัว และ pH จากนั้นนำโลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมาทดสอบการยอมรับและการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค

ตารางที่ 6 สูตรผลิตภัณฑ์โลชั่น

เฟส	สารเคมี	สูตรที่ 1 (ร้อยละ)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ)
น้ำมัน	SIMULGEL FL	3.00	3.00	3.00
	Mineral oil	5.00	5.00	5.00
น้ำ	ผงที่ไม่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง	3.45	-	-
	ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง	-	3.45	-
	สารสกัดเมล็ดมะม่วง	-	-	0.1
	น้ำปราศจากไอออน	qs 100	qs 100	qs 100

หมายเหตุ qs คือ เต็มจนครบ

ที่มา: ดัดแปลงจากบริษัทอดินพ (2555)

4.1 ค่าสีของตัวอย่าง

เทโลชั่นงานแก้วใส (plate) ประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะ ตรวจสอบด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer; Minolta, CM – 3500d, Konica minolta sensing Inc., Japan) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมอง 10° ในระบบค่าสีของ CIE Lab

4.2 ความหนืด

ทำการวัดค่าความหนืดของตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น DV-III โดยควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างที่ 25.0 ± 0.2 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์โลชันมา 15 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกใส่ตัวอย่าง จากนั้นใช้หัว SC4-21 วัดค่าความหนืดของตัวอย่างโดยใช้ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อัตราการเฉือน 37.2 s^{-1} จดบันทึกค่าความหนืดที่ได้จากการวัด

4.3 ความคงตัวของอิมัลชัน

การวิเคราะห์ความคงตัวโดยใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifugal test) โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่พอเหมาะใส่ลงในหลอดสำหรับหมุนเหวี่ยง แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราการหมุน 5,000 g นาน 20 นาที บันทึกลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยให้คะแนนตามเกณฑ์ ในตารางที่ 7 เกณฑ์การตัดสินคือ ตัวอย่างเครื่องสำอางที่มีลักษณะเป็นโลชันต้องได้คะแนนไม่เกิน 1 จึงจะถือว่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด (มอก. 152-2539)

ตารางที่ 7 เกณฑ์ลักษณะความคงตัวของอิมัลชัน

ลักษณะ	คะแนน
ไม่ปรากฏร่องรอยของการแยกชั้น	1
เริ่มไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	2
เริ่มแยกชั้น	3
แยกชั้นพอสังเกตเห็น	4
แยกชั้นชัดเจน	5

ที่มา: มอก. 152-2539

4.4 pH

วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter ยี่ห้อ Cyberscan รุ่น 500 โดยนำตัวอย่างปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในปิเกตอร์จากนั้นทำการวัดค่า pH ของโลชัน

4.5 การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อโลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

ทำการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อโลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงแบบ Central location test (CLT) กับผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย เพศชายและหญิง จำนวน 80 คน ที่ใช้ผลิตภัณฑ์โลชั่นเป็นประจำ ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9-point hedonic scaling ดำเนินการโดยแจกตัวอย่างผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง พร้อมแบบสอบถามดังภาคผนวกที่ ข1 พร้อมทั้งสอบถามการยอมรับและตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังที่จะรับรู้ข้อมูลคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

5. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลกลอสเททในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลกลอสเททกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง วางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) และประเมินผลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) ด้วยโปรแกรม Design-Expert version 6.0.2 (Trial version) (Statease Inc., Minneapolis, USA)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของกระบวนการในการทำแห้งต่อคุณภาพและความคงตัวของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง ผลของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา และผลของการประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์เป็นดังนี้ คือทำการทดลอง 3 ซ้ำ (replications) และนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญที่ร้อยละ 95

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลที่ได้จากการประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์โดยหาความถี่ ร้อยละ คะแนนความชอบเฉลี่ย และวิเคราะห์ McNemar test เพื่อให้ทราบถึงความถี่ของข้อมูล การยอมรับและการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคระหว่างก่อนและหลังทราบข้อมูลประโยชน์ของผลิตภัณฑ์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสี่ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลกลเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลกลเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง ซึ่งชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ศึกษา คือ กัมอะราบิกร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก ส่วนที่สองเปรียบเทียบผลของกระบวนการในการทำแห้งต่อคุณภาพและความคงตัวของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง ส่วนที่สามศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา โดยเก็บรักษาผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงไว้ในถุงอะลูมิเนียมพอยล์ที่อุณหภูมิ -20, 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ และส่วนที่สี่เป็นการประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์

1. ผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลกลเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลกลเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง

ในการศึกษาเบื้องต้นได้ใช้เมทิลกลเลทเป็นตัวแทนของสารสกัดเมล็ดมะม่วงเนื่องจากสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีเมทิลกลเลทเป็นองค์ประกอบหลัก แล้วจึงทำการเปรียบเทียบผลกับอิมัลชันที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดยศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเมทิลกลเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์ที่ศึกษา ได้แก่ กัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ทริน และแป้งเมล็ดมะขาม ในเฟสน้ำภายนอกต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเมทิลกลเลท โดยความเข้มข้นของส่วนผสมของอิมัลชันชนิด W/O/W แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นของส่วนผสมของอิมัลชันชนิด W/O/W

อิมัลชัน	ความเข้มข้น (ร้อยละ)
W/O	
เฟสที่กระจาย (W_1)	20.00
เมทิลไกลเลท	1.00
เจลาติน	1.00
โซเดียมคลอไรด์	0.60
น้ำ	18.00
เฟสน้ำมัน (O)	80.00
PGPR	8.00
น้ำมันถั่วเหลือง	78.00
W/O/W	
W/O	10.00
เฟสน้ำภายนอก (W_2)	90.00
Tween 80	0.50
กัมอะราบิก	0.00-20.00
มอลโตเดกซ์ตริน	0.00-30.00
แป้งเมล็ดมะขาม	0.00-3.00
น้ำ	qs 90

หมายเหตุ qs เติมจนครบ

จากการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อค่าคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูลชันเมทิลไกลเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W โดยมีปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกัมอะราบิก (X_1) ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตริน (X_2) และความเข้มข้นของแป้งเมล็ดมะขาม (X_3) ตามแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อเลือกชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมสำหรับการเอนแคปซูลชันเมทิลไกลเลท พบว่า ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.33-1.80 ไมครอน ศักย์ซีต้า -74.50-(-44.74) mV ความหนืด 24.75-267.00 mPa.s การแยกชั้นเป็นครีมร้อยละ 3.11-77.35 และประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชันร้อยละ 53.90 - 88.95 แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลของชนิดและความเข้มข้นของกัมอะราบิก โมลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อขนาดอนุภาค ศักย์ซีต้า ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน ของอิมัลชันชนิด W/O/W

สิ่งทดลอง	ปัจจัย (ร้อยละ)			ความคงตัวและประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน ของอิมัลชันชนิด W/O/W				
	GA	MD	TKP	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ศักย์ซีต้า (mV)	ความหนืด (mPa.s)	การแยกชั้น เป็นครีม (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพ การเอนแคปซูเลชัน (ร้อยละ)
	(X ₁)	(X ₂)	(X ₃)					
1	10.00	0.00	1.50	0.70±0.30	-73.54±1.91	20.95±0.07	54.35±0.90	54.35±0.58
2	16.00	24.00	2.39	0.33±0.10	-45.19±1.65	267.00±1.41	7.14±0.86	88.95±0.31
3	16.00	6.00	0.61	0.98±0.60	-59.20±2.07	42.80±0.00	50.73±0.74	67.63±0.75
4	4.00	24.00	0.61	0.66±0.70	-51.28±2.84	24.75±0.21	66.99±0.76	53.90±0.36
5	16.00	24.00	0.61	0.43±0.20	-62.50±1.97	211.00±2.83	4.10±0.85	80.76±0.48
6	4.00	5.40	0.61	1.15±0.20	-56.97±0.47	10.65±0.21	77.35±0.37	72.67±0.53
7	4.00	24.00	2.39	0.57±0.80	-49.78±1.09	54.70±0.00	47.96±0.41	52.81±1.12
8*	10.00	15.00	1.50	1.30±0.70	-54.16±0.18	42.15±0.07	32.50±0.46	68.36±0.90
9	10.00	15.00	3.00	0.75±0.30	-50.84±2.42	68.45±0.07	33.99±0.29	75.65±0.07
10*	10.00	15.00	1.50	1.32±0.20	-74.50±2.68	41.50±0.14	30.48±0.82	75.70±0.50
11*	10.00	15.00	1.50	0.96±0.50	-57.14±1.67	42.70±0.28	33.92±0.85	69.90±0.87

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สิ่งทดลอง	ปัจจัย (ร้อยละ)			ความคงตัวและประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน ของอิมัลชันชนิด W/O/W				
	GA (X ₁)	MD (X ₂)	TKP (X ₃)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ศักย์ซีต้า (mV)	ความหนืด (mPa.s)	การแยกชั้น เป็นครีม (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพ การเอนแคปซูเลชัน (ร้อยละ)
12	16.00	6.00	2.39	1.59±0.70	-53.93±1.19	68.70±0.14	20.59±0.30	68.05±0.90
13*	10.00	15.00	1.50	1.29±0.30	-53.58±1.16	42.70±0.71	31.75±0.43	71.61±0.45
14	4.00	6.00	2.39	1.80±0.50	-59.40±0.53	74.80±0.28	48.13±0.38	82.14±1.14
15	10.00	15.00	0.00	0.89±0.40	-52.07±1.37	25.60±0.42	52.67±0.48	53.94±0.57
16*	10.00	15.00	1.50	1.33±0.10	-54.02±1.86	41.90±0.00	29.89±0.69	65.18±0.72
17	0.00	15.00	1.50	0.78±0.20	-44.74±1.78	22.15±0.07	53.93±0.53	55.32±1.04
18*	10.00	15.00	1.50	1.32±0.00	-46.80±0.93	42.30±0.57	30.71±0.65	70.40±0.86
19	20.00	15.00	1.50	0.63±0.40	-57.80±0.66	208.00±1.41	7.54±0.07	76.56±0.37
20	10.00	30.00	1.50	0.40±0.10	-45.92±0.87	167.00±0.00	3.11±0.07	65.28±1.09

หมายเหตุ GA คือ กัมอะราบิก MD คือ มอลโตเดกซ์ตริน และ TKP คือ แป้งเมล็ดมะขาม

* คือ จุดศูนย์กลาง

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการรีเกรสชัน (Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับค่าตอบสนอง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสอง (first order model and second order model) เพื่อทำนายค่าตอบสนองและพิจารณาค่า R^2 (Coefficient of Multiple Determination) หรือสัมประสิทธิ์การทำนาย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงใน ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยศึกษากับค่าตอบสนอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
ขนาดอนุภาค = $0.90-0.15X_1-0.30X_2+0.087X_3$	$R^2=0.6829$
คั๊กซี่ตัด = $-55.17-1.86X_1+4.92X_2+1.98X_3$	$R^2=0.3433$
ความหนืด = $42.00+53.98X_1+44.38X_2+18.16X_3+27.10X_1^2+19.64X_2^2+3.04X_3^2+46.56X_1X_2-1.53X_1X_3-0.51X_2X_3$	$R^2=0.9908$
การแยกชั้นเป็นครีม = $53.16-19.31X_1-11.79X_2-8.71X_3-4.48X_1^2-7.67X_2^2-1.68X_3^2-6.19X_1X_2+2.64X_1X_3+5.42X_2X_3$	$R^2=0.9702$
ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน = $66.93-0.32X_1-3.83X_2+3.81X_3+11.04X_1X_2+0.40X_1X_3+2.99X_2X_3$	$R^2=0.7890$

