

การกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย



นางสาวศรัญญา พันปี

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENCAPSULATION OF LEMONGRASS OIL WITH CYCLODEXTRINS BY SPRAY DRYING

Miss Sarunya Phunpee



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University



ศรัณญา พันปี : การกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย. (ENCAPSULATION OF LEMONGRASS OIL WITH CYCLODEXTRINS BY SPRAY DRYING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธรรวัช, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. อรุชก รัชชตานนท์ชัย, 137 หน้า

ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในครัวไทย ปัจจุบันสารสกัดน้ำมันตะไคร้ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยา เนื่องจากซิทรัลซึ่งเป็นสารสำคัญหลักในน้ำมันตะไคร้พบว่าเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งซิทรัลสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากความร้อน แสง และออกซิเจนได้ง่าย จึงเป็นข้อจำกัดการใช้งานของน้ำมันตะไคร้ โดยน้ำมันตะไคร้จะสูญเสียสมบัติทางชีวภาพไปจากเดิม ดังนั้นกระบวนการไมโครเอนแคปซูลชันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการเพิ่มความคงทนของน้ำมันตะไคร้ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต้องการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตรินและอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันตะไคร้ต่อไซโคลเด็กซ์ตริน ที่มีผลต่อการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย จากการศึกษาพบว่า เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินให้ค่าการกักเก็บของ E-citral และแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินให้ค่าการกักเก็บของ Z-citral ดีที่สุด ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน 1:1 และลักษณะโครงสร้างของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากการใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกขรุขระ ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินลงในสารประกอบเชิงซ้อนต่อประสิทธิภาพการกักเก็บซิทรัลในผงแห้ง พบว่าเมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น การกักเก็บของซิทรัลในผงแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้แล้วผงแห้งน้ำมันตะไคร้ได้ถูกศึกษาการปลดปล่อยของซิทรัลจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินด้วย พบว่าซิทรัลถูกปลดปล่อยจากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินได้น้อยกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งการปลดปล่อยของซิทรัลจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินถูกกำหนดด้วยการแพร่ผ่านของสาร

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศรัณญา พันปี.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..... 2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....อรุชก รัชชตานนท์ชัย



## 5170626921: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ENCAPSULATION/ LEMONGRASS OIL/ CYCLODEXTRINS/ SPRAY DRYING

SARUNYA PHUNPEE: ENCAPSULATION OF LEMONGRASS OIL WITH CYCLODEXTRINS BY SPRAY DRYING, THESIS ADVISOR: APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., THESIS CO-ADVISOR: URACHA RUKTANONCHAI, Ph.D., 137 pp.

Lemongrass (*Cymbopogon ciatrus*) is widely used as a herb in Thai cuisine for a long time. Nowadays, the lemongrass oil has been applied and used as a medicine due to citral, major component, has a reported antimicrobial activity. But citral had limited biological properties by oxidation of heat, light and oxygen. Therefore, encapsulation process is the way for enhancing their stability and releasing control. In this study, encapsulation of lemongrass oil with cyclodextrins (CD) was investigated by spray drying. The effect of type of cyclodextrin and the citral:CD molar ratio on total oil retention were studied during spray drying process. The results showed that  $\beta$ -CD and  $\alpha$ -CD demonstrate the best encapsulation efficiency of E-citral and Z-citral, respectively, all of them showed the maximum total citral retention at the citral:CDs molar ratio 1:1. The morphology of powders appeared spherical shape with roughness for  $\alpha$ -CD and  $\gamma$ -CD whereas  $\beta$ -CD presented crystallite. In addition, maltodextrin was added in inclusion complexes for helpful encapsulation efficiency. The results showed that the total oil retention was not increased with increasing MD. Furthermore, the release characteristics of spray dried powders were studied. The results suggest that  $\beta$ -CD complex had a lower releases rate than those for  $\gamma$ -CD complex and  $\alpha$ -CD complex. The release of included citral in the complexes corresponded to the limited diffusion kinetics system.

Department: .....Chemical Engineering.....Student's signature.....S. Phunpee  
Field of Study: .....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....A. Soottitantawat  
Academic Year: .....2010.....Co-Advisor's signature.....U. Ruktanonchai

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ด้วยดี เนื่องจากกา  
ได้รับการดูแลเอาใจใส่ คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ จาก  
บุคคลหลายท่าน

ท่านแรกขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวรัช อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้  
คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ  
ดร. อรุษา รักรักษ์ตานนท์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย และขอขอบพระคุณ Prof. Takeshi  
Furuta และ Prof. Hidefumi Yoshii ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำงานวิจัยที่ประเทศ  
ญี่ปุ่น ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการ รอง  
ศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต พุทธิพิพัฒน์ฯ  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณทุน 100 ปี จุฬาลงกรณ์ ที่สนับสนุนเงินวิจัย ขอขอบคุณองค์การสนับสนุน  
นักศึกษาแห่งประเทศไทย (JASSO) ที่สนับสนุนทุนแลกเปลี่ยนในการทำวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นเป็น  
เวลา 6 เดือน และขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคตไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ  
และอุปกรณ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และ  
คำแนะนำในการทำงานวิจัย

ท่านที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนในเรื่องของ  
ทุนการศึกษาและคอยดูแลในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงใจที่สำคัญที่สุด ที่ทำให้มี  
แรงผลักดัน ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุก ๆ  
ด้าน

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่.....	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ตะไคร้ (Lemongrass oil) .....	4
2.2 กระบวนการกักเก็บสาร (Encapsulation) .....	7
2.3 สารห่อหุ้ม (Wall material) .....	9
2.4 ไซโคลเด็กซ์ตริน (Cyclodextrins) .....	11
2.4.1 กลไกการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ตริน.....	11
2.4.2 กลไกการกักเก็บโมเลกุลของเกสท์ด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน.....	14
2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน.....	15
2.5 มอลโตเด็กซ์ตริน (Maltodextrin) .....	20
2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) .....	20
2.7 ความคงตัวของผงแห้ง.....	28
2.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์.....	33
2.8.1 <i>Candida albican</i> .....	33
2.8.2 เทคนิคการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35

บทที่	หน้า
<b>3 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>39</b>
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	39
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	39
3.3 ขั้นตอนและการวิจัย.....	41
3.4 วิธีการทดลอง.....	42
3.4.1 การวิเคราะห์หาสารสำคัญของน้ำมันตะไคร้.....	42
3.4.2 การหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน.....	43
3.4.3 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินกับน้ำมันตะไคร้.....	45
3.4.4 วิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บซิติรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	49
3.4.5 วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผงแห้ง.....	49
3.4.6 วิเคราะห์ขนาดของผงแห้ง.....	50
3.4.7 วิเคราะห์การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วย XRD.....	50
3.4.8 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งด้วย SEM.....	51
3.4.9 วิเคราะห์ความคงตัวของผงแห้ง.....	52
3.4.10 วิเคราะห์หาปริมาณเชื้อเริ่มต้นของ <i>Candida albicans</i> ATCC 10231.....	52
3.4.11 วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้.....	54
3.4.12 วิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยผงแห้ง.....	56
<b>4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>57</b>
4.1 การศึกษาหาสารสำคัญและปริมาณของสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้.....	57
4.2 การศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน.....	58
4.2.1 ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อการละลายของน้ำมันตะไคร้.....	58

บทที่	หน้า
4.3 การศึกษาปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน.....	60
4.3.1 ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....	60
4.3.2 ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัลในผงแห้ง.....	63
4.3.3 ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน.....	66
4.4 การศึกษาปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อน.....	69
4.4.1 ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....	69
4.4.2 ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัลในผงแห้ง	74
4.4.3 ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีผลต่อลักษณะการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน.....	77
4.4.4 ผลต่อความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง.....	79
4.5 การศึกษาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อน.....	86
4.5.1 ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....	86
4.5.2 ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัลในผงแห้ง.....	90
4.5.3 ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง.....	92
4.6 การศึกษาผลของชนิดเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	97
4.6.1 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง.....	97
4.6.2 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัลในผงแห้ง.....	98
4.7 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>Candida albicans</i> ATCC 10231.....	99
4.7.1 ความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้.....	99
4.7.2 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>Candida albicans</i> ATCC 10231 ของผงแห้ง.....	99
รายการอ้างอิง.....	103



บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	137



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของสารหอมหุ่มและสมบัติของสารหอมหุ่ม.....	10
2.2 สมบัติของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ.....	13
3.1 สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์.....	42
3.2 สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-14B.....	44
3.3 สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น B-290.....	45
3.4 สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8.....	48
3.5 สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-2010.....	48
4.1 สารสำคัญและปริมาณของสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้.....	57
4.2 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่ม.....	81
4.3 ค่าค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) และค่าคงที่ (k) จากสมการ Peppas เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่ม.....	83
4.4 ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการของ Avrami ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินต่างๆ.....	84
4.5 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อใช้หมอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่ม.....	94
4.6 ค่าค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) และค่าคงที่ (k) จากสมการ Peppas เมื่อใช้หมอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่ม.....	95
4.7 ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อใช้หมอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารหอมหุ่ม.....	96
ก-1 ผลองค์ประกอบของน้ำมันตะไคร้ที่ได้จากเครื่อง GC/MS.....	108
ข-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี สำหรับการละลายของน้ำมันตะไคร้ ในสารละลายแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	109
ข-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี สำหรับการละลายของน้ำมันตะไคร้ ในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน.....	110



ตารางที่	หน้า
๑-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิติรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม.....	128
๑-4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิติรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม.....	129
๑-1 ปริมาณเชื้อที่ถูยับยั้งด้วยผงแห้งน้ำมันตะไคร้.....	130



