



# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอย

Chulalongkorn University

Pillar of the Kingdom

นางสาวมาลินี แก้วปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENCAPSULATION OF LEMONGRASS OIL BY SPRAY DRYING

## Chulalongkorn University

Pillar of the Kingdom

Miss Malinee Kaewpanha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University



# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอย

โดย

นางสาวมาลินี แก้วปัญญา

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวัช

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. อรุชา รักษัตานนท์ชัย)



# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาลินี แก้วปัญญา : การกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอย. (ENCAPSULATION

OF LEMONGRASS OIL BY SPRAY DRYING) อ. ที่ปริกษานิพนธ์หลัก : อ.ดร.

อภิรักษ์ สุทธิธารวัช, อ. ที่ปริกษานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล, 96

หน้า.

ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรที่มีการนำไปใช้ประกอบอาหารไทยกันอย่างมากโดยเฉพาะอาหารประเภทต้มยำ ดังนั้นจึงมีการผลิตเครื่องต้มยำออกมาในรูปผงปรุงรสสำเร็จรูป ซึ่งจะประสบปัญหาของการนำไปใช้งานจริงเนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของสารระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้กลิ่นและรสชาติแตกต่างไปจากรสต้มยำดั้งเดิม ในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ให้อยู่ในรูปของผงอนุภาคโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำมันตะไคร้ ชนิดสารห่อหุ้ม ขนาดอิมัลชันในสายปั่น และอุณหภูมิอากาศเข้า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ สมบัติของผงอนุภาคและความคงตัวของผงอนุภาค โดยประสิทธิภาพของกระบวนการกักเก็บจะประเมินจากการคงอยู่ของซีทรอลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำมันตะไคร้สามารถกักเก็บให้อยู่ในรูปของผงอนุภาคได้ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้แป้งดัดแปร และกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) เป็นสารห่อหุ้ม ลักษณะของผงอนุภาคที่ได้จะเป็นทรงกลม กลวง พื้นผิวเป็นหลุมโดยรอบ ขนาดประมาณ 10-40 ไมโครเมตร การใช้ปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่ำร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด จะทำให้การคงอยู่ของซีทรอลหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยยังคงมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 เมื่อใช้แป้งดัดแปรเป็นสารห่อหุ้ม แต่สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตรินจะทำให้ความคงตัวของผงอนุภาคสูงกว่าแป้งดัดแปร และในส่วนผลของอุณหภูมิอากาศเข้านั้นพบว่าไม่มีผลต่อค่าการคงอยู่ของซีทรอล นอกจากนี้ผลของขนาดอิมัลชันในสายปั่นก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าการคงอยู่ของซีทรอลโดยอิมัลชันขนาดเล็กจะให้ค่าการคงอยู่ของซีทรอลสูงกว่าอิมัลชันขนาดใหญ่

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..... 2552..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิพนธ์ร่วม.....





# จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย<sup>๙</sup>

## 5070407721: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ENCAPSULATION/ LEMONGRASS OIL/ SPRAY DRYING

MALINEE KAEWPANHA: ENCAPSULATION OF LEMONGRASS OIL BY SPRAY DRYING, THESIS ADVISOR: APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL, D.Eng., 96 pp.

Herbal lemongrass is widely used in Thai cooking and is important ingredient in Thai traditional sour soup, Tom Yum. At present, some commercial instant sour soup pastes exhibit flavor loss during their processing. In this study, lemongrass oil was of interest for finding a suitable way to keep the flavor as fresh products by encapsulation technique. The encapsulation of lemongrass oil by spray drying was investigated with respect to effects of oil loading, emulsion size and inlet air temperature. The effects of various process parameters on the emulsion size and encapsulation efficiency during spray drying with an aim to obtain the high retention of flavor after drying. Because citral is recognized as the major chemical compound in the extracted lemongrass oil it was used as the indicator compounds to evaluate the encapsulation efficiency. The results showed that lemongrass oil microcapsules were successfully produced by spray drying, using modified starch and gum arabic with maltodextrin (1: 3). The encapsulated lemongrass oil presented spherical shape with smooth and extensive dented surface. The mean particles size was 10-40  $\mu\text{m}$ . Spray drying at below 40 wt% oil loading with the modified starch could provide higher retention of citral about 100%. However, gum arabic with maltodextrin (1: 3) showed higher stability of encapsulated lemongrass oil than modified starch. The effect of inlet air temperature on the citral retention after spray drying was insignificant. However, the emulsion size could affect a significant on the citral retention. The smaller emulsion size could also provide the higher retention of citral.

Department: .....Chemical Engineering.....Student's signature.....

Field of Study: .....Chemical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic Year: .....2009.....Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรพ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ Prof. Takeshi Furuta และ Prof. Hidefumi Yoshii ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น ขอขอบคุณ ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบารุงรัตน์ ประธานกรรมการ รศ.ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ และ ดร. อรุชา รัชชตานนท์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนตลอดมา

ขอขอบพระคุณสำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ที่สนับสนุนเงินวิจัย และขอขอบคุณองค์การสนับสนุนนักศึกษาแห่งประเทศไทย (JASSO) ที่สนับสนุนทุนแลกเปลี่ยนในการทำวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 6 เดือน และบริษัทสยามมอดิฟายด์สตาร์ช จำกัด ที่เอื้อเฟื้อแบ่งตัดแปรเพื่อใช้เป็นสารหล่อหุ้มในการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ให้อยู่ในรูปผงอนุภาค

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

# สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....   | ฅ  |
| สารบัญภาพ.....   | ญ  |
| บทที่  |    |
| 1 <b>บทนำ</b> .....  | 1  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                              | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                     | 2  |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....  | 2  |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                   | 3  |
| 2 <b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....                         | 4  |
| 2.1 ตะไคร้.....  | 4  |
| 2.2 ชีทราล.....  | 6  |
| 2.3 เทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน.....                                      | 8  |
| 2.4 หลักการเลือกสารห่อหุ้ม.....                                      | 9  |
| 2.5 ชนิดของสารห่อหุ้ม.....   | 10 |
| 2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....                                    | 13 |
| 2.6.1 ข้อดีของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....                          | 18 |
| 2.6.2 ข้อเสียของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....                        | 18 |
| 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการกักเก็บกลิ่นด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย..... | 19 |
| 2.7.1 ความหนืดของอิมัลชัน.....                                       | 19 |
| 2.7.2 ปริมาณของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อน.....                         | 19 |
| 2.7.3 ขนาดของอิมัลชันในสายป้อน.....                                  | 20 |
| 2.7.4 อุณหภูมิของอิมัลชันในสายป้อน.....                              | 20 |
| 2.7.5 อุณหภูมิขาเข้าของอากาศ.....                                    | 21 |
| 2.7.6 อุณหภูมิอากาศขาออก.....  | 22 |

| บทที่   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.8 การศึกษาความคงตัวของผงแห้ง.....                                       | 23        |
| 2.9 ปัจจัยที่มีต่อความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลั่น.....                       | 26        |
| 2.9.1 อัตราส่วนระหว่างปริมาณกลั่นรสถต่อสารห่อหุ้ม.....                    | 26        |
| 2.9.2 ขนาดอิมัลชันในสายป้อน.....  | 26        |
| 2.9.3 ชนิดของสารห่อหุ้ม.....  | 26        |
| <b>3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....   | 28        |
| 3.2 วิธีการทดลอง.....   | 28        |
| 3.2.1 การหาปริมาณซีทรอลในน้ำมันตะไคร้.....                                | 28        |
| 3.2.2 การเตรียมอิมัลชันของน้ำมันตะไคร้.....                               | 29        |
| 3.2.3 การเตรียมผงแห้งน้ำมันตะไคร้.....                                    | 31        |
| 3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ.....  | 32        |
| 3.3.1 การวัดขนาดของอิมัลชัน.....  | 32        |
| 3.3.2 การวัดขนาดอนุภาคผงแห้ง.....   | 32        |
| 3.3.3 โครงสร้างของผงแห้ง.....   | 33        |
| 3.3.4 ความชื้นในผงแห้ง.....   | 34        |
| 3.3.5 ค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลั่น.....                                  | 34        |
| 3.3.6 ค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว.....                                   | 35        |
| 3.3.7 ความคงตัวของผงแห้ง.....   | 36        |
| <b>4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>                             | <b>37</b> |
| 4.1 การศึกษาปริมาณและองค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้.....                        | 37        |
| 4.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดสารห่อหุ้ม.....                 | 38        |
| 4.2.1 ผลต่อขนาดอิมัลชันและการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน.....                | 38        |
| 4.2.2 ผลต่อขนาดอนุภาคและความชื้นของผงแห้ง.....                            | 42        |
| 4.2.3 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....                                  | 42        |
| 4.2.4 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลั่นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว..... | 49        |
| 4.2.5 ผลต่อความคงตัวของผลแห้ง.....  | 52        |
| 4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า.....                                 | 55        |
| 4.3.1 ผลต่อขนาดอนุภาคและความชื้นของผงแห้ง.....                            | 55        |

| บทที่   | หน้า      |
|---|-----------|
| 4.3.2 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....                                  | 56        |
| 4.3.3 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว..... | 56        |
| 4.3.4 ผลต่อความคงตัวของผงแห้ง.....  | 61        |
| 4.4 การศึกษาผลของขนาดอิมัลชันในสายป้อน.....                               | 62        |
| 4.4.1 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว..... | 62        |
| 4.4.2 ผลต่อค่าความคงตัวของผงแห้ง.....                                     | 62        |
| <b>5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>                                | <b>68</b> |
| รายการอ้างอิง.....  | 70        |
| ภาคผนวก.....  | 74        |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 96        |

## สารบัญตาราง

| ตาราง |   | หน้า |
|-------|---|------|
| 4.1   | ปริมาณและองค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS.....  | 37   |
| 4.2   | ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดของสารห่อหุ้ม.....                       | 53   |
| 4.3   | ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า.....  | 61   |
| 4.4   | ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอิมัลชัน.....                            | 65   |
| ก-1   | ผลของน้ำมันตะไคร้ที่ได้จากเครื่อง GC/MS.....  | 76   |
| ก-2   | ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทราลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทราล (ผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม).....          | 80   |
| ก-3   | ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทราลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทราล (ผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม).....                               | 81   |
| ก-4   | ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทราลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทราล (ผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า).....  | 82   |
| ก-5   | ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทราลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทราล (ผลของขนาดอิมัลชันเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด)..... | 83   |
| ก-6   | ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทราลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทราล (ผลของขนาดอิมัลชันเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด)..... | 84   |
| ข-1   | ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม.....  | 86   |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| ข-2 | ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณ<br>น้ำมันตะไคร้โดยใช้กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม.....  | 87 |
| ข-3 | ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า.....  | 88 |
| ข-4 | ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณ<br>น้ำมันตะไคร้และขนาดอิมัลชัน.....  | 89 |
| ข-5 | ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการ<br>ปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมัน<br>ตะไคร้โดยใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม.....                      | 91 |
| ข-6 | ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการ<br>ปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมัน<br>ตะไคร้โดยใช้กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม..... | 92 |
| ข-7 | ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n)<br>จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า.....  | 93 |
| ข-8 | ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n)<br>จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และ<br>ขนาดอิมัลชัน.....                                  | 94 |

## สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ลักษณะลำต้นของตะไคร้.....   | 4    |
| 2.2 สูตรโครงสร้างขององค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้.....   | 5    |
| 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซีทรอล.....  | 7    |
| 2.4 สูตรโครงสร้างของแคปซูล.....   | 10   |
| 2.5 โครงสร้างของกัมอะราบิก.....   | 11   |
| 2.6 ลักษณะของมอลโตเดกซ์ตริน.....  | 12   |
| 2.7 สูตรโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตริน.....   | 12   |
| 2.8 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....  | 13   |
| 2.9 ลักษณะของ Rotary Atomizer.....  | 14   |
| 2.10 ลักษณะของ Pressure Nozzle.....   | 15   |
| 2.11 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....   | 16   |
| 2.12 กลไกการระเหยและเกิดเป็นผงอนุภาคด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....   | 17   |
| 3.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปคโตรมิเตอร์.....  | 29   |
| 3.2 เครื่องไฮโมจีโนเซอร์.....   | 30   |
| 3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....   | 30   |
| 3.4 เครื่อง Laser diffraction particle size analyzer.....   | 32   |
| 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....  | 33   |
| 3.6 เครื่อง Magnetron sputter.....  | 33   |
| 3.7 เครื่อง Karl Fischer.....   | 34   |
| 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....  | 35   |
| 4.1 ลักษณะการเกิดอิมัลชันชนิด Oil in water.....   | 39   |
| 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อขนาดของ<br>หยดน้ำมันในอิมัลชัน และในผงแห้ง เมื่อเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิด..... | 40   |
| 4.3 กราฟแสดงผลปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน<br>เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดแคปซูล.....                              | 41   |
| 4.4 กราฟแสดงผลปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน<br>เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน.....         | 41   |



## ภาพประกอบ

## หน้า

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.5  | กลไกการเกิดเป็นผงอนุภาคจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....  | 43 |
| 4.6  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอนุภาคผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด .....                     | 44 |
| 4.7  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และความชื้นของผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด .....                    | 44 |
| 4.8  | โครงสร้างภายนอกผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารหล่อหุ้ม .....   | 45 |
| 4.9  | โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารหล่อหุ้ม .....  | 46 |
| 4.10 | โครงสร้างภายนอกผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน .....   | 47 |
| 4.11 | โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน .....  | 48 |
| 4.12 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด .....           | 50 |
| 4.13 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด .....         | 50 |
| 4.14 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการกักเก็บของซีทรอลในผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด ..... | 51 |
| 4.15 | แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้ง .....  | 53 |
| 4.16 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อใช้สารหล่อหุ้มชนิดแคปซูล .....                              | 54 |
| 4.17 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อใช้สารหล่อหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน .....         | 54 |
| 4.18 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขนาดอนุภาค .....  | 57 |
| 4.19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและความชื้นในผงแห้ง .....  | 57 |
| 4.20 | โครงสร้างภายนอกผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารหล่อหุ้ม .....   | 58 |
| 4.21 | โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารหล่อหุ้ม .....  | 59 |
| 4.22 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น .....  | 60 |
| 4.23 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศขาเข้า.....                         | 60 |
| 4.24 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น .....   | 63 |

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว .....  | 63   |
| 4.26 โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20<br>โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและแคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม.....     | 64   |
| 4.27 โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 40<br>โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและแคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม.....     | 64   |
| 4.28 แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้งเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....                         | 66   |
| 4.29 แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้งเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....                         | 66   |
| 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อปริมาณน้ำมัน<br>ตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด..... | 67   |
| 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อปริมาณน้ำมัน<br>ตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด..... | 67   |
| ก-1 โครมาโทแกรมของน้ำมันตะไคร้จากเครื่อง GC/MS .....   | 75   |
| ก-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้<br>แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม .....  | 77   |
| ก-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้<br>สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน .....                           | 77   |
| ก-4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อ<br>มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศขาเข้า .....                                    | 78   |
| ข-1 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อใช้<br>สารห่อหุ้มชนิดแคปซูล.....  | 86   |
| ข-2 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อใช้<br>สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน.....                       | 87   |
| ข-3 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation.....   | 88   |
| ข-4 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อปริมาณ<br>น้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....        | 90   |
| ข-5 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อปริมาณ<br>น้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....        | 90   |

ภาพประกอบ

หน้า

ข-6 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อใช้  
สารห่อหุ้มชนิดแคปซูล.....91

ข-7 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อใช้  
สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน.....92

ข-8 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation.....93

ข-9 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อปริมาณ  
น้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....95

ข-10 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อปริมาณ  
น้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด.....95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมและมีสรรพคุณทางยามากมาย อาทิเช่น บำรุงธาตุ แก้โรคทางเดินปัสสาวะ ขับลมในลำไส้ แก้โรคหืด บำรุงสมอง เป็นต้น ซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายในรูปของสารสกัดและลำต้น ในส่วนของสารสกัดจะใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์น้ำหอม และเครื่องสำอางค์ นอกจากนี้ในส่วนของเหง้าและลำต้นก็ยังใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารประเภทตั๋มยาเนื่องจากให้กลิ่นหอมจึงช่วยดับกลิ่นคาวของเนื้อสัตว์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำการผลิตเครื่องตั๋มยาออกมาในรูปผงปรุงรสสำเร็จรูป ซึ่งจะประสบปัญหาในการนำไปใช้งานจริงเนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของสารระหว่างกระบวนการผลิต ในกรณีของน้ำมันตะไคร้ซึ่งมีซีทรอลเป็นองค์ประกอบหลัก จะเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วในสภาวะกรดหรือในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะเป็นผลให้กลิ่นของน้ำมันตะไคร้แตกต่างจากตะไคร้สดเพราะเกิดสารประกอบใหม่ที่ไปทำให้กลิ่นเปลี่ยนไป

งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอวิธีการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ให้อยู่ในรูปผงอนุภาคเพื่อเป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำมันตะไคร้ และยืดอายุการเก็บรักษา โดยอาศัยเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation) ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่ของเหลวหรืออนุภาคถูกห่อหุ้มให้อยู่ในรูปของแคปซูลด้วยพอลิเมอร์เป็นชั้นบางๆ เกิดเป็นไมโครแคปซูล ซึ่งชั้นพอลิเมอร์บางๆ นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันหรือปลดปล่อยสารสำคัญภายในออกมาเมื่อเราต้องการ อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร โดยการแปรรูปกลิ่นที่สกัดจากสมุนไพรให้อยู่ในรูปของแคปซูลขนาดเล็ก ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการเอนแคปซูเลชันคือ เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) ซึ่งเป็นเทคนิคสำคัญที่นิยมใช้กันมากในการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชัน และของเหลวชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมทางเคมีและอาหาร โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำมันตะไคร้ อุณหภูมิอากาศเข้า ขนาดอิมัลชัน และชนิดของสารห่อหุ้มที่มีต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บ รวมถึงความคงตัวของผงอนุภาคบรรจุกลิ่นที่ได้ ซึ่งจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงแห้งของน้ำมันตะไคร้ที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ทั้งใน

ประเทศไทยและต่างประเทศ รวมทั้งองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการต่อยอดสำหรับการกักเก็บสารสำคัญชนิดอื่นจากเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชันโดยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย

## 1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคกระบวนการกักเก็บ รวมทั้งปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาชนิด และปริมาณสารห่อหุ้มที่ใช้กักเก็บน้ำมันตะไคร้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี และกายภาพ ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ และความคงตัวของผงแห้งที่ผลิตได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)
- 1.3.2 เตรียมอิมัลชันน้ำมันตะไคร้โดยศึกษาปริมาณน้ำมันในอิมัลชัน และชนิดของสารห่อหุ้มที่มีผลต่อขนาดอิมัลชัน ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง
  - แป้งดัดแปร (Capsul)
  - กัมอะราบิก (Gum arabic) ผสมมอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) ในอัตราส่วน 1: 3
- 1.3.3 วิเคราะห์ขนาดของอิมัลชันด้วยเครื่อง Laser scattering particle size analyzer
- 1.3.4 เตรียมผงแห้งน้ำมันตะไคร้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซีทรอล
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ ดังนี้
  - ขนาดอนุภาคผงแห้ง
  - โครงสร้างผงแห้ง
  - ค่าร้อยละการคงอยู่
  - ค่าการคงอยู่ที่พื้นผิว
  - ความชื้น
  - ความคงตัว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ : อุตสาหกรรมการผลิตผงปรุงรสสำเร็จรูปได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ยืดอายุการเก็บรักษา และมีการยอมรับจากผู้บริโภคมากขึ้น จากการผลิตผงแห้งของน้ำมันตะไคร้เป็นกระบวนการต้นแบบ
- 1.4.2 ด้านพัฒนาเทคโนโลยี : อุตสาหกรรมอาหารได้เรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ในการใช้กักเก็บน้ำมันหอมระเหย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่มีคุณภาพและเหมือนต้นตำรับมากขึ้น
- 1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ : เป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสสำเร็จรูป ในตลาดสินค้าส่งออกให้กับประเทศ
- 1.4.4 ด้านวิชาการ : สามารถนำกระบวนการกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย ไปประยุกต์ใช้ในการกักเก็บสารสกัดชนิดอื่นเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับการกักเก็บสารนั้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตะไคร้

ตะไคร้ (Lemongrass) เป็นพืชในวงศ์ Gramineae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cymbopogon citratus* stapf จัดเป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้าขึ้นอยู่รวมกันเป็นกอ ความสูงประมาณ 1 เมตร และเป็นพรรณไม้ที่มีอายุหลายปี โดยลักษณะลำต้นเป็นรูปทรงกระบอกตั้งตรงมีข้อและปล้องสั้น ซึ่งตามปล้องจะมีใบปกคลุมอยู่ ส่วนใบจะมีลักษณะเป็นใบเดี่ยวเรียวยาว ปลายใบแหลม ผิวใบจะสากมือทั้งสองด้าน ก้านใบสีเขียวหนวและขอบใบมีขนขึ้นอยู่เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรที่มีประโยชน์ทั้งในด้านการประกอบอาหารและมีสรรพคุณทางยา ซึ่งในการประกอบอาหารจะนำส่วนของเหง้าและลำต้นมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารที่สำคัญหลายชนิด เช่น ต้มยำ เนื่องจากเป็นพืชที่ให้กลิ่นหอมจึงสามารถช่วยดับกลิ่นคาวจากเนื้อสัตว์ ในด้านสรรพคุณทาง ส่วนที่สามารถนำมาใช้เป็นยาได้แก่ ใบ ต้น เหง้า หรือทั้งต้น ซึ่งในแต่ละส่วนมีสรรพคุณที่แตกต่างกันไปดังนี้

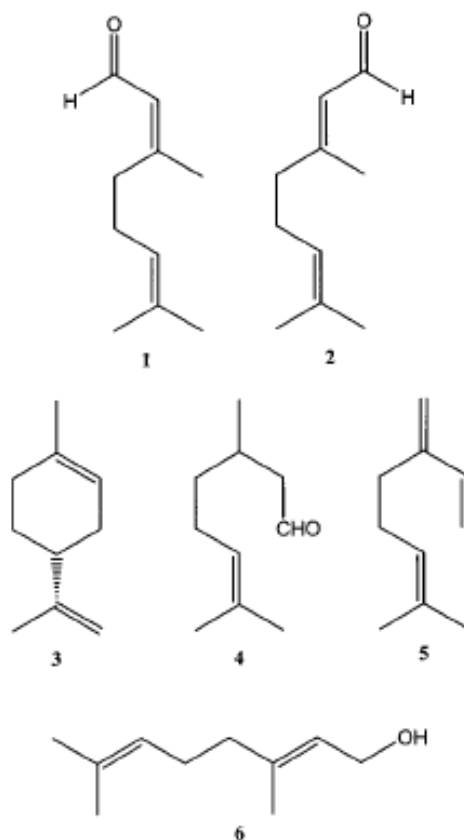
- ใบ ใช้เป็นยาลดความดันโลหิต แก้ไข้
- ต้น ใช้เป็นยาขับลม แก้โรคทางเดินปัสสาวะ แก้เนื้องอก ตับกลั่นคาว เจริญอาหาร
- เหง้า ใช้รักษาโรคเบื่ออาหาร บำรุงไฟธาตุ แก้กษัย ขับลมในลำไส้ แก้ปัสสาวะขัด แก้เนื้องอก
- ทั้งต้น ใช้เป็นยารักษาโรคหืด แก้ปวดท้อง ขับปัสสาวะ บำรุงธาตุ ขับเหงื่อ



รูปที่ 2.1 ลักษณะลำต้นของตะไคร้

ตะไคร้ นอกจากจะมีการใช้งานในรูปของลำต้นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีการนำน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่สกัดได้จากส่วนของเหง้าและกาบใบ มาใช้ประโยชน์ในอีกหลายด้าน เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์และเครื่องหอมต่าง ๆ หรือนำไปผสมใช้ในการผลิตยาฆ่าแมลงหรือป้องกันยุง สารสำคัญที่พบในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ได้แก่ เนรล (Neral) เจราเนียล (Geranial) ลิโมนีน (Limonene) เจอรานีโอล (Geraniol) ซิโตรเนลลอล (Citronellol) และเมอริซีน (*α*-myrcene) ซึ่งสารสำคัญมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.2 [Schaneberg และคณะ (2002)] และมีประโยชน์ดังนี้

1. มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อรา ซึ่งทำให้เกิดโรคพืชหลายชนิดในหลอดทดลอง
2. สารเคมีในน้ำมันหอมระเหย คือ เนอรัล เจราเนียล ซิโตรเนลลอล และ เจอรานีโอล มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย



**รูปที่ 2.2** สูตรโครงสร้างขององค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้ (1: neral, 2: geranial, 3: limonene, 4: citronellal, 5: *α*-myrcene, 6: geraniol)



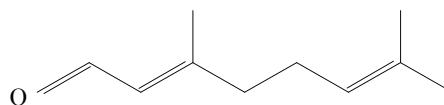
## 2.2 ซิทราล

ซิทรัล (Citral) เป็นสารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ (Terpenoid) พบในน้ำมันหอมระเหยของพืชหลายชนิด เช่น มะนาว ส้ม ตะไคร้ และเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้ ซิทราลประกอบด้วย 2 ไอโซเมอร์ได้แก่ เจราเนียล (Geranial) หรือซิทรัลเอ (Citral A) เป็นทรานส์ไอโซเมอร์ (trans-isomer) และเนรัล (Neral) หรือซิทรัลบี (Citral B) เป็นซิสไอโซเมอร์ ซึ่งมีสมบัติทั่วไปดังนี้ [WIKIPIDIA The free Encyclopedia. [Citral](#) (online)]

ชื่อทางเคมี : 3,7-dimethyl-2,6-octadienal

สูตรโมเลกุล :  $C_{10}H_{16}O$

สูตรโครงสร้าง :