หมายเหตุ X_1 แทน ความเข้มข้นของกัมอะราบิก

X_2 แทน ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตริน

X_3 แทน ความเข้มข้นของแป้งเมล็ดมะขาม

จากตารางที่ 10 สมการทำนายค่าขนาดอนุภาค ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และ ประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.6829, 0.9908, 0.9702 และ 0.7890 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.6 จึงจะถือว่าสมการนี้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ (อนุวัตร, 2552) แต่สมการทำนายค่าศักย์ซีต้า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.3433 ซึ่งน้อยกว่า 0.6 จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ ดังนั้น การทดลองนี้จึงเหลือค่าตอบสนอง เพียง 4 ค่าคือ ขนาดอนุภาค การแยกชั้นเป็นครีม ความหนืด และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชัน

1.1 ขนาดอนุภาค

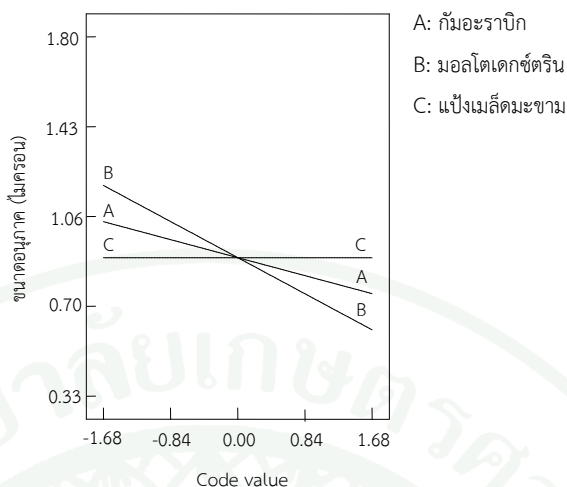
จากภาพที่ 8 พบว่า ขนาดอนุภาคของอิมัลชันชนิด W/O/W จะมีขนาดเล็กลงเมื่อ ความเข้มข้นของกัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์จาก สมการในตารางที่ 10 (ขนาดอนุภาค = $0.90 - 0.15X_1 - 0.30X_2 + 0.087X_3$) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ ของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน มีค่า -0.15 และ -0.30 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอลโตเดกซ์ตริน มีผลต่อขนาดอนุภาคมากกว่ากัมอะราบิก ทั้งนี้ อาจเพราะมอลโตเดกซ์ตรินทำหน้าที่เพิ่มความหนืด ให้กับเฟสต่อเนื่องโดยทำหน้าที่ชะลอการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเฟสภายในให้เคลื่อนที่ช้าลง นอกจากนั้น ระบบอิมัลชันที่มีทั้งสารลดแรงตึงผิวและไฮโดรคอลลอยด์อยู่ในระบบจะเกิดอันตรกิริยา ระหว่างสารทั้งสองซึ่งจะส่งผลต่ออนุภาคของอิมัลชัน (Dickinson, 2003) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวขนาดเล็กอาจจับกับมอลโตเดกซ์ตรินโดยใช้ส่วนที่ไม่มีขั้วของสารทั้งสองจับตัวกันเป็นเกลียว (helical coil) (Wangsakan *et al.*, 2001; Wangsakan *et al.*, 2003) นอกจากมอลโตเดกซ์ตรินที่มีผลต่อขนาด อนุภาคของอิมัลชันแล้ว กัมอะราบิกก็ส่งผลต่อขนาดอนุภาคด้วยเช่นกัน กล่าวคือ กัมอะราบิกเป็น ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีสมบัติเป็นสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว (amphiphilic molecule) อยู่ในตัวเดียวกัน ดังนั้นกัมอะราบิกจึงใช้กลไกของ steric stabilization ในการรักษาความคงตัวของอิมัลชัน โดย กัมอะราบิกจะสร้างฟิล์มที่หนา (thick) และมีขนาดใหญ่ ล้อมรอบอนุภาคของอิมัลชันไว้จึงส่งผลให้ อิมัลชันเกิดความคงตัว (Dickinson, 2003)

ตารางที่ 11 ค่าทางสถิติของขนาดอนุภาค ความหนืด การแยกชั้นเป็นครีม และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W

Source	DF	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)			DF	ความหนืด (mPa.s)		
		Coefficient	Sum of squares	p-value		Coefficient	Sum of squares	p-value
Model	3	0.90	1.59	0.0072	7	42.00	1.033E+005	< 0.0001
b ₁	1	-0.15	0.29	0.0932	1	53.98	39790.03	< 0.0001
b ₂	1	-0.30	1.20	0.0024	1	44.38	26901.40	< 0.0001
b ₃	1	0.087	0.10	0.3080	1	18.16	4505.88	< 0.0001
b ₁₁	-	-	-	-	1	27.10	10581.31	< 0.0001
b ₂₂	-	-	-	-	1	19.64	5557.07	< 0.0001
b ₃₃	-	-	-	-	1	3.04	132.96	0.2652
b ₁₂	-	-	-	-	1	46.56	17344.53	< 0.0001
b ₁₃	-	-	-	-	1	-1.52	18.60	0.6682
b ₂₃	-	-	-	-	1	-0.51	2.10	0.8850
Residual	16		1.48		10		954.47	
Lack-of-fit	11		1.12	0.3640	5		953.38	< 0.0001
Pure error	5		0.36		5		1.09	
Total	19		3.07		19		1.043E+005	
R ²		0.6829				0.9908		
Adj-R ²		0.4287				0.9826		
Adeq precision		7.792				34.218		

ตารางที่ 11 (ต่อ)

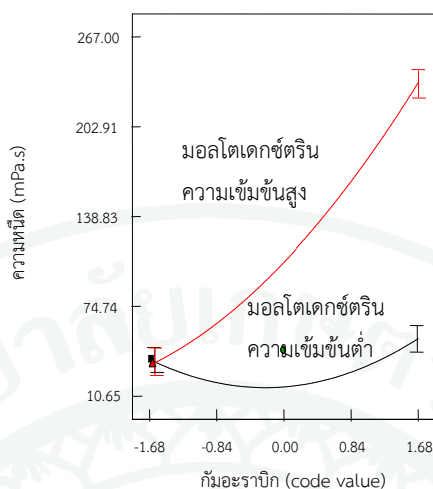
Source	DF	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)			DF	ความหนืด (mPa.s)		
		Coefficient	Sum of squares	p-value		Coefficient	Sum of squares	p-value
Model	9	53.16	9679.44	< 0.0001	6	66.93	1710.11	0.0009
b ₁	1	-19.31	5092.93	< 0.0001	1	-0.32	1.39	0.8455
b ₂	1	-11.79	1898.86	< 0.0001	1	-3.83	200.17	0.0330
b ₃	1	-8.71	1035.11	0.0001	1	5.81	460.42	0.0031
b ₁₁	1	-4.48	289.62	0.0108	-	-	-	-
b ₂₂	1	-7.67	848.04	0.0003	-	-	-	-
b ₃₃	1	-1.68	40.58	0.2694	-	-	-	-
b ₁₂	1	-6.19	306.88	0.0092	1	11.04	975.27	0.0002
b ₁₃	1	2.64	55.90	0.1999	1	0.40	1.27	0.8521
b ₂₃	1	5.42	235.22	0.0183	1	2.99	71.58	0.1773
Residual	10		296.82		13		457.20	
Lack-of-fit	5		270.80	0.0112	8		387.39	0.0934
Pure error	5		26.02		5		69.81	
Total	19		9976.26		19		2167.31	
R ²		0.9702				0.7890		
Adj-R ²		0.9435				0.6917		
Adeq precision		20.667				11.559		



ภาพที่ 8 ผลของความเข้มข้นของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของอิมัลชันชนิด W/O/W

1.2 ความหนืดของอิมัลชัน

ความหนืดมีความสำคัญต่อลักษณะและความคงตัวของอิมัลชัน เมื่อตัวอย่างมีความหนืดสูงจะทำให้อิมัลชันมีความคงตัวและเกิดการแยกชั้นช้าลง การเติมกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามมีผลโดยตรงต่อความหนืด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์จากสมการในตารางที่ 10 (ความหนืด = $42.00 + 53.98X_1 + 44.38X_2 + 18.16X_3 + 27.10X_1^2 + 19.64X_2^2 + 3.04X_3^2 + 46.56X_1X_2 - 1.53X_1X_3 - 0.51X_2X_3$) ของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขาม มีค่า 53.98, 44.38 และ 18.16 ตามลำดับ พบว่า กัมอะราบิกมีผลต่อความหนืดมากกว่ามอลโตเดกซ์ตรินและแป้งเมล็ดมะขาม นอกจากนั้นยังเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตริน เมื่อพิจารณาที่มอลโตเดกซ์ตรินปริมาณต่ำ พบว่า การเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกจะไม่มีผลต่อความหนืดของอิมัลชัน แต่เมื่อพิจารณามอลโตเดกซ์ตรินปริมาณสูง พบว่า การเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกจะมีผลต่อความหนืด (ภาพที่ 9) ซึ่งการที่ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นนั้นเป็นการรักษาความคงตัวของอิมัลชันได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากความหนืดของเฟสต่อเนื่องจะช่วยชะลออนุภาคของเฟสภายในไม่ให้มารวมตัวกันหรือมารวมตัวกันได้ช้าลง



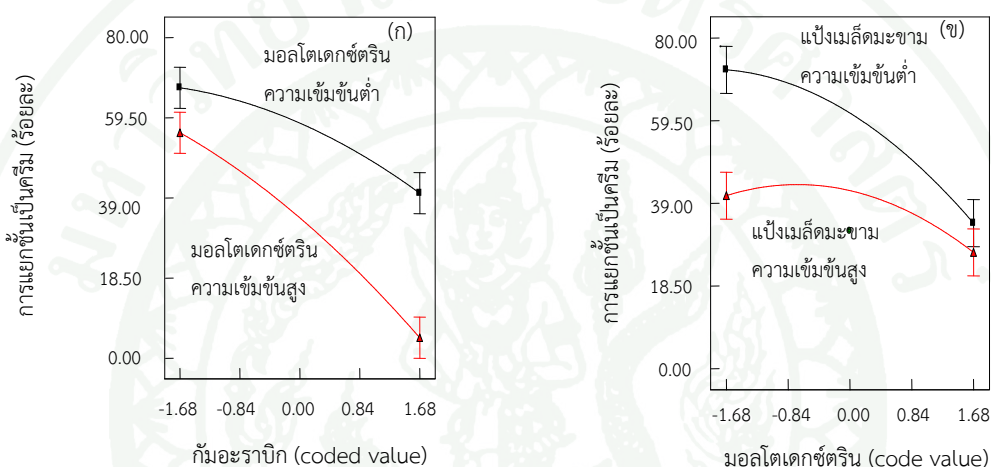
ภาพที่ 9 อันตรกิริยาของความเข้มข้นของกัมมะราบิกและมอลโตเดคซ์ตรินต่อความหนืดที่ อัตราการเฉือน 30.4 mPa.s ของอิมัลชันชนิด W/O/W