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ต้นตะไคร้.....	4
2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เนรัล, (ข) เจอรานิเอล, (ค) เมอร์ซีน, (ง) ลิโมนิน, (จ) เจอรานิออล และ (ฉ) ลินาลู.....	5
2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซีตรัล (1a: geranial, 1b: neral, 2: p-menth-1-ene-3,8-diols, 3a: p-mentha-1,5-dien-9-ol, 3b: 2-dien-8-ol, 3c:, 4: 3-ethoxy-p-menth-1-en-8-ol, 5: $\alpha$ -terpineol, 6: p-cymen-8-ol, 7: p-mentha-1, 8: $\alpha$ ,p-dimethylstyrene, 9: p-cymene, 10: 2,3-Dehydro-1,8-cinele).....	6
2.4 ลักษณะโครงสร้างของแคปซูลชนิดต่างๆ .....	8
2.5 ขั้นตอนในกระบวนการกักเก็บสาร .....	8
2.6 กระบวนการสังเคราะห์แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	12
2.7 หน่วยกลูโคไพลาโนส (ก) และโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ตริน (ข).....	13
2.8 โครงสร้างของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน (ก), บีต้าไซโคลเด็กซ์ตริน (ข) และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน (ค).....	13
2.9 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับ p-xylene.....	15
2.10 เฟสการละลาย.....	17
2.11 สูตรโครงสร้างของมอลโตเด็กซ์ตริน.....	20
2.12 ระบบการทำงานเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	21
2.13 ลักษณะของ Rotary atomizer.....	22
2.14 ลักษณะของ Pressure nozzle atomizer.....	23
2.15 ลักษณะหัวฉีดแบบ Two-Fluid nozzle.....	24
2.16 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ก) co-current (ข) counter-current และ (ค) การไหลแบบผสม (Mixed flow).....	25
2.17 กลไกการอบแห้งของละอองฝอย.....	26
2.18 แสดงวิธีการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง.....	35
3.1 ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41



ภาพประกอบที่	หน้า
3.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์ รุ่น Agilent 7890A/5975C.....	43
3.3 ซีตรัลในสารละลาย.....	44
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-14B.....	44
3.5 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น B-290.....	46
3.6 เครื่องไฮโมจีไนน์เซอร์ รุ่น Polytron PT 3100.....	47
3.7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8.....	47
3.8 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-2010.....	47
3.9 เครื่องทดสอบหาความชื้น รุ่น MKS-510.....	50
3.10 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค รุ่น SALD-710.....	50
3.11 เครื่องวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) รุ่น Discover.....	51
3.12 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM 6060.....	51
3.13 เตาอบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Chamber) รุ่น BTL-433.....	52
3.14 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง รุ่น Spectronic Genesys 20.....	53
3.15 เครื่อง Spiral plater รุ่น Spiral Biotech Autoplate 4000.....	53
3.16 เครื่องนับโคโลนี.....	53
3.17 แผนภูมิสรุปขั้นตอนวิธีการเจือจางสารทดสอบ (Broth dilution method).....	55
3.18 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง รุ่น SpectraMax M5 Microplate Reader.....	55
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซีตรัล ((ก) E-citral, (ข) Z-citral) และความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ ( $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	57
4.2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีพแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งเมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	62
4.3 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีพเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งเมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	62

ภาพประกอบที่	หน้า
4.4 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งเมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	63
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล ((ก) E-citral, (ข) Z-citral) ต่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินในสายป้อน ที่ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน, $\circ$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน.....	65
4.6 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	67
4.7 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	68
4.8 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	68
4.9 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	70
4.10 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	71
4.11 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ทรินและผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	72
4.12 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	73

ภาพประกอบที่	หน้า
4.13 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของ ซิทรัลต่อแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	74
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล ((ก) E-citral, (ข) Z- citral) ต่อปริมาณซิทรัลในสายป้อน ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟา ไซโคลเด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน...	76
4.15 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้ เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อ ไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	78
4.16 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อ ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคล เด็กซ์ตริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	78
4.17 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้ เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อ ไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1.....	79
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ E-citral (ก), Z-citral (ข) ที่คงเหลือและ เวลาในการปลดปล่อย ของผงแห้งที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อ ไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคล เด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	80
4.19 กราฟการปลดปล่อย E-citral (ก) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Higuchi เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	82
4.20 กราฟการปลดปล่อย E-citral (ก) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Peppas เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	83
4.21 กราฟการปลดปล่อย E-citral (ก) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Avrami เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\square$ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....	85

ภาพประกอบที่	หน้า
4.22 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ก) 20, (ข) 60 และ (ค) 80 เปอร์เซ็นต์.....	88
4.23 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ก) 60 และ (ข) 80 เปอร์เซ็นต์.....	89
4.24 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ก) 20, (ข) 60 และ (ค) 80 เปอร์เซ็นต์.....	89
4.25 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ก) 60 และ (ข) 80 เปอร์เซ็นต์.....	90
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการคงอยู่ของ E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) โดยเปรียบเทียบแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข)....	91
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ E-citral (โปร่ง), Z-citral (ทึบ) ที่คงเหลือและเวลาในการปลดปล่อยของผงแห้ง (ก) $\alpha$ -CD 100 เปอร์เซ็นต์, (ข) $\alpha$ -CD 80 เปอร์เซ็นต์ + MD 20 เปอร์เซ็นต์, (ค) $\beta$ -CD 100 เปอร์เซ็นต์และ (ง) $\beta$ -CD 80 เปอร์เซ็นต์ + MD 20 เปอร์เซ็นต์.....	93
4.28 ลักษณะการปลดปล่อย E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) ตามแบบจำลองของ Higuchi (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข).....	94
4.29 ลักษณะการปลดปล่อย E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) ตามแบบจำลองของ Peppas (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข).....	95

4.30 แสดงลักษณะการปลดปล่อย E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) ตาม  
 แบบจำลองของ Arvami (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคล  
 เด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน  
 เป็นสารห่อหุ้ม (ข) ..... 96

4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อต่อเวลา ของผงแห้ง  
 (ก) แอลฟาไซโคลเด็กซ์, (ข) เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ (ค) แกมมาไซโคลเด็กซ์  
 ตริน เมื่อ CDs 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ทึบ) และ CDs 80 เปอร์เซ็นต์โดย  
 น้ำหนัก + MD20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (โปร่ง) ..... 100

ก-1 โครมาโทแกรมของน้ำมันตะไคร้จากเครื่อง GC/MS..... 108

ค-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์  
 ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน  $\Delta$  10,  $\bigcirc$  20 และ  
 $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดย  
 น้ำหนัก เท่ากับ 24.23, 19.10 และ 19.73 ไมโครเมตร ตามลำดับ)..... 112

ค-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์  
 ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน  $\Delta$  10,  $\bigcirc$  20 และ  
 $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดย  
 น้ำหนัก เท่ากับ 7.65, 8.60 และ 11.25 ไมโครเมตร ตามลำดับ)..... 112

ค-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์  
 ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน  $\Delta$  10,  $\bigcirc$  20 และ  
 $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดย  
 น้ำหนัก เท่ากับ 28.72, 17.70 และ 17.22 ไมโครเมตร ตามลำดับ)..... 113

ง-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์  
 ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของชิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน  $\Delta$  1:1,  
 $\bigcirc$  1.5:1 และ  $\square$  2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของชิตรัลต่อไซโคล  
 เด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 11.14, 10.06 และ 8.71  
 ไมโครเมตร ตามลำดับ)..... 117



ภาพประกอบที่	หน้า
<p>ง-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์                      ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน <math>\triangle</math> 1:1,  <math>\circ</math> 1.5:1 และ <math>\square</math> 2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคล                      เด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 8.5, 9.15 และ 8.93 ไมโครเมตร                      ตามลำดับ).....</p>	117
<p>ง-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์                      ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน <math>\triangle</math> 1:1,  <math>\circ</math> 1.5:1 และ <math>\square</math> 2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคล                      เด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 16.30, 9.16 และ 9.35                      ไมโครเมตร ตามลำดับ).....</p>	118
<p>จ-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์                      ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อ                      มอลโตเด็กซ์ตริน <math>\triangle</math> 20:80, <math>\circ</math> 50:50, <math>\square</math> 80:20 และ <math>\blacksquare</math> 100:0 (ขนาด                      เฉลี่ย; อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน 20:80, 50:50,                      80:20 และ 100:0 เท่ากับ 15.04, 14.82, 19.72 และ 11.14 ไมโครเมตร                      ตามลำดับ).....</p>	125
<p>จ-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์                      ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินต่อ                      มอลโตเด็กซ์ตริน <math>\triangle</math> 60:40, <math>\circ</math> 80:20 และ <math>\square</math> 100:0 (ขนาดเฉลี่ย;                      อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน 60:40, 80:20 และ                      100:0 เท่ากับ 16.45, 11.43 และ 8.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ).....</p>	125
<p>ณ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินใน                      สายป้อน ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; <math>\triangle</math> แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, <math>\circ</math> เบต้า                      ไซโคลเด็กซ์ตริน และ <math>\square</math> แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....</p>	135
<p>ณ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณซีตรัลในสายป้อน                      ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; <math>\triangle</math> แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, <math>\circ</math> เบต้าไซโคล                      เด็กซ์ตริน และ <math>\square</math> แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน.....</p>	136

ภาพประกอบที่

หน้า

ฉ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินใน สายป้อน ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; $\Delta$ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และ $\bigcirc$ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน.....	136
---	-----



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีพืชสมุนไพรมากมายหลายชนิด ซึ่งคนไทยสมัยโบราณได้นำพืชสมุนไพรมาใช้ประโยชน์นานับการสืบต่อกันมาจนถึงปัจจุบัน ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกในประเทศไทยมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน น้ำมันตะไคร้เป็นสารสกัดที่ได้จากส่วนเหนือดินของต้นตะไคร้ โดยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองคล้ำ มีกลิ่นเฉพาะตัว และมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ซิทรัล ร้อยละ 65-85 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันตะไคร้มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ แต่มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน แสง และความชื้นร้อนต่ำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถของน้ำมันตะไคร้ให้มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสามารถนำไปใช้งานในรูปของผงแห้งได้นั้น ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีการกักเก็บสารจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

กระบวนการกักเก็บสารเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น กระบวนการกักเก็บสาร คือ กระบวนการที่อนุภาคขนาดเล็กถูกห่อหุ้มหรือถูกตรึงไว้ในสารห่อหุ้มเกิดเป็นแคปซูลขึ้น โดยขั้นตอนแรกของกระบวนการกักเก็บสาร คือ การเลือกชนิดของสารที่ห่อหุ้มให้เหมาะสม สารห่อหุ้มที่ใช้ในกระบวนการกักเก็บสารมีด้วยกันหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส กัม และโปรตีน ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป

กระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็คซ์ตริน ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นกระบวนการกักเก็บในระดับโมเลกุล โดยความสามารถในการจับกับโมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยไว้ในโพรงของไซโคลเด็คซ์ตริน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ตรินกับน้ำมันหอมระเหยขึ้นนั้น เป็นสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของไซโคลเด็คซ์ตรินต่อกระบวนการกักเก็บสาร