น้ำหนักโมเลกุล : 152.24 g/mol

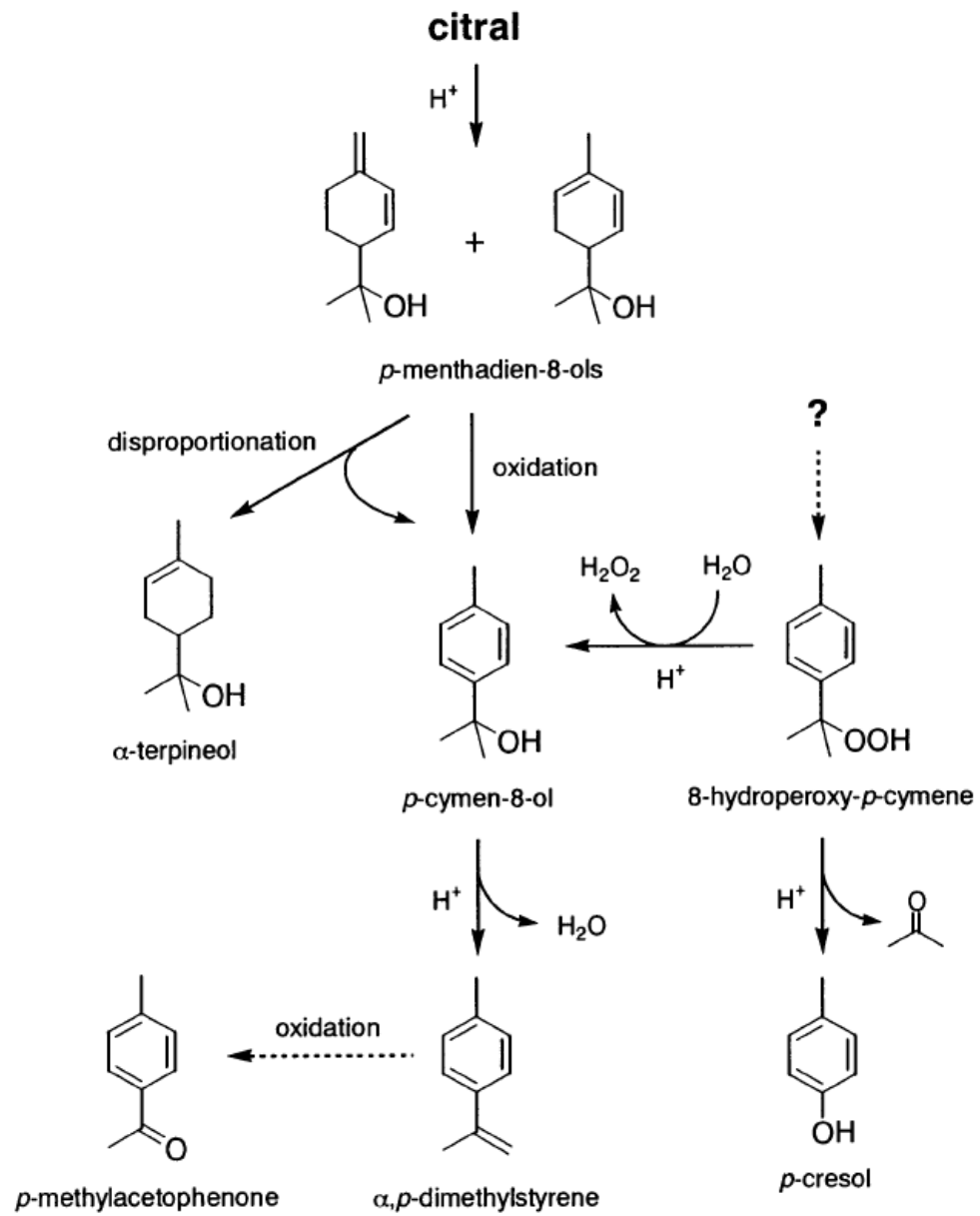
ความหนาแน่น (25 °C) : 0.893 g/cm<sup>3</sup>

Refractive index : 1.486-1.490

อุณหภูมิจุดเดือด : 229 °C (1 atm)

ความสามารถการละลาย : Practically insoluble

นอกจากนี้ซิทรัลยังมีคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial) และขับไล่แมลง อีกทั้งยังเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วิตามินเออีกด้วย แต่ซิทรัลจะเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วในสภาวะกรดหรือในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะเป็นผลให้กลิ่นของน้ำมันตะไคร้แตกต่างจากตะไคร้สดเพราะเกิดสารประกอบใหม่ที่ทำให้กลิ่นเปลี่ยนไป [Darinka และคณะ (2007)] ซึ่งสารประกอบหลักที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซิทรัลคือ p-cresol และ p-methylacetophenone ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซิทรัล [Toshino และคณะ (2004)]

### 2.3 เทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชัน (Encapsulation)

เทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชันเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการกักเก็บสารที่ไม่เสถียรในสภาวะปกติ หรือใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยของสารที่ต้องการ เช่นในอุตสาหกรรมอาหาร กลิ่นจัดว่าเป็น ลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารและเป็นแรงจูงใจต่อผู้บริโภค ดังนั้นการรักษาไว้ซึ่งกลิ่นรส ของอาหารจึงจัดได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็น อีกทั้งในอุตสาหกรรมการแพทย์ความสามารถในการออกฤทธิ์ ของยารักษาโรคถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษา เพราะโรคบางชนิดก็ต้องการยาที่ออกฤทธิ์ เฉพาะที่หรือต้องการยาที่มีการปลดปล่อยอย่างเชื่องช้า ดังนั้นเทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชันจึงถูก นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นระยะเวลานาน

เทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูลเลชัน หมายถึง กระบวนการที่ของเหลวหรืออนุภาคถูกห่อหุ้ม ให้อยู่ในรูปของแคปซูลด้วยพอลิเมอร์เป็นชั้นบางๆ เกิดเป็นไมโครแคปซูลขนาดประมาณ 1-1,000 ไมโครเมตร ซึ่งชั้นพอลิเมอร์บาง ๆ นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันหรือปลดปล่อยสารสำคัญภายใน ออกมาเมื่อเราต้องการ [Boh และคณะ (2008)] ขั้นตอนสำคัญของเทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชัน คือ

1. ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ รอบอนุภาค หรือทำให้เกิดเป็นอิมัลชัน
2. ทำให้ฟิล์มนั้นแข็งแรง
3. แยกแคปซูลและทำให้แห้ง

ไมโครแคปซูลที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม อยู่ในรูปผงแห้งที่สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ สารสำคัญที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลจะถูกเรียกว่า คอร์ (core) หรือสารสำคัญ และผนังบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารสำคัญจะถูกเรียกว่าวอลล์ (wall) หรือสารห่อหุ้ม โดยลักษณะของวอลล์ที่ดีควรจะต้อง มีความสามารถแผ่เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ได้ มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงเพียงพอ นอกจากนี้ยังต้องมี คุณสมบัติในการยึดติดกับคอร์ได้ดีโดยไม่ทำปฏิกิริยากัน มีความคงตัวสูง เพื่อป้องกันคอร์จาก สภาพแวดล้อมต่างๆ และ ปลดปล่อยคอร์ได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จะเห็นได้ว่าวอลล์ เป็นตัวการที่สำคัญของเทคโนโลยีเอนแคปซูลเลชัน ดังนั้นการเลือกใช้สารที่จะนำมาทำเป็นวอลล์ จึง จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมทั้งต่อสารสำคัญ และต่อสภาวะที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในบาง กรณีมีการทำเป็นวอลล์ 2 ชั้น ชั้นในทำหน้าที่ปกป้องคอร์ และชั้นนอกเพื่อวัตถุประสงค์ของการใช้ งาน นอกจากชนิดของวอลล์ที่มีความสำคัญแล้ว วิธีการเตรียมฟิล์ม สภาวะในการเตรียม รวมทั้ง กระบวนการที่เลือกใช้ ก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการเอนแคปซูลเลชัน ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการ ผลิตไมโครแคปซูลนั้น มีทั้งวิธีกายภาพ และวิธีทางเคมี ได้แก่ spray-drying, spray-cooling,

spray-chilling, freeze-drying, liposome entrapment เป็นต้น แต่กระบวนการที่ได้รับความนิยมใช้กันมากโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่ spray-drying

## 2.4 หลักการเลือกสารห่อหุ้ม

การเลือกสารห่อหุ้มจัดได้ว่ามีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน สายป้อน ความหนืด และความคงตัวของผงแห้งที่เตรียมได้ ประเภทของสารห่อหุ้มที่ใช้กันมาก [Berger (2007) และ Fuchs และคณะ (2006)] ได้แก่

- พอลิแซคคาไรด์และน้ำตาล (gums, starches, celluloses, cyclodextrin, dextrose)
- โปรตีน (gelatin, casein, soy protein)
- ลิพิด (waxes, paraffin, oils, fats)
- สารอนินทรีย์ (silicates, clays, calcium sulphate)
- สารสังเคราะห์ (acrylic polymers, poly(vinylpyrrolidone))

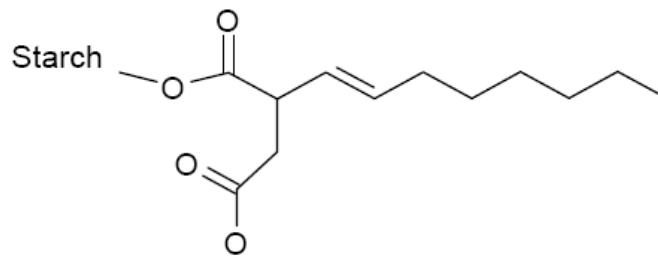
สมบัติของสารห่อหุ้มที่สำคัญได้แก่

- มีความสามารถในการละลายสูง
- มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดี
- มีความสามารถในการสร้างฟิล์ม
- มีความหนืดต่ำเมื่อละลายน้ำที่ความเข้มข้นสูง
- ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา
- ป้องกันสารระเหยจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้
- ไม่มีรสชาติ
- มีความสามารถในการผ่านความร้อนจากการทำแห้งได้
- ราคาถูก

## 2.5 ชนิดของสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ประกอบด้วย

1. แคปซูล (Capsul) เป็นแป้งดัดแปรชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติมาดัดแปรโดยการเติม n-octenyl succinic anhydride (OSA) ด้วยวิธีทางเคมีโดยการรวมตัวกันของส่วน lipophilic (รูปที่ 2.4) เพื่อให้ได้แป้งดัดแปรชนิดใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในกระบวนการกักเก็บสารระเหย และทดแทนสารห่อหุ้มชนิดอื่นที่มีราคาแพงเช่น กัมอะราบิก และโปรตีน โดยสารที่เติมลงไปนั้นจะทำให้แป้งมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์เนื่องจากว่า OSA มีทั้งหมู่ไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิก ซึ่งหมู่ไฮโดรโฟบิกจะเกิดเป็นฟิล์มรอบอนุภาคของหยดน้ำมัน ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันกลับมารวมตัวกัน ซึ่งสมบัติที่โดดเด่นของแคปซูล คือ สามารถเตรียมอิมัลชันที่ปริมาณของแข็งสูง ได้อิมัลชันที่เสถียร และยังให้การคงอยู่ของกลิ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสูงอีกด้วย

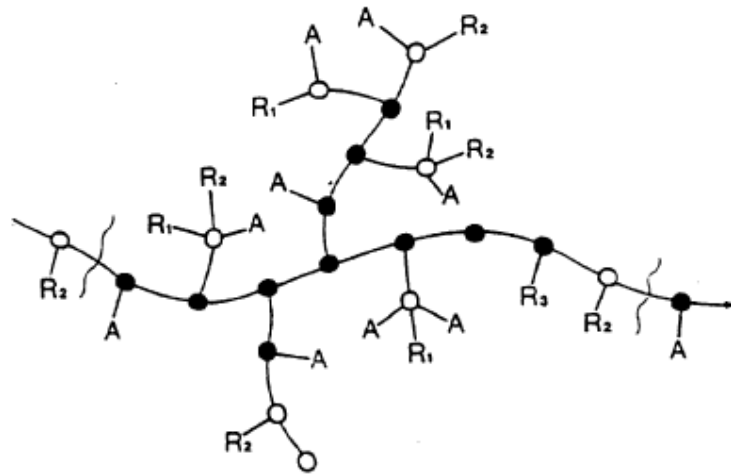


Empirical formula:  $(C_6H_{10}O_5)_x (C_{12}H_{18}O_3)_y \quad x \gg y$

รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของแคปซูล [Kuentz และคณะ (2006)]

2. กัมอะราบิก (Gum arabic) เป็นสารผสมเชิงซ้อนของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) และไกลโคโปรตีน (glycoproteins) ที่สกัดได้จากเปลือกของต้นอะเคเชีย (Acacia) (รูปที่ 2.5) ซึ่งปลูกมากในแอฟริกา สามารถละลายน้ำได้ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 50 ได้สารละลายที่มีความหนืดต่ำ มีความเป็นกรดเล็กน้อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและรสชาติ จัดได้ว่าเป็นสารห่อหุ้มในกระบวนการกักเก็บสารระเหยที่มีคุณภาพสูงเนื่องจากมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีมาก เนื่องจากโปรตีนที่มีทั้งหมู่ไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิกจะทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวของน้ำมันหลังจากเกิดเป็นอิมัลชัน โดยส่วนของไฮโดรโฟบิกจะเกิดเป็นฟิล์มรอบหยดน้ำมันระหว่างรอยต่อของทั้งสองเฟส นอกจากนี้การใช้กัมอะราบิกเป็นสารห่อหุ้มจะทำให้

ผงแห้งที่ได้ไม่จับตัวเป็นก้อนได้ง่ายโดยง่ายเหมาะสำหรับใช้กักเก็บสารระเหยที่ขึ้นง่าย และยังให้การคงอยู่ของกลิ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสูงอีกด้วย แต่ข้อเสียของการใช้กัมอะราบิคเป็นสารห่อหุ้มคือต้นทุนสูงเนื่องจากเป็นสารที่มีราคาแพง ดังนั้นจึงนิยมใช้ผสมกับสารห่อหุ้มชนิดอื่น [WIKIPEDIA The free Encyclopedia. [Gum arabic](#).(online)]



**รูปที่ 2.5** โครงสร้างของกัมอะราบิค (A= arabinosyl; ● = 3-linked galactose (galactose attached); ○ = 6-linked galactose (galactose or glucuronic acid attached or end group); R<sub>1</sub> = rhamnose-glucuronic acid; R<sub>2</sub> = galactose-3-arabinose; R<sub>3</sub> = arabinose-3-arabinose-3-arabinose.) [Stephen (1995)]

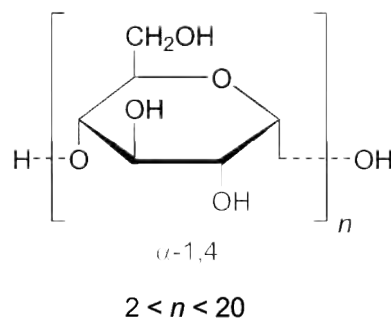
3. มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวดังแสดงในรูปที่ 2.6 ไม่มีกลิ่นรส ละลายน้ำได้ดี มีความหนืดต่ำ แต่ไม่มีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์จึงมักใช้ร่วมกับสารห่อหุ้มชนิดอื่น เช่น กัมอะราบิค เพื่อลดต้นทุน มอลโตเดกซ์ตรินผลิตจากปฏิกิริยาการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ มอลโตเดกซ์ตรินจึงอยู่ในรูปของน้ำตาลกลูโคสหลาย ๆ โมเลกุลมารวมกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยถูกจัดว่าเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย สำหรับค่า DE (Dextrose Equivalent) ของมอลโตเดกซ์ตริน สามารถวัดได้จากปริมาณของเอนไซม์อะไมเลสที่เติมลงไปสำหรับการย่อยแป้ง โดยปกติแป้งเมื่อถูกการย่อยจะกลายเป็นน้ำตาลกลูโคส หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า DE ก็คือ ดัชนีชี้วัดเปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในมอลโตเดกซ์ตรินนั่นเอง ดังนั้น ค่า DE ที่สูง จึงมีความหวานมากกว่าค่า DE ที่ต่ำ และสามารถกักเก็บสารระเหยได้ดีกว่า [WIKIPEDIA The free Encyclopedia. [Maltodextrin](#).(online)]

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารหอมหุ่มสองชนิดผสมกันเพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต เช่นในงานวิจัยของ Thevenet และคณะ (1995) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บ citrus oil โดยใช้สารหอมหุ่มกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน ซึ่งกัมอะราบิกเป็นสารหอมหุ่มที่มีสมบัติอิมัลซิฟายเออร์ และเกิดเป็นฟิล์มดี แต่ราคาแพง ส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่มที่มีสมบัติการเกิดเป็นฟิล์มต่ำ และราคาถูก ดังนั้นจึงมีการนำสารหอมหุ่มทั้งสองชนิดมาผสมกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า อัตราส่วนระหว่างกัมอะราบิกต่อมอลโตเดกซ์ตริน 1: 0, 1: 1, 1: 3 และ 1: 5 จะทำให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นมีค่าสูง



รูปที่ 2.6 ลักษณะของมอลโตเดกซ์ตริน

[COOPERATIVEPURCHASERS. [Maltodextrin](#) (online)]

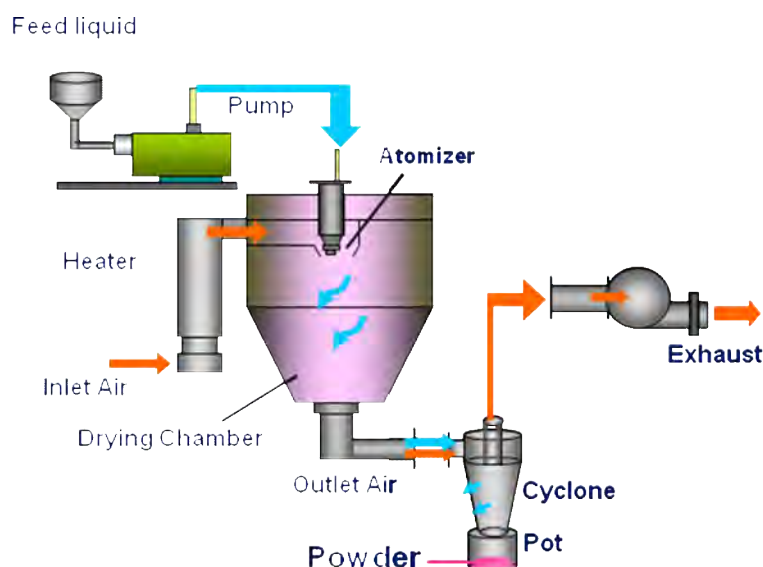


รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของมอลโตเดกซ์ตริน

[WIKIPIDIA The free Encyclopedia. [Maltodextrin](#) (online)]

## 2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [Masters (1991)]

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากในการทำแห้งสารละลายอินทรีย์ สารประเภทอิมัลชัน และของเหลวชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมทางเคมีและอาหาร โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้วิธีการนี้ในการทำแห้งที่พบในปัจจุบันได้แก่ นมผง อาหารเด็ก ยา และสีย้อม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและช่วยลดขนาดและปริมาตรของของเหลวลงอีกด้วย หลักการของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย จะอาศัยอากาศร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากของเหลวที่เป็นละอองฝอยอย่างรวดเร็ว ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยก็คือเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) ซึ่งมีระบบการทำงานแสดงในรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายได้โดยเริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านตัวกรอง และผ่านตัวให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) จากนั้นสารละลายของเหลวจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดละอองฝอย (Atomizer) ภายในห้องอบแห้งและจะสัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ กระเปาะเปียกเล็กน้อย จากนั้นจะได้ผงผลิตภัณฑ์ที่ตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง และผงบางส่วนที่หลุดมากับอากาศจะถูกแยกโดยใช้ไซโคลน (cyclone) จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยรายละเอียดของระบบการทำงานสามารถจำแนกออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.8 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย



## 1. การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละออง

ขั้นตอนนี้เป็นการทำให้อาจอยู่ในรูปอิมัลชันหรือสารละลาย กลายเป็นละอองฝอยโดยใช้อะตอมไมเซอร์ (atomizer) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เพราะชนิดของอะตอมไมเซอร์จะมีผลต่อปริมาณการคงอยู่ของกลิ่นรสที่พื้นผิวของผงแห้งกักเก็บกลิ่น โดยในงานวิจัยของ Finney และคณะ (2002) ซึ่งทำการศึกษาผลของชนิดของอะตอมไมเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและความคงตัวของผงแห้งที่ได้ ในการกักเก็บ orange oil โดยใช้แป้งตัดแปรเป็นสารห่อหุ้ม ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า อะตอมไมเซอร์แบบ Rotary Atomizer จะทำให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสที่พื้นผิวมากกว่าอะตอมไมเซอร์แบบ spray nozzle ลักษณะของอะตอมไมเซอร์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

### i. Rotary Atomizer

อะตอมไมเซอร์ชนิดนี้ ของเหลวจะไหลลงบนจานหมุนซึ่งใกล้กับจุดศูนย์กลาง โดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบสูงประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อนาที และของเหลวจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละออง โดยขนาดเฉลี่ย 30-120 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเฉลี่ยนี้จะแปรผันโดยตรงกับอัตราความเร็วของของเหลว ความหนืด และแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน



รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Rotary Atomizer

[[http://www.niroinc.com/technologies/spray\\_drying\\_tech.asp](http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp)]

## ii. Two-fluid Nozzle (Pneumatic Nozzle)

อะตอมไมเซชันชนิดนี้ของเหลวและอากาศจะไหลผ่านหัวของหัวฉีดซึ่งจะทำให้ของเหลวแตกเป็นละอองฝอยเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศด้วยความเร็วสูงภายในหัวฉีด การปรับอัตราการไหลของอากาศ จะช่วยในการกระจายเป็นละอองของของเหลว อะตอมไมเซชันชนิดนี้นิยมใช้กับ ของเหลวที่มีความหนืดสูง แต่อย่างไรก็ตามการใช้อะตอมไมเซชันชนิดนี้มีค่าดำเนินการสูงและให้ผลผลิตต่ำ

## iii. Pressure Nozzle

อะตอมไมเซชันชนิดนี้ของเหลวจะไหลผ่านรูหัวฉีดภายใต้ความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดเป็นฝอยโดยไม่ใช้อากาศ อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ย 120-250 มิลลิเมตร โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของของเหลว ความหนืด และจะแปรผกผันกับความดัน



รูปที่ 2.10 ลักษณะของ Pressure Nozzle

[[http://www.niroinc.com/technologies/spray\\_drying\\_tech.asp](http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp)]

## 2. การสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศ

ขั้นตอนนี้ละอองของเหลวที่ถูกฉีดออกมาจะสัมผัสหรือเข้าผสมกับอากาศร้อน และเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของอะตอมไม่เชอกับอากาศแห้งๆเข้าจะสามารถแบ่งรูปแบบของการสัมผัสกับอากาศร้อนได้ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้

### i. การไหลผ่านทางเดียวกัน (Co-current flow)

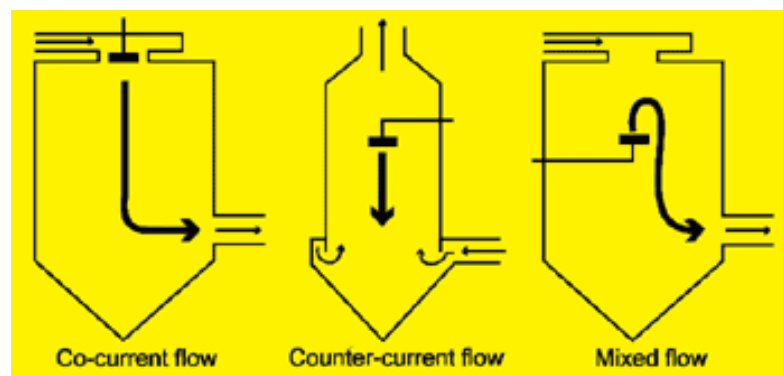
ทิศทางการฉีดของเหลวเป็นทิศทางเดียวกับการไหลของอากาศร้อน ละอองของของเหลวจะสัมผัสและผสมเข้ากับกับอากาศร้อนขณะที่ยังมีความชื้นสูงหรือน้ำภายในอนุภาคมากอยู่ จากนั้นผลิตร้อนจะถูกทำให้ระเหยทันทีจนกลายเป็นผง วิธีนี้เป็นวิธีการทำแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยทั่วไป

### ii. การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow)

ทิศทางการฉีดของเหลวเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอากาศร้อน โดยของเหลว จะถูกฉีดลงมาจากด้านบนในขณะที่อากาศร้อนจะไหลขึ้นจากด้านล่าง ผลิตร้อนที่ได้จะมีความร้อนสูงมาก วิธีนี้จึงเหมาะเฉพาะผลิตร้อนที่เสถียรต่อความร้อนสูงเท่านั้น