1.3 การแยกชั้นเป็นครีม

การแยกชั้นเป็นครีม คือ ความไม่คงตัวของอิมัลชัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงโน้มถ่วง การแยกชั้นเกิดจากความหนาแน่นระหว่างอนุภาคและของเหลวรอบๆ ไม่เท่ากัน ทำให้อิมัลชัน เกิดการแยกชั้นออกจากกัน ถ้าอนุภาคของเฟสกระจายตัวมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวโดยรอบ อนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ซึ่งเรียกว่าการแยกชั้นเป็นครีม (Friberg and Larsson, 1997) จาก ตารางที่ 9 พบว่า การแยกชั้นเป็นครีมนั้นจะเกิดขึ้นแตกต่างกันตามความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์จะทำให้แนวโน้มการแยกชั้นเป็นครีมลดลง ซึ่งอาจเกิด จากความหนืดของอิมัลชันที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคของเฟสภายในหรือเฟสกระจายเคลื่อนที่ได้ช้า จึงชะลอการแยกชั้นของอนุภาคของอนุภาคน้ำมันได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vélez *et al.* (2003) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกัวร์กัมและแซนแทนกัมมีผลทำให้อัตราการแยกชั้นลดลง เนื่องจากกัวร์กัมและแซนแทนกัมทำให้เฟสต่อเนื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงชะลอการเกิดการแยกชั้น เป็นครีมของอิมัลชันได้

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการแยกชั้นเป็นครีม ของอิมัลชันชนิด W/O/W ในตารางที่ 11 พบว่า ความเข้มข้นของกัมมะราบิก มอลโตเดคซ์ตริน และ แป้งเมล็ดมะขามมีผลต่อการแยกชั้นเป็นครีม นอกจากนี้ยังเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัมมะราบิกกับ

มอลโตเดกซ์ตริน และกัมอะราบิกกับแป้งเมล็ดมะขาม จากภาพที่ 10ก เมื่อพิจารณาที่มอลโตเดกซ์ตรินปริมาณต่ำ พบว่า การเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกมีผลต่อการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตริน พบว่า การเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกมีผลต่อการแยกชั้นเป็นครีมลดลง และจากภาพที่ 10ข เมื่อพิจารณาที่แป้งเมล็ดมะขามปริมาณต่ำ พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเมล็ดมะขาม พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อการแยกชั้นเป็นครีมเพียงเล็กน้อย

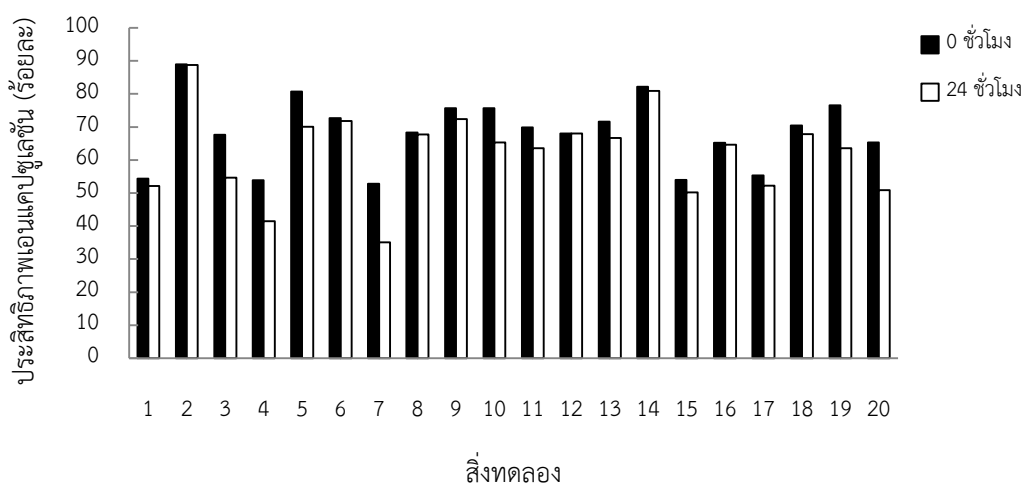


ภาพที่ 10 อันตรกิริยาของ (ก) กัมอะราบิกและมอลโตเดกซ์ตริน (ข) มอลโตเดกซ์ตรินและแป้งเมล็ดมะขามต่อการแยกชั้นเป็นครีมของอิมัลชันชนิด W/O/W

1.4 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเมทิลไกลโคเลท

ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมีความสำคัญอย่างมากต่อการเอนแคปซูเลท สารออกฤทธิ์ ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน คือ ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ (Mehta *et al.*, 1996; Rafati *et al.*, 1997; Li *et al.*, 1999) นอกจากนั้นความหนืดและปริมาณของแข็งในเฟสกระจายตัวก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันโดยปริมาณของแข็งที่สูงและความหนืดที่พอเหมาะนั้นจะส่งผลทำให้การเอนแคปซูเลชันดีขึ้น (Schlicher *et al.*, 1997) จากการทดลอง พบว่า สิ่งทดลองที่ 2 คือ ความเข้มข้นของกัมอะราบิกร้อยละ 16.00 มอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 24.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.39 (ความเข้มข้นรวมของไฮโดรคอลลอยด์ร้อยละ 42.39) มีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเมทิลไกลโคเลทสูงที่สุด เมื่อพิจารณาสิ่งทดลองที่ 20 แม้ว่ามีความเข้มข้นรวมของไฮโดรคอลลอยด์ร้อยละ 41.50 (ความเข้มข้นของกัมอะราบิก

ร้อยละ 10.00 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 30.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 1.50) ซึ่งใกล้เคียงกับ
 สิ่งทดลองที่ 2 แต่ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันไม่ดีเท่าสิ่งทดลองที่ 2 แสดงว่าชนิดของ
 ไฮโดรคอลลอยด์ อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาพที่ 11
 พบว่า การเก็บอิมัลชันไว้นานขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน คือ ทำให้
 ประสิทธิภาพเอนแคปซูเลชันลดลงเมื่อเทียบกับระยะเวลา 0 ชั่วโมง



ภาพที่ 11 ผลของความเข้มข้นของกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ทริน และแป้งเมล็ดมะขามต่อ
 ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของอิมัลชันชนิด W/O/W

1.5 การเปรียบเทียบคุณภาพและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันระหว่างสารสกัดเมล็ด
 มะม่วงและเมทิลแอลกอฮอล์ในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W

เนื่องจากในการศึกษาเบื้องต้น ได้ใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวแทนของสารสกัดเมล็ดมะม่วง
 เพื่อคัดเลือกสัดส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสม ในที่นี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพใน
 ด้านต่างๆ และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันของระบบที่มีการเติมสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดย
 ความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ร้อยละ 1.17 เทียบเท่ากับปริมาณเมทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 1

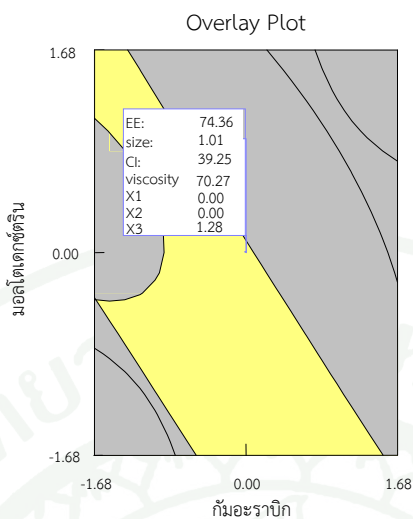
จากการศึกษาในข้อ 1.4 พบว่า สิ่งทดลองที่ 2 เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการเอน-
 แคปซูเลชันสูงที่สุด แต่เนื่องจากตัวอย่างมีความหนืดสูง ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปทำแห้งด้วย
 กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย จึงได้คัดเลือกสิ่งทดลองที่ 14 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเล-
 ชันสูงรองลงมา แต่ตัวอย่างมีความหนืดอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยสิ่งทดลองที่ 14 มีส่วนประกอบ

ของกัมมะราปิกร้อยละ 4.00 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 6.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.39 เมื่อทำการเตรียมอิมัลชันที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า ไม่มีการแยกชั้นเป็นครีมและมีประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูงขึ้น (ตารางที่ 12) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะส่วนประกอบที่มีอยู่ในสารสกัดเมล็ดมะม่วงทำให้อิมัลชันคงตัวและเสริมประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันมากขึ้น

ตารางที่ 12 การแยกชั้นเป็นครีมและประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลทเมทิลแอลกอฮอล์และสารสกัดเมล็ดมะม่วงในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W

ระบบอิมัลชันชนิด W/O/W	การแยกชั้นเป็นครีม (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชัน (ร้อยละ)
เมทิลแอลกอฮอล์	48.13±0.12	81.95±0.20
สารสกัดเมล็ดมะม่วง	0.00±0.00	96.02±0.15

ความคงตัวของอิมัลชัน ความหนืดที่พอเหมาะ (Rodríguez-huezo *et al.*, 2004) และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันเป็นคุณภาพที่สำคัญในการศึกษาครั้งนี้เนื่องจากต้องการให้สารออกฤทธิ์มีประสิทธิภาพในการใช้งานและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่าย ดังนั้นจึงนำเกณฑ์ดังกล่าวมาใช้พิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมของพื้นที่ตอบสนองหรือ RSM (Response surface methodology) คือ ขนาดอนุภาค 0.33-1.8 ไมครอน การแยกชั้นเป็นคริมน้อย ความหนืดอยู่ในช่วง 10.65-75 mPa.s และประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลชันสูงสุด จากภาพที่ 12 พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ กัมมะราปิกร้อยละ 10.00 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 15.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.75



ภาพที่ 12 เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟ (Overlay Plot) ระหว่างค่าประสิทธิภาพเอนแคปซูลชั้น ขนาดอนุภาค การแยกชั้นเป็นครีม และความหนืด เพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมของอิมัลชันที่มีกัมอะราบิก มอลโตเดกซ์ตริน และแป้งเมล็ดมะขามเป็นองค์ประกอบ โดยพื้นที่สีเหลือง คือ พื้นที่ที่ซ้อนทับกัน เป็นบริเวณที่ใช้คัดเลือกสภาวะที่เหมาะสม

หมายเหตุ X_1 คือ กัมอะราบิก X_2 คือ มอลโตเดกซ์ตริน และ X_3 คือ แป้งเมล็ดมะขาม

EE คือ ประสิทธิภาพเอนแคปซูลชั้น size คือ ขนาดอนุภาค CI คือ การแยกชั้นเป็นครีม และ viscosity คือ ความหนืด