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน โดยอาศัยเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยช่วยในการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของผงแห้ง โดยทำการศึกษาถึงชนิดของไซโคลเด็กซ์ตริน (แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, บีต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน) อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน และการใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินเพื่อใช้เป็นสารห่อหุ้มต่อการกักเก็บซีตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย นอกจากนี้แล้วผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ได้ยังมีการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างภายนอก ความคงตัวของผงแห้ง และความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ของผงแห้งที่บรรจุซีตรัล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน
- 1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน และสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บสาร
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความคงตัวของผงแห้งหลังกระบวนการกักเก็บสาร
- 1.2.4 เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของผงแห้งที่บรรจุซีตรัลได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 หาสารสำคัญและปริมาณสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้โดยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography Mass Spectrometry; GC/MS)
- 1.3.2 หาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยศึกษาถึงปัจจัย 2 ประการ คือ
  - ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตริน ตั้งแต่ 0 – 10 มิลลิโมลาร์
  - ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตริน (แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, บีต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน)
- 1.3.3 เตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินกับน้ำมันตะไคร้ โดยศึกษาวิจัยผลการคงอยู่ของซีตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง
  - ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตริน (แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, บีต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน)

- อัตราส่วนโดยโมลของซัลเฟอร์ต่อไฮโดรเจนเท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1
- อัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมไฮโดรเจนกับออกซิเจนเพื่อใช้เป็นสารหล่อหุ้ม โดยเติมออกซิเจนที่อัตราส่วนของออกซิเจนต่อไฮโดรเจนเท่ากับ 0, 20 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 1.3.4 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของผงแห้ง ดังนี้

- ขนาดอนุภาค
- ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้ง
- ความชื้น
- ความคงตัว
- ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การเสริมสร้างองค์ความรู้ทางวิชาการในด้านการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไฮโดรเจน โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถนำไปพัฒนาและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตะไคร้ (Lemongrass oil)

ประเทศไทยมีพืชสมุนไพรมากมายหลายชนิด ซึ่งคนไทยสมัยโบราณได้นำพืชสมุนไพรมาใช้ประโยชน์นานับประการสืบต่อกันมาจนถึงปัจจุบัน ตะไคร้เป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกในประเทศไทยมาเป็นระยะเวลานาน โดยตะไคร้เป็นพืชในวงศ์ *Gramineae* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cymbopogon citratus Stapf* จัดเป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้า มีความสูงประมาณ 1 เมตร ใบยาวเรียว ปลายใบมีขนหนาม ลำต้นรวมกันเป็นกอ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตะไคร้เป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งในส่วนของใบ ต้น เหง้า และทั้งต้น โดยมีสรรพคุณทางยาดังต่อไปนี้

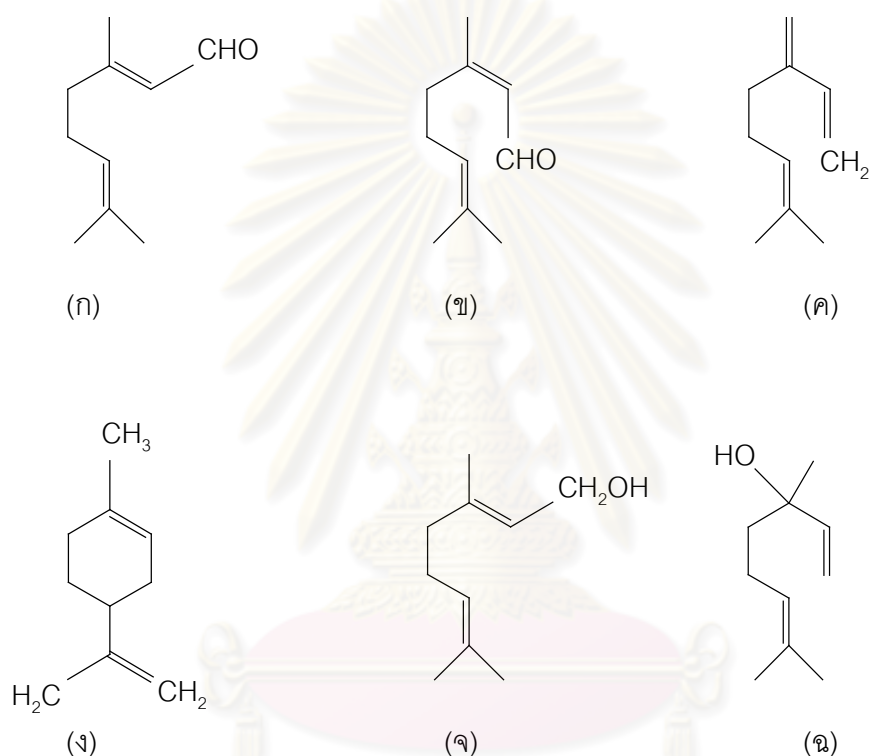
1. ใบ ใช้เป็นยาลดความดันโลหิต แก้ไข้
2. ต้น ใช้เป็นยาแก้ขับลม แก้เบื่ออาหาร แก้โรคทางเดินปัสสาวะ
3. เหง้า ใช้เป็นยาแก้กษัย ขับลมในลำไส้ แก้ปัสสาวะขัด แก้นิ่ว
4. ทั้งต้น ใช้เป็นยารักษาโรคหืด แก้ปวดท้อง ขับปัสสาวะ แก้อหิวาตกโรค และทำเป็นยาทานวด



รูปที่ 2.1 ต้นตะไคร้

[<http://lemongrassworld.com>]

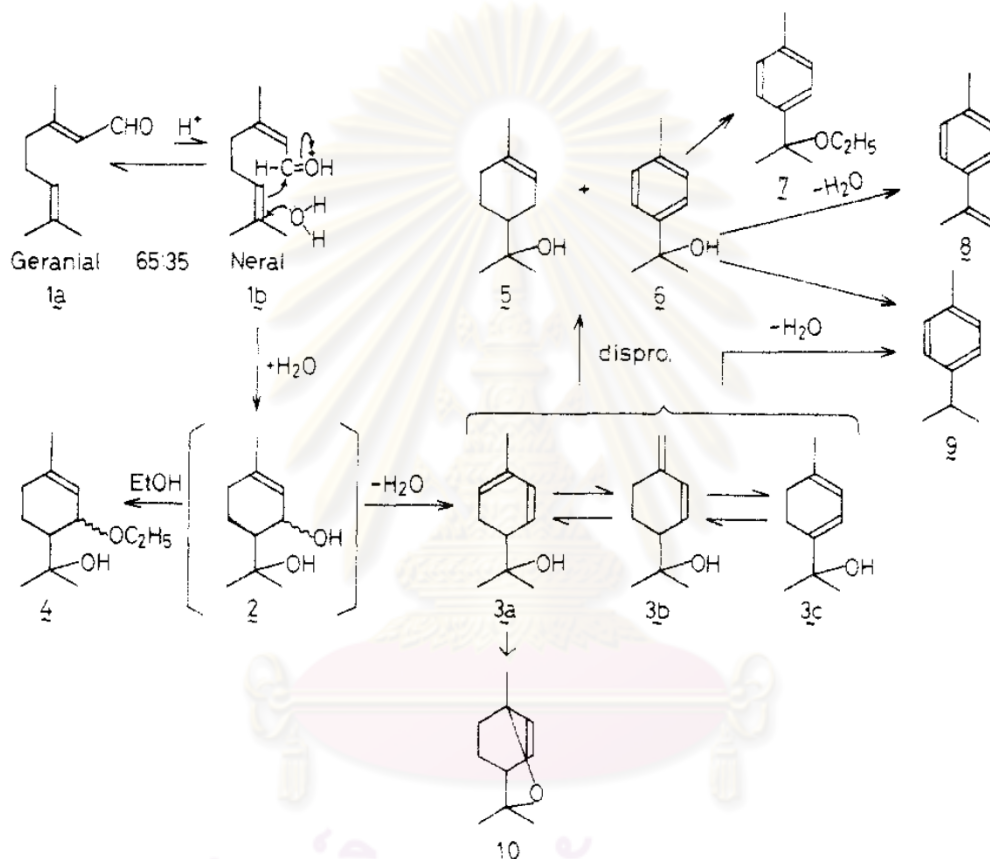
ปัจจุบันได้มีการนำตะไคร้มากลั่นเป็นน้ำมันหอมระเหยและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น โดยน้ำมันตะไคร้เป็นน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้จากเหง้าและใบ มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองคล้ำ ปราศจากตะกอน และสารแขวนลอย มีกลิ่นเฉพาะตัว และมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ เนรัล (Neral), เจอราเนียล (Geranial), เมอร์ซีน (Mircene), ลิโมนีน (Limonene), เจอราเนียนอล (Geraniol) และลินาลู (Linalool) (Paviani และคณะ, 2006) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เนรัล, (ข) เจอราเนียล, (ค) เมอร์ซีน, (ง) ลิโมนีน, (จ) เจอราเนียนอล และ (ฉ) ลินาลู

ซิทรัล (Citral) เป็นสารในกลุ่มเทอร์พีนอยด์ (Terpenoid) ซึ่งเทอร์พีนอยด์เป็นสารกลุ่มใหญ่ที่สุด ที่ได้จากการสังเคราะห์มาจากพืช โดยซิทรัลมีสูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>O (3,7-dimethyl-2,6-octadienal) ในธรรมชาติพบว่าซิทรัลประกอบด้วย 2 ไอโซเมอร์ คือ เจอราเนียล หรือซิทรัลเอ (Citral A) หรืออี-ซิทรัล (E-citral) เป็นทรานไอโซเมอร์ (*trans*-isomer) และเนรัล หรือซิทรัลบี (Citral B) หรือซี-ซิทรัล (Z-citral) เป็นซิสไอโซเมอร์ (*cis*-isomer) ซึ่งซิทรัลเป็นสารสำคัญหลักที่พบในน้ำมันตะไคร้ถึงร้อยละ 85 และมีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดย Onawunmi (1989) ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Candida albican* ด้วยน้ำมันตะไคร้และซิทรัล โดยวิธี Broth dilution method พบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ในการยับยั้งการ