### iii. การไหลผ่านแบบผสม (Mixed flow)

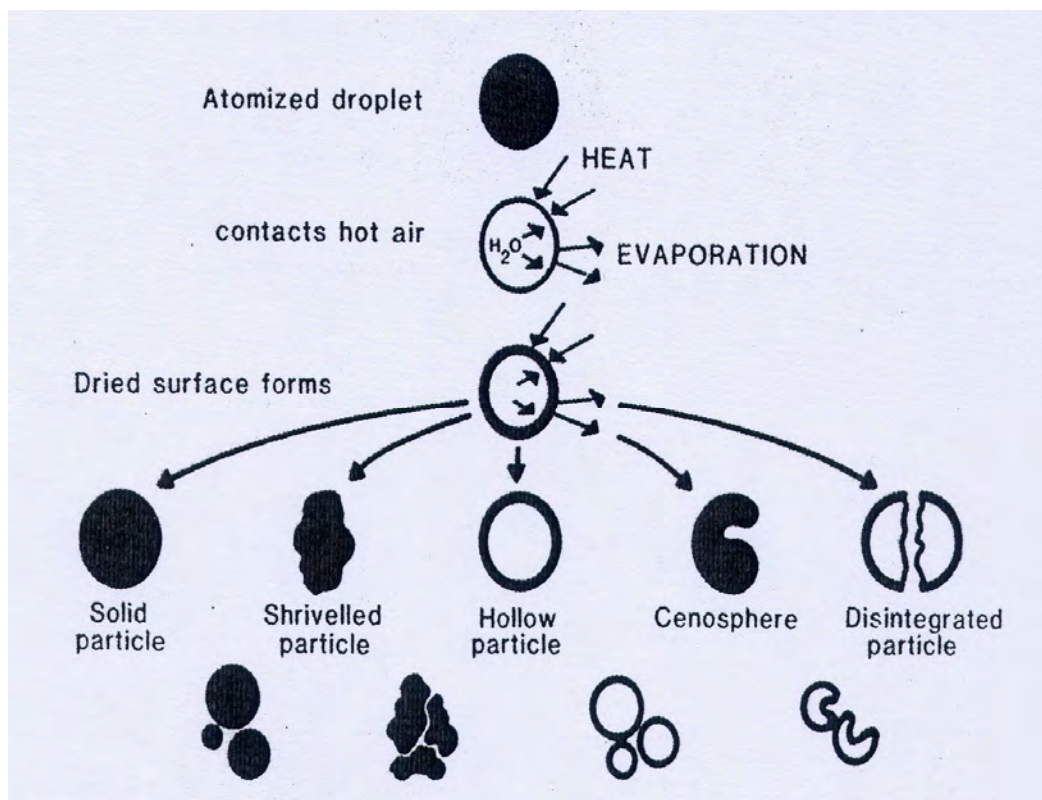
การไหลของของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านทั้งห้อง Co-current และ Counter-current วิธีนี้เหมาะสำหรับทำแห้งผลิตร้อนที่เป็นผงหยาบ และทนความร้อนได้สูงมาก



รูปที่ 2.11 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 3. การระเหยของละอองฝอย

ขั้นตอนี้เมื่อละอองสัมผัสกับอากาศแห้งร้อน จะเกิดการระเหยชั้นไออ้อมตัวบริเวณผิวของละอองอย่างรวดเร็ว โดยจะมีอุณหภูมิที่ผิวละอองที่อุณหภูมิระเปาะเปียกของอุณหภูมิอากาศแห้งจะแพร่สู่ผิวหนังซึ่งอยู่ในสภาวะอ้อมตัว ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่อัตราการระเหยคงที่ จนกระทั่งความชื้นต่ำ ไม่มีการแพร่สู่ผิวหน้าทำให้เกิดชั้นแห้งหนาขึ้นตามเวลา ช่วงนี้อัตราการระเหยจะลดลง ซึ่งกลไกการระเหยและเกิดเป็นผงอนุภาคแสดงในรูปที่ 2.12 [Masters (1991)]



รูปที่ 2.12 กลไกการระเหยและเกิดเป็นผงอนุภาคด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

#### 4. ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนเป็นตัวเก็บผลผลิตแห้งที่ตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ส่วนลมที่ออกจากด้านบนของไซโคลน จะผ่านไปยังตัวเก็บขั้นสุดท้าย ทั้งนี้อาจเป็น wet scrubber หรือ bag filter หรือ electrostatic precipitator ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่มีและประสิทธิภาพการนำกลับมา

##### 2.6.1 ข้อดีของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [Madene และคณะ (2006)]

- เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง
- ต้นทุนการผลิตต่ำ
- ผงอนุภาคที่ได้มีขนาดเล็ก
- ผงอนุภาคที่ได้มีความคงตัวสูง

##### 2.6.2 ข้อเสียของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [Madene และคณะ (2006)]

- ผงอนุภาคที่ได้ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน
- ข้อจำกัดในการเลือกใช้สารหล่อหุ้ม (ความหนืดต่ำที่ปริมาณความเข้มข้นสูง)
- ไม่เหมาะกับสารที่ไวต่อความร้อน

## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการกักเก็บกลิ่นด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.7.1 ความหนืดของอิมัลชัน

การเพิ่มปริมาณของแข็งในสายป้อนมีความสำคัญในด้านของเศรษฐศาสตร์ และคุณภาพ ซึ่งการเพิ่มปริมาณของแข็งเป็นการเพิ่มความหนืดของสายป้อนซึ่งจะทำให้ได้ผงที่หยาบขึ้น ถ้าหากความหนืดของสายป้อนต่ำจะส่งให้ผงที่ได้ละเอียด แต่ปริมาณผงที่ได้ในไซโคลนจะต่ำ นอกจากนี้ยังเพิ่มราคาในการดำเนินการ อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งที่มากเกินไปจะทำให้ได้ผงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่หรือมีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งต้องการเวลาในการทำให้แห้งนานกว่าและจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของผงแห้งที่ได้ การเพิ่มอุณหภูมิของสายป้อนจะช่วยลดความหนืดซึ่งจะทำให้สามารถใช้ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งในกระบวนการเอนแคปซูเลชันโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารระเหย การเพิ่มปริมาณของแข็งสามารถเพิ่มค่าความคงอยู่ของกลิ่นได้ ดังในงานวิจัยของ Rosenberg และคณะ (1990) ที่ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าการคงอยู่ของสารหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้สารประกอบเอสเทอร์เป็นสารหอมระเหยต้นแบบและกัมอะราบิกเป็นสารห่อหุ้ม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของแข็ง (solid concentration) ส่งผลให้ค่าการคงอยู่เพิ่มมากขึ้น ปริมาณของแข็งของสายป้อนส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 20-50 % ขึ้นอยู่กับสมบัติของสายป้อน และชนิดของอะตอมไมเซอที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมนมผงจะใช้ปริมาณของแข็งของสายป้อนเท่ากับ 50% และอะตอมไมเซอชนิด rotary atomizer สามารถใช้ที่ความหนืดสูงประมาณ 1000 mPa.s ได้

### 2.7.2 ปริมาณของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อน

การเพิ่มปริมาณของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อนจะส่งผลให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสมีค่าลดลงและยังทำให้ปริมาณกลิ่นรสที่เกาะอยู่ที่พื้นผิวมีค่ามากขึ้น ดังในงานวิจัยของ Rosenberg และคณะ (1990) พบว่าในการกักเก็บสารประกอบเอสเทอร์ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยมีกัมอะราบิกเป็นสารห่อหุ้ม เมื่อเพิ่มปริมาณเอสเทอร์ในอิมัลชันสายป้อนขณะที่ปริมาณของแข็งคงที่จะส่งผลให้ค่าการคงอยู่ของสารลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเอสเทอร์จะทำให้สัดส่วนระหว่างเอสเทอร์กับสารห่อหุ้มนั้นเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเอสเทอร์จะเกิดการสัมผัสกับอากาศร้อนมากขึ้นในระหว่างขั้นตอนการเกิดเป็นอนุภาค นอกจากนี้ Shu และคณะ (2006) ได้ทำการกักเก็บ lycopene ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเมื่อใช้เจลาตินกับซูโครสเป็นสารห่อหุ้ม โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง lycopene กับสารห่อหุ้มที่มีต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง lycopene กับสารห่อหุ้ม จะทำให้

ประสิทธิภาพการกักเก็บลดลงเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันนั้นจะทำให้เกิดอิมัลชันที่ไม่เสถียรเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานจะเกิดการแยกชั้น

### 2.7.3 ขนาดของอิมัลชันในสายป้อน

ขนาดของอิมัลชันในสายป้อนมีผลต่อค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสในระหว่างกระบวนการอย่างมาก โดยพบว่า เมื่อขนาดอิมัลชันในสายป้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสในระหว่างกระบวนการลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soottitantawat และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาค่าผลของขนาดอิมัลชันที่มีต่อค่าการคงอยู่ของกลิ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ในการกักเก็บกลิ่น *d*-Limonene, ethyl butyrate และ ethyl propionate โดยใช้ gum arabic, soybean water-soluble polysaccharides และ modified starch ผสมกับ maltodextrin เป็นสารห่อหุ้ม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดอิมัลชันทำให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นลดลง เนื่องจากในขั้นตอนของการทำให้เกิดละอองฝอย อิมัลชันขนาดใหญ่จะถูกแรงจากอะตอมโมเลกุลที่หมุนด้วยความเร็วสูงตัดออกกลายเป็นอิมัลชันขนาดเล็กซึ่งสังเกตได้จากการผลของกระจายตัวของขนาดอิมัลชันก่อนและหลังกระบวนการ ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียกลิ่นรสไปบางส่วน

### 2.7.4 อุณหภูมิของอิมัลชันในสายป้อน

อุณหภูมิของอิมัลชันในสายป้อนมีผลต่อการคงอยู่ของกลิ่นรสหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ทั้งนี้เนื่องจากการอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนืดของอิมัลชันสายป้อน Shu และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิสายป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ lycopene ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเมื่อใช้เจลาตินกับซูโครสเป็นสารห่อหุ้ม พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสายป้อนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิตอนแรก (35-55°C) เนื่องจากจะไปช่วยลดความหนืดของสายป้อนส่งผลให้เกิดเป็นละอองฝอยได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 55-65°C พบว่าค่าประสิทธิภาพการกักเก็บนั้นลดลงและมีอนุภาคสะสมอยู่ที่ผนังของเครื่อง ดังนั้นจึงควรรักษาอุณหภูมิของอิมัลชันในสายป้อนที่เหมาะสมสำหรับการกักเก็บกลิ่นรสเพื่อให้กระบวนการกักเก็บมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 2.7.5 อุณหภูมิอากาศของอากาศ

การเพิ่มอุณหภูมิอากาศของอากาศหมายถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย ซึ่งการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความว่องไวต่อความร้อนของผลิตภัณฑ์ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 120-300°C ในอุตสาหกรรมนมผงจะใช้อุณหภูมิประมาณ 180-200°C เพื่อป้องกันการสลายตัวด้วยความร้อนและการเหนียวติดของผงใน chamber ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ อุณหภูมิสูงสามารถนำไปสู่การกระจายตัวของผงที่ได้ระหว่างการทำแห้งซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่นของผงและความหนาแน่นโดยรวม (Bulk density) ที่ได้ลดลง เนื่องจากเกิดความพรุนและมีการแตกหักของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นอุณหภูมิอากาศขาเข้าจึงมีผลต่อการคงอยู่ของกลีโคสหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krishnaiah และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาค่าผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า (110-150°C) ในการกักเก็บสารสกัดจากยอโดยใช้คาร์ราจีแนน (Carrageenan) เป็นสารห่อหุ้มที่มีต่อโครงสร้างของอนุภาค, Encapsulation Yield (EY) และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ จากผลการทดลองที่ได้พบว่าโครงสร้างของผงแห้งที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมพื้นผิวเรียบ มีขนาดประมาณ 1-20 ไมโครเมตร และการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าทำให้ได้ค่า EY สูงขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาจไม่เพียงพอ จึงยังคงเหลือปริมาณน้ำอยู่ในผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิดการติดอยู่ที่ผนังของเครื่องอบแห้งจึงทำให้ได้ EY ต่ำ แต่การเพิ่มอุณหภูมิเพื่อจะให้ค่า EY สูง ๆ นั้น กระทำได้จนถึงค่า ๆ หนึ่งเท่านั้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างอัตราการระเหยน้ำและการเกิดฟิล์มซึ่งจะนำไปสู่การแตกของอนุภาคสะสมอยู่ที่ผนังของเครื่องซึ่งจะส่งผลให้ค่า EY ลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระลดลงเนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้สารต้านอนุมูลอิสระเกิดการเสื่อมสภาพและอาจเกิดการเสื่อมสลายระหว่างกระบวนการ

Tonon และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาค่าผลของสภาวะการดำเนินงานด้วยเทคนิคอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า (138-202°C) ในการผลิตผงแห้งของ Açai โดยใช้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงแห้งที่ได้ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิอากาศขาเข้ามีผลโดยตรงต่อปริมาณความชื้นของผงแห้ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างละอองฝอยกับอากาศแห้งมากกว่าเป็นผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนเพื่อระเหยน้ำออกได้มากกว่า ดังนั้นจึงทำให้ผงแห้งที่ได้มีปริมาณความชื้นลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้ายังมีผลทำให้ค่าร้อยละการคงอยู่ของ anthocyanin ลดลง เนื่องจากสารนี้เป็นสารที่มีความว่องไวสูงทางด้านความร้อน



อย่างไรก็ดีแผงที่ผลิตจากอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำมีโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เพราะมีปริมาณความชื้นสูง แต่ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการลดโอกาสในการสัมผัสกับออกซิเจนและป้องกันการเสื่อมสภาพของแผง จึงเป็นการเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

### 2.7.6 อุณหภูมิอากาศขาออก

ผลของอุณหภูมิอากาศขาออกต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และสภาวะการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งเป็นอีกตัวแปรที่ต้องคำนึงถึง การปรับอัตราไหลของ feed มีผลต่ออุณหภูมิขาออก ถ้าอัตราการไหลของ feed สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง และเกาะติดอยู่บริเวณผนังของ drying chamber ได้ นอกจากนี้อุณหภูมิอากาศขาออกยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศขาเข้าซึ่งโดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิขาเข้าประมาณ 150-300°C จะมีอุณหภูมิอากาศขาออกประมาณ 50-110°C โดยการเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าทุก 2-3°C จะทำให้อุณหภูมิอากาศขาออกเพิ่มขึ้นเพียง 1°C อุณหภูมิขาออกต่ำ ๆ จะทำให้ผงที่ได้ค่อนข้างเหนียวและนำไปสู่การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน การเพิ่มอุณหภูมิขาออกจะลดความชื้นในแผงที่ได้ ลดขนาดอนุภาคของผง และลดความหนาแน่นโดยรวม

ถ้าอุณหภูมิอากาศขาออกมากกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผลิตภัณฑ์จะทำให้ได้ผงที่เหนียวซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตน้อยลงและเกิดปัญหาต่อการดำเนินการ อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกก็พบปัญหาในด้านผลิตภัณฑ์ที่เหนียวแต่ก็มีข้อดีในด้านช่วยลดต้นทุนในการผลิต

นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาออกยังเป็นการเพิ่มการคงอยู่ของกลิ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในขณะที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าคงที่ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาออกก็คือการลดอัตราการไหลสายป้อน ดังนั้นในช่วงแรกจะมีอัตราการระเหยสูงและเกิดเป็นฟิล์มที่ป้องกันการแพร่ผ่านของสารระเหยอย่างรวดเร็ว ขณะที่ยังมีการระเหยอย่างต่อเนื่องแต่ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิอากาศขาออกมากกว่าจุดเดือดของของเหลวจะทำให้เกิดความดันขึ้นภายในหยดของเหลวซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวของฟิล์ม และจะนำไปสู่การสูญเสียกลิ่นของสารระเหยจากหยดของเหลว

## 2.8 การศึกษาความคงตัวของผงแห้ง

การศึกษาความคงตัวของผงแห้งกระทำได้โดยวิเคราะห์ลักษณะการปลดปล่อยของสารจากผงอนุภาค ซึ่งทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยของสารมีมากมาย ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้ โดยจะเริ่มต้นที่ Higuchi model ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้วิเคราะห์กลไกการปลดปล่อยของยา โดยข้อสันนิษฐานของทฤษฎีเป็นดังนี้ [Giovagnoli และคณะ (2007)]

- i. ความเข้มข้นเริ่มต้นของยาในระบบต้องมากกว่าค่าการละลายของเมทริกซ์
- ii. ค่า diffusivity ของยาคงที่
- iii. ไม่พิจารณาการบวมตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์

Higuchi's equation:

$$M_t = A\sqrt{D(2C_0 - C_s)t} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $M_t$  คือ ปริมาณยาที่ปลดปล่อยที่เวลา  $t$   
 $t$  คือ เวลาในการปลดปล่อย  
 $A$  คือ พื้นที่ผิว  
 $D$  คือ ค่า diffusivity ของยาผ่านเมทริกซ์  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นของยาตอนเริ่มต้น  
 $C_s$  คือ ค่าการละลายของยา

ข้อจำกัดของ Higuchi model ก็คือไม่สามารถใช้ในกรณีที่มีการบวมตัวของเมทริกซ์ และทำให้เมทริกซ์สีกร่อนที่ละน้อย ดังนั้นจึงมีการใช้ทฤษฎีอื่นเพื่อมาใช้วิเคราะห์กลไกการปลดปล่อยของสาร ซึ่งได้แก่ Peppas's equation โดยการนำกฎของเลขยกกำลังมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายข้อมูลการปลดปล่อย [Talukdar และคณะ (1998)]

Peppas's equation:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $M_t$  คือ ปริมาณยาที่ปลดปล่อยที่เวลา  $t$   
 $M_\infty$  คือ ปริมาณยาที่ปลดปล่อยที่เวลา  $\infty$   
 $t$  คือ เวลาในการปลดปล่อย  
 $k$  คือ ค่าตัวแปรการทดลอง  
 $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย

สมการนี้จะใช้สำหรับวิเคราะห์การปลดปล่อยของสารที่ไม่ทราบกลไกการปลดปล่อยหรือมีลักษณะการปลดปล่อยมากกว่า 1 แบบ ซึ่งกลไกการปลดปล่อยสามารถบอกได้จากค่า  $n$  ซึ่งสามารถหาได้จากการเขียนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปลอการิทึม

$$\ln \frac{M_t}{M_\infty} = \ln k + n \ln t \quad (2.3)$$

และจะหาค่า  $n$  ได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{M_t}{M_\infty}$  กับ  $\ln t$  ซึ่งถ้าหาก  $n = 0.5$  กลไกการปลดปล่อยจะถูกควบคุมด้วยการแพร่เท่านั้น และถ้าค่า  $n$  มีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือ กลไกการปลดปล่อยจะถูกควบคุมด้วย polymeric controlled release devices และในส่วนของค่าคงที่  $k$  เนื่องจากความแตกต่างของจลนศาสตร์การปลดปล่อยของสารและสภาวะการทดสอบ ทำให้ค่าคงที่  $k$  ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยของสารในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันจะใช้ค่า mean dissolution time (MTD) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยจากรูปแบบของปริมาณยาที่ให้และประสิทธิภาพที่ลดลงของพอลิเมอร์ คำนวณได้จากข้อมูลการเสื่อมสลายดังนี้

$$MTD = \frac{n}{n+1} k^{-(1/n)} \quad (2.4)$$

ซึ่งข้อจำกัดของสองทฤษฎีแรกก็คือ สามารถใช้อธิบายการปลดปล่อยของสารได้ดีในช่วง 60 % แรกของการปลดปล่อยเท่านั้น และทฤษฎีต่อมาที่ใช้ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยก็คือ Weibull model ซึ่งจะอธิบายในลักษณะของ exponential function ซึ่งเป็นสมการที่ประยุกต์ใช้กันมากในการวิเคราะห์การสลายตัวและลักษณะการปลดปล่อย เนื่องจากสามารถอธิบายการปลดปล่อยทั้งในแบบ Fickian transport และ non-Fickian transport ได้สูงถึง 100 % ของการปลดปล่อย [Papadopoulou และคณะ (2006)]

Weibull's equation;

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \exp(-at^b) \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $M_t$  คือ ปริมาณยาที่ปลดปล่อยที่เวลา  $t$   
 $M_\infty$  คือ ปริมาณยาที่ปลดปล่อยที่เวลา  $\infty$   
 $a, b$  คือ ค่าคงที่  
 $t$  คือ เวลาในการปลดปล่อย

ค่าคงที่  $a$  และ  $b$  เป็นค่าที่แสดงถึงกลไกการปลดปล่อย โดยพบว่าค่าคงที่  $a$  และ  $b$  จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่เฉพาะเจาะจงของเมทริกซ์ โดยเฉพาะค่า  $b$  จะขึ้นอยู่กับ แรงกระทำระหว่างอนุภาคและปริมาณการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังมี Avrami's equation ซึ่งแต่เดิมสมการนี้เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ซึ่งรูปแบบของสมการนั้นคล้ายกับ Weibull's equation จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยของสาร [Yoshii และคณะ (2001)]

Avrami's equation:

$$R = \exp[-(kt)^n] \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $R$  คือ ค่าการคงอยู่ของกลิน  
 $t$  คือ เวลาในการเก็บรักษา  
 $k$  คือ ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย  
 $n$  คือ ตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย

ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย ( $k$ ) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย ( $n$ ) นั้นสามารถหาได้จากการกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(-\ln R)$  กับ  $\ln t$  เมื่อ  $n$  คือความชันของกราฟ และจะคำนวณค่า  $k$  ได้จากจุดตัดแกน  $\ln(-\ln R)$  ของกราฟ ซึ่งหากค่า  $n = 1$  แสดงว่ากลไกการปลดปล่อยเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง (First order)  $n < 1$  แสดงว่ากลไกการปลดปล่อยจะถูกกำหนดด้วยการแพร่ผ่านของโมเลกุล และถ้า  $n > 1$  นั่นคือการปลดปล่อยจะเกิดอย่างรวดเร็วในช่วงแรก

## 2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลิ่น

### 2.9.1 อัตราส่วนระหว่างปริมาณกลิ่นรสดต่อสารหอมหุ้ม

อัตราส่วนระหว่างปริมาณกลิ่นรสดต่อสารหอมหุ้มมีผลต่อความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลิ่น ดังในงานวิจัยของ Bertolini และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาความคงตัวของสารในกลุ่ม monoterpenes ซึ่งประกอบด้วย citral, linalool,  $\alpha$ -myrcene, limonene และ  $\alpha$ -pinene ที่ใช้เทคนิคเอนแคปซูลชั้นในการกักเก็บด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้กัมอะราบิกเป็นสารหอมหุ้ม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อสารหอมหุ้มจะมีผลทำให้ค่าการคงอยู่มีค่าลดลงโดยเฉพาะในกรณีของสาร citral และ linalool นอกจากนี้ยังพบว่าในการกักเก็บสารกลุ่ม monoterpenes โดยมีกัมอะราบิกเป็นสารหอมหุ้มนั้น citral และ  $\alpha$ -pinene มีความคงตัวมากกว่าสารชนิดอื่น

### 2.9.2 ขนาดอิมัลชันในสายป้อน

ขนาดอิมัลชันในสายป้อนมีผลต่อความคงตัวของผลแห้ง ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากงานวิจัยของ soottitantawat และคณะ (2005) ที่ทำการศึกษาผลของขนาดอิมัลชันและขนาดอนุภาคของผงแห้ง d-limonene ที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้กัมอะราบิก, HI-CAP 100 และกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารหอมหุ้มที่มีต่อความคงตัวของผงแห้งที่ได้ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอิมัลชันขนาดเล็กทำให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นมีค่ามากกว่าอิมัลชันขนาดใหญ่

### 2.9.3 ชนิดของสารหอมหุ้ม

จากงานวิจัยของ Soottitantawat และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยจากผงแห้งและค่าการคงอยู่ของผงแห้ง ethyl butyrate ที่เตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้มอลโตเดกซ์ตรินผสมกับกัมอะราบิก หรือ Soybean soluble polysaccharide (SSPS) เป็นสารหอมหุ้ม จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าการคงอยู่ของผงแห้งที่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมอลโตเดกซ์ตรินและชนิดของสารหอมหุ้มที่ใช้ โดยการเพิ่มอัตราส่วนของมอลโตเดกซ์ตรินทำให้ค่าการคงอยู่เพิ่มขึ้น และ SSPS มีคุณสมบัติในการกักเก็บ ethyl butyrate ดีวกัมอะราบิก และต่อมา Soottitantawat และคณะ (2005) ได้ศึกษาการกักเก็บ d-limonene ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้กัมอะราบิก, HI-CAP 100 และกัมอะราบิกผสมมอลโต

เดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่าสารห่อหุ้มชนิดสารห่อหุ้มชนิด HI-CAP 100 ทำให้อุณหภูมิความ  
คงตัวมากกว่าสารห่อหุ้มชนิดอื่น ดังนั้นจะพบว่า ความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลี้นั้นขึ้นอยู่กับ  
ชนิดของสารห่อหุ้มที่ใช้ในการกักเก็บด้วย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

3.1.1. น้ำมันตะไคร้ (Lemongrass oil) บริษัท อุตสาหกรรมเครื่องหอมไทย-จีน จำกัด

3.1.2. สารทอหุ้ม (Wall material)

- แคปซูล (Capsul) บริษัท Nippon NSC Co., Ltd. (Tokyo, Japan)
- กัมอะราบิก (Gum arabic) บริษัท Nacalai Tesque, Inc (Kyoto, Japan)
- มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin, DE 11) บริษัท Nippon Starch Chemicals Co., Ltd. (Osaka, Japan)

#### 3.2 วิธีทดลอง

##### 3.2.1 การหาปริมาณซีทรอลในน้ำมันตะไคร้

ซีทรอลเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้ ดังนั้นจึงต้องหาปริมาณซีทรอลที่แน่นอนเพื่อใช้เป็นสารอ้างอิงในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ ซึ่งทำได้โดยนำน้ำมันตะไคร้มาละลายในตัวทำละลายเฮกเซนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ 1 ไมโครลิตร ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC/MS) ที่สภาวะการทำงานดังนี้

- Gas chromatography (7890 A, Agilent Technologies, USA)
- Mass spectrometer (5975 C, Agilent Technologies, USA)
- Column: DB-5 MS fuse silica capillary column (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m)
- Carrier gas: He
- Flow rate: 1.1133 ml/min
- Injector temperature: 250 °C
- Column temperature: เริ่มที่ 60 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มด้วยอัตรา 5 °C/min จนถึง 120 °C และเพิ่มด้วยอัตรา 10 °C/min จนถึง 250 °C/min

- Ion source temperature: 230 °C
- Ionization conditions: Ion energy 70 eV, Mass range scan 30-650 amu
- Library: Willey 7n



**รูปที่ 3.1** เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปคโตรมิเตอร์

(Gas chromatograph/Mass Spectrometer, GC/MS, Agilent 7890A/5975C, U.S.A.)