2. ผลของกระบวนการทำแห้งต่อคุณภาพของผงเอนแคปซูลสารสกัดเมล็ดมะม่วง

จากการทดลองในข้อ 1 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอิมัลชันชนิด W/O/W คือ สารสกัดเมล็ดมะม่วงร้อยละ 1.17 ในเฟสน้ำภายใน กัมอะราบิกร้อยละ 10.00 มอลโตเดกซ์ตริน ร้อยละ 15.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.75 ในเฟสน้ำภายนอก นำตัวอย่างอิมัลชันที่ได้จากข้อ 1 มาศึกษาผลของกระบวนการทำแห้ง โดยเปรียบเทียบ 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง นำผงตัวอย่างมาทำการศึกษาคูณภาพต่างๆ ได้แก่ ความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี้ ความสามารถในการละลาย สี ขนาดและรูปร่างของผงเอนแคปซูลสารสกัดเมล็ดมะม่วง และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

2.1 ความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

จากการวิเคราะห์ความชื้นและ วอเตอร์แอกติวิตี้ของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า กระบวนการทำแห้งมีผลต่อความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตี้ของทั้งสองกระบวนการ โดยผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความชื้นร้อยละ 3.03 และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 0.150 ส่วนผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความชื้นร้อยละ 3.21 และวอเตอร์แอกติวิตี้ 0.140 (ตารางที่ 13) ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทผงจะมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3-4 (Mujumdar, 1995) โดยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการทำให้ตัวอย่างแห้งด้วยการทำให้สารละลายแตกตัวเป็นละอองหรืออนุภาคเล็กๆ แล้วผ่านไปในห้องอบแห้ง (chamber) ซึ่งมีอากาศร้อนไหลผ่าน ซึ่งจะเกิดการระเหยขึ้นที่ผิวของอนุภาคเล็กๆ อย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยอยู่ในสภาพผงแห้ง ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิลมร้อนขาออกต่ำ (70-115 องศาเซลเซียส) จะช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆ ได้ (Macrae *et al.*, 1993) ในขณะที่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำให้ตัวอย่างแห้งโดยการระเหิดน้ำแข็งในตัวอย่างทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างตัวอย่าง จึงทำให้ตัวอย่างแห้งได้ (Van Arsdel *et al.*, 1973)

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีกายภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

สมบัติทางเคมีกายภาพ	การทำแห้งแบบพ่นฝอย	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
ความชื้น (ร้อยละ)	3.03 ^b ± 0.05	3.21 ^a ± 0.07
ปริมาณฟีนอลิก (มิลลิกรัมต่อ 1 กรัม น้ำหนักแห้ง)	1.55 ^b ± 0.01	1.99 ^a ± 0.02
วอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w)	0.150 ^a ± 0.002	0.142 ^b ± 0.003
ความสามารถในการละลาย (ร้อยละ)	88.74 ^a ± 0.46	83.51 ^b ± 0.37
ค่าสี L*	84.16 ^a ± 0.31	83.63 ^b ± 0.23
a*	0.26 ^a ± 0.03	0.01 ^b ± 0.06
b*	11.25 ^b ± 0.11	13.28 ^a ± 0.12

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวเดียวกันที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.2 ความสามารถในการละลาย

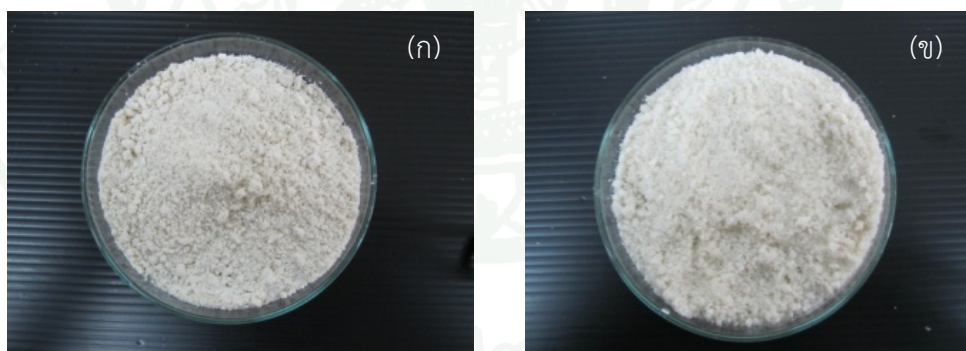
ความสามารถในการละลายเป็นเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพผลิตภัณฑ์ประเภทผง ซึ่งตัวอย่างที่สามารถละลายได้ดีจะต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีพื้นที่ในการดูดซับน้ำปริมาณมาก (wettability) มีความสามารถในการจม (sinkability) และมีความสามารถในการกระจายตัวที่ดี (dispersability) (Chen and Patel, 2008)

ในการทดลองนี้ได้นำผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมาทดสอบความสามารถในการละลายได้ผลดังตารางที่ 13 พบว่า ตัวอย่างที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยและแบบแช่เยือกแข็งมีความสามารถในการละลายร้อยละ 88.74 และ 83.51 ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการละลายสูงกว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าการทดลองของ Kha *et al.* (2010) ที่ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินและอนุหภูมิในการทำแห้งต่อลักษณะเคมีกายภาพและสมบัติด้านออกซิเดชันของผงพริกข้าว พบว่า ความสามารถในการละลายของผงพริกข้าวอยู่ในช่วงร้อยละ 36.91-38.25

ความสามารถในการละลายของผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยนั้นอาจจะมีผลมาจากส่วนประกอบของวัตถุดิบ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ตัวพาที่ใช้ในการทำแห้ง และลมที่ใช้ในการเป่าและอัตราการไหล (Hall, 1999) การทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่เหมาะสมจะทำให้มีลมชั้นมีความชื้นต่ำและมี wet surface อยู่รอบอนุภาคน้อย เมื่อนำไปละลายน้ำจึงละลายได้ดีกว่าผงที่มีความชื้นสูง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วการทำแห้งแบบพ่นฝอยจะได้ผงที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และมี wet surface อยู่โดยรอบ ซึ่งถ้าหากมี wet surface อยู่ในปริมาณมากจะทำให้ น้ำในบริเวณดังกล่าวเกิดการเกาะติดกัน เป็นผลให้อนุภาคผงรวมกันเป็นก้อน เมื่อนำไปละลายน้ำอาจทำให้มีความสามารถในการละลายลดลง ส่วนความสามารถในการละลายของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง อาจเนื่องมาจากอนุภาคผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน จึงช่วยในการดูดน้ำกลับ รวมถึงสมบัติของโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของสารห่อหุ้มมีการเสียสภาพธรรมชาติน้อย ทำให้การละลายเกิดได้ดีเนื่องจากน้ำจะสามารถเข้าไปภายในช่องว่างได้อย่างรวดเร็ว (Baker, 1997)

2.3 สี

สี เป็นคุณภาพทางกายภาพค่าหนึ่งของตัวอย่างผงแห้ง ในการทดลองนี้ได้นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ในระบบ CIE L* a* b* ซึ่งค่า L* แสดงค่าความสว่าง a* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีแดง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีเขียว และ b* ค่าบวก (+) แสดงค่าสีเหลือง ค่าลบ (-) แสดงค่าสีน้ำเงิน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 เมื่อพิจารณาผลของกระบวนการทำแห้งต่อค่าสีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า กระบวนการทำแห้งมีผลต่อค่าสีของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ตัวอย่างมีค่าความสว่าง (L*) และสีแดง (a*) สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ในทางกลับกัน พบว่า ค่าสีเหลือง (b*) มีค่าน้อยกว่า ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพถ่ายของตัวอย่างร่วมกัน (ภาพที่ 13) เนื่องจากจากอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ 90 ± 2 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำแห้งสั้น (1-3 วินาที) จึงส่งผลให้ความสว่างของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความสว่างสูงกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เมื่อพิจารณาวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการระเหิดน้ำออกจากอิมัลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงทำให้สารละลายที่เหลือมีความเข้มข้นและความหนาแน่นที่สูง ทำให้ค่าสีมีความสว่างลดลง และมีสีที่เข้มขึ้น (Van Arsdell *et al.*, 1973)



ภาพที่ 13 ลักษณะปรากฏและสีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง (ก) แบบพ่นฝอย (ข) แบบแช่เยือกแข็ง

2.4 ปริมาณฟีนอลิก

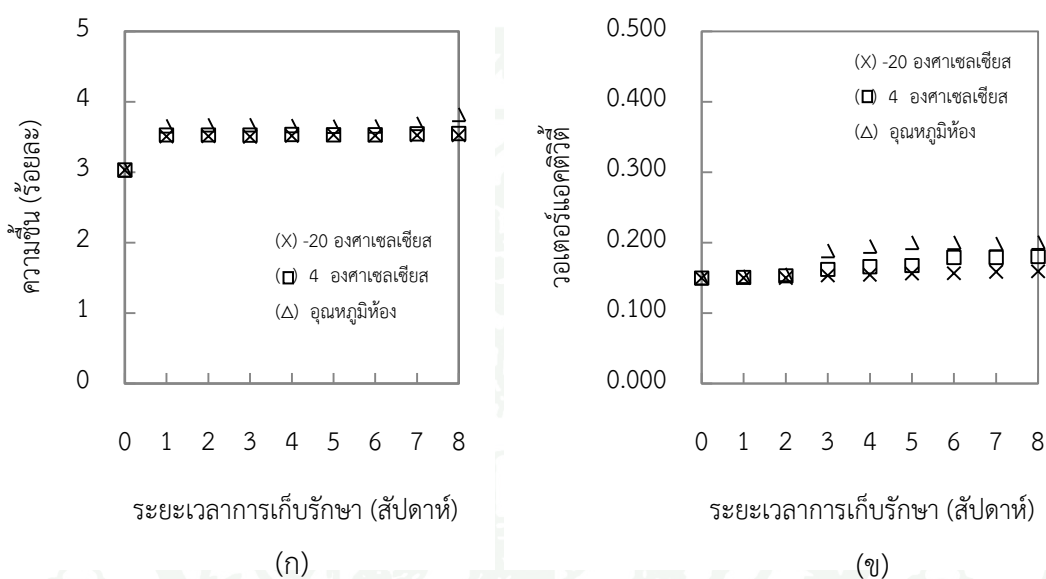
เมื่อตรวจสอบสมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี total phenols assay พบว่า กระบวนการทำแห้งมีผลต่อปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ ปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าสูงกว่าปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งการที่ปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงจากวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าฟีนอลิกสูงกว่า เพราะการทำแห้งแบบ แช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำให้แห้งโดยการแช่แข็งสารละลาย ทำให้เป็นน้ำแข็ง จากนั้นทำการระเหยให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันอากาศต่ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้สารเกิดการเสื่อมสลายจากความร้อนน้อยมาก (สาธิต, 2538) นอกจากนั้นการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความร้อนจากกระบวนการมาเกี่ยวข้องจึงทำให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kha *et al.* 2010 พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งแบบพ่นฝอยจาก 120-200 องศาเซลเซียส มีผลทำให้สารต้านอนุมูลอิสระลดลง

2.5 ลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) ของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการแห้งแบบพ่นฝอยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการทำให้ตัวอย่างแห้งโดยการฉีดตัวอย่างผ่านหัวฉีด (atomizer) ซึ่งจะทำให้อนุภาคของผงที่ได้มีขนาดเล็ก แต่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำให้ตัวอย่างแห้งโดยบรรจุในถาด ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่น เมื่อนำไปบดให้เป็นผงจึงทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย ลักษณะผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการแห้งแบบพ่นฝอยจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ผิววนอกเรียบ (ภาพที่ 14ก) ส่วนผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอนุภาคมีลักษณะผิวไม่เรียบ มีรูพรุน และมีส่วนเว้าของโครงสร้างของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง (ภาพที่ 14ข)