เจริญเติบโตของเชื้อ (Minimum Inhibitory Concentration; MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Minimum Bactericidal Concentration; MBC) ของน้ำมันตะไคร้และซิตรัลมีค่าเท่ากัน โดย MIC และ MBC มีค่าเท่ากับ 0.05 และ 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองของ Onawunmi แสดงให้เห็นว่าซิตรัลเป็นสารสำคัญหลักในการออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตและฆ่าเชื้อ *Candida albican* ซึ่งสามารถนำน้ำมันตะไคร้มาใช้ทดแทนซิตรัลได้ เพราะซิตรัลเป็นสารบริสุทธิ์ที่มีราคาแพง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันตะไคร้



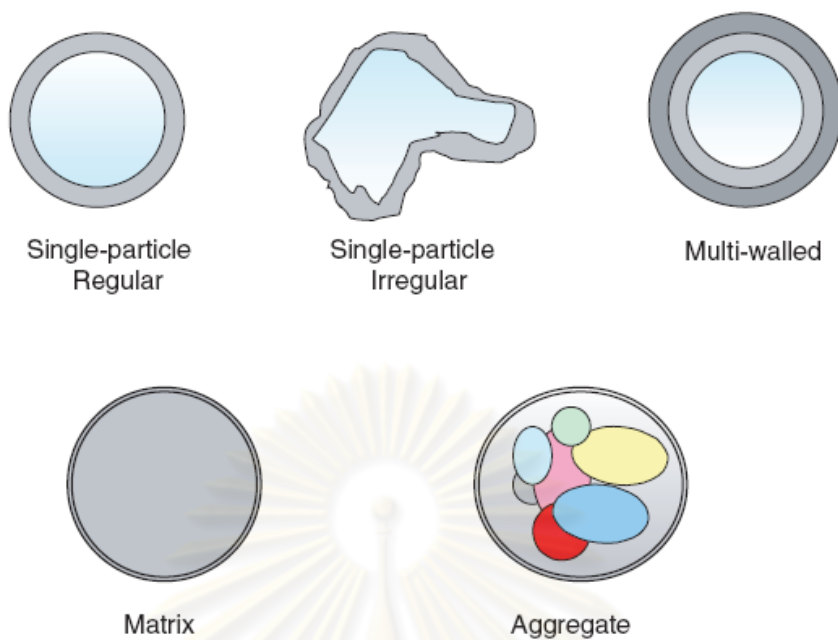
**รูปที่ 2.3** กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซิตรัล (1a: geranial, 1b: neral, 2: p-menth-ene-3,8-diols, 3a: p-mentha-1,5-dien-9-ol, 3b: 2-dien-8-ol, 3c:, 4: 3-ethoxy-p-menth-1-en-8-ol, 5: α-terpineol, 6: p-cymen-8-ol, 7: p-mentha-1, 8: α,p-dimethylstyrene, 9: p-cymene, 10: 2,3-Dehydro-1,8-cinele) (Kimura และคณะ, 1986)

นอกจากนี้แล้วซีตรัลยังสามารถเสื่อมสลายเปลี่ยนรูปได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน แสง และความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้กลิ่นและรสเปลี่ยนรูปไปจากเดิม โดย Kimura และคณะ (1986) ศึกษาการเสื่อมสลายของซีตรัลภายใต้สภาวะกรด ดังรูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซีตรัล พบว่าสารประกอบหลักที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ พี-ไซมีน (p-cymene) และแอลฟา, พี- ไดเมททิล สไตรีน ( $\alpha$ ,p-dimethylstyrene) ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียซีตรัลจากการถูกทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นอากาศและแสง รวมไปถึงการระเหยไปของตัวกลิ่นรสเอง เทคโนโลยีการกักเก็บสารจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เพื่อใช้ในการปรับปรุงความคงทน

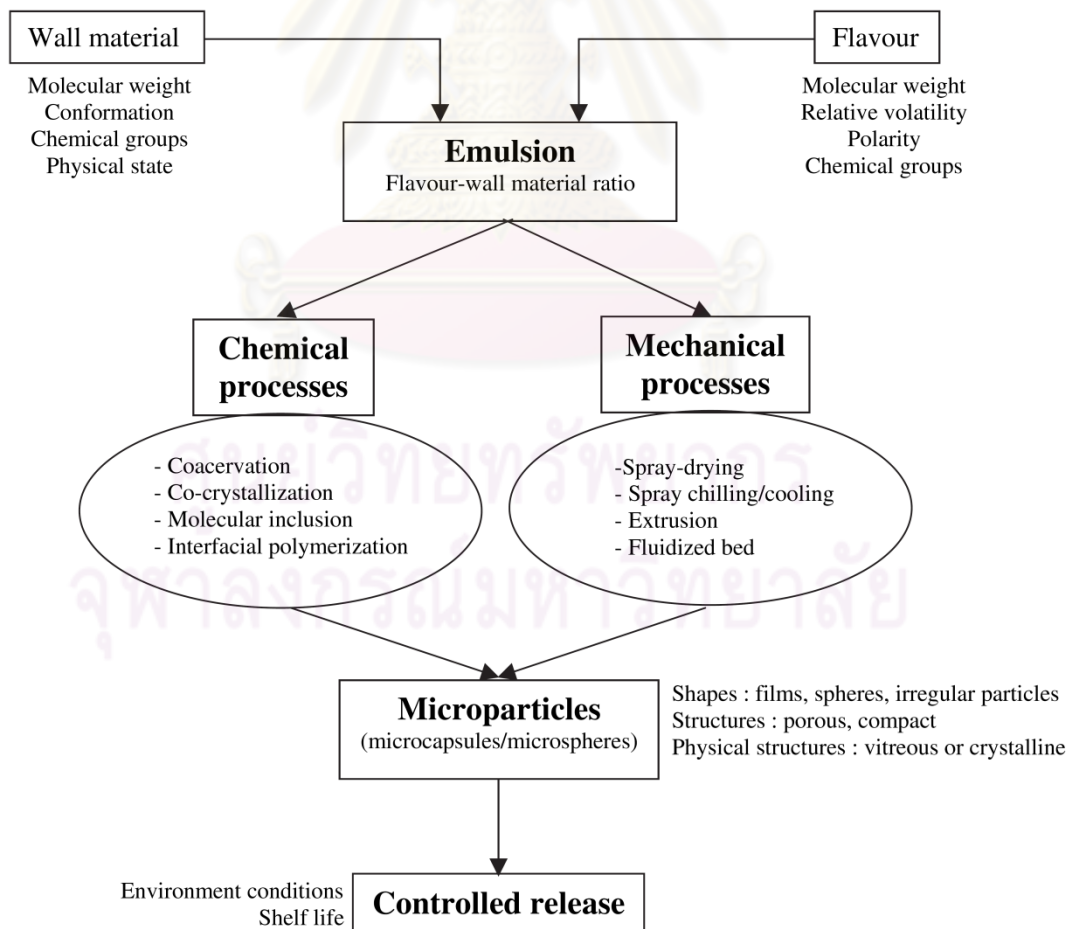
## 2.2 กระบวนการกักเก็บสาร (Encapsulation)

กระบวนการกักเก็บสารเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ เป็นต้น โดยในอุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการกักเก็บสารจะช่วยทำให้อาหารคงกลิ่นรสอยู่ได้นาน ด้วยการป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสจากการถูกทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นอากาศและแสง รวมไปถึงการระเหยไปของตัวกลิ่นรสเอง และในอุตสาหกรรมยา กระบวนการกักเก็บสารยังช่วยทำให้ตัวยาค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ เพื่อให้ออกฤทธิ์ได้ตรงตามเป้าหมายของการรักษาโรค

กระบวนการกักเก็บสาร คือ กระบวนการที่สารสำคัญถูกห่อหุ้มหรือถูกตรึง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นของเหลว แต่บางครั้งอาจเป็นของแข็งหรือแก๊ส ไว้ภายในสารห่อหุ้มเกิดเป็นแคปซูลขึ้น โดยวัสดุที่ทำหน้าที่ห่อหุ้ม เรียกว่า เซลล์ (shell), เมมเบรน (membrane) หรือชั้นห่อหุ้ม (wall material) เป็นต้น และสารสำคัญที่ถูกห่อหุ้ม เรียกว่า คอร์ (core material) ฟอรัมตัวเป็นแคปซูลขึ้น โดยทั่วไปแล้วแคปซูลสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้างของแคปซูล (Barbosa-C´anovas และคณะ, 2005) คือ โครงสร้างอนุภาคเดี่ยว (regular or irregular), โครงสร้างอนุภาครวม (aggregate structure) และโครงสร้างอนุภาคหลายชั้น (multi-walled) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยขนาดของอนุภาคที่เตรียมได้จากกระบวนการกักเก็บสารมีขนาดอยู่ในช่วง 1-5000 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 5000 ไมโครเมตร เรียกว่า แมกโครแคปซูล (macro capsule) ขนาด 1-5,000 ไมโครเมตร เรียกว่า ไมโครแคปซูล (micro capsule) และขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร เรียกว่า นาโนแคปซูล (nano capsule) (King, 1995)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของแคปซูลชนิดต่างๆ (Barbosa-C´anovas และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนในกระบวนการกักเก็บสาร (Madene และคณะ, 2006)



ข้อดีของกระบวนการกักเก็บสาร คือ ควบคุมอัตราการปลดปล่อยสาร (Madene และคณะ, 2006) เพิ่มความคงทนต่ออุณหภูมิ ความชื้น แสง และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Zhong และคณะ, 2009) นอกจากนี้ยังง่ายต่อการนำไปใช้งานในรูปของผงแห้งได้อีกด้วย (Jafari และคณะ, 2008) โดยขั้นตอนในกระบวนการกักเก็บสารสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5

### 2.3 สารห่อหุ้ม (Wall material)

ในกระบวนการกักเก็บสาร การเลือกวัสดุที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มสารถือเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสารห่อหุ้มเป็นตัวกลางในการปกป้องคอร์จากสภาพแวดล้อมต่างๆ อีกทั้งยังทำหน้าที่ปลดปล่อยคอร์ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานอีกด้วย ซึ่งสมบัติของสารห่อหุ้มมีดังต่อไปนี้

- สามารถฟอร์มเป็นชั้นฟิล์มได้ดี
- มีความหนืดต่ำที่ปริมาณของแข็งสูง
- มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเซอร์ที่ดี
- สามารถปลดปล่อยคอร์ได้หลังการกักเก็บสาร
- มีสมบัติในการยึดติดกับคอร์ได้ดี โดยไม่ทำปฏิกิริยากัน
- สามารถป้องกันคอร์ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้
- ราคาถูก