### 3.2.2 การเตรียมอิมัลชันของน้ำมันตะไคร้

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสารหอม 2 ชนิดได้แก่ แป้งดัดแปร (Capsul) และกัมอะราบิกผสมกับมอลโตเดกซ์ตริน ในอัตราส่วน 1:3 การเตรียมสารละลายอิมัลชันที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด (สารหอมและน้ำมัน) 50 เปอร์เซ็นต์ทำได้โดยนำสารหอมมาละลายในน้ำอุ่น ปั่นจนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติมน้ำมันตะไคร้ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60, 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำหนักรวมของแข็งทั้งหมด จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปทำให้อิมัลชันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Polytron homogenizer model PT-6100) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้ความเร็วในการหมุน 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที





รูปที่ 3.2 เครื่องโฮโมจีไนเซอร์

(Polytron homogenizer model PT-6100, Kinematica GA, Littau, Switzerland)



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

(Ohkawara LB-8 Spray dryer, Ohkawara kakouki Co., LTD., Japan)

### 3.2.3 การเตรียมผงแห้งน้ำมันตะไคร้

นำสารละลายอิมัลชันที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.2 มาทำให้เป็นผงแห้งโดยผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีอะตอมไมเซอเป็นแบบจานหมุน (Rotary Atomizer) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นดังนี้

- Feed rate: 30 ml/min
- Inlet air temperature: 120-180 °C
- Outlet air temperature: 100-110 °C
- Rotary atomizer speed: 30,000 rpm/min
- Air flow rate: 110 kg/hr

### 3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.3.1 การวัดขนาดของอิมัลชัน

การวัดขนาดของอิมัลชันประกอบด้วย การวัดขนาดของอิมัลชันสายป้อน และขนาดของอิมัลชันในผงแห้ง ซึ่งขนาดของอิมัลชันสายป้อนวัดได้โดยนำอิมัลชันที่เตรียมได้ในข้อ 3.2.2 มาวัดขนาดด้วยเครื่อง Laser diffraction particle size analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ที่ค่าดัชนีหักเห 1.70-0.2i โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวกลาง ในกรณีขนาดของอิมัลชันในผงแห้งทำได้โดยชั่งผงแห้งที่เตรียมได้ประมาณ 0.1 กรัม มาละลายน้ำ 2 มิลลิลิตรในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบวอร์เทกซ์เพื่อละลายสารห่อหุ้ม จากนั้นจึงนำไปวัดขนาดอิมัลชันด้วยเครื่อง Laser diffraction particle size analyzer เช่นเดียวกัน



**รูปที่ 3.4** เครื่อง Laser diffraction particle size analyzer  
(SALD-7100, Shimadzu, Kyoto, Japan)

#### 3.3.2 การวัดขนาดอนุภาคผงแห้ง

ชั่งผงแห้งที่เตรียมได้มาประมาณ 0.1 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 2-methyl-1-propanol ในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร นำไปทำให้อนุภาคของผงแห้งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวทำละลายด้วยเครื่องโซนิคเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปวัดขนาดของผงแห้งด้วยเครื่อง Laser diffraction particle size analyzer ที่ค่าดัชนีหักเห 1.70-0.2i

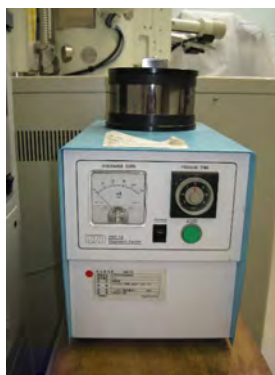
### 3.3.3 โครงสร้างของผงแห้ง

การศึกษาโครงสร้างภายนอกและภายในของผงแห้งกระทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM: JEOL model JSM-6060) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยนำผงแห้งที่เตรียมได้มาติดลงบน SEM stub ในกรณีที่ต้องการศึกษาโครงสร้างภายในของผงแห้ง การเตรียมตัวอย่างทำได้โดย นำเทปกาวแปะลงบน SEM stub ที่มีตัวอย่างติดอยู่แล้ว และดึงออกอย่างรวดเร็ว ด้วยแรงทางกายภาพจะสามารถทำให้อนุภาคของผงแห้งบางส่วนแตกออกจากรัน แล้วทำการเคลือบตัวอย่างด้วย Pt-Pd ด้วยเครื่อง magnetron sputter coating ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เคลือบแล้ววางในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM ที่ตั้งระดับอัตราเร่งของอิเล็กตรอน (Electron concentration) ที่ 15 kV



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning electron microscope, JSM 6060 model, JEOL Ltd., Japan)



รูปที่ 3.6 เครื่อง Magnetron sputter (MSP-1S, Kabushiki Co., Japan)

### 3.3.4 ความชื้นในผงแห้ง

ค่าความชื้นในผงแห้งมีผลกระทบอย่างมากต่อความคงตัวของผงแห้งที่ได้ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าความชื้นในผงแห้งทำได้โดย ชั่งผงแห้งที่เตรียมได้ประมาณ 0.03 กรัม ใส่ในตัวทำละลายฮายาชิ (Hayashi solvent) และนำไปหาค่าความชื้นในผงแห้งด้วยเครื่องคาร์ลฟิชเชอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง และรายงานเป็นค่าความชื้นเฉลี่ยในผงแห้ง



รูปที่ 3.7 เครื่อง Karl Fischer (MKS-510N)

### 3.3.5 ค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลิน

ชั่งผงแห้งที่เตรียมได้ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในขวดแก้ว เต็มน้ำ 1 มิลลิลิตร นำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารแบบวอร์เทกซ์ เต็มตัวทำละลายอะซิโตนซึ่งมีไซโคลเฮกซาโนนทำหน้าที่เป็นสารมาตรฐานภายใน (อะซิโตน 1 มิลลิลิตร ต่อ ไซโคลเฮกซาโนน 1 ไมโครลิตร) 4 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยทุก 10 นาที จะนำออกมาผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบวอร์เทกซ์ นำสารละลายที่ได้ไปหาปริมาณความเข้มข้นของชิทราลที่คงเหลือหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC-2010) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้คอลัมน์แบบคาปิลลารี (Capillary column, DB-WAX, 30 m x 0.320 mmφ 0.25 micron) และดีเทคเตอร์แบบเปลวไอออไนเซชัน (Flame Ionization Detector, FID) ซึ่งสภาวะการทำงานของเครื่องเป็นดังนี้

- Injector temperature: 210 °C
- Detector temperature: 230 °C
- Column temperature: เริ่มที่ 50 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 10 °C/min จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 230 °C
- Carrier gas: Nitrogen
- Flow rate: 76.2 ml/min

จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล (Citral retention) ดังสมการ

$$\text{ร้อยละการคงอยู่} = \frac{\text{ปริมาณซิทรัลในผงแห้ง (Dry basis)} \times 100}{\text{ปริมาณซิทรัลในอิมัลชันสายป้อน}}$$



รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

(Gas chromatograph, GC Shimadzu GC-2010, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan)

### 3.3.6 ค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว

ซังผงแห้งที่เตรียมได้ประมาณ 0.1 กรัม มาสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 5 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง โดยใช้ไมโครฟิลเตอร์ นำสารละลายที่ได้มาหาค่าปริมาณซีทรอลในตัวทำละลาย โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีที่สภาวะเดียวกับข้อ 3.3.5 โดยค่าที่รายงานจะเป็นค่าคงอยู่ที่พื้นผิวรวม

### 3.3.7 ความคงตัวของผงแห้ง

ซังผงแห้งที่เตรียมได้ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร จำนวน 18 ขวด นำไปเก็บในตู้อบที่สภาวะอุณหภูมิและความชื้นคงที่ที่  $50^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ตามลำดับ เป็นเวลา 30 วัน ในระหว่างระยะเวลาดังกล่าวจะนำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ค่าร้อยละการคงอยู่ของซีทรอลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นในข้อ 3.3.5

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การศึกษาปริมาณและองค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้

การศึกษาหาปริมาณและองค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้กระทำโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC/MS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีในสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า E-citral และ Z-citral หรือเรียกรวมกันว่า citral เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 80.80 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการทราบปริมาณที่แน่นอนขององค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้จึงเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้ ในหัวข้อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น ค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว และความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลิ่น หลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย จะคำนวณโดยคิดเทียบกับสารองค์ประกอบหลัก

ตารางที่ 4.1 ปริมาณและองค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS

| Component               | Relative contents (%) |
|-------------------------|-----------------------|
| E-citral                | 45.8                  |
| Z-citral                | 35.0                  |
| beta-myrcene            | 5.5                   |
| geraniol                | 5.1                   |
| geranyl acetate         | 2.0                   |
| 6-methyl-5-hepten-2-one | 1.5                   |
| Linalool L              | 1.1                   |
| selina-6-en-4-ol        | 1.1                   |
| other                   | 2.9                   |

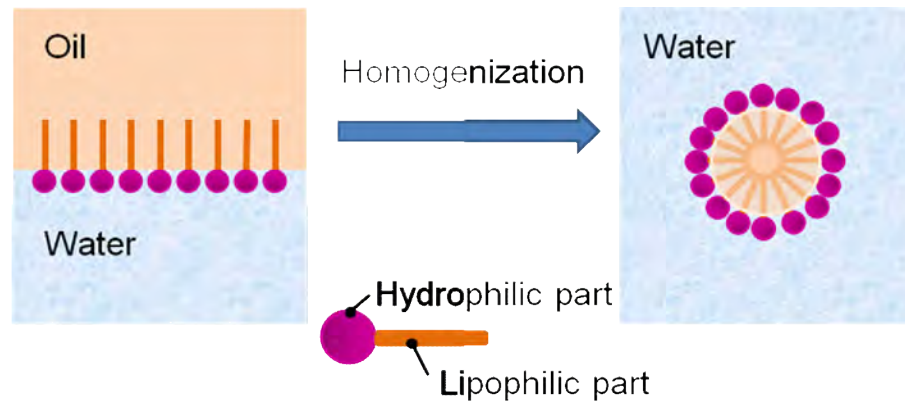


## 4.2 การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดสารหล่อหุ้ม

### 4.2.1 ผลต่อขนาดอิมัลชันและการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน

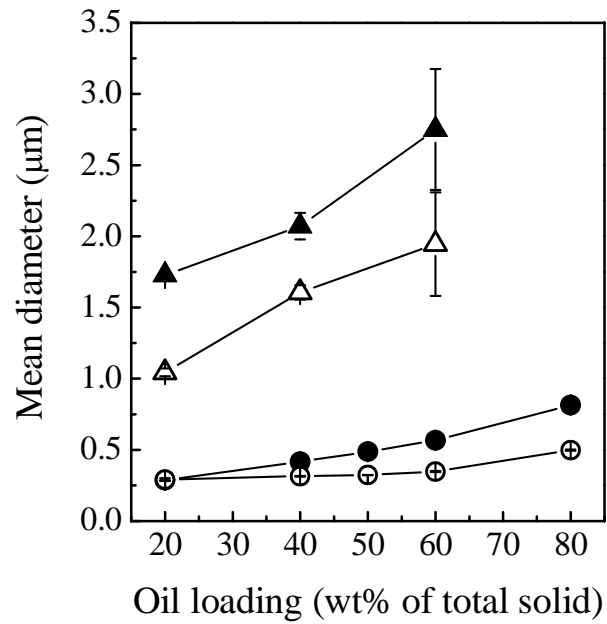
การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดสารหล่อหุ้มต่อขนาดอิมัลชัน มีความจำเป็นเนื่องจาก ขนาดอิมัลชันจะส่งผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยทำการศึกษาที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 40 50 60 และ 80 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (น้ำหนักน้ำมันตะไคร้และสารหล่อหุ้ม) ที่มีต่อขนาดอิมัลชันและการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน (Size distribution) และทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารหล่อหุ้ม 2 ชนิดได้แก่ แคปซูล และ กัมอะราบิกผสมมอลโตเดคตรินในอัตราส่วน 1: 3 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าสารหล่อหุ้มทั้งสองชนิด เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของอิมัลชันใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shu และคณะ (2006) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดคงที่นั้น จะส่งผลให้ปริมาณสารหล่อหุ้มที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการเตรียมอิมัลชันลดลง ได้อิมัลชันที่มีความคงตัวลดลง สังเกตได้จากเมื่อขนาดของอิมัลชันมีขนาดใหญ่จะทำให้อิมัลชันเกิดการแยกชั้นเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน และพบว่าที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้เดียวกันสารหล่อหุ้มชนิดแคปซูลจะได้ขนาดของอิมัลชันเล็กกว่าเมื่อเทียบกับสารหล่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดคตริน (1: 3) ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการเกิดอิมัลชัน แคปซูลซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะมีการจัดเรียงตัวของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่พื้นผิวของหยดน้ำมันอย่างหนาแน่น ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของหยดน้ำมัน จึงทำให้หยดน้ำมันที่ได้มีขนาดเล็ก แต่ในส่วนของกัมอะราบิกผสมมอลโตเดคตริน พบว่าโครงสร้างของกัมอะราบิกมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขาจำนวนมากของโปรตีนและพอลิแซคคาไรด์ จึงทำให้การจัดเรียงตัวของส่วนที่ชอบน้ำที่พื้นผิวของหยดน้ำมันหนาแน่นน้อยกว่าแคปซูล ส่งผลให้หยดน้ำมันที่ได้มีขนาดใหญ่ และอิมัลชันมีความเสถียรน้อย เมื่อพิจารณาผลขนาดของหยดน้ำมันในผงแห้งน้ำมันตะไคร้ (Reconstituted emulsion) พบว่า ขนาดของหยดน้ำมันในผงแห้งมีค่าน้อยกว่าขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชัน นั่นคือ ในระหว่างขั้นตอนการทำให้เกิดละอองฝอย หยดน้ำมันขนาดใหญ่ไม่สามารถถูกกักเก็บให้อยู่ในผงแห้งได้

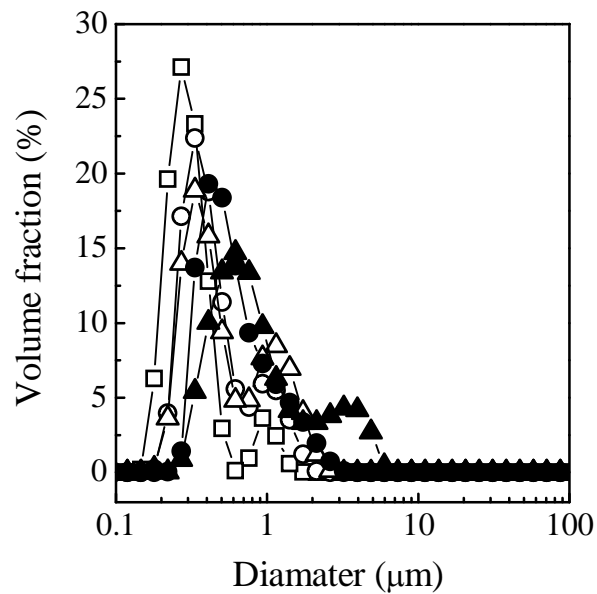


รูปที่ 4.1 ลักษณะการเกิดอิมัลชันชนิด Oil in water

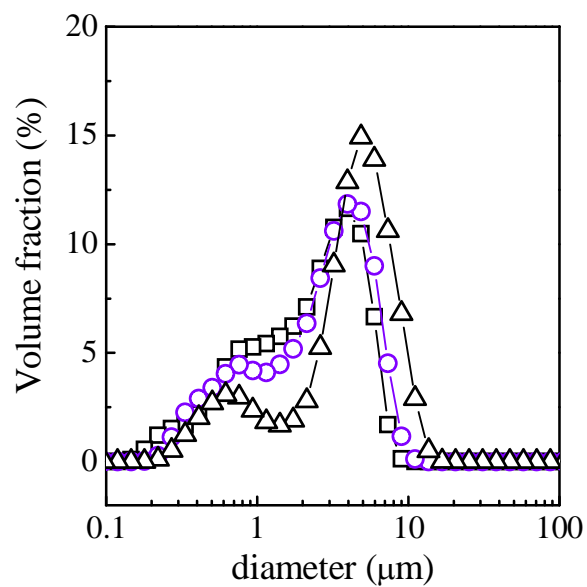
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อการกระจายตัวของขนาดอิมัลชัน พบว่า สารหอหุ้มทั้งสองชนิดให้ผลในทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวของขนาดอิมัลชันมีลักษณะเป็นการกระจายตัวแบบสองฐานนิยม (Bimodal distribution) มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 นั้นหมายถึงในระหว่างการเตรียมอิมัลชันเกิดเป็นอิมัลชันที่มีความเสถียรน้อย และสารหอหุ้มชนิดแคปซูลจะมีการกระจายตัวของขนาดอิมัลชันแคบกว่าสารหอหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ทริน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชัน (▲, ●) และในผงแห้ง (△, ○) เมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด (▲, △ กัมอะราบิก ผสมมอลโตเดกซ์ตริน, ●, ○ แคปซูล)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อการกระจายตัวของขนาดอิมัลชันเมื่อใช้สารหล่อลื่นชนิดแคปซูล (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: □ 20 wt%, ○ 40 wt%, △ 50 wt%, ● 60 wt%, ▲ 80 wt%)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อการกระจายตัวของขนาดอิมัลชันเมื่อใช้สารหล่อลื่นชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: □ 20 wt%, ○ 40 wt%, △ 60 wt%)

#### 4.2.2 ผลต่อขนาดอนุภาคและความชื้นของผงแห้ง

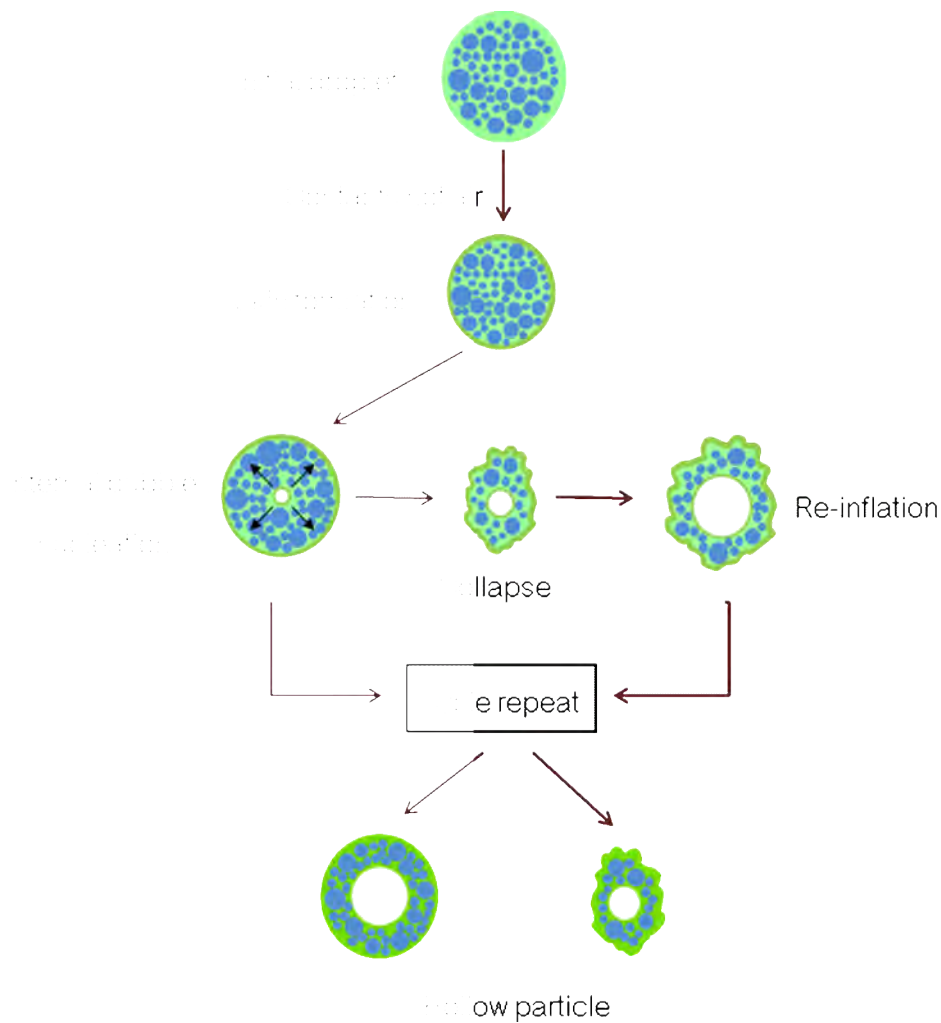
การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดสารห่อหุ้มต่อขนาดอนุภาคและความชื้นของผงแห้ง กระทำโดยเครื่อง Laser diffraction particle size analyzer และเครื่อง Karl Fischer ตามลำดับ ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้จะมีผลต่อความคงตัวของผงแห้งที่ได้ รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อขนาดอนุภาคผงแห้งโดยเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิด พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขนาดอนุภาคผงแห้งลดลงในสารห่อหุ้มชนิดแคปซูล ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gharsallaoui และคณะ (2007) กล่าวคือการเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้ทำให้ความหนืดของสายป้อนลดลง [Hogan และคณะ (2001)] จึงก่อให้เกิดเป็นหยดละอองขนาดเล็กในขั้นตอนการทำให้เกิดละอองฝอย และนำไปสู่การผลิตผงแห้งที่มีอนุภาคขนาดเล็ก แต่สำหรับในสารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ทรินพบว่าปริมาณน้ำมันตะไคร้ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคผงแห้ง

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อความชื้นของผงแห้งโดยเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิด พบว่า ความชื้นของผงแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 2-7 % โดยน้ำหนัก และปริมาณน้ำมันตะไคร้ไม่มีผลต่อค่าความชื้นในผงแห้ง ซึ่งปัจจัยโดยตรงที่มีผลต่อความชื้นในผงแห้งนั้นคืออุณหภูมิอากาศที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยของ Tuyen และคณะ (2010)

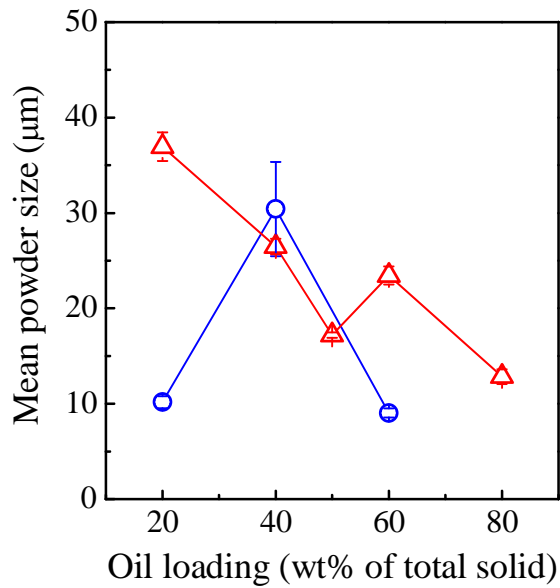
#### 4.2.3 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

การศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อโครงสร้างภายนอกและภายในของผงแห้งที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อใช้สารห่อหุ้มสองชนิด พบว่า โครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ได้เป็นทรงกลม พื้นผิวมีลักษณะเป็นหลุมโดยรอบอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rosenberg และคณะ (1985) และ Loksuwan และคณะ (2007) กล่าวคือการที่อนุภาคมีลักษณะดังกล่าวนี้เกิดการหดตัวของอนุภาคเนื่องจากการระเหยของน้ำในระหว่างขั้นตอนการอบแห้ง รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้สารห่อหุ้มสองชนิด พบว่าโครงสร้างภายในของผงแห้งทำให้ทราบว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมกลวง และแสดงถึงการฝังตัวของหยดน้ำมันตะไคร้ที่ผนังของสารห่อหุ้ม ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดลักษณะดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.5 กล่าวคือในขั้นตอนการอบแห้งอุณหภูมิภายในของหยดละอองฝอยจะมีค่าสูงขึ้นมากว่า

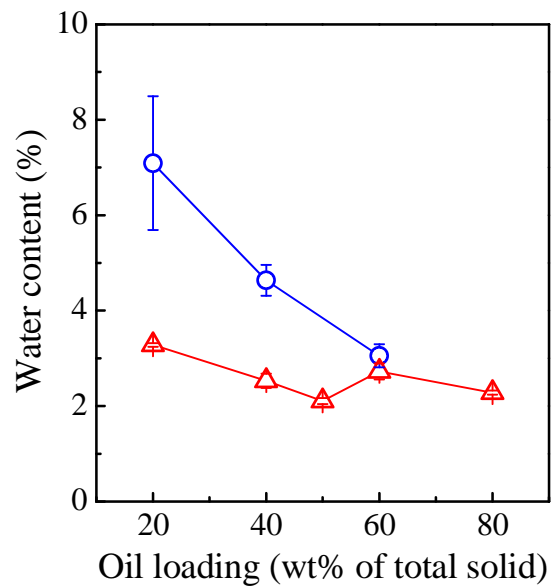
อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำทำให้น้ำที่อยู่ภายในเกิดการกลายเป็นไอและไม่สามารถแพร่ออกมาสู่ภายนอกได้ เนื่องจากผิวของอนุภาคที่เริ่มแห้ง จึงรวมตัวกันเกิดเป็นฟองอากาศอยู่ภายในผนังอนุภาค และเมื่อน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้น พบว่าความหนาของชั้นเปลือกจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มาก จะทำให้อัตราการอบแห้งเกิดอย่างรวดเร็ว และเกิดการแข็งตัวของอนุภาคอย่างรวดเร็ว