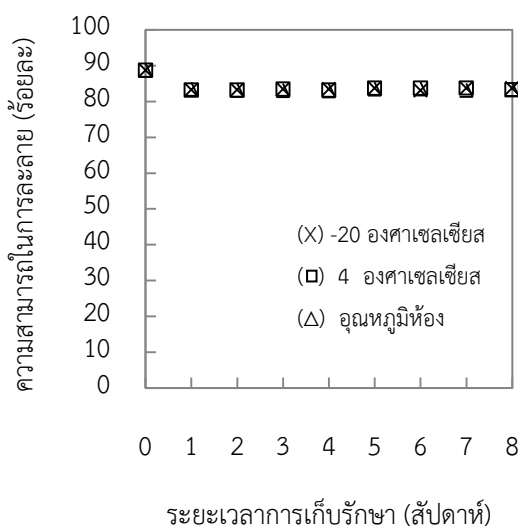
4 องศาเซลเซียส มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3.03-3.55 และผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เก็บในสภาวะอุณหภูมิห้อง มีความชื้นเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 3.03-3.82 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเกิดจากการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำผ่านถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ และอาจเกิดการปรับตัวของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงให้เข้าสู่ภาวะสมดุลภายในภาชนะ ทำให้มีปริมาณความชื้นของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเพิ่มขึ้น (Labuza, 1982)



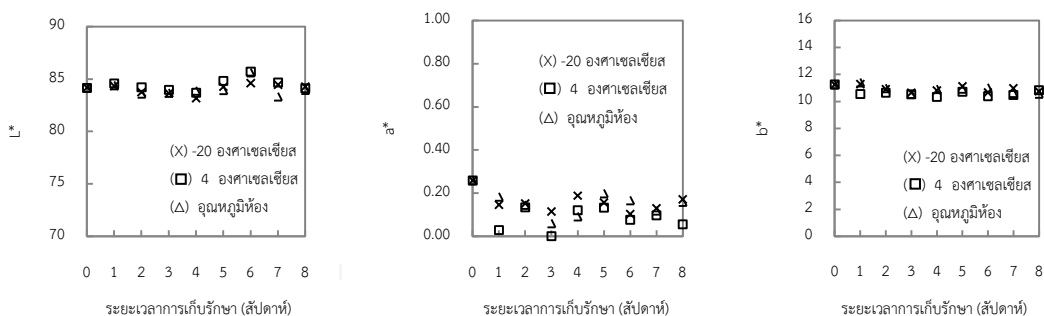
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความชื้น (ข) วอเตอร์แอกติวิตีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในสภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (□) 4 องศาเซลเซียส และ (△) อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์

เมื่อพิจารณาผลของสภาวะการเก็บต่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี (ภาพที่ 15ข) พบว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เก็บที่อุณหภูมิ -20, 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง นาน 8 สัปดาห์ ค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บรักษาผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเป็นเวลานานขึ้นจะมีการแพร่ผ่านความชื้นเข้ามาในบรรจุภัณฑ์ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าสูงกว่าขณะเดียวกันภายในอาหารมีความดันไอน้ำต่ำกว่าอากาศ ดังนั้นอาหารจึงดูดความชื้นในอากาศ ส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความชื้นของตัวอย่าง

ภาพที่ 16 แสดงผลของสภาวะการเก็บต่อความสามารถในการละลาย พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิตั้ง 3 อุณหภูมิ โดยค่าความสามารถในการละลายน้ำของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงสัปดาห์ที่ 0 เท่ากับร้อยละ 88.74 เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 83.72 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 83.33 และที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 83.42 ซึ่งค่าความสามารถในการละลายน้ำของทั้งสามอุณหภูมิต่ำลง อาจเนื่องมาจากในระหว่างการเก็บรักษาปริมาณความชื้นของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ตัวอย่างที่เก็บไว้จับตัวเป็นก้อน (Peleg and Bagley, 1983) ส่งผลให้ค่าการละลายลดลง



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายน้ำของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในสภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (□) 4 องศาเซลเซียส และ (Δ) อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงค่า L^* a^* และ b^* ของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในสภาวะการเก็บต่างกัน (X) -20 องศาเซลเซียส (□) 4 องศาเซลเซียส และ (Δ) อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์

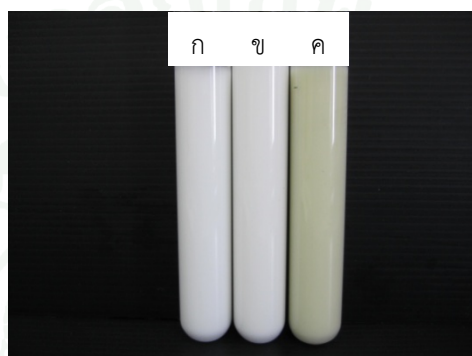
ในระหว่างการเก็บรักษาผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่อุณหภูมิ -20, 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า สีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นและเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่า L^* คือ ค่าความสว่างในตัวผลิตภัณฑ์ พบว่า ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีความสว่างลดลง อยู่ในช่วง 84.16 ถึง 83.94 ค่า a^* มีค่าเป็นบวก แสดงว่าผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีสีแดง และค่าเป็นสีแดงลดลง อยู่ในช่วง 0.26 ถึง 0.06 ค่า b^* มีค่าเป็นบวก แสดงว่าผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีสีเหลือง และค่าความเป็นสีเหลืองลดลง อยู่ในช่วง 11.25 ถึง 10.56 นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) โดยผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่อุณหภูมิห้องมีค่าความสว่างลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิ -20 และ 4 องศาเซลเซียส

4. การประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่เตรียมได้จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยเปรียบเทียบคุณภาพกับสูตรควบคุมและสูตรที่มีการเติมสารสกัดเมล็ดมะม่วง คุณภาพที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะภายนอก สี ความหนืด ความคงตัว และ pH ได้ผลดังตารางที่ 14

4.1 ลักษณะปรากฏ

โลชันทุกสูตรมีลักษณะเนื้ออิมัลชันที่เนียนและละเอียด โดยโลชันสูตรที่ 1 และ 2 มีสีขาว นวล ไม่มีกลิ่น ส่วนโลชันสูตรที่ 3 มีสีเหลืองนวลและมีกลิ่นของสารสกัด ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ตัวอย่างโลชัน ก) สูตรควบคุม ข) ผงเอนแคปซูลเทสสารสกัดเมล็ดมะม่วง ค) สารสกัด เมล็ดมะม่วง

ตารางที่ 14 คุณภาพของโลชันตัวอย่างสูตรควบคุม สูตรที่มีการเติมผงเอนแคปซูลเทสสารสกัดเมล็ด มะม่วง และสูตรที่มีการเติมสารสกัดเมล็ดมะม่วง

ค่าคุณภาพ	ตัวอย่างทดสอบ		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ลักษณะภายนอก	เนื้อเนียนละเอียด สีขาว ไม่มีกลิ่น	เนื้อเนียนละเอียด สีขาว ไม่มีกลิ่น	เนื้อเนียนละเอียด สีเหลืองนวล มีกลิ่น ของสารสกัด
สี L*	88.40 ^a ±0.75	88.26 ^a ±0.39	77.37 ^b ±1.70
a*	-0.76 ^a ±0.04	-0.81 ^a ±0.07	-1.37 ^b ±0.01

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ค่าคุณภาพ	ตัวอย่างทดสอบ		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
b*	2.16 ^c ±0.03	3.38 ^b ±0.10	17.03 ^a ±0.10
ความหนืด (mPa.s)	1225.31 ^a ±15.47	1096.25 ^{ab} ±62.76	1036.88 ^b ±38.01
ความคงตัว	คะแนน 1 (ไม่ปรากฏร่องรอยของ การแยกชั้น)	คะแนน 1 (ไม่ปรากฏร่องรอยของ การแยกชั้น)	คะแนน 3 (เริ่มแยกชั้น)
pH	5.49 ^b ±0.09	5.63 ^b ±0.01	9.63 ^a ±0.22

หมายเหตุ a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวเดียวกันที่มีอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อนำโลชันทั้ง 3 สูตรมาวัดค่าคุณภาพทางกายภาพ (ตารางที่ 14) พบว่า ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีแดง (a*) ของโลชันสูตรควบคุมและสูตรที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีค่าสูงกว่าโลชันสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง แสดงว่าโลชันสูตรควบคุมและสูตรที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีความสว่างมากกว่าและมีสีโทนไปทางสีแดงมากกว่าโลชันที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง ในขณะที่ค่าสีเหลือง (b*) ของโลชันสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีค่าสูงกว่าโลชันสูตรควบคุมและสูตรที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง (ภาพที่ 18) ซึ่งสีเหลืองของโลชันสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงเกิดจากสีของสารสกัดที่มีน้ำตาลเหลืองนั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่าความหนืด พบว่า ความหนืดของโลชันมีความหนืดอยู่ในช่วง 1036.25-1225.31 mPa.s ค่าความคงตัวของโลชัน พบว่า สูตรควบคุมและสูตรที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีความคงตัวดีหลังจากผ่านการหมุนเหวี่ยงด้วยอัตราความเร็ว 5,000 g นาน 20 นาที ส่วนโลชันสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงพบว่าการแยกชั้นเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาคุณภาพทางเคมี พบว่า ค่า pH ของโลชันที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีค่า 9.63 ซึ่งมีค่าสูงกว่า โลชันสูตรควบคุมและสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง คือ 5.49 และ 5.63 ตามลำดับ ซึ่งโลชันที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วงมี pH สูงกว่า pH ของผิวหนังซึ่งมีค่า

อยู่ระหว่าง 4.5-6.0 ดังนั้นเมื่อโลชันดังกล่าวมาทาผิวอาจทำให้ผิวระคายเคืองได้ (พิมพร, 2532) ในที่นี้สามารถใช้ Triethanalamine ปรับค่า pH เพื่อให้เหมาะสมกับ pH ของผิวหนัง

4.2 การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อโลชันที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อโลชันที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลชันสารสกัดเมล็ดมะม่วงแบบ Central location test (CLT) กับผู้บริโภคกลุ่มผู้บริโภคเพศชายและหญิงจำนวน 80 คน ในเขตกรุงเทพมหานคร ได้ผลดังนี้

4.2.1 ข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภค

ข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภค แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 87.50 มีอายุอยู่ในช่วงอายุระหว่าง 15 – 24 ปี คิดเป็นร้อยละ 57.5 ระดับการศึกษาสูงสุดของผู้บริโภคส่วนใหญ่ คือ ระดับปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 61.25 ส่วนใหญ่มีอาชีพนักเรียนนักศึกษา คิดเป็นร้อยละ 91.25 โดยผู้บริโภคส่วนมากมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนน้อยกว่า 15,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 86.25

ตารางที่ 15 ข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภคในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

n=80

ข้อมูล	จำนวน (คน)	จำนวน (ร้อยละ)
เพศ		
ชาย	10	12.50
หญิง	70	87.50
อายุ		
15 – 24 ปี	46	57.50
25 – 34 ปี	29	36.25
35 – 44 ปี	4	5.00
45 ปีขึ้นไป	1	1.25

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ข้อมูล	จำนวน (คน)	จำนวน (ร้อยละ)
การศึกษาสูงสุด		
ต่ำกว่าปริญญาตรี	8	10.00
ปริญญาตรี	49	61.25
สูงกว่าปริญญาตรี	23	28.75
อาชีพ		
นักเรียน/นิสิต/นักศึกษา	73	91.25
ธุรกิจส่วนตัว/ค้าขาย	1	1.25
ข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจ	4	5.00
พนักงานบริษัทเอกชน	1	1.25
อื่นๆ	1	1.25
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน		
น้อยกว่า 15,000 บาท	69	86.25
15,001 – 30,000 บาท	9	11.25
มากกว่า 30,001 บาท	2	2.50

4.2.2 ความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อโลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

ผลการทดสอบความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อโลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง แสดงดังตารางที่ 16 พบว่า ผู้บริโภคมีความชอบในทุกคุณลักษณะอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย

ตารางที่ 16 ข้อมูลคะแนนความชอบเฉลี่ยที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลท สารสกัดเมล็ดมะม่วงจากการทดสอบการยอมรับ

n=80

คุณลักษณะ	ค่าเฉลี่ย	ระดับความชอบ
1. ลักษณะปรากฏ	6.8±1.1	ชอบเล็กน้อย
2. ความหนืดของโลชั่น	6.2±1.3	ชอบเล็กน้อย
3. การซึมซาบเข้าสู่ผิว	6.2±1.5	ชอบเล็กน้อย
4. ความชุ่มชื้นผิวภายหลังการใช้	6.8±1.1	ชอบเล็กน้อย
5. ความชอบโดยรวม	6.8±0.8	ชอบเล็กน้อย

4.2.3 การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลท สารสกัดเมล็ดมะม่วง

จากการสอบถามการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดยสอบถามทั้งก่อนและหลังทราบข้อมูลและประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 17 พบว่า ผู้บริโภคร้อยละ 95.0 ยอมรับผลิตภัณฑ์ก่อนทราบข้อมูล และยอมรับเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 96.2 หลังจากทราบข้อมูลประโยชน์ของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 17 การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของสารสกัดเมล็ดมะม่วง

n=80

ปัจจัย	ก่อนให้ข้อมูล (ร้อยละ)	หลังให้ข้อมูล (ร้อยละ)
การยอมรับ		
ยอมรับ	95	96.2
ไม่ยอมรับ	5	3.8

เมื่อเปรียบเทียบการยอมรับระหว่างก่อนและหลังทราบข้อมูลประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์วิธี McNemar test โดยมีวิธีการคำนวณดังภาคผนวก ข พบว่า การยอมรับผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงของผู้บริโภคก่อนและหลังทราบข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 18 การวิเคราะห์ McNemar test

การวิเคราะห์	การยอมรับ
McNemar test	
χ^2 calculated	1
χ^2 table (df=1, $\alpha=0.05$)	3.84
ก่อนและหลังการให้ข้อมูล	ไม่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 19 พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างการตัดสินใจซื้อกับการยอมรับที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดยผู้บริโภคที่ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ จะมีเปอร์เซ็นต์ของการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ในอัตราร้อยละ 77.9 ของจำนวนความถี่รวม ในขณะที่ เปอร์เซ็นต์ของการตัดสินใจไม่ซื้อผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่ร้อยละ 22.1 ส่วนผู้ที่ไม่ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ จะมีเปอร์เซ็นต์ในการตัดสินใจไม่ซื้อเท่ากับร้อยละ 100 นั้นแสดงให้เห็นว่า ผู้บริโภคที่ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ จะมีโอกาสซื้อผลิตภัณฑ์ในสัดส่วนที่มากกว่าการตัดสินใจไม่ซื้อ

ตารางที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในด้านการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์กับการยอมรับผลิตภัณฑ์ โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

การยอมรับต่อผลิตภัณฑ์	ความถี่รวม	ความถี่ (คน)		ร้อยละ ¹	
		ซื้อ	ไม่ซื้อ	ซื้อ	ไม่ซื้อ
ยอมรับ	77	60	17	77.9	22.1
ไม่ยอมรับ	3	0	3	0	100
รวม	80	60	20		

หมายเหตุ ¹ หมายถึง ร้อยละจากความถี่รวมของข้อมูล

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. ผลของชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเมทิลไกลโคเลทในระบบอิมัลชันชนิด W/O/W และเปรียบเทียบคุณภาพของระบบอิมัลชันที่มีส่วนผสมของเมทิลไกลโคเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ กัมอะราบิกร้อยละ 10.00 มอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 15.00 และแป้งเมล็ดมะขามร้อยละ 2.75 เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีเมทิลไกลโคเลทกับระบบที่มีสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า ประสิทธิภาพในการเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีค่าสูงกว่าเมทิลไกลโคเลท

2. ผลของกระบวนการในการทำแห้งต่อคุณภาพและความคงตัวของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง พบว่า กระบวนการทำแห้งมีผลต่อคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง โดยความสามารถในการละลาย วอเตอร์แอกติวิตี ความสว่างและค่าสีแดงของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าสูงกว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ขณะที่ความชื้น ค่าสีเหลืองและปริมาณฟีนอลิกของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าต่ำกว่าผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

3. ผลของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20, 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง นาน 8 สัปดาห์ โดยเก็บในถุงอะลูมิเนียม พบว่า ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ความชื้นและค่าสีของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ความสามารถในการละลายลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น

4. การประยุกต์ใช้ผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงในผลิตภัณฑ์ พบว่า ผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงมีความคงตัว นอกจากนั้นเมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่า ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงร้อยละ 95

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. **เคมีกายภาพของอาหาร: คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล.**
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ , กรุงเทพฯ.
- พิมพ์ร ลีลาพรพิสิฐ. 2532. **เครื่องสำอางสำหรับผิวหน้า.** พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,
เชียงใหม่.
- พวงเพชร นิธยานนท์. 2521. **การผลิตและการใช้ประโยชน์ของกัมจากเมล็ดมะขาม.** วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. **วิศวกรรมการแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร.** โอเดียนสโตร์,
กรุงเทพฯ.
- วัลยา เนาวรัตน์วัฒนา และ พัชรี บุญศิริ. 2542. **โปรออกซิแดนซ์: อีกล้อมหน้าของแอนติออกซิ
แดนซ์. วารสารวิทยาศาสตร์. 53: 196-198.**
- วิไล รัชสาดทอง. 2545. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์หนังสือ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สาธิต พุทธิพิพัฒน์ขจร. 2538. **เทคโนโลยี freeze-drying ในการพัฒนาเภสัชภัณฑ์, น. 139-164.**
**ใน ญัณนันท์ สิ้นชัยพานิช และ พจวรรณ ประยูรพรหม, บรรณาธิการ. Advances in
Industrial Pharmaceutical. ที่ พี พรินต์, กรุงเทพฯ.**
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2539. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
เครื่องสำอาง: ครีมและโลชั่นบำรุงผิว. มอก. 152-2539.**
- อดิณพ, บริษัท จำกัด. 2555. **Formulation of cream gel cocoon like feeling.**
แหล่งที่มา: <http://www.adinop.co.th>, 7 มิถุนายน 2555.

อนุวัตร แจ่มชัด. 2552. สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Abdalla, A. E. M., S. M. Darwish, E. H. E. Ayad and R. M. El-Hamahmy. 2007. Egyptian mango by-product1. Compositional quality of mango seed kernel. **Food Chem.** 103: 1134-1140.

Arogba, S. S., 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.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis of AOAC International.** 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.

Baker, C. G. J. 1997. **Industrial Drying of Foods.** Blackie Academic and Professional, U. K.

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.

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 Hydrocolloids.** 23: 92-101.

Carareto, N. D. D., E. S. Monteiro Filho, P. A. Pessoa Filho and A. J. A. Meirelles. 2010. Water activity of aqueous solutions of ethylene oxide-propylene oxide block copolymers and maltodextrins. **Braz. J. Chem. Eng.** 27(1): 173 – 181.

Chakravarti, I. B. 1961. Isolation, purification and fraction of tamarind kernel polysaccharide. **J. Sci. Indus. Res.** 20D: 380-384.

- Chen Q, K. Song, L. Qiu, X. Liu, H. Huang and H. Guo. 2005. Inhibitory effects on mushroom tyrosinase by p-alkoxybenzoic acids. **Food Chem.** 91: 269–274.
- Chen, X. D. and K. C. Patel. 2008. Manufacturing better quality food powders from spray drying and subsequent treatments. **Drying Tech.** 26(11): 1313-1318.
- Choi, S. J., E. A. Decker and D. J. McClements. 2009. Impact of iron encapsulation within the interior aqueous phase of water-in-oil-in-water emulsions on lipid oxidation. **Food Chem.** 116: 271-276.
- Cilek, B., A. Luca, V. Hasirci, S. Sahin and G. Sumnu. 2012. Microencapsulation of phenolic compounds extracted from sour cherry pomace: effect of formulation, ultrasonication time and core to coating ratio. **Eur. Food Res. Technol.** 235(4): 587-596.
- Coupland, J. N. and D. J. McClements. 1996. Lipid oxidation in food emulsion. **Trends Food Sci. Tech.** 7: 83.
- Desobry, S. S., F. M. Netto and T. P. Labuza. 1997. Comparison of spray-drying, drum-drying and freeze-drying for β -carotene encapsulation and preservation. **J. Food Sci.** 62: 1158-1162.
- Dickinson, E. 1992. **An Introduction to Food Colloids.** Oxford University Press, Oxford.
- _____. 2003. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. **Food Hydrocolloids.** 17: 25–39.
- Dickinson, E. and D. J. McClements. 1995. **Advance in Food Colloids.** Chapman & Hall, London.

- Dickinson, E. and G. Stainsby. 1982. **Colloids in Food**. Applied Science Publishers, London.
- Fiuza S. M., C. Gomes, L. J. Teixeira, M. T. Girão da Cruz, M. N. D. S. Cordeiro, N. Milhazes, F. Borges and M. P. M. Marques. 2004. Phenolic acid derivatives with potential anticancer properties - a structure - activity relationship study. Part 1: Methyl, propyl and octyl esters of caffeic and gallic acids. **Bioorgan. Med. Chem.** 12: 3581–3589.
- Florence, A. T. and D. Whitehill. 1985. Stability and stabilization of water-in-oil-in-water multiple emulsions. pp. 359–380. *In* D.O. Shah, ed. **Macro and Microemulsions: Theory and Application**. American Chemical Society, Washington, DC.
- Fox, C. 1997. Advance in the cosmetics science and technology of topical bioactive materials. **Cosmet. Toilet Magazine.** 112: 67-84.
- Frankel, E. N. and A. S. Meyer. 2000. The problems of using one-dimensionnal methods to evaluate multifunction food and biological antioxidants. **J. Sci. Food Agric.** 80: 1925-1941.
- Friberg, S. E. and K. Larsson. 1997. **Food Emulsions**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Garti, N. 1997. Double emulsions-scope, limitations and new achievements. **Colloid Surf. A Phys. Eng. Aspects.** 123: 233–246.
- 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.
- Hall, K. 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. **Geomorphology.** 31: 47–63.