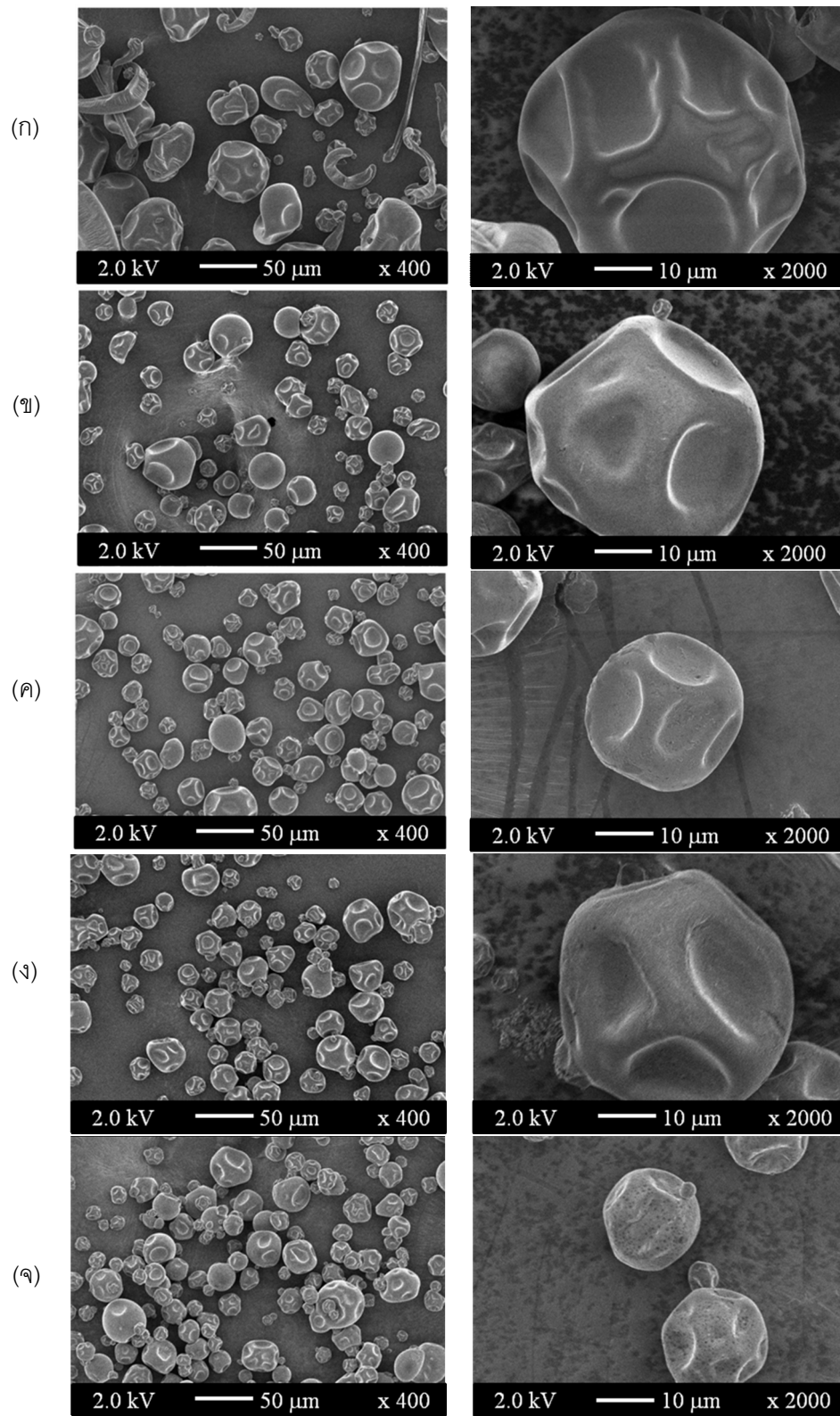
รูปที่ 4.5 กลไกการเกิดเป็นผนังอนุภาคจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอนุภาคผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิด (○ กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน, △ แคปซูล)

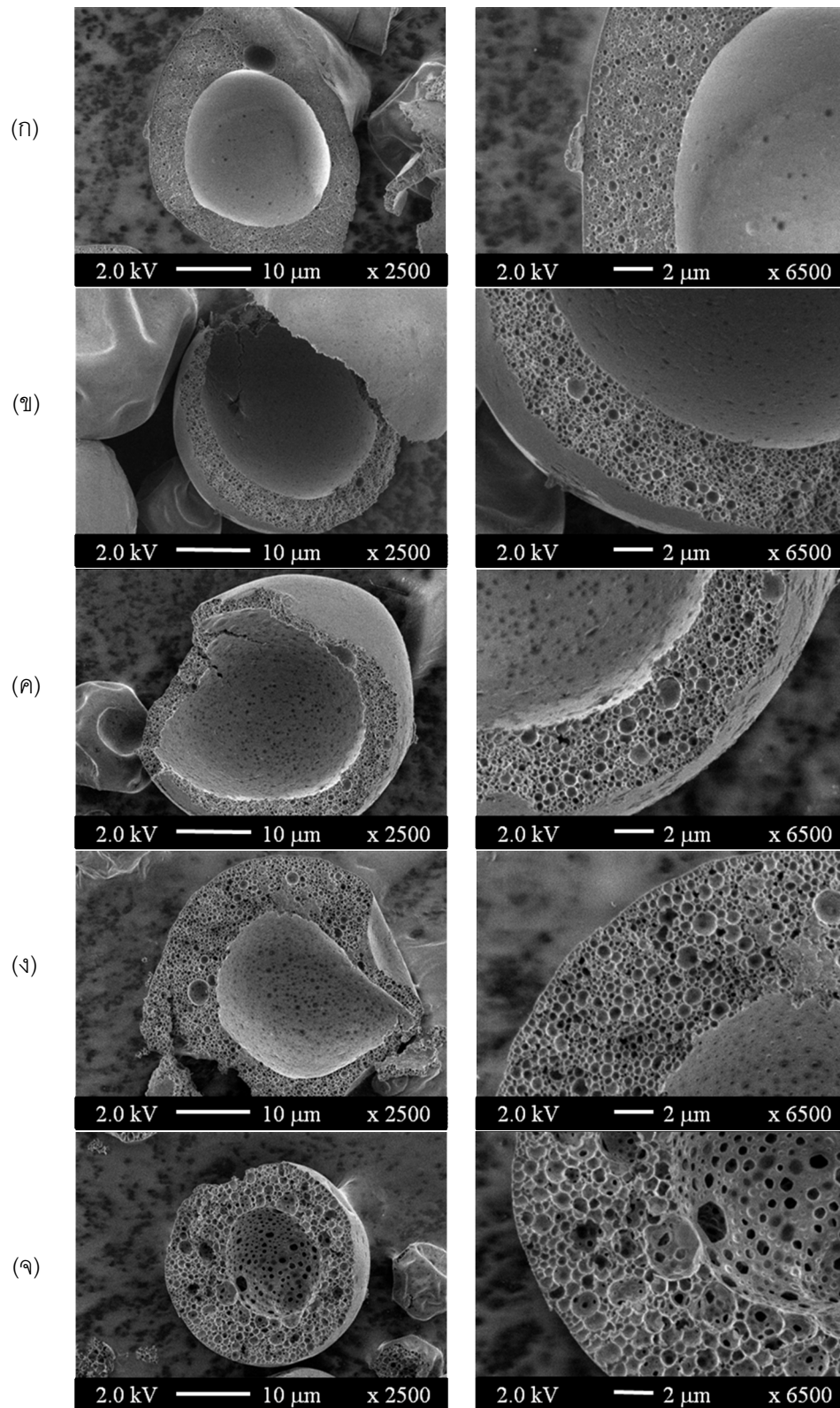


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และความชื้นของผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิด (○ กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน, △ แคปซูล)

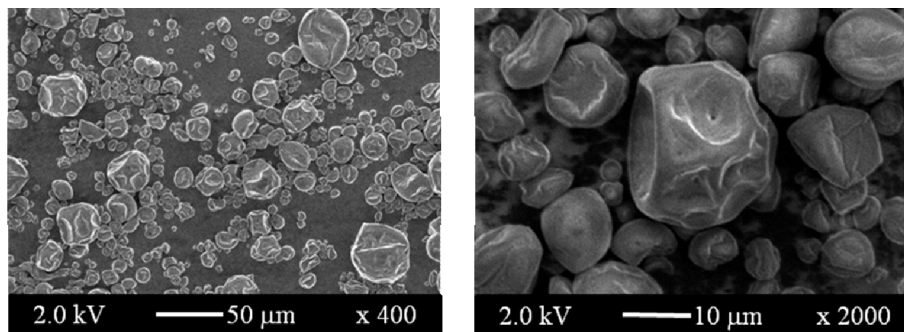


รูปที่ 4.8 โครงสร้างภายนอกของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (ปริมาณน้ำมัน ตะไคร้: (ก) 20 wt%, (ข) 40 wt%, (ค) 50 wt%, (ง) 60 wt%, (จ) 80 wt%)

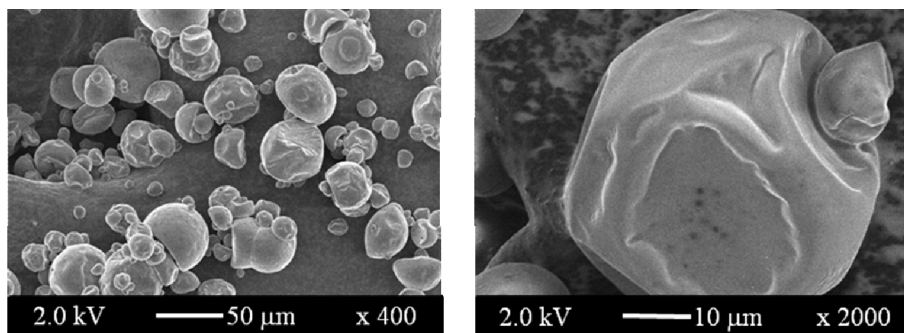




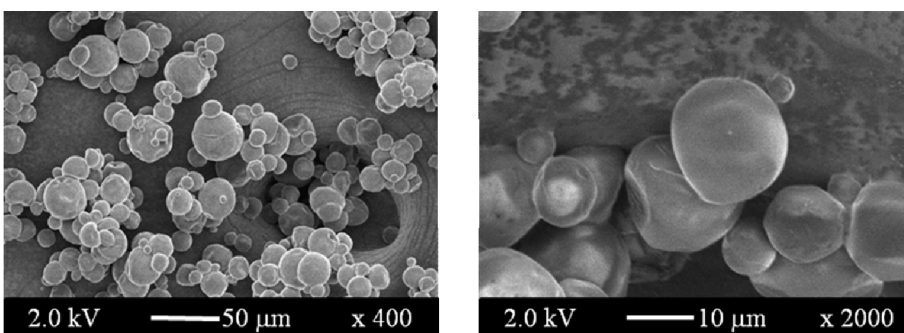
รูปที่ 4.9 โครงสร้างภายนอกของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: (ก) 20 wt%, (ข) 40 wt%, (ค) 50 wt%, (ง) 60 wt%, (จ) 80 wt%)



(ก)

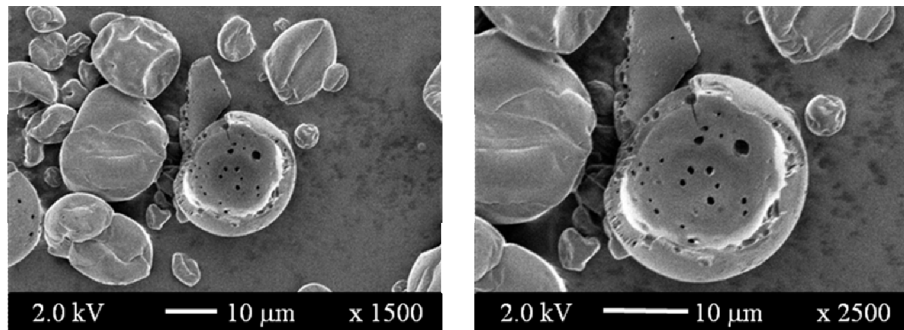


(ข)

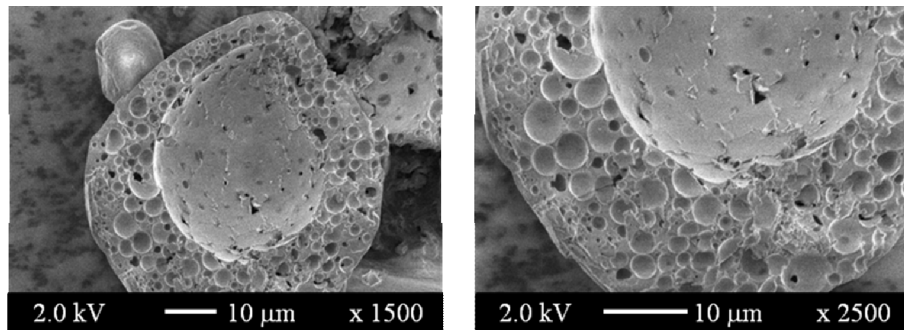


(ค)

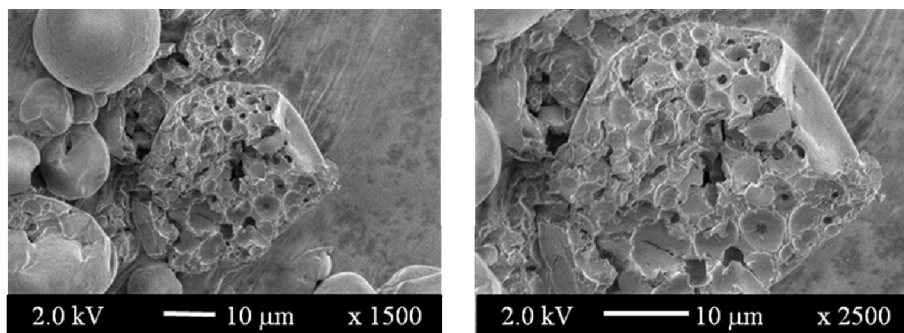
รูปที่ 4.10 โครงสร้างภายนอกของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) เป็นสารหล่อหุ้ม (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: (ก) 20 wt%, (ข) 40 wt%, (ค) 60 wt%)



(ก)



(ข)



(ค)

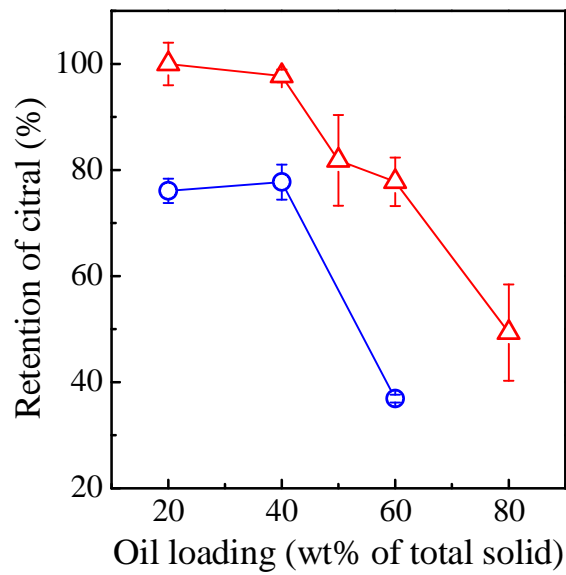
รูปที่ 4.11 โครงสร้างภายนอกของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) เป็นสารหล่อหุ้ม (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: (ก) 20 wt%, (ข) 40 wt%, (ค) 60 wt%)

#### 4.2.4 ผลต่อคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นและคาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิว

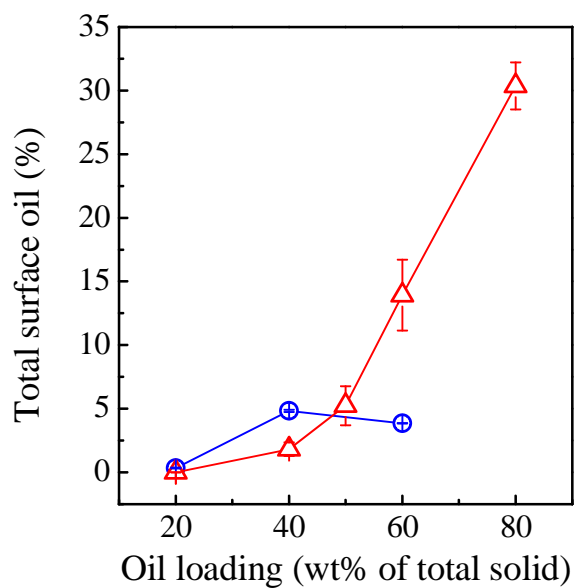
กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงดังนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำมันระหว่างกระบวนการ ซึ่งปริมาณการสูญเสียสามารถบอกได้ด้วยคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้น หากคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นมีค่าสูงก็จะเป็นผลดีต่อผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่อคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นและคาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิวจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของกระบวนการ จากการศึกษาผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดของสารหล่อหุ้มต่อคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นและคาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิวพบว่า พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้มีผลทำให้คาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งให้ผลลักษณะเดียวกันเมื่อใช้สารหล่อหุ้มสองชนิด เนื่องจากความสามารถที่จำกัดในการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ของสารหล่อหุ้ม ซึ่งสังเกตได้จากขนาดของอิมัลชันที่เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากันพบว่า สารหล่อหุ้มชนิดแคปซูลจะมีคาร์บอนการคงอยู่ของกลี้นมากกว่าเมื่อใช้สารหล่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน นั่นคือสารหล่อหุ้มชนิดแคปซูลมีความสามารถในการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแคปซูลมีสมบัติการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีกว่าจึงทำให้เกิดอิมัลชันที่มีขนาดเล็กกว่า จึงเกิดการสูญเสียของสารในระหว่างขั้นตอนการเกิดละอองฝอยน้อยกว่า

ปริมาณน้ำมันบนพื้นผิวของผงแห้งสามารถถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารอื่นได้ง่าย ซึ่งเป็นต้นเหตุในการเสื่อมสภาพของน้ำมัน ดังนั้นคาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิวจึงมีความสำคัญสำหรับความคงตัวของผงแห้งที่ได้ รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีต่อคาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิวเมื่อใช้สารหล่อหุ้มสองชนิดพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้มีผลทำให้คาร์บอนการคงอยู่ที่พื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลลักษณะเดียวกันเมื่อใช้สารหล่อหุ้มทั้งสองชนิด ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถที่จำกัดในการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ของสารหล่อหุ้ม

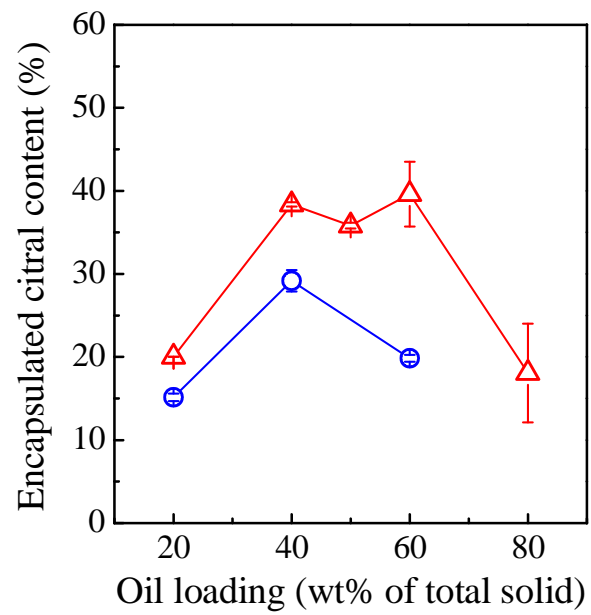
คาร์บอนการกักเก็บของซีทรัลในผงอนุภาค (Encapsulated citral content) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่ถูกกักเก็บอยู่ในของผงอนุภาค ซึ่งคำนวณได้จาก คาร์บอนการคงอยู่ของกลี้น ลบด้วยค่าการคงอยู่ของกลี้นที่พื้นผิว รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และคาร์บอนการกักเก็บของซีทรัลในผงแห้ง พบว่า การใช้แคปซูลเป็นสารหล่อหุ้มเพื่อกักเก็บน้ำมันตะไคร้ปริมาณไม่เกินร้อยละ 40 จะเกิดการสูญเสียน้ำมันตะไคร้ระหว่างกระบวนการน้อยที่สุด



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด ( $\circ$  กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน,  $\Delta$  แคปซูล)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด ( $\circ$  กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน,  $\Delta$  แคปซูล)



**รูปที่ 4.14** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และค่าร้อยละการกักเก็บของซิทรัลในผงแห้งเมื่อเปรียบเทียบสารหล่อหุ้มสองชนิด (○ กัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน, △ แคปซูล)

#### 4.2.5 ผลต่อความคงตัวของผงแห้ง

ความคงตัวของผงแห้งสามารถศึกษาได้จากการปลดปล่อยและออกซิเดชันของสารสำคัญในผงแห้งบรรจุกลั่น ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการอธิบายการปลดปล่อยนั้นมีด้วยกันหลายสมการ และพบว่าสมการของ Avrami มีความเหมาะสมในการอธิบายการปลดปล่อยของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้งได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่น ดังแสดงในภาคผนวก ข และจากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคงอยู่ของกลั่นและเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 50 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เมื่อใช้สารห่อหุ้มสองชนิดและปริมาณน้ำมันตะไคร้ต่าง ๆ พบว่าปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดของสารห่อหุ้มส่งผลต่อความคงตัวของผงแห้งบรรจุกลั่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Avrami:

$$R = \exp[-(kt)^n]$$

เมื่อ R คือ ค่าการคงอยู่ของกลั่น

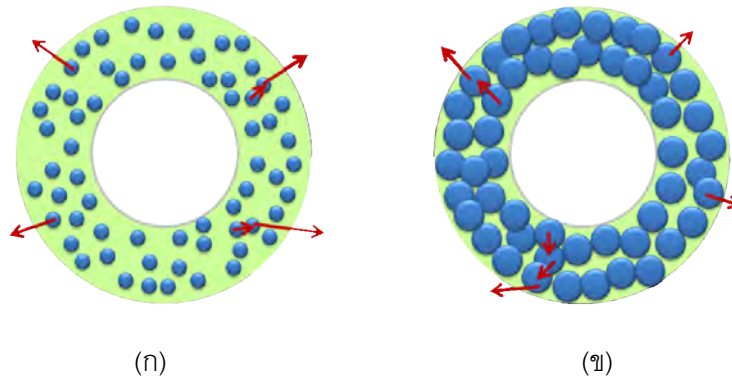
t คือ เวลาในการเก็บรักษา

k คือ ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย

n คือ ตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย

ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) นั้นสามารถหาได้จากการกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(-\ln R)$  กับ  $\ln t$  เมื่อ n คือความชันของกราฟ และจะคำนวณค่า k ได้จากจุดตัดแกน  $\ln(-\ln R)$  ของกราฟ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดของสารห่อหุ้มต่อค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้น นั่นคือ เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้มากจะทำให้การปลดปล่อยของสารเร็วกว่าที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้น้อย และกัมมะชะวาบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) เป็นสารห่อหุ้มที่มีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยน้อยกว่าแคปซูล ตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.8 นั่นคือ การปลดปล่อยสารสำคัญจะถูกกำหนดด้วยกลไกการแพร่ผ่านของโมเลกุล (Molecular diffusion) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Fick's law โดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลสารมีค่าขึ้นอยู่กับระยะทางในการถ่ายโอนมวลสาร พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนมวลสารและค่า diffusivity ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้มากจะทำให้ความหนาแน่นของหยดน้ำมันที่ผนังสารห่อหุ้มจะมาก ทำให้สังเกตเห็นการถ่ายโอนมวลสารผ่านสารห่อหุ้มลดลง และจะเกิดการถ่ายโอนมวลสารในเฟสของเหลวมากกว่าเฟสของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบสารห่อหุ้มสองชนิดพบว่า

กัมมะอะบิคผสมมอลโตเดกซ์ตรินจะทำให้ผงแห้งมีความคงตัวมากกว่าแคปซูลเนื่องจากกัมมะอะบิคมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าแคปซูลซึ่งจะสามารถกักเก็บน้ำมันตะไคร้ได้ดีกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goubet และคณะ (1998)

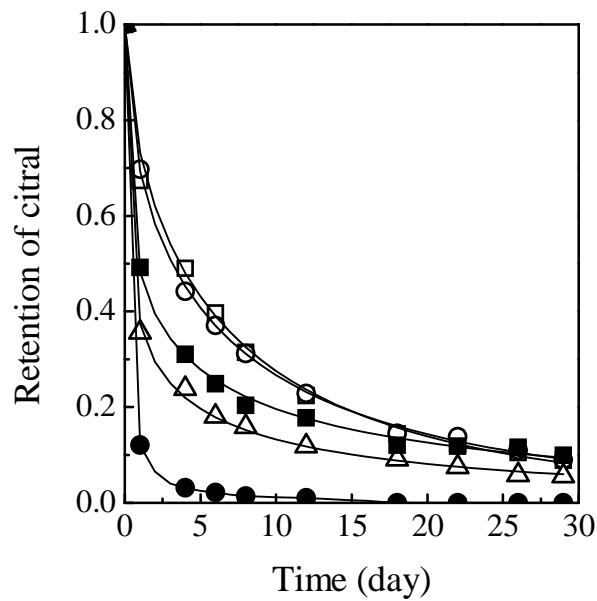


รูปที่ 4.15 แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้ง (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: (ก) 20 wt%, (ข) 80 wt%)

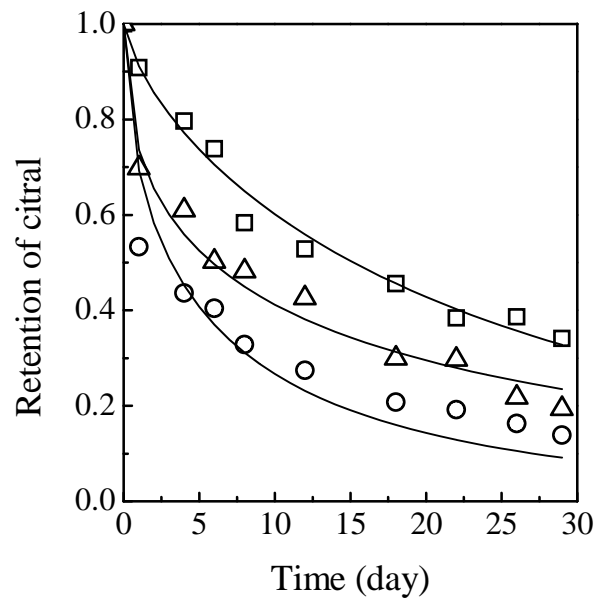
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดของสารห่อหุ้ม

| ชนิดสารห่อหุ้ม                | ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|-------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------|----------------|
| แคปซูล                        | 20                                   | 0.62 | 1.51              | 1.00           |
|                               | 40                                   | 0.56 | 1.65              | 1.00           |
|                               | 50                                   | 0.35 | 4.04              | 0.99           |
|                               | 60                                   | 0.31 | 9.47              | 0.99           |
|                               | 80                                   | 0.32 | 12.75             | 0.99           |
| กัมมะอะบิค+<br>มอลโตเดกซ์ตริน | 20                                   | 0.74 | 0.40              | 0.98           |
|                               | 40                                   | 0.44 | 1.49              | 0.99           |
|                               | 60                                   | 0.46 | 0.77              | 0.95           |





รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อใช้สารหล่อหุ้มชนิดแคปซูล (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: □ 20 wt%, ○ 40 wt%, ■ 50 wt%, △ 60 wt%, ● 80 wt%)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อใช้สารหล่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: □ 20 wt%, ○ 40 wt%, △ 60 wt%)

### 4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

การศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อสมบัติของผงแห้งที่ได้ จะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 120-180 °C โดยใช้สารหล่อหุ้มชนิดแคปซูลในการเตรียมอิมัลชันที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 50 % โดยน้ำหนัก และปริมาณน้ำมันตะไคร้ 40 % โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด จากนั้นนำไปทำให้เป็นผงแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิดังกล่าว

#### 4.3.1 ผลต่อขนาดอนุภาคและความชื้นของผงแห้ง

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขนาดอนุภาค ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อขนาดอนุภาค ซึ่งให้ผลแตกต่างกับงานวิจัยของ Finney และคณะ (2002) และ Tonon และคณะ (2008) ที่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วดังนั้นอนุภาคจึงเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว และไม่มีเวลาที่อนุภาคจะเกิดการหดตัว ทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำ

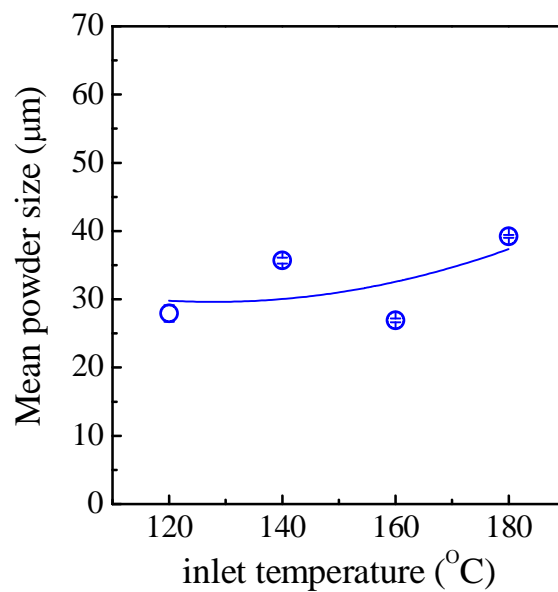
อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นมีผลโดยตรงต่อความชื้นของผงแห้ง รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและความชื้นของผงแห้ง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้ามีผลให้ความชื้นของผงแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างหยดละอองฝอยกับอากาศแห้งมากกว่า เป็นผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนเพื่อระเหยน้ำออกได้มากกว่า ดังนั้นจึงทำให้ผงแห้งที่ได้มีปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Quek และคณะ (2007) และ Grabowski และคณะ (2006)

#### 4.3.2 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

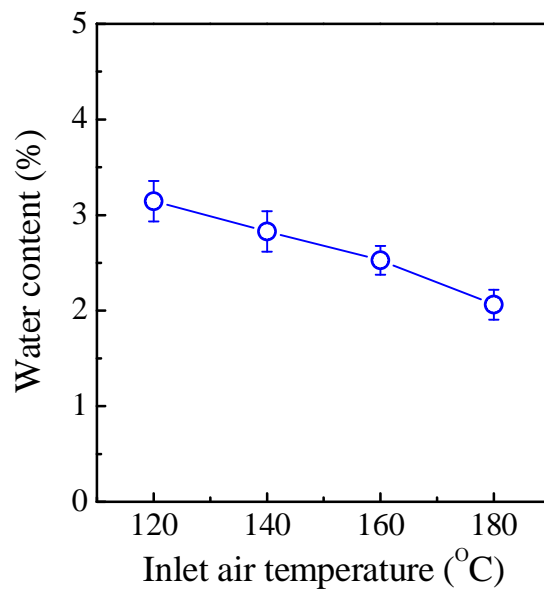
การศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อโครงสร้างภายนอกและภายในของผงแห้งที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า โครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ได้เป็นทรงกลม พื้นผิวอนุภาคบางส่วนมีลักษณะเรียบและบางส่วนมีลักษณะเป็นหลุม โดยรอบอนุภาคสำหรับทุกค่าของอุณหภูมิอากาศขาเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อโครงสร้างภายในของผงแห้งซึ่งแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้ามีผลทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและผนังของสารห่อหุ้มบางลง เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอนุภาคจึงเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วทำให้น้ำที่อยู่ภายในไม่สามารถแพร่ออกมาได้ และอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำจึงทำให้น้ำกลายเป็นไอแล้วรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศภายในอนุภาค และมีแรงดันทำให้อนุภาคขยายตัว เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้แรงดันภายในเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ผงอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่และมีผนังที่บางกว่า

#### 4.3.3 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว

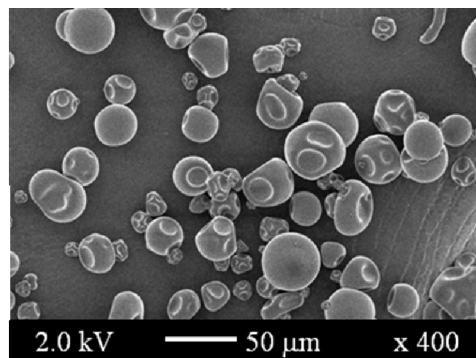
การศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพของกระบวนการและความคงตัวของผงแห้งที่ได้ รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นมีค่าใกล้เคียง 100 % สำหรับทุกค่าของอุณหภูมิอากาศขาเข้า และค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.93 - 2.19 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลี้นและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว



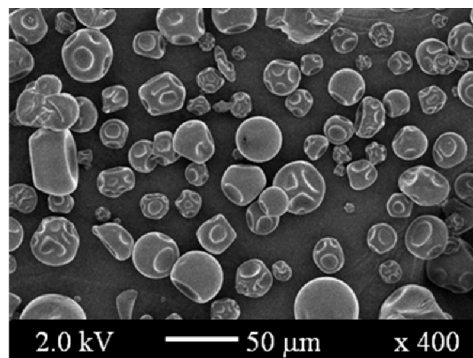
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขนาดอนุภาค



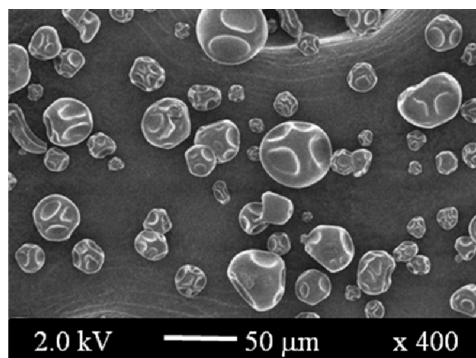
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและความชื้นในผงแห้ง



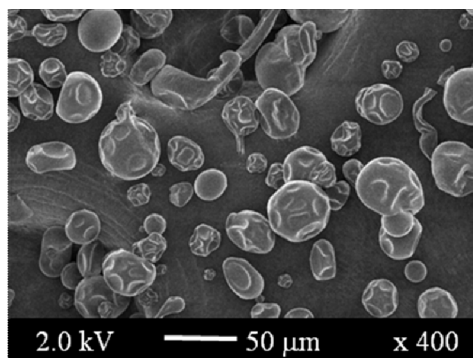
(ก)



(ข)

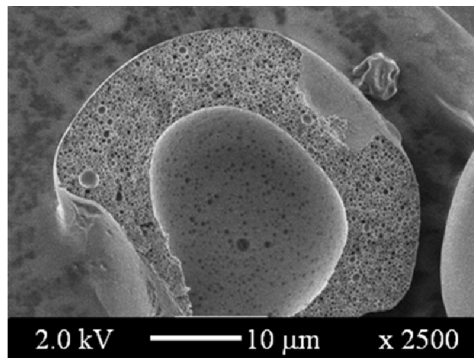


(ค)

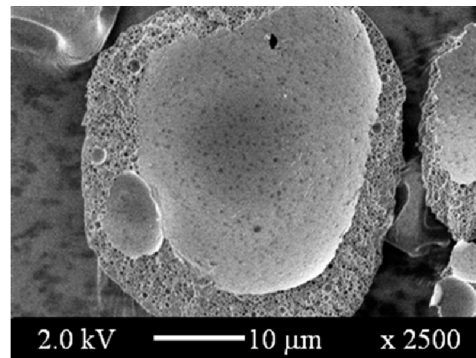


(ง)

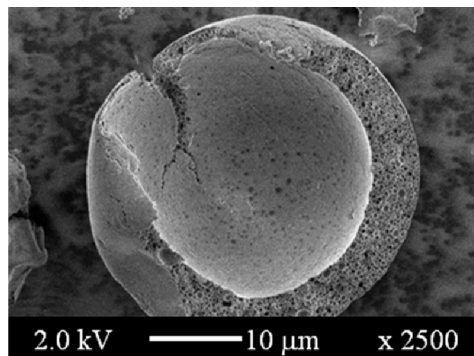
รูปที่ 4.20 โครงสร้างภายนอกของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (อุณหภูมิอากาศ  
ขาเข้า: (ก) 120 °C, (ข) 140 °C, (ค) 160 °C, (ง) 180 °C)



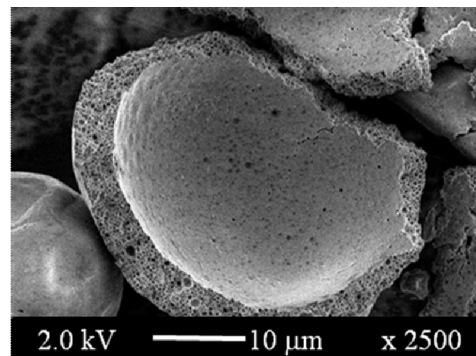
(ก)



(ข)

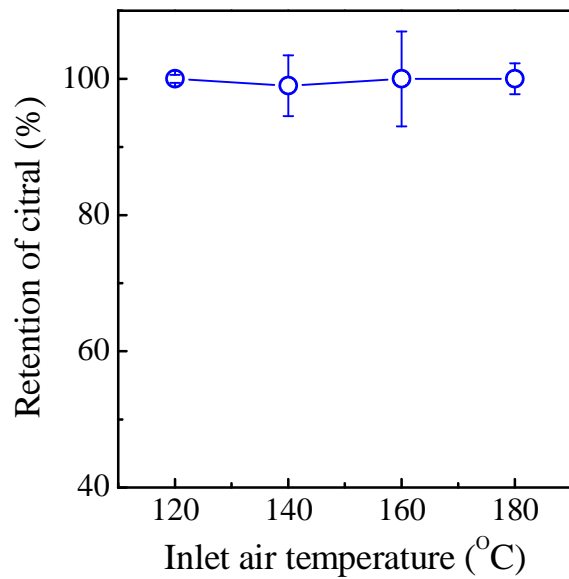


(ค)

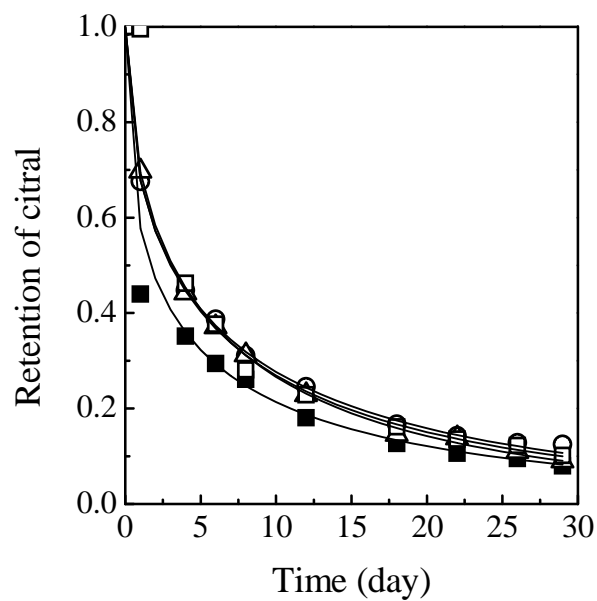


(ง)

**รูปที่ 4.21** โครงสร้างภายในของแข็งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (อุณหภูมิอากาศ  
 เข้า: (ก) 120 °C, (ข) 140 °C, (ค) 160 °C, (ง) 180 °C)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอากาศขาเข้า: ■ 120 °C, ○ 140 °C, △ 160 °C, □ 180 °C)

#### 4.3.4 ผลต่อความคงตัวของผงแห้ง

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคงอยู่ของกลิ่นและเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิอากาศขาเข้ามีผลต่อความคงตัวของผงแห้งในกรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 140 °C ในการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และจากการคำนวณค่าตัวแปรในสมการ Avrami นั่นคือ ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้ามากกว่า 140 °C ในการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) ใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าการใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำกว่า 140 °C ส่วนตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.8 นั่นคือ การปลดปล่อยสารสำคัญจะถูกกำหนดด้วยกลไกการแพร่ผ่านของโมเลกุล (Molecular diffusion) เนื่องจากการดำเนินงานที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำ จะทำให้ค่าความชื้นในผงแห้งมากกว่าอุณหภูมิอากาศขาสูง ซึ่งจะส่งผลให้โมเลกุลของแป้งจับกันอย่างหลวม ๆ มากขึ้นเพราะมีน้ำแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้ง ซึ่งดูได้จากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของแป้งที่ลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น [Chung และคณะ (2002)] จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการถ่ายโอนมวลของน้ำมันตะไคร้ออกไปได้มากกว่าการใช้อุณหภูมิอากาศขาสูง ทำให้การปลดปล่อยน้ำมันตะไคร้ที่อุณหภูมิต่ำเร็วกว่าที่อุณหภูมิสูง

**ตารางที่ 4.3** ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

| ชนิดสารห่อหุ้ม | อุณหภูมิอากาศขาเข้า<br>(°C) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------------|------|-------------------|----------------|
| แคปซูล         | 120                         | 0.46 | 2.61              | 0.99           |
|                | 140                         | 0.52 | 1.61              | 1.00           |
|                | 160                         | 0.57 | 1.66              | 1.00           |
|                | 180                         | 0.53 | 1.67              | 0.99           |



#### 4.4 การศึกษาผลของขนาดอิมัลชันในสายป้อน

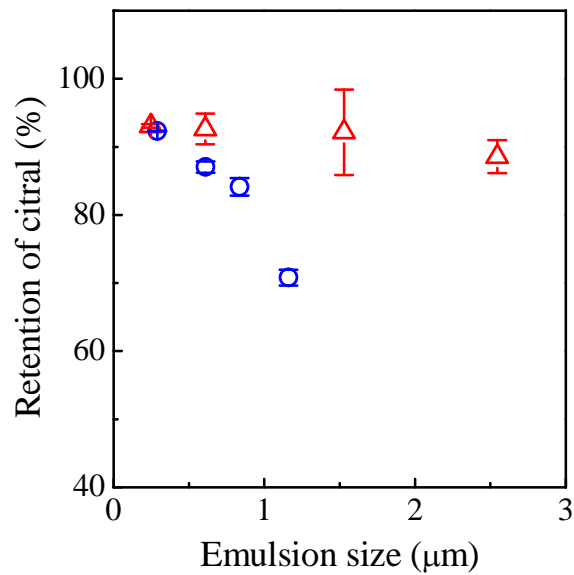
การศึกษาผลของขนาดอิมัลชันในสายป้อนต่อสมบัติผงแห้งที่ได้ ในขั้นการเตรียมอิมัลชันที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ทำได้โดยควบคุมความเร็วของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์เพื่อให้ได้อิมัลชันที่มีขนาดต่าง ๆ กันและมีขนาดอยู่ในช่วง 0-3 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปทำให้เป็นผงแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะการดำเนินงานเดียวกันกับในหัวข้อ 4.2

##### 4.4.1 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลินและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว

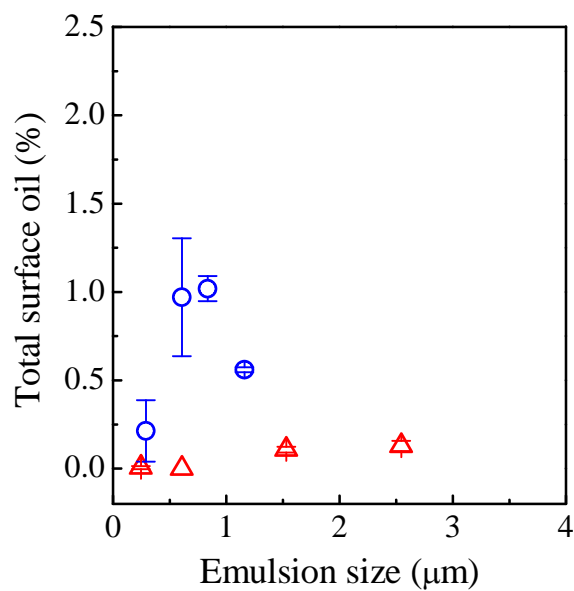
ขนาดของอิมัลชันในสายป้อนมีผลต่อค่าการคงอยู่ของกลินและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวอย่างมาก รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอิมัลชันในสายป้อนต่อค่าการคงอยู่ของกลิน จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขนาดอิมัลชันมีผลทำให้ค่าร้อยละการคงอยู่ของกลินลดลง ซึ่งให้ผลในทางเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อนเท่ากับร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soottitantawat และคณะ (2005) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออนุภาคของอิมัลชันมีขนาดใหญ่จะถูกแรงเฉือนจากอะตอมไมเซอทำให้อนุภาคอิมัลชันแตกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียกลินระหว่างกระบวนการมากขึ้น รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันในสายป้อนต่อค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว พบว่า การเพิ่มขนาดอิมัลชันมีผลทำให้ค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิวมีค่ามากขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อนเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด

##### 4.4.2 ผลต่อค่าความคงตัวของผงแห้ง

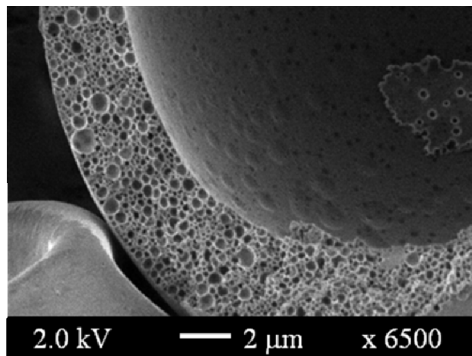
รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคงอยู่ของกลินและเวลาในการเก็บรักษาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอิมัลชัน พบว่า ขนาดอิมัลชันและปริมาณน้ำมันตะไคร้มีผลต่อความคงตัวของผงอนุภาค และจากการคำนวณค่าตัวแปรในสมการ Avrami นั่นคือ ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า การเพิ่มขนาดอิมัลชันทำให้ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) ลดลงที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มขนาดอิมัลชันทำให้ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ส่วนตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.5 นั่นคือ การปลดปล่อยสารสำคัญจะถูกกำหนดด้วยกลไกการแพร่ผ่านของโมเลกุล (Molecular diffusion) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้



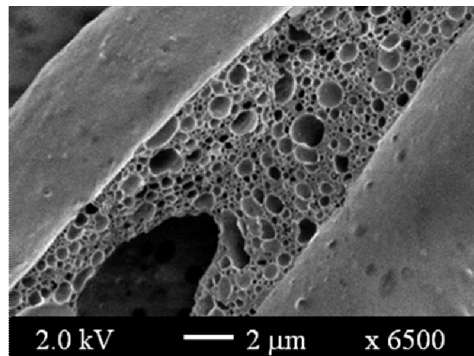
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันและค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น (ปริมาณน้ำมันตะไคร้:  $\triangle$  20 wt%,  $\circ$  40 wt%)



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันและค่าร้อยละการคงอยู่ที่พื้นผิว (ปริมาณน้ำมันตะไคร้:  $\triangle$  20 wt%,  $\circ$  40 wt%)

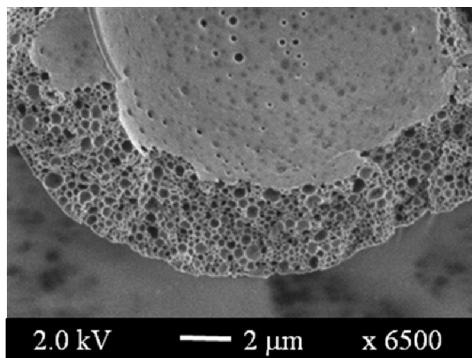


(ก)

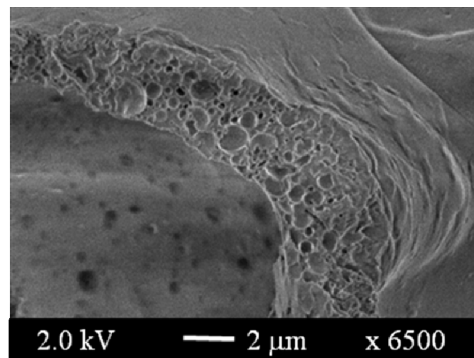


(ข)

รูปที่ 4.26 โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและแคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (ขนาดอิมัลชัน: (ก) 0.25 μm, (ข) 1.53 μm)



(ก)



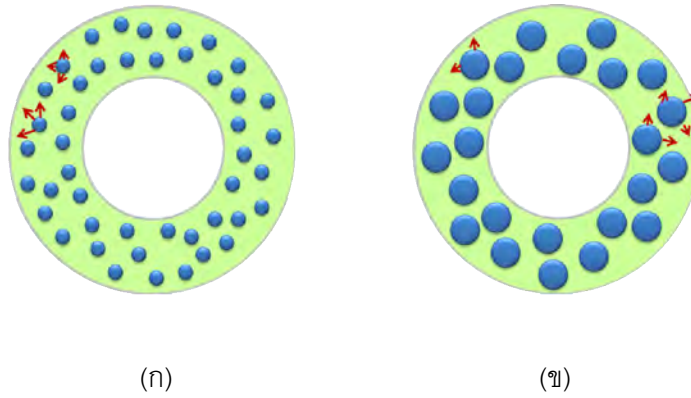
(ข)

รูปที่ 4.27 โครงสร้างภายในผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดและแคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (ขนาดอิมัลชัน: (ก) 0.29 μm, (ข) 1.42 μm)

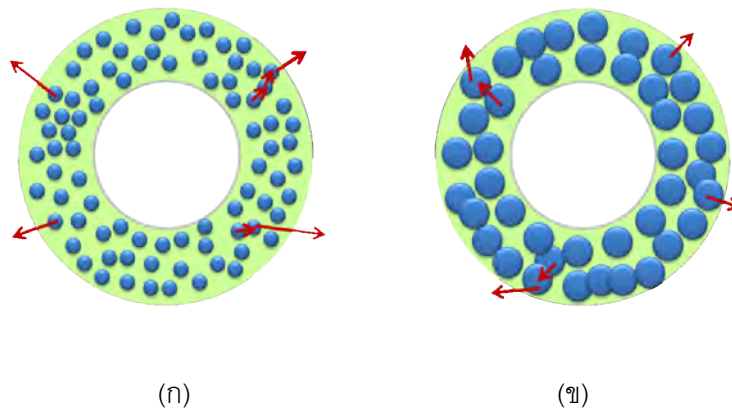
ที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่นของหยดน้ำมันในผนังสารห่อหุ้มจะน้อยกว่าที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารจึงได้แก่ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล กล่าวคือเมื่ออิมัลชันมีขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลมาก ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยเร็วกว่าผองอนุภาคที่ขนาดอิมัลชันใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด ความหนาแน่นของหยดน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้หยดน้ำมันอยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารจึงได้แก่ ระยะทางในการถ่ายโอนมวล กล่าวคือ เมื่ออิมัลชันมีขนาดใหญ่ทำให้สิ่งกีดขวางในการถ่ายโอนมวลลดลง และการถ่ายโอนมวลสารในเฟสของเหลวมากกว่าในเฟสของแข็ง จึงทำให้การปลดปล่อยเร็วกว่าผองอนุภาคที่อิมัลชันขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.29

**ตารางที่ 4.4** ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอิมัลชัน

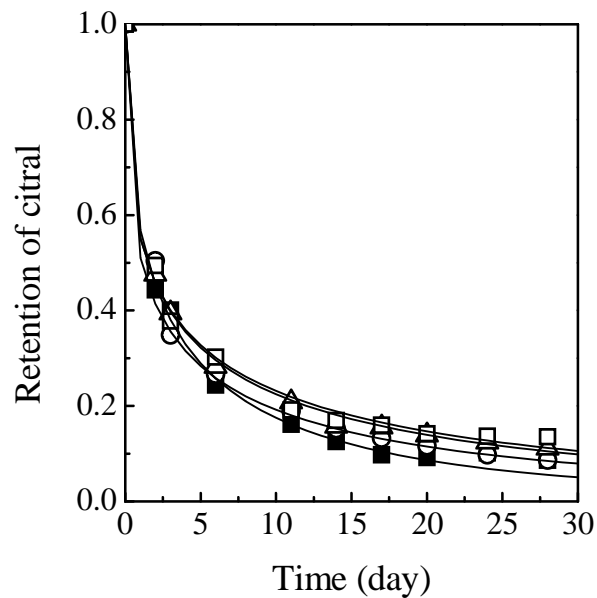
| ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | ขนาดอิมัลชัน<br>( $\mu\text{m}$ ) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------|-------------------|----------------|
| 20                                   | 0.247                             | 0.49 | 3.11              | 0.99           |
|                                      | 0.609                             | 0.39 | 3.62              | 1.00           |
|                                      | 1.530                             | 0.40 | 2.73              | 0.99           |
|                                      | 2.545                             | 0.39 | 2.66              | 0.97           |
| 40                                   | 0.290                             | 0.37 | 5.32              | 1.00           |
|                                      | 0.610                             | 0.38 | 6.83              | 0.98           |
|                                      | 0.837                             | 0.34 | 7.56              | 0.99           |
|                                      | 1.161                             | 0.30 | 14.50             | 0.99           |



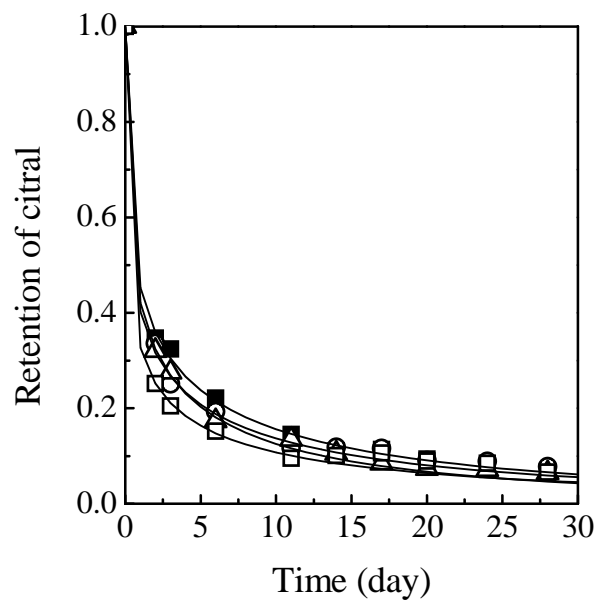
รูปที่ 4.28 แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้งเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: (ก) เล็ก, (ข) ใหญ่)



รูปที่ 4.29 แสดงการถ่ายโอนมวลของหยดน้ำมันในผงแห้งเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: (ก) เล็ก, (ข) ใหญ่)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ■ 0.25  $\mu\text{m}$ , ○ 0.61  $\mu\text{m}$ , △ 1.53  $\mu\text{m}$ , □ 2.55  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าการคงอยู่ของกลิ่นเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ■ 0.29  $\mu\text{m}$ , ○ 0.61  $\mu\text{m}$ , △ 0.84  $\mu\text{m}$ , □ 1.16  $\mu\text{m}$ )

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถกักเก็บน้ำมันตะไคร้ให้อยู่ในรูปของผงอนุภาคโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้สารหล่อหุ้มสองชนิดคือ แป้งดัดแปร (แคปซูล) และกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) ผงอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม กลวง พื้นผิวเป็นหลุมโดยรอบขนาดประมาณ 10-40 ไมโครเมตร จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ สมบัติของผงอนุภาคและความคงตัวของผงอนุภาค ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

##### 1. ผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และชนิดสารหล่อหุ้ม

- การเพิ่มปริมาณน้ำมันตะไคร้ทำให้ขนาดอิมัลชันใหญ่ขึ้น ค่าการคงอยู่ของซีทรอลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย และความคงตัวของผงอนุภาคลดลง
- ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่ยังคงทำให้ค่าการคงอยู่ของซีทรอลมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 คือต่ำกว่าร้อยละ 40
- ปริมาณน้ำมันตะไคร้ไม่มีผลต่อค่าความชื้นของผงอนุภาคซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 2-5
- สารหล่อหุ้มชนิดกัมอะราบิคผสมมอลโตเดกซ์ตริน (1: 3) ทำให้ผงอนุภาคมีความคงตัวมากกว่าแป้งดัดแปร

##### 2. ผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

- การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อค่าการคงอยู่ของซีทรอลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย แต่จะมีผลทำให้ค่าความชื้นในผงอนุภาคลดลง
- การใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำกว่า 140 °C ในการดำเนินงานทำให้ผงอนุภาคมีความคงตัวน้อยที่สุด

### 3. ผลของขนาดอิมัลชันในสายป้อน

- การเพิ่มขนาดของอิมัลชันในสายป้อนส่งผลให้ค่าการคงอยู่ของซีทรอลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยลดลง
- ปริมาณน้ำมันตะไคร้มีผลต่อความคงตัวของผงอนุภาคมากกว่าขนาดของอิมัลชัน โดยที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด พบว่าเมื่อขนาดอิมัลชันเพิ่มขึ้นทำให้ความคงตัวของผงอนุภาคลดลง แต่ที่ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมดการเพิ่มขนาดอิมัลชันไม่มีผลต่อความคงตัวของผงอนุภาค

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อศึกษาการกักเก็บน้ำมันตะไคร้โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

- ศึกษาผลของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) ที่ใช้เตรียมอิมัลชัน โดยศึกษาที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำกว่าร้อยละ 50
- ศึกษาผลของสารหน่วงที่เป็นสารผสมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อวิเคราะห์ผลที่มีต่อสมบัติของผงอนุภาค และความคงตัวของผงอนุภาคที่ได้
- ศึกษาคุณภาพของน้ำมันตะไคร้ที่ผ่านการกักเก็บโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการนำมาเปรียบเทียบกับกลิ่นและรสในสภาวะใช้งาน



## รายการอ้างอิง

- Berger, R. G. Flavours and fragrances. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Bertolini, A. C., Siani, A. C., Grosso, C. R. F. Stability of monoterpenes encapsulated in gum Arabic by spray-drying. Journal of agricultural and food chemistry 49 (2001): 780-785.
- Boh, B., Boštjan, S. Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. RMZ-Materials and geoenvironment 55 (2008): 329-344.
- Chung, H. J., Lee, E. J., Lim, S. T. Comparison in glass transition and enthalpy relaxation between native and gelatinized rice starches. Carbohydrate polymers 48 (2002): 287-298.
- COOPERATIVEPURCHASERS. Maltodextrin [online]. 2007. แหล่งที่มา:  
<http://www.cooperativepurchasers.com/Ingredients/Maltodextrin/> [28 Feb. 2009]
- Darinka, D., Luisito, C., Jean, A., Eric, A. D. Chemical and physical stability of citral and limonene in sodium dodecyl sulfate-chitosan and gum arabic-stabilized oil-in-water emulsions. Journal of agricultural and food chemistry 55 (2007): 3585-3591.
- Finney, J., Buffo, R., Reineccius, G. A. Effects of type of atomization and processing temperature on the physical properties and stability of spray-dried flavors. Journal of food science 67 (2002): 1108-1114.
- Fuchs, M., Turchiulu, C., Bohin, M., Cuvelier, M.E. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration. Journal of food engineering 75 (2006): 27-35.
- GEA Process Engineering Inc. Spray drying technology [online]. 2008. แหล่งที่มา:  
[http://www.niroinc.com/technologies/spray\\_drying\\_tech.asp](http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp) [23 March 2010]

- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: Review. Food research international 40 (2007): 1107-1121.
- Giovagnoli, S., Blasi, P., Ricci, M. Physicochemical characterization and release mechanism of a novel prednisone biodegradable microsphere formulation. Journal of pharmaceutical sciences 97 (2008): 303-317.
- Hogan, S. A., McNamee, B. F., Dolores, E. Emulsification and microencapsulation properties of sodium caseinate/carbohydrate blends. International dairy journal 11 (2001): 137-144.
- Hui, Y. H., Clary, C., Farid, M. M., Fasina, O. O. Food drying science and technology: Microbiology, Chemistry, Applications. Pennsylvania: DEStech Publications, 2008.
- Krishnaiah, D., Sarbatly, R., Hafeza, A.M.M. Study on retention of bioactive components of Morinda Citrifolia L. using spray-drying. Journal of applied sciences 9 (2009): 3092-3097.
- Kuentz, M., Egloff, P., Dieter, R. A technical feasibility study of surfactant-free drug suspensions using octenyl succinate-modified starches. European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics 63 (2006): 37-43.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J. Flavour encapsulation and controlled release – a review. International journal of food science and technology 41 (2006): 1-21.
- Masters, K. Spray drying handbook. Fifth edition. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- Papadopoulou, V., Kosmidis, K., Vlachou, M. On the use of the Weibull function for the discernment of drug release mechanisms. International journal of pharmaceuticals 309 (2006): 44-50.

- Rosenberg, M., Kopelman, I. J., Talmon, Y. Factors affecting retention in spray-drying microencapsulation of volatile materials. Journal of agricultural and food chemistry 38 (1990): 1288-1294.
- Schaneberg, B.T., Khan, I.A. Comparison of extraction methods for marker compounds in the essential oil of lemon grass by GC. Journal of agricultural and food chemistry 50 (2002): 1345-1349.
- Shu, B., Yu, W., Zhao, Y. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. Journal of food engineering 76 (2006): 664-669.
- Soottitantawat, A., Yoshii, H., Furuta, T., Atarashi, T., Ohgawara, M. Flavor release from spray-dried maltodextrin/gum arabic or soy matrices as a function of storage relative humidity. Innovative Food Science and Emerging Technologies 2 (2001): 55-61.
- Soottitantawat, A., Yoshii, H., Furuta, T. Microencapsulation by spray drying: Influence of emulsion size on the retention of volatile compounds. Journal of food science 68 (2003): 2256-2262.
- Soottitantawat, A., Yoshii, H., Furuta, T., Bigeard, F., Linko, P. Influence of emulsion and powder size on the stability of encapsulated d-limonene by spray drying. Innovative Food Science and Emerging Technologies 6 (2005): 107-114.
- Stephen, A.M. Food polysaccharides and their applications. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995.
- Talukdar, M. M., Rombaut, P., Kinget, R. The release mechanism of an oral controlled-release delivery system for indomethacin. Pharmaceutical development and technology 3 (1998): 1-6.
- Tonon, R. V., Brabet, C., Hubinger, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of Açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. Journal of food engineering 88 (2008): 411-418.

Toshino, U., Hideki, M., Chi-Tang, H. Formation mechanism of p-methylacetophenone from citral via a tert-alkoxy radical intermediate. Journal of agricultural and food chemistry 52 (2004): 5677-5684.

WIKIPIDIA The free Encyclopedia. Citral [online]. 2008. แหล่งที่มา:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Citral> [2 April 2010]

WIKIPIDIA The free Encyclopedia. Gum\_arabic [online]. 2006. แหล่งที่มา:

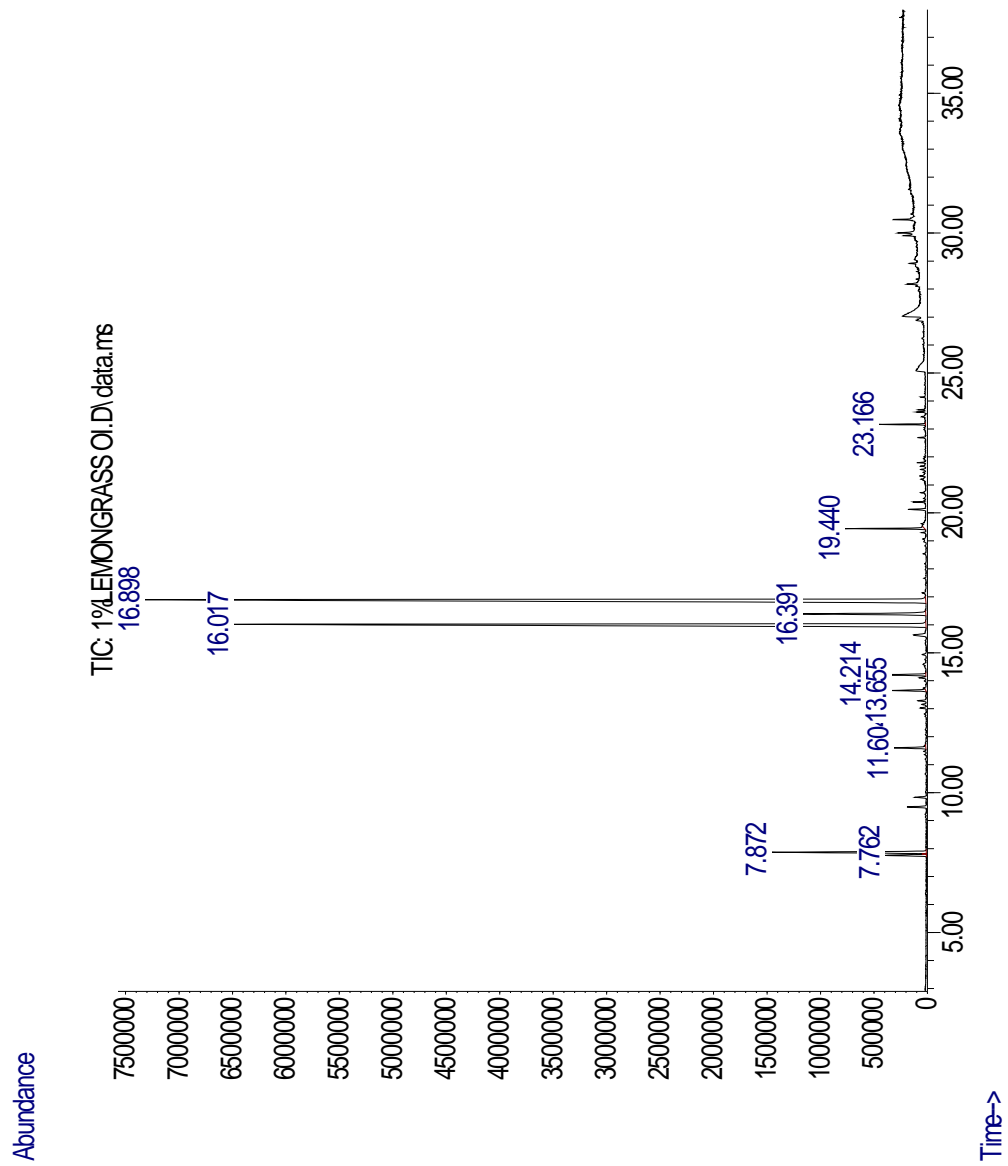
[http://en.wikipedia.org/wiki/Gum\\_arabic](http://en.wikipedia.org/wiki/Gum_arabic) [4 February 2009]

WIKIPIDIA The free Encyclopedia. Maltodextrin [online]. 2007. แหล่งที่มา:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Maltodextrin> [5 March 2010]

ภาคผนวก

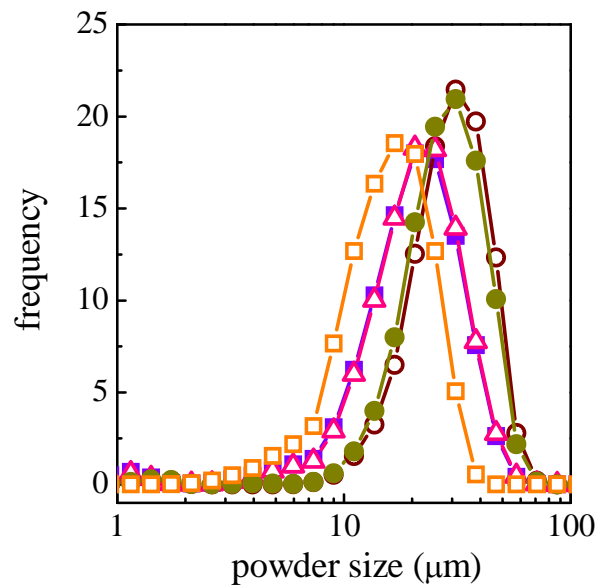
ภาคผนวก ก  
ผลการทดลอง



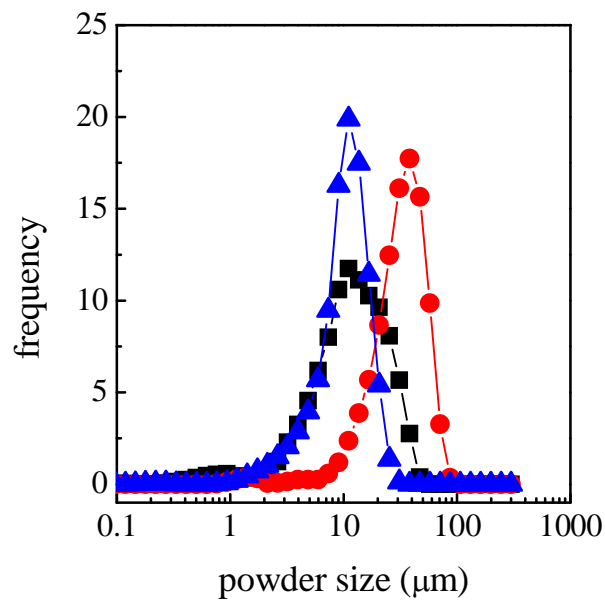
รูปที่ ก-1 โครมาโทแกรมของน้ำมันตะไคร้จากเครื่อง GC/MS

ตารางที่ ก-1 ผลของน้ำมันตะไคร้ที่ได้จากเครื่อง GC/MS

| Peak | compounds               | R.T.   | First | Max  | Last | Height  | Area     | Pct Max | Pct Total(%) |
|------|-------------------------|--------|-------|------|------|---------|----------|---------|--------------|
| 1    | 6-methyl-5-hepten-2-one | 7.762  | 687   | 696  | 703  | 385089  | 10485601 | 3.25    | 1.491        |
| 2    | beta-myrcene            | 7.872  | 703   | 712  | 727  | 1432293 | 38503137 | 11.94   | 5.474        |
| 3    | LINALOOL L              | 11.604 | 1236  | 1245 | 1261 | 302661  | 7938475  | 2.46    | 1.129        |
| 4    | -                       | 13.655 | 1528  | 1538 | 1546 | 318968  | 7579253  | 2.35    | 1.078        |
| 5    | -                       | 14.214 | 1609  | 1618 | 1631 | 550472  | 13170789 | 4.09    | 1.872        |
| 6    | Z-citral                | 16.017 | 1855  | 1875 | 1895 | 6463519 | 2.46E+08 | 76.41   | 35.017       |
| 7    | geraniol                | 16.391 | 1916  | 1929 | 1946 | 1145500 | 35408780 | 10.98   | 5.034        |
| 8    | E-citral                | 16.898 | 1980  | 2001 | 2018 | 7511850 | 3.22E+08 | 100     | 45.826       |
| 9    | geranyl acetate         | 19.44  | 2357  | 2364 | 2376 | 736361  | 14108036 | 4.38    | 2.006        |
| 10   | selina-6-en-4-ol        | 23.166 | 2889  | 2896 | 2907 | 426930  | 7559433  | 2.35    | 1.075        |

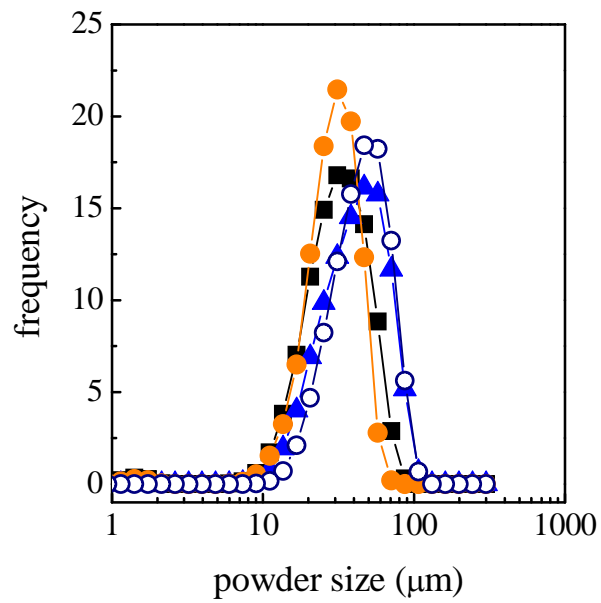


รูปที่ ก-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: □ 20 wt%, ○ 40 wt%, △ 50 wt%, ● 60 wt%, ▲ 80 wt%)



รูปที่ ก-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิก ผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ● 20 wt%, ■ 40 wt%, ▲ 60 wt%)





รูปที่ ก-4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศเข้า (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ● 120 °C, ■ 140 °C, ▲ 160 °C, ○ 180 °C)

### ตัวอย่างการคำนวณการหาค่าการคงอยู่ของชิทราล

- ปริมาณน้ำมันตะไคร้ร้อยละ 20 (กัมมะธราบิคผสมมอดโตเดกซ์ตรินเป็นสารหล่อหุ้ม)

จากสมการ

$$\text{ร้อยละการคงอยู่} = \frac{\text{ปริมาณชิทราลในผงแห้ง (Dry basis)} \times 100}{\text{ปริมาณชิทราลในอิมัลชันสายป้อน}}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณชิทราลในผงแห้ง (Dry basis)} &= \frac{\text{ปริมาณชิทราลที่คำนวณได้จาก Calibration curve (g)}}{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดในผงแห้งไม่รวมชิทราล (g)}} \\ &= \frac{0.0106}{0.0826} \\ &= 0.1283 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณชิทราลในอิมัลชันสายป้อน} &= \frac{\text{ปริมาณชิทราลในน้ำมันตะไคร้ (g)}}{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดในอิมัลชันไม่รวมชิทราล (g)}} \\ &= \frac{14.7528}{85.2472} \\ &= 0.1731 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ร้อยละการคงอยู่ของชิทราล} &= \frac{0.1283}{0.1731} \times 100 \\ &= 74.1190 \end{aligned}$$

หมายเหตุ ปริมาณชิทราลในน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 80.80 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทรอลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทรอล (ผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม)

| oil loading<br>(% wt total solid) | weight<br>(g) | WC<br>(% wt) | no. | peak area     |         |         |         | ratio<br>(citral/cyclo.) | g(citral)/g(solid)<br>powder | retention<br>(%) | Ave.    | Sd.    |
|-----------------------------------|---------------|--------------|-----|---------------|---------|---------|---------|--------------------------|------------------------------|------------------|---------|--------|
|                                   |               |              |     | cyclohexanone | 11.1    | 11.7    | citral  |                          |                              |                  |         |        |
| 20                                | 0.1003        | 7.0903       | 1   | 1294491       | 1530662 | 2198230 | 3728892 | 2.8806                   | 0.1283                       | 74.1190          |         |        |
|                                   | 0.1000        | 7.0903       | 2   | 916900        | 1088305 | 1646396 | 2734701 | 2.9826                   | 0.1344                       | 77.6725          | 76.0471 | 2.2986 |
| 40                                | 0.1001        | 4.6343       | 1   | 1129563       | 2857469 | 4148638 | 7006107 | 6.2025                   | 0.3155                       | 75.3772          |         |        |
|                                   | 0.1002        | 4.6343       | 2   | 965007        | 2530423 | 3740677 | 6271100 | 6.4985                   | 0.3352                       | 80.0749          | 77.7260 | 3.3218 |
| 60                                | 0.1001        | 3.0531       | 1   | 1195152       | 2917288 | 4129560 | 7046848 | 5.8962                   | 0.2891                       | 36.4113          |         |        |
|                                   | 0.1003        | 3.0531       | 2   | 1184232       | 2952055 | 4198174 | 7150229 | 6.0379                   | 0.2973                       | 37.4499          | 36.9306 | 0.7344 |

หมายเหตุ สมการจากกราฟ Calibration curve สำหรับหาความเข้มข้นของซีทรอล

$$y = 615.19x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของซีทรอล (mg/l)

x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟซีทรอลต่อไซโคลเฮกซาโนน

ตารางที่ ก-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทรอลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซีทรอล (ผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม)

| oil loading<br>(% wt total<br>solid) | weight<br>(g) | WC<br>(% wt) | no. | peak area     |         |         |          | ratio<br>(cital/cyclo.) | g(cital)/g(solid)<br>powder | retention<br>(%) | Ave.    | Sd.    |
|--------------------------------------|---------------|--------------|-----|---------------|---------|---------|----------|-------------------------|-----------------------------|------------------|---------|--------|
|                                      |               |              |     | cyclohexanone | 11.1    | 11.7    | cital    |                         |                             |                  |         |        |
| 20                                   | 0.1004        | 3.2807       | 1   | 1301166       | 2324779 | 3436574 | 5761353  | 4.4278                  | 0.2146                      | 99.0033          |         |        |
|                                      | 0.1002        | 3.2807       | 2   | 1428507       | 2427516 | 3644892 | 6072408  | 4.2509                  | 0.2048                      | 100.0308         | 99.5171 | 4.0195 |
| 40                                   | 0.1003        | 2.5268       | 1   | 1269073       | 3758081 | 5480874 | 9238955  | 7.2801                  | 0.4056                      | 96.8941          |         |        |
|                                      | 0.1003        | 2.5268       | 2   | 1236825       | 3724439 | 5390412 | 9114851  | 7.3696                  | 0.4126                      | 98.5763          | 97.7352 | 1.1895 |
| 50                                   | 0.1004        | 2.1053       | 1   | 1358324       | 4872795 | 7143510 | 12016305 | 8.8464                  | 0.5355                      | 91.6476          |         |        |
|                                      | 0.1003        | 2.1053       | 2   | 1366815       | 4409568 | 6382954 | 10792522 | 7.8961                  | 0.4527                      | 77.4646          | 81.7972 | 8.5512 |
| 60                                   | 0.1004        | 2.7210       | 1   | 1402999       | 5671421 | 8330971 | 14002392 | 9.9803                  | 0.6555                      | 82.5569          |         |        |
|                                      | 0.1003        | 2.7210       | 2   | 1182396       | 4582056 | 6742398 | 11324454 | 9.5775                  | 0.6138                      | 77.3075          | 77.7716 | 4.5710 |
| 80                                   | 0.1003        | 2.2814       | 1   | 1238184       | 5721417 | 8730308 | 14451725 | 11.6717                 | 0.8568                      | 59.5108          |         |        |
|                                      | 0.1001        | 2.2814       | 2   | 1398534       | 5613108 | 8523350 | 14136458 | 10.1081                 | 0.6678                      | 46.3857          | 49.3369 | 9.0660 |