- Harris, R., E. Lecumberri, I. Mateos-Aparicio, M. Mengibar and A. Heras. 2011. Chitosan nanoparticles and microspheres for the encapsulation of natural antioxidants extracted from *Ilex paraguariensis*. **Carbohydr. Polym.** 84: 803–806.
- 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.
- Kaushik, V. and Y. H. Roos. 2007. Limonene encapsulation in freeze-drying of gum Arabic–sucrose–gelatin systems. **LWT.** 40: 1381–1391.
- 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
- Khounvilay, K. and W. Sittikijyothin. 2012. Rheological behaviour of tamarind seed gum in aqueous solutions. **Food Hydrocolloids.** 26: 334-338.
- Kumar, C.S. and S. Bhattacharya. 2008. Tamarind Seed: Properties, Processing and Utilization. **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 48: 1-20.
- 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.** 9B: 71S-88S.
- Labuza, T. P. 1982. **Shelf-life Dating of Foods.** Food & Nutrition Press, Inc., Westport.

- Li, X., X. Deng, M. Yuan, C. Xiong, Z. Huang, Y. Zhang and W. Jia. 1999. Investigation on process parameters involved in preparation of polylactide-poly (ethylene glycol) microspheres containing *Leptospira Interrogans* antigens. **Int. J. Pharm.** 178: 245-255.
- Macrae, R., R. K. Robinson and M. J. Sadler. 1993. **Encyclopaedia of Food Science, Food Technology and Nutrition.** Vol. 3. Academic Press Limited, London.
- Madene, A., M. Jacquot, J. Scher and S. Desobry. 2006. Flavor encapsulation and controlled release: a review. **Int. J. Food Sci. Tech.** 41: 1-21.
- Maisuthisakul, P. 2008. Antiradical scavenging activity and polyphenolic compounds extracted from Thai mango seed kernels. **Asian J. Food Ago-Ind.** 1: 87-96.
- _____. and M. H. Gordon. 2009. Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of mango seed kernel by product. **Food Chem.** 117: 332-341.
- _____. 2011. Effect of oil, surfactant and phenolic extract from mango seed kernel on the physicochemical properties of W/O/W emulsions. **Afr. J. Biotechnol.** 10: 14937-14947.
- _____. 2012. Characterization and storage stability of the extract of Thai mango (*Mangifera indica* Linn. Cultivar Chok-Anan) seed kernels. **J. Food Sci. Technol.** 1-10.
- Malvern Instruments. 2003. **Zetasizer Nano Series User Manual.** Malvern Instruments Ltd., England.
- Marathe, R. M., U. S. Annapure, R. S. Singhal and P. R. Kulkarni. 2002. Gelling behaviour of polyose from tamarind kernel polysaccharide. **Food Hydrocolloids.** 16: 423-426.

- Masibo, M. and Q. He. 2008. Major mango polyphenols and their potential significance to human health. **Comp. Rev. Food Sci. Food Safety** 7: 309-19.
- McClements, D. J. 2005. **Food Emulsions: Principles, Practice, and Techniques**. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton.
- Mehta, R. C., B. C. Thanoo and P. P. DeLuca. 1996. Peptide containing microspheres from low molecular weight and hydrophilic poly (D,L-lactide-co-glycolide). **J. Control. Release**. 41: 249- 257.
- Mehrnoush A., C. P. Tan, M. Hamed, N. Ab. Aziz and T. C. Ling. 2011. Optimisation of freeze drying conditions for purified serine protease from mango (*Mangifera indica* Cv. Chokanan) peel. **Food Chem**. 128: 158–164.
- Mujumdar, A.S. 1995. **Handbook of Industrial Drying**. Marcel Dekker, New York.
- Muschiolik, G., I. Scherza, P. Preissler, J. Weiss, A. Knoth and A. Fechner. 2006. **Multiple Emulsions-preparation and stability**. Available source: <http://iufost.edpscience.org>, March 20, 2012.
- Nakajima, H., S. Tadokoro, H. Hashiba, F. Ito, H. Furuya, T. Kabuki, M. Arai and S. Dosako. 2000. **Bacteriostatic and antibacterial agent containing mango kernel component**. U.S. patent 6, 063, 382.
- Nilsang, S., S. Lertsiri, M. Suphantharika and A. Assavanig. 2005. Optimization of enzymatic hydrolysis of fish soluble concentrate by commercial proteases. **J. Food Eng**. 70(4): 517-578.
- 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.

- Omotosho, J., T. Whateley, T. Law and A. Florence. 1986. The nature of the oil phase and the release of solutes from multiple (W/O/W) emulsions. **J. Pharm. Pharmacol.** 38: 865–870.
- O'Regan, J. and D. M. Mulvihill. 2010. Sodium caseinate–maltodextrin conjugate stabilized double emulsions: encapsulation and stability. **Food Res. Inter.** 43: 224–231.
- Peleg, M. and E. B. Bagley. 1983. **Physical Properties of Foods.** AVI Publishing Co., Westport.
- Puravankara, D., V. Boghra 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: 522-6.
- Rafati, H., A. G. A. Coombes, J. Adler, J. Holland and S. S. Davis. 1997. Protein-loaded PLGA microparticles for oral administration: formulation, structural and release Characteristics. **J. Control. Release.** 43: 89-102.
- Rao, P. S. and H. C. Srivastava. 1973. Tamarind. pp. 369-411. *In* R. L. Whistler, ed. **Industrial gums.** 2nd ed. Academic Press, New York.
- Rice-Evans, C. A., N. J. Miller and G. Paganga. 1996. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. **Free Radic. Biol. Med.** 20(7): 933-956.
- Robards, K., P. D. Prenzler, G. Tucker, P. Swatsitang and W. Glover. 1999. Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. **Food Chem.** 66: 401-436.

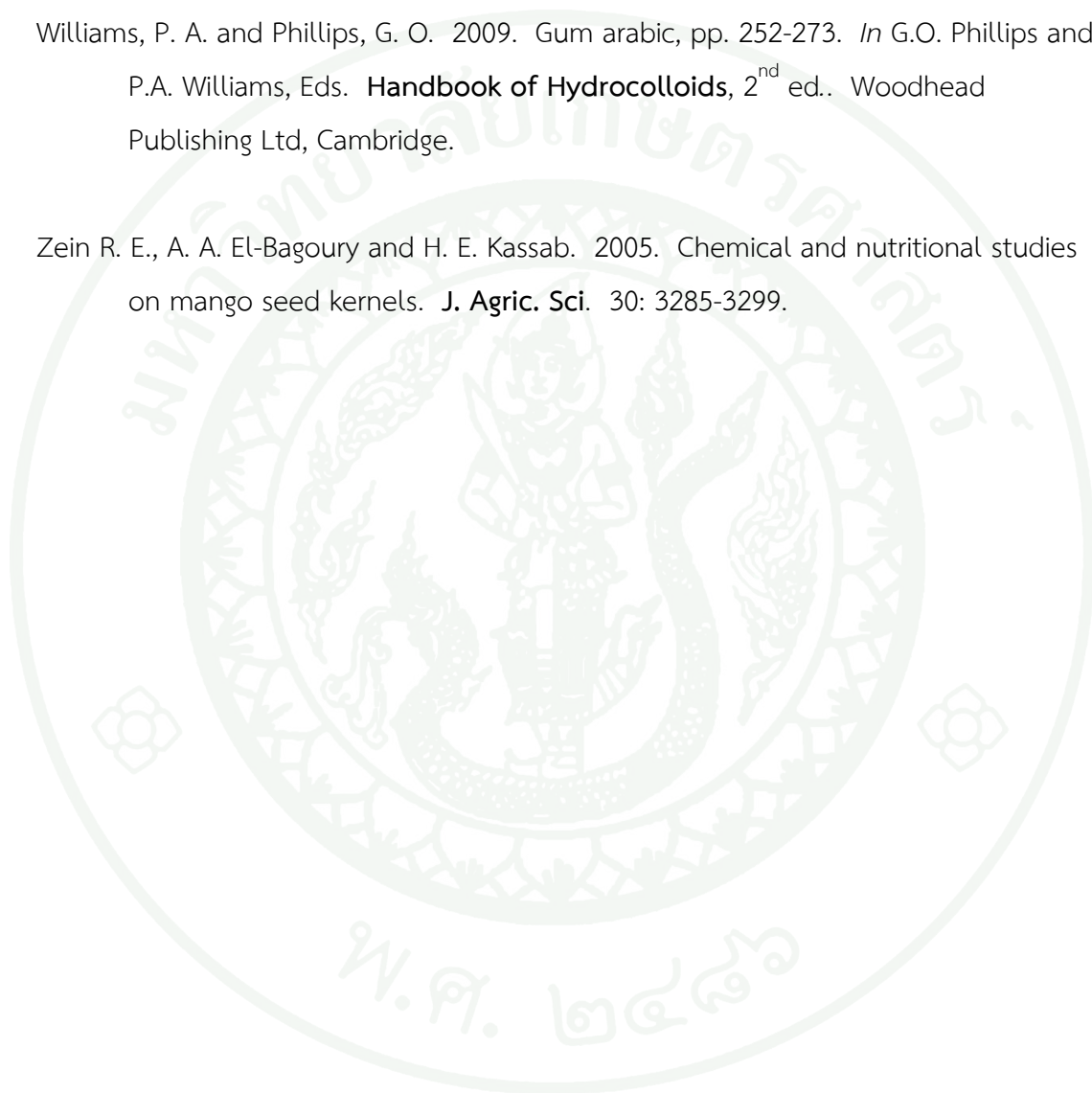
- Rodrigues, S. N., I. Fernandes, I. M. Martins, V. G. Mata, F. Barreiro and A. E. Rodrigues. 2008. Microencapsulation of Limonene for Textile Application. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47: 4142–4147.
- Rodríguez-Huezo, M. E., R. Pedroza-Islas, L. A. Prado-Barragan, C. I. Beristain, and E. J. Vernon-Carter. 2004. Microencapsulation by spray drying of multiple emulsions containing carotenoids. **J. Food Sci.** 69: E351–E359.
- Schlicher, E. J. A. M., N. S. Postma, J. Zuidema, H. Talsma and W. E. Hennink. 1997. Preparation and characterization of poly(D,L-lactic-co-glycolic acid) microspheres containing desferrioxamine. **Int. J. Pharm.** 153: 235-245.
- Shahidi, F. and M. Naczk. 1991. **Phenolics in Food and Nutraceuticals**. CRC Press, Florida.
- _____ and X. Q. Han. 1993. Encapsulation of food ingredients. **Crit Rev Food Sci Nutr.** 33: 501-47.
- Shu, B., W. Yu, Y. Zhao and X. Liu. 2006. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. **J. Food Eng.** 76: 664-669.
- Snowman, J. W. 1996. Lyophilization, pp. 275 – 299. *In* M.S. Verrall ed. **Downstream Processing of Natural Products**. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- St. Angelo, A. L. 1989. A Brief introduction to food emulsions and emulsifiers, pp. 1-8. *In* G. Charalambous and G. Doxastakis, eds. **Food Emulsifiers Chemistry, Technology, Functional Properties and Applications**. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Su, J., J. Flanagan., Y. Hemar and H. Singh. 2006. Synergistic effects of polyglycerol ester of polyricinoleic acid and sodium caseinate on the stabilisation of water-oil-water emulsions. **Food Hydrocolloids.** 20: 261–268.