หมายเหตุ สมการจากกราฟ Calibration curve สำหรับหาความเข้มข้นของซีทรอล

$$y = 774.9x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของซีทรอล (mg/l)

x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟซิทรัลต่อไซโคลเฮกซาโนน

ตารางที่ ก-4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซิทรัล (ผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า)

| inlet temp | weight<br>(g) | WC<br>(%wt) | no. | peak area     |         |         |         | ratio<br>(citral/cyclo.) | g(citral)/g(solid)<br>powder | %retention | ave.     | sd.    |
|------------|---------------|-------------|-----|---------------|---------|---------|---------|--------------------------|------------------------------|------------|----------|--------|
|            |               |             |     | cyclohexanone | 11.1    | 11.7    | citral  |                          |                              |            |          |        |
| 120        | 0.1001        | 3.1437      | 1   | 1298289       | 3983662 | 5724318 | 9707980 | 7.4775                   | 0.4262                       | 101.8313   | 101.7935 | 0.5916 |
|            | 0.1003        | 3.1437      | 2   | 1258855       | 3866546 | 5560460 | 9427006 | 7.4886                   | 0.4259                       | 101.7557   |          |        |
| 140        | 0.1002        | 2.8279      | 1   | 1245259       | 3854026 | 5543358 | 9397384 | 7.5465                   | 0.4292                       | 99.5510    | 98.9921  | 4.4676 |
|            | 0.1003        | 2.8279      | 2   | 1195411       | 3639572 | 5260191 | 8899763 | 7.4449                   | 0.4204                       | 100.4469   |          |        |
| 160        | 0.1003        | 2.5268      | 1   | 1269073       | 3758081 | 5480874 | 9238955 | 7.2801                   | 0.4056                       | 96.8941    | 97.4548  | 6.9578 |
|            | 0.1003        | 2.5268      | 2   | 1236825       | 3724439 | 5390412 | 9114851 | 7.3696                   | 0.4126                       | 98.5763    |          |        |
| 180        | 0.1000        | 2.0621      | 1   | 1279997       | 3919234 | 5652550 | 9571784 | 7.4780                   | 0.4202                       | 100.3859   | 101.6347 | 2.2763 |
|            | 0.1001        | 2.0621      | 2   | 1276516       | 3943014 | 5778570 | 9721584 | 7.6157                   | 0.4306                       | 102.8852   |          |        |

หมายเหตุ สมการจากกราฟ Calibration curve สำหรับหาความเข้มข้นของซิทรัล

$$y = 774.9x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของซิทรัล (mg/l)

x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟซิทรัลต่อไซโคลเฮกซาโนน

ตารางที่ ก-5 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรอลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซิทรอล (ผลของขนาดอิมัลชันเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด)

| emulsion size<br>(mm) | weight<br>(g) | WC<br>(%w/w) | no. | peak area     |         |         |         | ratio<br>(citral/cyclo.) | g(citral)/g(solid)<br>powder | %retention | ave.    | sd.    |
|-----------------------|---------------|--------------|-----|---------------|---------|---------|---------|--------------------------|------------------------------|------------|---------|--------|
|                       |               |              |     | cyclohexanone | 11.1    | 11.7    | citral  |                          |                              |            |         |        |
| 0.25                  | 0.1005        | 2.4562       | 1   | 1396849       | 2090478 | 3047229 | 5137707 | 3.6781                   | 0.1608                       | 92.8881    | 93.0755 | 0.2650 |
|                       | 0.1002        | 2.4562       | 2   | 1354382       | 2018353 | 2965543 | 4983896 | 3.6798                   | 0.1614                       | 93.2629    |         |        |
| 0.61                  | 0.1000        | 2.7863       | 1   | 1325963       | 2008389 | 2887612 | 4896001 | 3.6924                   | 0.1631                       | 94.2218    | 92.6317 | 2.2486 |
|                       | 0.1004        | 2.7863       | 2   | 1423126       | 2105860 | 3016100 | 5121960 | 3.5991                   | 0.1576                       | 91.0417    |         |        |
| 1.53                  | 0.1000        | 2.7887       | 1   | 1318500       | 2086822 | 2886756 | 4973578 | 3.7721                   | 0.1672                       | 96.5994    | 92.1656 | 6.2704 |
|                       | 0.1007        | 2.7887       | 2   | 1501355       | 2137178 | 3111286 | 5248464 | 3.4958                   | 0.1518                       | 87.7318    |         |        |
| 2.55                  | 0.1005        | 3.0565       | 1   | 1422031       | 2020930 | 2884662 | 4905592 | 3.4497                   | 0.1503                       | 86.8745    | 88.5769 | 2.4077 |
|                       | 0.1005        | 3.0565       | 2   | 1314544       | 1908185 | 2780328 | 4688513 | 3.5666                   | 0.1562                       | 90.2794    |         |        |

หมายเหตุ สมการจากกราฟ Calibration curve สำหรับหาความเข้มข้นของซิทรอล

$$y = 615.19x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของซิทรอล (mg/l)

x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟซิทรอลต่อไซโคลเฮกซาโนน

ตารางที่ ก-6 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรอลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าการคงอยู่ของซิทรอล (ผลของขนาดอิมัลชันเมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด)

| emulsion size<br>( $\mu\text{m}$ ) | weight<br>(g) | WC<br>(%wt) | no. | peak area     |         |         |          |                       | g(citral)/g(solid)<br>powder | %retention | ave.    | sd.    |
|------------------------------------|---------------|-------------|-----|---------------|---------|---------|----------|-----------------------|------------------------------|------------|---------|--------|
|                                    |               |             |     | cyclohexanone | 11.1    | 11.7    | citral   | ratio (citral/cyclo.) |                              |            |         |        |
| 0.29                               | 0.1002        | 2.7553      | 1   | 1489862       | 4285438 | 6160748 | 10446186 | 7.0115                | 0.3866                       | 92.3711    | 92.3186 | 0.0742 |
|                                    | 0.1000        | 2.7553      | 2   | 1417492       | 4036931 | 5873864 | 9910795  | 6.9918                | 0.3862                       | 92.2661    |         |        |
| 0.61                               | 0.0999        | 2.2780      | 1   | 1479043       | 4036037 | 5866254 | 9902291  | 6.6951                | 0.3619                       | 86.4657    | 87.0489 | 0.8248 |
|                                    | 0.1003        | 2.2780      | 2   | 1426464       | 3942290 | 5740864 | 9683154  | 6.7882                | 0.3668                       | 87.6322    |         |        |
| 0.84                               | 0.1000        | 3.2436      | 1   | 1507372       | 4021379 | 5860286 | 9881665  | 6.5556                | 0.3560                       | 85.0523    | 84.1322 | 1.3012 |
|                                    | 0.1003        | 3.2436      | 2   | 1521796       | 4039120 | 5806469 | 9845589  | 6.4697                | 0.3483                       | 83.2122    |         |        |
| 1.16                               | 0.1004        | 2.5293      | 1   | 1516249       | 3507533 | 5168812 | 8676345  | 5.7222                | 0.2929                       | 69.9905    | 70.8114 | 1.1609 |
|                                    | 0.1002        | 2.5293      | 2   | 1474897       | 3497042 | 5077864 | 8574906  | 5.8139                | 0.2998                       | 71.6323    |         |        |

หมายเหตุ สมการจากกราฟ Calibration curve สำหรับหาความเข้มข้นของซิทรอล

$$y = 774.9x$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นของซิทรอล (mg/l)

x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟซิทรอลต่อไซโคลเฮกซาโนน

## ภาคผนวก ข

### การศึกษาความคงตัวของผงอนุภาค

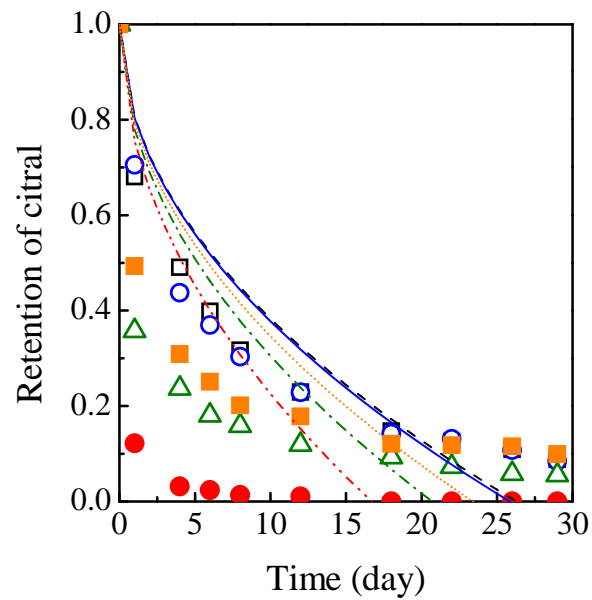
การศึกษาความคงตัวของผงอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยหลายสมการ ซึ่งในภาคผนวกนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ของลักษณะการปลดปล่อยที่มาจากสมการกับผลการทดลองโดยสมการที่ใช้ได้แก่

- i. Higuchi's equation
- ii. Peppas's equation



ตารางที่ ข-1 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม

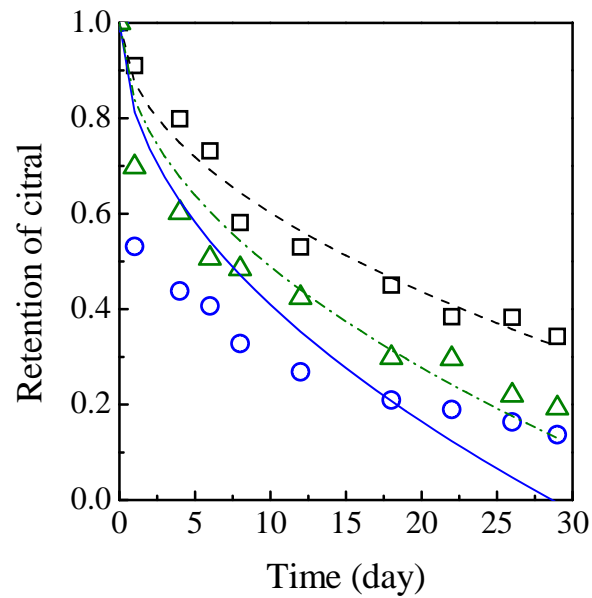
| ชนิดสารห่อหุ้ม | ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | $k \times 10^{-1}$<br>(1/day) | $R^2$ |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------|
| แคปซูล         | 20                                   | 1.95                          | 0.87  |
|                | 40                                   | 1.97                          | 0.84  |
|                | 50                                   | 2.07                          | 0.47  |
|                | 60                                   | 2.20                          | 0.28  |
|                | 80                                   | 2.45                          | -0.22 |



รูปที่ ข-1 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดแคปซูล (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ---□--- 20 wt%, ---○--- 40 wt%, ...■... 50 wt%, ---△--- 60 wt%, ---●--- 80 wt%)

ตารางที่ ข-2 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยใช้กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

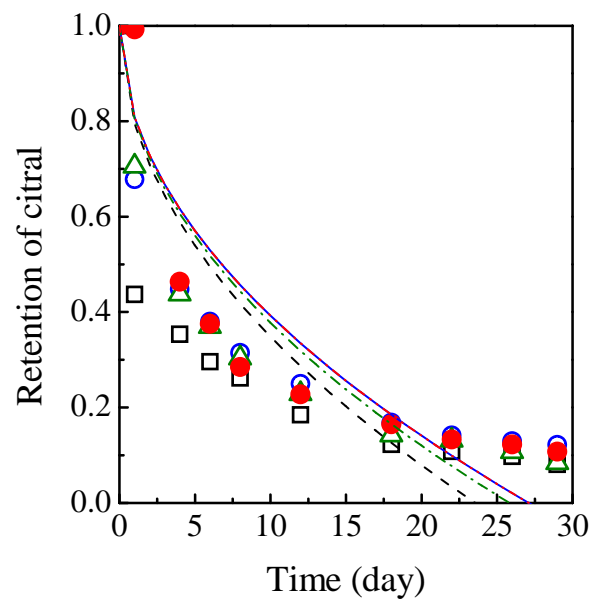
| ชนิดสารห่อหุ้ม                | ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | $k \times 10^{-1}$<br>(1/day) | $R^2$ |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------|
| กัมอะราบิก+<br>มอลโตเดกซ์ตริน | 20                                   | 1.26                          | 0.98  |
|                               | 40                                   | 1.87                          | 0.67  |
|                               | 60                                   | 1.62                          | 0.91  |



รูปที่ ข-2 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ---□--- 20 wt%, —○— 40 wt%, ---△--- 60 wt%)

ตารางที่ ข-3 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

| ชนิดสารหอมหุ้ม | อุณหภูมิอากาศขาเข้า<br>(°C) | $k \times 10^{-1}$<br>(1/day) | $R^2$ |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|-------|
| แคปซูล         | 120                         | 2.06                          | 0.53  |
|                | 140                         | 1.92                          | 0.81  |
|                | 160                         | 1.97                          | 0.84  |
|                | 180                         | 1.92                          | 0.85  |

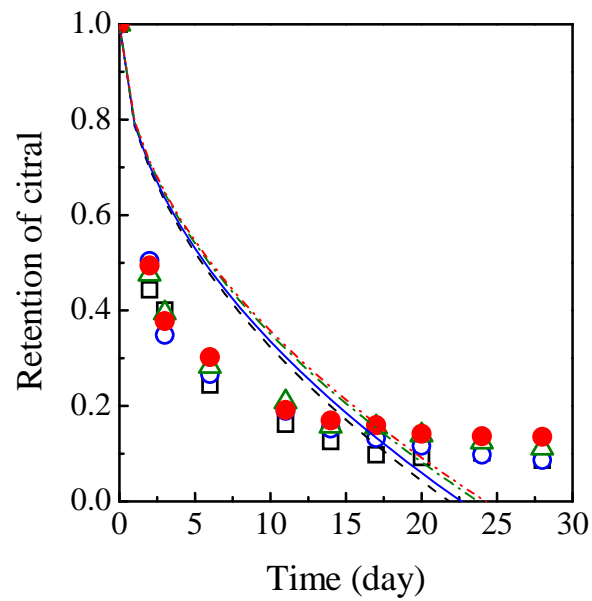


รูปที่ ข-3 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation (อุณหภูมิอากาศขาเข้า:

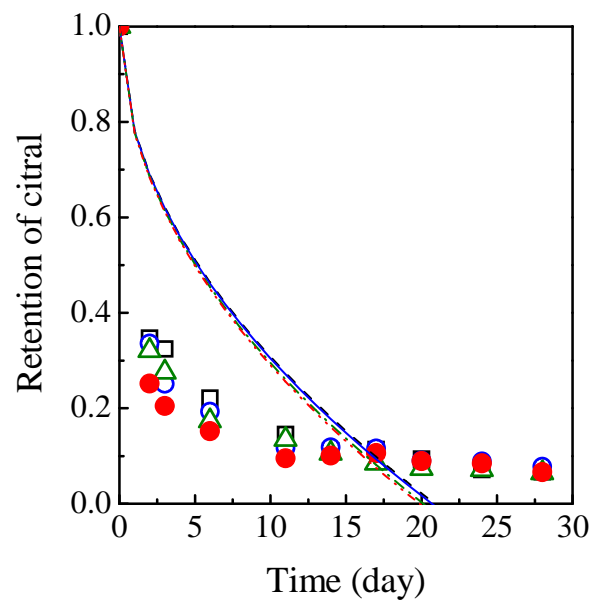
---□--- 120 °C, ---○--- 140 °C, ---△--- 160 °C, ---●--- 180 °C)

ตารางที่ ข-4 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอิ้มัลชัน

| ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | ขนาดอิ้มัลชัน<br>( $\mu\text{m}$ ) | $k \times 10^{-1}$<br>(1/day) | $R^2$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------|
| 20                                   | 0.247                              | 2.14                          | 0.64  |
|                                      | 0.609                              | 2.10                          | 0.66  |
|                                      | 1.530                              | 2.05                          | 0.64  |
|                                      | 2.545                              | 2.03                          | 0.62  |
| 40                                   | 0.290                              | 2.19                          | 0.49  |
|                                      | 0.610                              | 2.20                          | 0.36  |
|                                      | 0.837                              | 2.23                          | 0.40  |
|                                      | 1.161                              | 2.24                          | 0.19  |



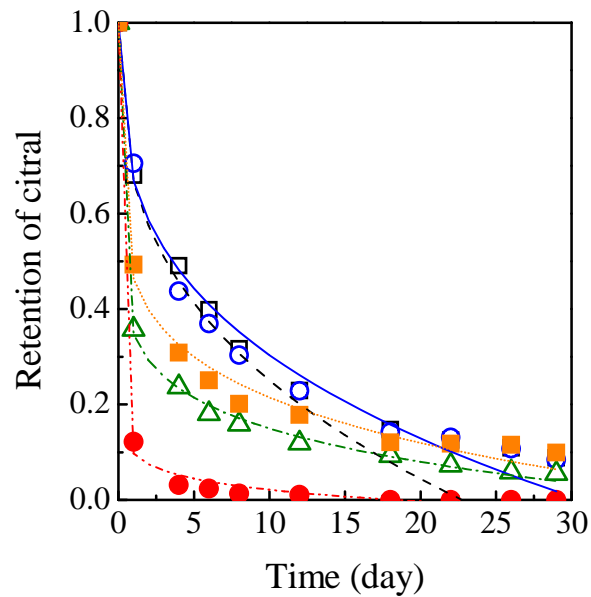
รูปที่ ข-4 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ---□--- 0.25  $\mu\text{m}$ , ---○--- 0.61  $\mu\text{m}$ , ---△--- 1.53  $\mu\text{m}$ , ---●--- 2.55  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ ข-5 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Higuchi's equation เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ---□--- 0.29  $\mu\text{m}$ , ---○--- 0.61  $\mu\text{m}$ , ---△--- 0.84  $\mu\text{m}$ , ---●--- 1.16  $\mu\text{m}$ )

ตารางที่ ข-5 ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยใช้แคปซูลเป็นสารห่อหุ้ม

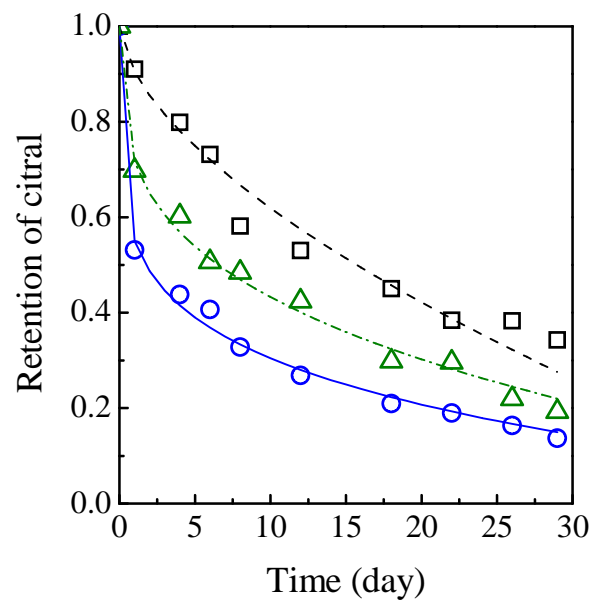
| ชนิดสารห่อหุ้ม | ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|----------------|--------------------------------------|------|-------------------|----------------|
| แคปซูล         | 20                                   | 0.35 | 3.34              | 0.98           |
|                | 40                                   | 0.32 | 3.31              | 0.96           |
|                | 50                                   | 0.17 | 5.37              | 0.96           |
|                | 60                                   | 0.11 | 6.54              | 0.99           |
|                | 80                                   | 0.04 | 9.03              | 0.84           |



รูปที่ ข-6 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดแคปซูล (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ---□--- 20 wt%, ---○--- 40 wt%, ...■... 50 wt%, ---△--- 60 wt%, ---●--- 80 wt%)

ตารางที่ ข-6 ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้โดยใช้กัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

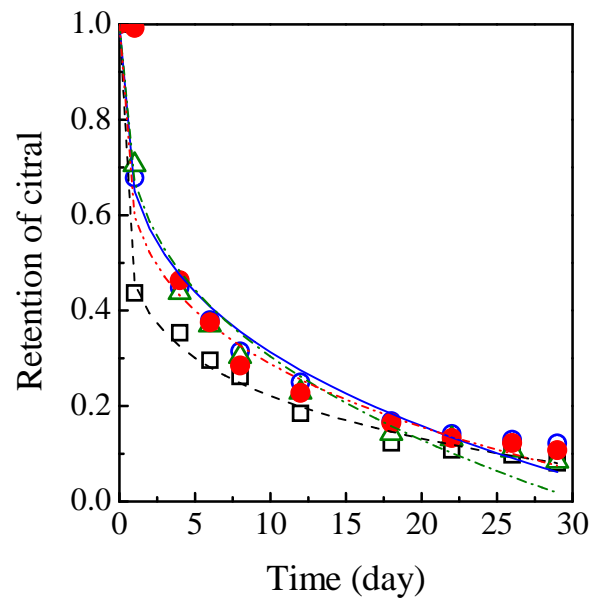
| ชนิดสารห่อหุ้ม                | ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | n    | $k \times 10^2$<br>(1/day) | $R^2$ |
|-------------------------------|--------------------------------------|------|----------------------------|-------|
| กัมอะราบิก+<br>มอลโตเดกซ์ตริน | 20                                   | 0.60 | 9.47                       | 0.97  |
|                               | 40                                   | 0.19 | 44.98                      | 0.98  |
|                               | 60                                   | 0.30 | 28.51                      | 0.98  |



รูปที่ ข-7 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อใช้สารห่อหุ้มชนิดกัมอะราบิกผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ปริมาณน้ำมันตะไคร้: ---□--- 20 wt%, —○— 40 wt%, ---△--- 60 wt%)

ตารางที่ ข-7 ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

| ชนิดสารห่อหุ้ม | อุณหภูมิอากาศขาเข้า<br>(°C) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|----------------|-----------------------------|------|-------------------|----------------|
| แคปซูล         | 120                         | 0.16 | 5.44              | 0.98           |
|                | 140                         | 0.29 | 3.50              | 0.97           |
|                | 160                         | 0.32 | 3.31              | 0.96           |
|                | 180                         | 0.25 | 4.04              | 0.96           |

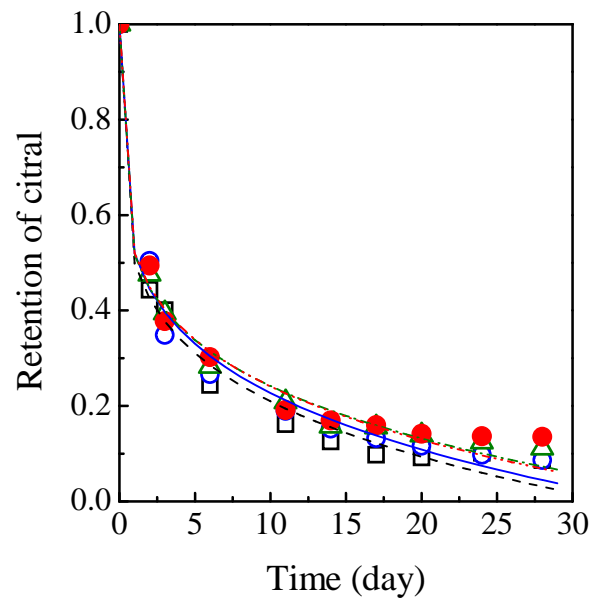


รูปที่ ข-8 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation (อุณหภูมิอากาศขาเข้า:  
 ---□--- 120 °C, ---○--- 140 °C, ---△--- 160 °C, ---●--- 180 °C)

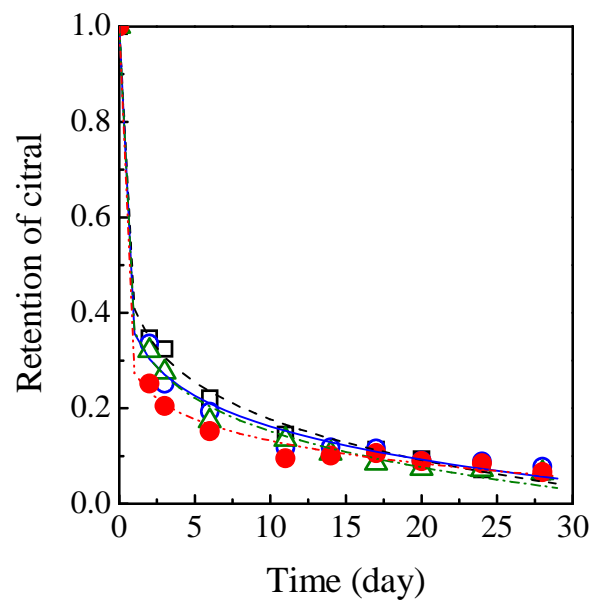


ตารางที่ ข-8 ค่าตัวแปรการทดลอง (k) และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Peppas เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณน้ำมันตะไคร้และขนาดอิมัลชัน

| ปริมาณน้ำมันตะไคร้<br>(% โดยน้ำหนัก) | ขนาดอิมัลชัน<br>( $\mu\text{m}$ ) | n    | k x 10<br>(1/day) | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------|-------------------|----------------|
| 20                                   | 0.247                             | 0.20 | 5.01              | 0.95           |
|                                      | 0.609                             | 0.21 | 4.81              | 0.92           |
|                                      | 1.530                             | 0.20 | 4.84              | 0.96           |
|                                      | 2.545                             | 0.20 | 4.80              | 0.93           |
| 40                                   | 0.290                             | 0.14 | 5.92              | 0.98           |
|                                      | 0.610                             | 0.12 | 6.43              | 0.94           |
|                                      | 0.837                             | 0.12 | 6.39              | 0.97           |
|                                      | 1.161                             | 0.08 | 7.27              | 0.94           |



รูปที่ ข-9 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ---□--- 0.25  $\mu\text{m}$ , ---○--- 0.61  $\mu\text{m}$ , ---△--- 1.53  $\mu\text{m}$ , ---●--- 2.55  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ ข-10 กราฟแสดงลักษณะการปลดปล่อยจาก Peppas's equation เมื่อปริมาณน้ำมันตะไคร้เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแข็งทั้งหมด (ขนาดอิมัลชัน: ---□--- 0.29  $\mu\text{m}$ , ---○--- 0.61  $\mu\text{m}$ , ---△--- 0.84  $\mu\text{m}$ , ---●--- 1.16  $\mu\text{m}$ )

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว มาลินี แก้วปัญหา เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุโขทัย เข้าศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550