- Sugiura, S., M. Nakajima, K. Yamamoto, S. Iwamoto, T. Oda, M. Satake and M. Seki. 2004. Preparation characteristics of water-in-oil-in-water multiple emulsions using microchannel emulsification. **J. Colloid Interface Sci.** 270: 221-228.
- 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.
- Van Arsdell, W. B., M. J. Copley and Jr. A. I. Morgan. 1973. **Food Dehydration: Drying Methods and Phenomena**, Vol. 1. AVI Pub. Co. Inc., Westport.
- Van der Graaf, S., C. G. P. H. Schroen and R. M. Boom. 2005. Preparation of double emulsion by membrane emulsification-a review. **J. Membrane Sci.** 251: 7-15.
- Vélez, G., M. A. Fernández, J. Muñoz, P. A. Williams and R. J. English. 2003. Role of hydrocolloids in the creaming of oil in water emulsions. **J. Agric. Food Chem.** 265-269.
- Wang, C. X. and Sh. L. Chen. 2005. Aromachology and its Application in the Textile Field. **Fibers Text. East. Eur.** 13: 41-54.
- Walstra, P. 1996. Dispersed systems: basic considerations, pp. 95-155. *In* O.R. Fennema, ed. **Food Chemistry**. 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Wangsakan, A., P. Chinachoti, and D. J. McClements. 2001. Maltodextrin-anionic surfactant interactions: Isothermal titration calorimetry and surface tension study. **J. Agric. Food Chem.** 49: 5039-5045.

Wangsakan, A., P. Chinachoti, and D. J. McClements. 2003. Effect of different dextrose equivalent of maltodextrin on the interactions with anionic surfactant in an isothermal titration calorimetry study. **J. Agric. Food Chem.** 51: 7810–7814.

Williams, P. A. and Phillips, G. O. 2009. Gum arabic, pp. 252-273. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, Eds. **Handbook of Hydrocolloids**, 2nd ed.. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.

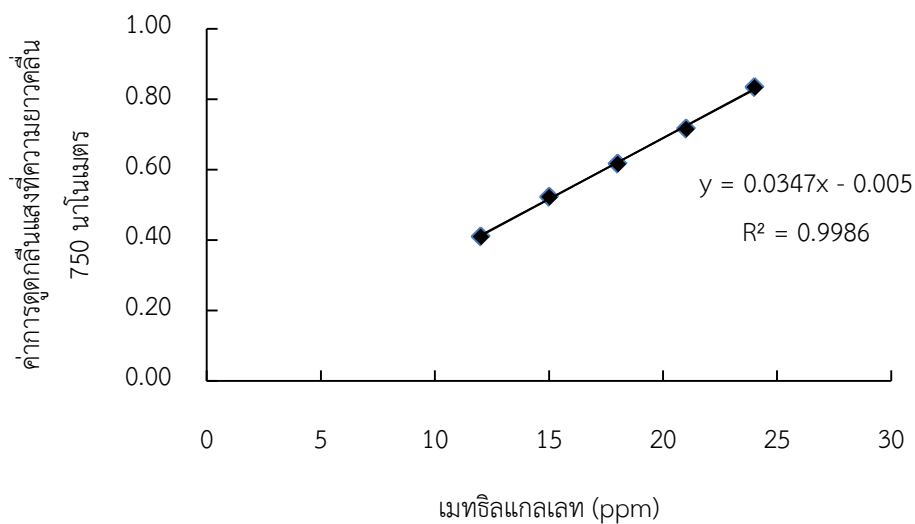
Zein R. E., A. A. El-Bagoury and H. E. Kassab. 2005. Chemical and nutritional studies on mango seed kernels. **J. Agric. Sci.** 30: 3285-3299.





ภาคผนวก





ภาพผนวกที่ ก1 กราฟมาตรฐานของเมทิลแกลเลทสำหรับการตรวจสอบสมบัติต้านออกซิเดชันโดยเทคนิค total phenolic assay



แบบสอบถาม

เรียน ผู้ตอบแบบสอบถาม

เรื่อง การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

คำอธิบาย แบบสอบถามชุดนี้เป็นส่วนหนึ่งในวิทยานิพนธ์ของนางสาวธนวรรณ วันทอง นิสิตปริญญาโท สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง ผู้วิจัยจึงใคร่ขอความร่วมมือจากท่านกรุณาตอบแบบสอบถาม ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ท่านให้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยนี้ และไม่มีผลกระทบใดๆต่อท่านทั้งสิ้น

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง
ผู้วิจัย

คำแนะนำ: โปรดทำเครื่องหมาย ลงใน ตามคำตอบที่ตรงกับความคิดเห็นของท่าน
ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

1. เพศ

<input type="checkbox"/> 1. ชาย	<input type="checkbox"/> 2. หญิง
---------------------------------	----------------------------------
2. อายุ

<input type="checkbox"/> 1. น้อยกว่า 15 ปี	<input type="checkbox"/> 2. 15 – 24 ปี
<input type="checkbox"/> 3. 25 – 34 ปี	<input type="checkbox"/> 4. 35 – 44 ปี
<input type="checkbox"/> 5. 45 ปีขึ้นไป	
3. ระดับการศึกษาสูงสุดที่ได้รับ

<input type="checkbox"/> 1. ต่ำกว่าปริญญาตรี
<input type="checkbox"/> 2. ปริญญาตรี
<input type="checkbox"/> 3. สูงกว่าปริญญาตรี
4. อาชีพ

<input type="checkbox"/> 1. นักเรียน / นิสิต / นักศึกษา	<input type="checkbox"/> 2. ธุรกิจส่วนตัว / ค้าขาย
<input type="checkbox"/> 3. ข้าราชการ / รัฐวิสาหกิจ	<input type="checkbox"/> 4. พนักงานบริษัทเอกชน
<input type="checkbox"/> 5. แม่บ้าน	<input type="checkbox"/> 6. อื่นๆ (โปรดระบุ.....)
5. รายได้ต่อเดือน

<input type="checkbox"/> 1. น้อยกว่า 15,000 บาท
<input type="checkbox"/> 2. 15,001 – 30,000 บาท
<input type="checkbox"/> 3. มากกว่า 30,001 บาท

ส่วนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับความชอบและการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลท สารสกัดเมล็ดมะม่วง

6. กรุณาให้ **คะแนนความชอบ** ด้านต่างๆ ให้ตรงกับความชอบที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง (กรุณาให้เครื่องหมาย ✓ ในช่องว่างให้ตรงกับความรู้สึกของท่าน)

คุณลักษณะ	ไม่ชอบมากที่สุด	ไม่ชอบมาก	ไม่ชอบปานกลาง	ไม่ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ชอบเล็กน้อย	ชอบปานกลาง	ชอบมาก	ชอบมากที่สุด
1.ลักษณะปรากฏ									
2.ความหนืดของโลชั่น									
3.การซึมซาบเข้าสู่ผิว									
4.ความชุ่มชื้นผิวภายหลังการใช้									
5.ความชอบโดยรวม									

7. ท่านยอมรับผลิตภัณฑ์นี้หรือไม่

ยอมรับ

ไม่ยอมรับ เพราะ.....

ส่วนที่ 3 กรุณาอ่านคำอธิบาย ดังต่อไปนี้

คำอธิบาย: ผลิตภัณฑ์โลชั่นที่ท่านทดสอบนี้เป็นผลิตภัณฑ์โลชั่นเพื่อความกระจ่างใสของผิวหนัง ที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติ และมีฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสซึ่งเป็นสาเหตุของความหมองคล้ำของผิวหนัง นอกจากนี้ยังให้ความชุ่มชื้นแก่ผิว ช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากผิว และยังเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ ที่ช่วยยับยั้งการเสื่อมสภาพและปกป้องเซลล์ผิว

8. หลังจากที่ท่านได้รับทราบข้อมูลที่อธิบายด้านบนแล้ว ท่านยอมรับผลิตภัณฑ์นี้หรือไม่

ยอมรับ

ไม่ยอมรับ เพราะ.....

9. ถ้าผลิตภัณฑ์นี้มีการผลิตออกมาในระดับอุตสาหกรรมเพื่อจำหน่าย โดยบรรจุในขวดป๋ม ปริมาณ 250 มิลลิลิตรต่อขวด และมีความปลอดภัย โดยได้รับรองจากองค์การอาหารและยา ราคาขวดละ 359 บาท ท่านจะซื้อผลิตภัณฑ์นี้หรือไม่

ซื้

ไม่ซื้ เพราะ.....

ข้อเสนอแนะ

ขอขอบพระคุณในความร่วมมือ



การเปรียบเทียบการยอมรับก่อนและหลังการได้รับข้อมูลประโยชน์
ของผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วง

การยอมรับของผู้บริโภค

ตารางผนวกที่ ข1 การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของผงเอนแคปซูเลทสารสกัดเมล็ดมะม่วงก่อนและหลังได้รับข้อมูลประโยชน์ของผลิตภัณฑ์

ก่อนได้รับข้อมูล	หลังได้รับข้อมูล		รวม
	ยอมรับ	ไม่ยอมรับ	
ยอมรับ	76	0	76
ไม่ยอมรับ	1	3	4
รวม	77	3	80

วิธีการคำนวณ McNemar test

$$\text{จาก McNemar Chi-square} = \frac{(|\pi_{21} - \pi_{12}| - 1)^2}{(\pi_{21} + \pi_{12})}$$

โดยที่ π_{12} = จำนวนผู้บริโภคที่ยอมรับผลิตภัณฑ์ก่อนให้ข้อมูลและไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์หลังจากได้รับข้อมูล (0 คน)

π_{21} = จำนวนผู้บริโภคที่ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ก่อนให้ข้อมูลและยอมรับผลิตภัณฑ์หลังจากได้รับข้อมูล (1 คน)

แทนค่าในสมการ McNemar Chi-square calculated (1) < χ^2 table $df=1, \alpha=0.05$ (3.84)
ดังนั้น ผู้บริโภคยอมรับผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังให้ข้อมูล ไม่แตกต่างกัน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวธนวรรณ วันทอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 กรกฎาคม พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	จังหวัด สุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(วิทยาศาสตร์) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (พ.ศ. 2552)
ผลงานทางวิชาการ	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 5 th Tropical & Sub-Tropical Crops Research Symposium on July 21-22, 2011, Bangkok, Thailand. Wanthong T., T. Harnsilawat and P. Maisuthisakul. 2012. Using UV-vis spectrum and apparent viscosity to investigate the interaction between polysaccharides. Presented at Food Innovation Asia Conference 2012 on June 14-15, 2012, BITEC, Bangkok, Thailand. Harnsilawat T., T. Wanthong, P. Maisuthisakul and A. Jangchud. 2012. Physical Characterizations of Encapsulated Mango Seed Kernel Extract Powder Prepared by Spray Drying and Freeze Drying. Presented at International Seminar on Food and Agricultural Science 2012 on September 4-6, 2012, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553