สารห่อหุ้มที่ใช้ในกระบวนการกักเก็บสารมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งชนิดที่ได้มาจากธรรมชาติ และชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น สารห่อหุ้มที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารห่อหุ้มและสมบัติของสารห่อหุ้ม (Jafari และคณะ, 2008)

ชนิดสารห่อหุ้ม	ตัวอย่าง	สมบัติ	ตัวอย่างคอร์
สารประเภทคาร์โบไฮเดรต	มอลโตเด็กซ์ตริน (Maltodextrin)	- ราคาถูก - มีความหนืดต่ำที่ปริมาณของแข็งสูง - มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี	- ซิตรัล, ลินาลิว อะซีเตอท, น้ำมันส้ม, น้ำมันมะนาว
	แป้งดัดแปร (Modified starch)	- มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเซอร์ที่ดี - มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี - ราคาถูก	- เมนทอล, วิตามิน อี, น้ำมันพริกไทยดำ, น้ำมันปลา
	ไซโคลเด็กซ์ตริน (Cyclodextrins)	- มีความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี - ราคาแพง - มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเซอร์ที่ดี	- น้ำมันมะนาว, กลิ่นชิตะเกะ, ลิโมนิน, ซิตรัล
สารประเภทโปรตีน	โปรตีนจากถั่ว	- มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเซอร์ที่ดี - ราคาแพง	- ไขมันจากนม, น้ำมันถั่วเหลือง
สารประเภทยางหรือกัม	กัมอะราบิก (Gum arabic)	- มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิฟายเซอร์ที่ดี - มีความหนืดต่ำที่ปริมาณของแข็งสูง	- น้ำมันพืช, น้ำมันถั่วเหลือง, ไขมัน, ลิโมนิน

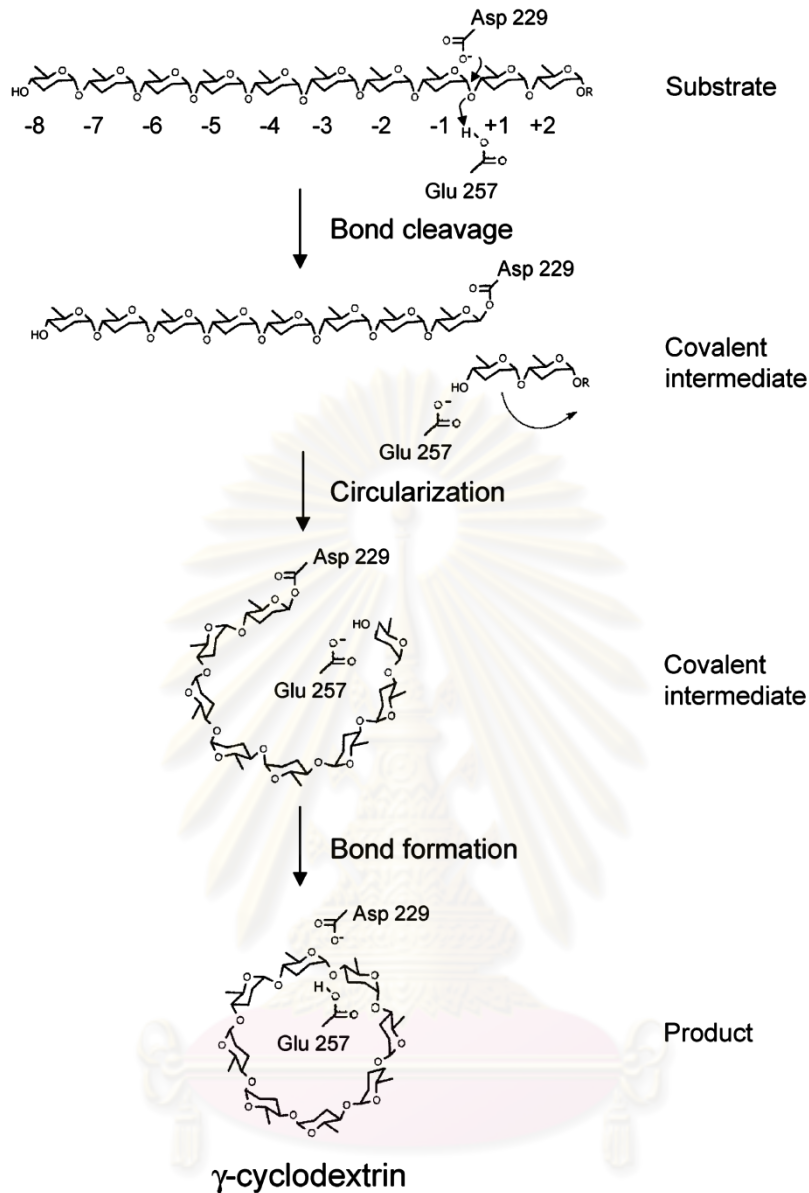
## 2.4 ไสโคลเด็กซ์ตริน (Cyclodextrins)

ในปี 1891 ได้มีการค้นพบการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึกของสารที่ได้จากการหมักแป้ง โดยในตอนนั้นไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าสารที่ค้นพบเป็นสารชนิดใด ต่อมาในปี 1903 Schardinger ศึกษาการสลายแป้งโดยใช้แบคทีเรียชนิดต่าง Bacillus macerans พบว่าสามารถสังเคราะห์ได้สารที่เป็นโครงสร้างผลึก 2 ชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างทางเคมี โดยโครงสร้างผลึกของสาร 2 ชนิดนั้นประกอบขึ้นมาจากกลูโคไพลาโนสหลายพันหน่วยมาเชื่อมต่อกันกลายเป็นวงขึ้น ซึ่ง Schardinger เรียกสารที่ค้นพบว่า แอลฟาเด็กซ์ตริน และบีตาเด็กซ์ตริน ต่อมาในปี 1930 Freudenberg สรุปโครงสร้างผลึกที่ Schardinger ค้นพบว่าเป็นเกิดจากกลูโคไพลาโนสหลายหน่วยมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคไซคลิก เกิดเป็นวงโครงสร้างผลึกขึ้น และในช่วงปี 1948-1950 ได้มีการค้นพบแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินขึ้น (Szejtli, 2004)

### 2.4.1 กลไกการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ตริน

ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารที่ดัดแปลงมาจากแป้งโดยใช้เอนไซม์ไซโคลเด็กซ์ตริน ไกลโคซิลทรานสเฟอเรส (Cyclodextrin Glucosyl Transferase, CGTase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ผลิตได้จากแบคทีเรีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากแบคทีเรียชนิดต่าง Bacillus โดยปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ตริน คือ cyclization ดังรูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการสังเคราะห์แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ตริน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (Astray และคณะ, 2009) คือ

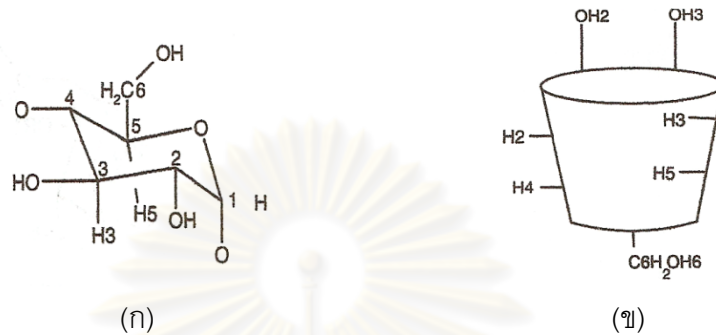
1. กระบวนการผลิตเอนไซม์ CGTase
2. การแยกเอนไซม์ CGTase ออกจากสารอาหาร
3. เอนไซม์ CGTase เปลี่ยนแป้ง โดย CGTase ตัดโมเลกุลของแป้งทำให้เกิดสายไซตรงสั้นๆ ขึ้น และเกิดการ circularization ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคไพราโนสแต่ละหน่วย ด้วยพันธะแอลฟา 1, 4 กลูโคไซโครติก เกิดเป็นวงไซโคลเด็กซ์ตรินขึ้น
4. การคัดแยกไซโคลเด็กซ์ตรินแต่ละชนิดออกจากกัน



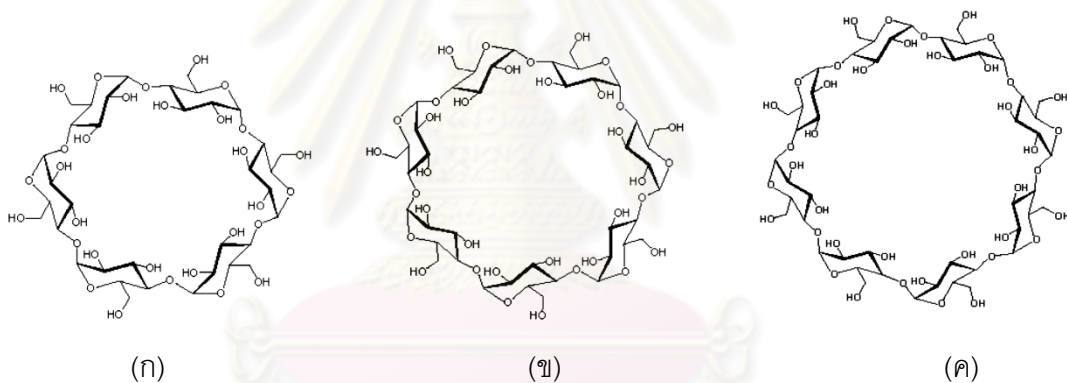
รูปที่ 2.6 กระบวนการสังเคราะห์แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน (Li และคณะ, 2007)

โดยทั่วไปแล้วไซโคลเด็กซ์ตรินที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นวง ซึ่งเกิดจากกลูโคไพลานอส (รูปที่ 2.7 ก) หลายๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1, 4 กลูโคไซด์ิก เกิดเป็นวงคล้ายโดนัท (รูปที่ 2.7 ข) จากโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏหมู่ไฮดรอกซิลหนึ่งตั้งอยู่ที่ปลายฐานด้านแคบ ขณะที่กลุ่มไฮดรอกซิลอีกด้านหนึ่ง (C2 และ C3) ตั้งอยู่ที่ปลายของฐานด้านกว้าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ภายนอกของไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่ภายในโพรงของโครงสร้างไซโคลเด็กซ์ตริน ประกอบด้วยโปรตอน H3, H5 และคูโดดเดี่ยวของอะตอมออกซิเจน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) โดยไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด

คือ แอลฟาไซโคลเดกซ์ทริน ( $\alpha$ -CD) บีต้าไซโคลเดกซ์ทริน ( $\beta$ -CD) และแกมมาไซโคลเดกซ์ทริน ( $\gamma$ -CD) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้แล้วยังแสดงสมบัติของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดต่างๆ ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 หน่วยกลูโคไพลาโนส (ก) และโครงสร้างของไซโคลเดกซ์ทริน (ข) (Helena, 2006)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแอลฟาไซโคลเดกซ์ทริน (ก), บีต้าไซโคลเดกซ์ทริน (ข) และแกมมาไซโคลเดกซ์ทริน (ค) (Li และคณะ, 2007)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดต่างๆ (Helena, 2006)

สมบัติ	$\alpha$ -CD	$\beta$ -CD	$\gamma$ -CD
จำนวนหน่วยกลูโคไพลาโนส	6	7	8
น้ำหนักโมเลกุล	972	1134	1296
เส้นผ่านศูนย์กลางโพรง (พิโคเมตร)	500	620	800
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (พิโคเมตร)	1460	1540	1750

ตารางที่ 2.2 สมบัติของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ (ต่อ)

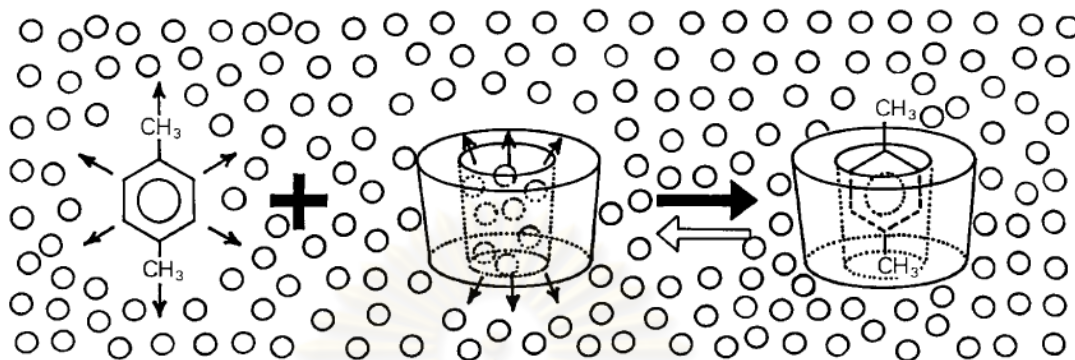
สมบัติ	$\alpha$ -CD	$\beta$ -CD	$\gamma$ -CD
การละลายในน้ำ ณ. อุณหภูมิห้อง (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	14.5	1.85	23.2
อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	255-260	255-265	240-245
ปริมาณน้ำในผลึก (% โดยน้ำหนัก)	10.2	13-15	17
โมเลกุลน้ำในโพรง	6	11	17

#### 2.4.2 กลไกการกักเก็บโมเลกุลของเกสต์ด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน

กระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นกระบวนการกักเก็บในระดับโมเลกุล โดยสมบัติในการจับกับโมเลกุลของเกสต์ที่ไว้ภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นนั้น เป็นสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของไซโคลเด็กซ์ตรินต่อกระบวนการกักเก็บสาร ซึ่งไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้กับโมเลกุลของเกสต์หลายชนิด เช่น ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว กรดคาร์บอกซิลิก และอนุพันธ์ของเอมีน เป็นต้น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นทำให้โมเลกุลของเกสต์เพิ่มความสามารถในการละลาย และความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสต์นั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมีใดๆ วิธีที่ใช้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสามารถทำได้โดย การตกตะกอน สเลอรี การผสมแห้ง ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกัน คือ การใช้น้ำ เป็นสื่อกลางในการละลายไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสต์เข้าด้วยกัน (Hedges, 1998)

Astray และคณะ (2009) อธิบายกลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เริ่มจากการละลายไซโคลเด็กซ์ตรินในน้ำ ซึ่งภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินจะมีน้ำปริมาณหนึ่ง โมเลกุลของน้ำนี้ไม่สามารถเกิดพันธะกับโครงสร้างภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินได้ ดังนั้นเมื่อโมเลกุลของ p-xylene ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าน้ำถูกเติมเข้ามาในสารละลายของไซโคลเด็กซ์ตริน โมเลกุลของน้ำจะถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของ p-xylene โดยแรงที่ใช้ในการผลักดันให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน คือ การปลดปล่อยโมเลกุลน้ำออกจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน โดยพลังงานของระบบจะลดลงเมื่อโมเลกุลของน้ำถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของเกสต์ที่เหมาะสมซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วน้อยกว่าน้ำ แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) แรงแวนเดอร์ วาลส์ (Van der waals forces) หรือพันธะ

ไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ที่เกิดขึ้น จะเป็นตัวยึดให้โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินและโมเลกุลของเกสท์อยู่ด้วยกัน



รูปที่ 2.9 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับ p-xylene (Astray และคณะ, 2009)

### 2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

ในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสท์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (Martin Del Valle, 2004)

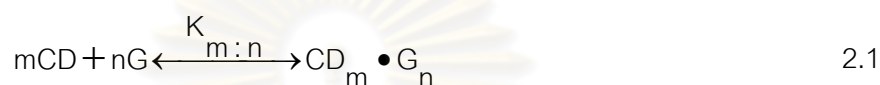
#### 1. ขนาดโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินกับขนาดโมเลกุลของเกสท์

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินกับขนาดโมเลกุลของเกสท์เป็นสมบัติหนึ่งที่มีส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน โดยโครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ตรินจะมีขนาดของโพรงที่แตกต่างกันตามจำนวนหน่วยกลูโคสไพราโนสที่มาเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสท์ที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรง จะทำให้โมเลกุลของเกสท์บางส่วนถูกห่อหุ้มไว้ภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน ดังนั้นโมเลกุลของเกสท์จึงไม่เพียงแต่สัมผัสกับภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินหนึ่งเท่านั้น แต่ยังไปสัมผัสกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินอีกโมเลกุลหนึ่งด้วย ดังในงานวิจัยของ Reineccius และคณะ (2002) ศึกษาการกักเก็บโมเดลกลิ้นดินแบบด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ จากการทดลองพบว่า โมเดลกลิ้นดินแบบที่มีฟังก์ชันของ diketone, dimethyl sulfide และ ethyl ester สามารถกักเก็บในแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดีกว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องมาจากขนาดของโมเลกุลของเกสท์ที่ใหญ่สามารถกักเก็บไว้ในโพรงที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่า



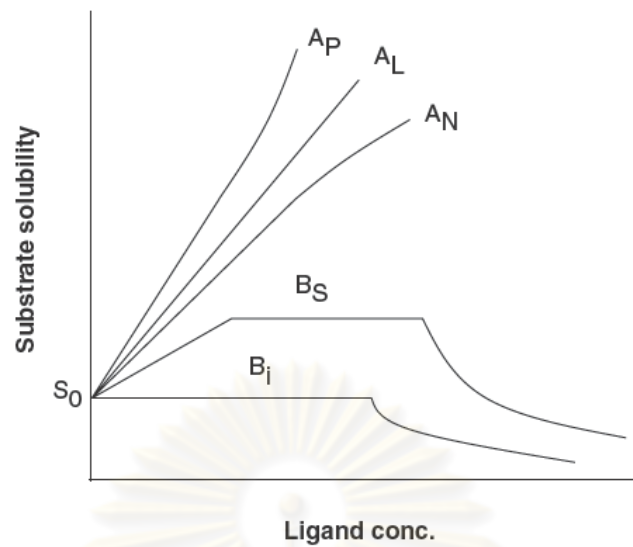
## 2. ปฏิริยาอุณหพลศาสตร์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ (โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน, โมเลกุลของน้ำมัน, ตัวทำละลาย)

ปฏิริยาอุณหพลศาสตร์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ของระบบจะเป็นแรงผลักดันในการดึงโมเลกุลของเกสต์เข้าไปภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน โดย ณ สภาวะสมดุล โมเลกุลไซโคลเด็กซ์ตรินอิสระ เกสต์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถเขียนแทนสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ 2.1



เมื่อ	G	คือ	โมเลกุลของเกสต์
	CD	คือ	โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน
	$\text{CD}_m\text{G}_n$	คือ	สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับเกสต์
	$K_{m:n}$	คือ	ค่าคงที่สมดุลของปฏิริยา
	m, n	คือ	ปริมาณสารสัมพันธ์

โดยสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical Chemistry) ของโมเลกุลของเกสต์อิสระ และโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินอิสระ มีความแตกต่างกับโมเลกุลของเกสต์และโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อน การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ช่วยให้สามารถหาปริมาณสารสัมพันธ์และค่าคงที่สมดุลของปฏิริยาได้ Higuchi และคณะ (1965) ได้อธิบายการหาปริมาณสารสัมพันธ์และค่าคงที่สมดุลของปฏิริยา โดยใช้ทฤษฎีเฟสการละลาย (Phase solubility method) ระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของเกสต์ โดยใช้ความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์เป็นหลัก ว่าสามารถจำแนกความสามารถในการละลายโมเลกุลของเกสต์ออกเป็น 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เฟสการละลาย (Loftsson และคณะ, 2005)

#### i. เฟสการละลายแบบ A

เฟสการละลายแบบ A แสดงถึงความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสท์ในสารละลายไซโคลเดกซ์ตรินมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ตรินมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเฟสการละลายแบบ A ยังสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด คือ  $A_L$ ,  $A_N$  และ  $A_P$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2.1 และไดอะแกรมเฟสการละลายสามารถหาค่าคงที่สมดุลได้ดังต่อไปนี้

$$K_{m:n} = \frac{[G_mCD_n]}{[G]^m[CD]^n} \quad 2.2$$

$$[G] = G_0 \quad 2.3$$

$$[G]_{tot} = G_0 + n[CD_mG_n] \quad 2.4$$

$$[CD]_{tot} = [CD] + m[CD_mG_n] \quad 2.5$$

เมื่อ  $[CD]$  คือ ความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ตริน  
 $[CD]_{tot}$  คือ ความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ตรินทั้งหมด

$CD_0$	คือ	ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินเริ่มต้น
$[G]$	คือ	ความเข้มข้นของโมเลกุลของเกสต์
$[G]_{tot}$	คือ	ความเข้มข้นของโมเลกุลของเกสต์ทั้งหมด
$[G \cdot CD]$	คือ	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน

เฟสการละลายแบบ  $A_L$  แสดงถึงความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้นในสัดส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ค่าคงที่สมดุลสามารถหาได้จากการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน (แกน X) กับความเข้มข้นโมเลกุลของเกสต์ (แกน y) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 สามารถหาค่าคงที่สมดุล ( $K_{1:1}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ซึ่งค่า  $K_{1:1}$  แสดงถึงโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน 1 โมเลกุล เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของเกสต์ 1 โมเลกุล

$$[G]_{tot} = \frac{K_{1:1}G_0[CD]_{tot}}{(1+K_{1:1}G_0)} + G_0 \quad 2.6$$

$$K_{1:1} = \frac{\text{Slope}}{G_0(1 - \text{slope})} \quad 2.7$$

เฟสการละลายแบบ  $A_N$  แสดงถึงความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น ช่วงแรกเพิ่มขึ้นในสัดส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเช่นเดียวกับเฟสการละลายแบบ  $A_L$  แต่ที่ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินค่าหนึ่งความสามารถในการละลายของเกสต์เกิดการเบี่ยงเบนเชิงลบขึ้น เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ตริน 1 โมเลกุลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของเกสต์ 2 โมเลกุล สามารถหาค่าคงที่สมดุล ( $K_{2:1}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$[G]_{tot} = \frac{2K_{2:1}G_0^2[CD]_{tot}}{(1+K_{2:1}G_0^2)} + G_0 \quad 2.8$$

$$K_{2:1} = \frac{\text{Slope}}{G_0^2(2 - \text{slope})} \quad 2.9$$

เฟสการละลายแบบ  $A_p$  แสดงถึงความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น ช่วงแรกเพิ่มขึ้นในสัดส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเช่นเดียวกับเฟสการละลายแบบ  $A_L$  แต่ที่ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินค่าหนึ่ง ความสามารถในการละลายของเกสต์เกิดการเบี่ยงเบนเชิงบวกขึ้น เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ตริน 2 โมเลกุลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของเกสต์ 1 โมเลกุล สามารถหาค่าคงที่สมดุล ( $K_{1,2}$ ) โดยการวาดกราฟเป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังแสดงในสมการที่ 2.12



$$[G]_{tot} = CD_0 + K_{1,1}CD_0[CD] + K_{1,1}K_{1,2}CD_0[CD]^2 \quad 2.12$$

## ii. เฟสการละลายแบบ B

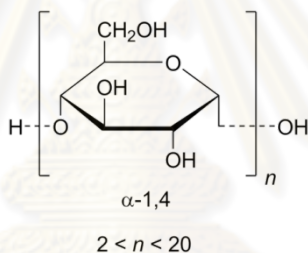
เฟสการละลายแบบ B แสดงถึงคอมเพล็กซ์จำกัดความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์ เฟสการละลายแบบ B สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ  $B_s$  และ  $B_l$

เฟสการละลายแบบ  $B_s$  แสดงถึงความสามารถในการละลายของโมเลกุลของเกสต์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และที่ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินค่าหนึ่ง การละลายของโมเลกุลของเกสต์มีค่าคงที่ ดังงานวิจัยของ Haiyee และคณะ (2009) ศึกษาการละลายของ 1,8-cineole และ tumerone ด้วยเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน พบว่าเฟสการละลายมีลักษณะแบบ  $B_s$  เมื่อพิจารณาหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาสามารถหาได้จากเฟสการละลาย โดยแบ่งเฟสการละลายออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก เฟสการละลายของเกสต์เพิ่มขึ้นในสัดส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง และสมมติให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในช่วงนี้มีค่าเท่ากับ 1:1 (ดังสมการที่ 2.7) และช่วงที่สอง ที่ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินค่าหนึ่งการละลายของโมเลกุลของเกสต์มีค่าคงที่ โดยค่าคงที่สมดุลในช่วงนี้จะมีค่ามากกว่า  $K_{1,1}$

เฟสการละลายแบบ  $B_l$  คล้ายกับกรณีกรณี  $B_s$  แต่ในช่วงแรกของกรณี  $B_l$  นั้น คอมเพล็กซ์ไม่สามารถละลายได้

## 2.5 มอลโตเด็กซ์ตริน (Maltodextrin)

มอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ โดยแหล่งของแป้งที่ได้มาจากข้าวโพด (Corn), ข้าวเจ้า (Rice), มันสำปะหลัง (Tapioca starch) และข้าวสาลี (Wheat) เป็นต้น หลังกระบวนการย่อยแป้งจะได้น้ำตาลเด็กซ์ตริน (Dextrin) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่เกิดจากกลูโคส (D-glucose) หลายๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะ แอลฟา (1→4) กลูโคไซด์ิก มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยชนิดของมอลโตเด็กซ์ตรินสามารถจำแนกได้ด้วยค่า Dextrose Equivalent (DE) ซึ่งค่า DE เป็นค่าดัชนีชี้วัดเปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในมอลโตเด็กซ์ตริน โดยที่ค่า DE สูงๆ ความเป็นน้ำตาลจึงมีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่า DE ต่ำๆ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า DE สูงๆ สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้ดีกว่า DE ต่ำๆ เนื่องจากสามารถละลายและแตกตัวได้ง่าย จึงมีความสามารถทำให้เกิดเมทริกซ์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิดการเคลือบผิว

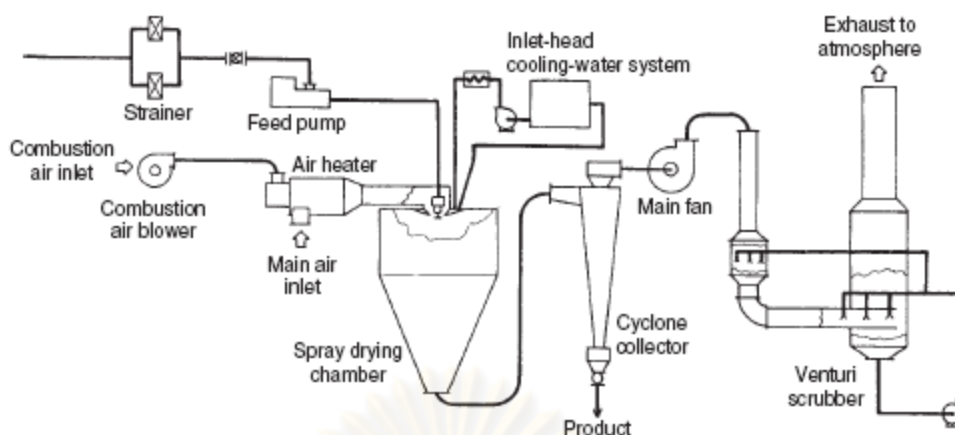


รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของมอลโตเด็กซ์ตริน

[WIKIPEDIA The free Encyclopedia. Maltodextrin (online)]

## 2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในกระบวนการกักเก็บสาร เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย โดยสามารถผลิตผงแห้งได้อย่างต่อเนื่องภายในขั้นตอนเดียว และอนุภาคที่ได้หลังกระบวนการอบแห้งมีคุณภาพดี กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ กระบวนการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากสถานะของเหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารละลาย อิมัลชัน หรือ สารแขวนลอย ให้กลายเป็นผงแห้งด้วยอากาศร้อน โดยทั่วไปแล้วเครื่องพ่นฝอยแบบอบแห้ง ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ป้อนสาร, หัวฉีด, เครื่องให้ความร้อนกับอากาศ, เครื่องป้อนอากาศ, หอบแห้ง, ระบบฟอกอากาศให้สะอาด และอุปกรณ์เก็บอนุภาคผง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Filkova' และคณะ, 2006)

หลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (Masters, 1991)

คือ

### 1. ขั้นตอนการเปลี่ยนของเหลวให้กลายเป็นละอองฝอย (Atomization)

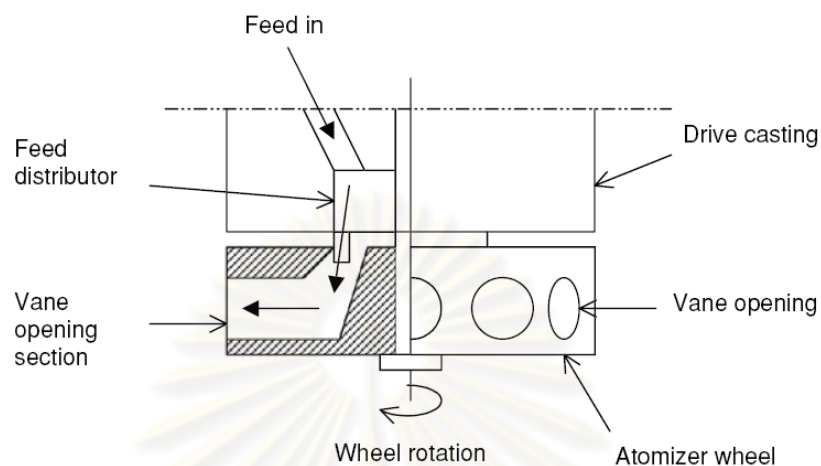
การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเริ่มจากการเตรียมสารป้อนซึ่งอาจเป็นสารละลาย อิมัลชัน หรือสารแขวนลอย โดยทำการเตรียมในถังผสม จากนั้นสารป้อนจะถูกปั๊มเข้าเครื่องอบแห้งโดยผ่านไปยังหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะถูกติดตั้งอยู่ภายในเครื่องกระจายอากาศซึ่งเป็นบริเวณเหนือสุดของหอบแห้ง หัวฉีดทำหน้าที่ทำให้ของเหลวกลายเป็นละอองฝอย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากการเกิดละอองฝอยที่มีขนาดพอเหมาะ จะเป็นตัวกำหนดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง โดยทั่วไปแล้วหัวฉีดสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ หัวฉีดแบบจานหมุน และหัวฉีดแบบแรงดัน

#### - Rotary atomizer

Rotary atomizer ประกอบด้วยจานหมุน (Wheel หรือ Disc) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5-50 เซนติเมตร หมุนด้วยความเร็วรอบ 5000-25000 รอบต่อนาที หลักการทำงานของโรตารีอะตอมไมเซอร์ คือ สารจะถูกป้อนเข้ามาที่ตรงกลางของจานหมุน จานที่หมุนด้วยความเร็วสูงจะแรงเหวี่ยงให้ของเหลวไปรอบๆ จานหมุน และหลุดแตกออกกลายเป็นละอองฝอยออกมา โดยอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 30-120 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับ



อัตราการป้อนสาร ความหนืด และปริมาณของแข็งในสารละลาย แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน โดยลักษณะของ Rotary atomizer ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Rotary atomizer (C'anovas และคณะ, 2005)

#### ข้อดี

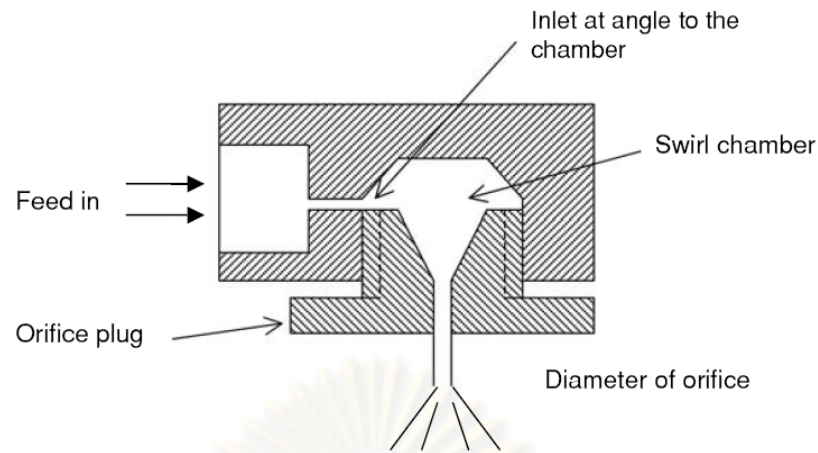
1. สามารถใช้ได้ดีกับสารที่มีความหนืดสูง
2. ขนาดละอองฝอยสามารถควบคุมได้ด้วยความเร็วรอบของจานหมุน

#### ข้อเสีย

1. ใช้พลังงานสูงกว่าหัวฉีดแบบแรงดัน
2. ราคาแพง

#### - Pressure nozzle atomizer

Pressure nozzle atomizer หรือ single-fluid nozzle ทำงานโดยอาศัยป้อนความดัน ต้นของเหลวให้ผ่านช่องแคบออริฟิส (Orifice) ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-3 มิลลิเมตร ให้กลายเป็นละอองฝอย โดยความดันที่ใช้มีค่าเท่ากับ 8.49–28.3 เมกะปาสคาล อนุภาคที่ได้จะมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบ โดยมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 120-250 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสาร และความหนืด แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ต้นของเหลวให้ผ่านช่องแคบออริฟิส โดยลักษณะของ Pressure nozzle atomizer ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะของ Pressure nozzle atomizer (C´anovas และคณะ, 2005)

#### ข้อดี

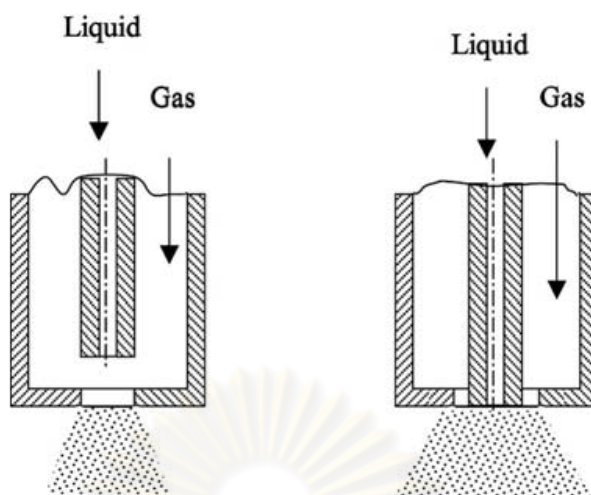
1. ราคาถูก
2. ใช้พลังงานน้อย

#### ข้อเสีย

1. ไม่สามารถควบคุมการผลิตละอองฝอยได้
2. ไม่เหมาะกับสารที่แขวนลอย
3. เมื่อเกิดการสึกกร่อนของหัวฉีดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการสเปรย์

#### - Pneumatic Nozzles

Pneumatic Nozzles หรือ two-fluid nozzles หัวฉีดแบบนี้ของเหลวและอากาศจะไหลผ่านไปยังหัวฉีด ซึ่งของเหลวจะถูกทำให้เป็นละอองฝอย เนื่องจากถูกแรงเสียดทานสูงของอากาศที่มีความเร็วสูง โดยความดันที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.3–1 เมกะปาสคาล โดยลักษณะของ Pneumatic Nozzles ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะหัวฉีดแบบ Two-Fluid nozzle (C´anovas และคณะ, 2005)

## 2. ขั้นตอนการผสมกันระหว่างละอองฝอยกับอากาศร้อน (Spray-air contact)

หลังจากที่ของเหลวถูกปั๊มผ่านหัวฉีดและเปลี่ยนของเหลวให้อยู่ในรูปของละอองฝอยแล้ว ละอองฝอยจะสัมผัสกับอากาศร้อนที่ถูกปั๊มเข้ามาในหอบแห้ง เพื่อระเหยน้ำออกให้เหลือแต่ผลิตภัณฑ์ผงแห้ง ซึ่งทิศทางที่อากาศร้อนถูกปั๊มนั้นมี 3 รูปแบบ คือ ทิศทางการไหลผ่านทางเดียวกับสารปั๊ม (Co-current flow) ทิศทางไหลตรงกันข้ามกับสารปั๊ม (Counter-current flow) และการไหลแบบผสม (Mixed flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

### - ทิศทางการไหลผ่านทางเดียวกับสารปั๊ม (Co-current flow)

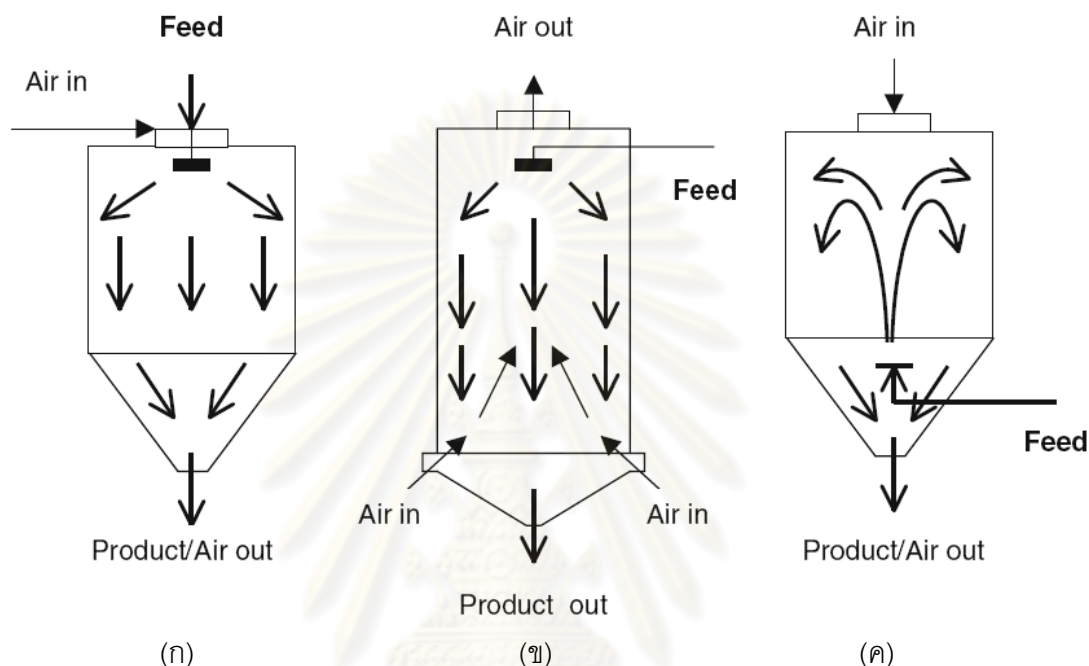
ในกระบวนการนี้สารปั๊มจะถูกปั๊มทิศทางเดียวกับอากาศร้อน โดยการระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นทันทีและการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 50-80 องศาเซลเซียส

### - ทิศทางไหลตรงกันข้ามกับสารปั๊ม (Counter-current flow)

ในกระบวนการนี้สารปั๊มจะถูกปั๊มในทิศตรงข้ามกับอากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความร้อนสูงมาก ซึ่งวิธีนี้จึงเหมาะเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เสถียรต่อความร้อนสูง

- การไหลแบบผสม (Mixed flow)

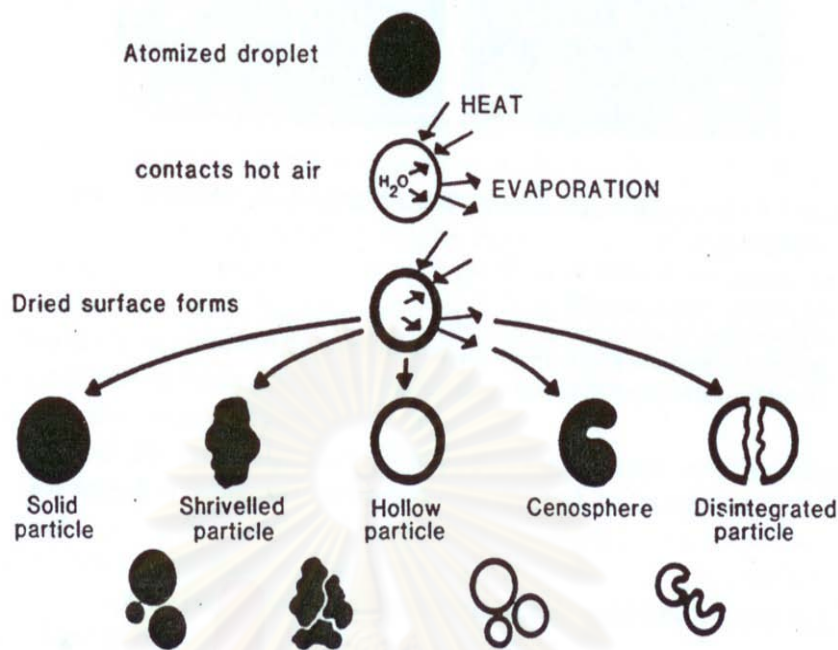
ในกระบวนการนี้สารป้อนจะเคลื่อนที่ผ่านอากาศทั้ง Co-current และ Counter-current วิธีนี้เหมาะสำหรับทำผงแห้งที่เป็นผงหยาบ และขนาดของหอบแห้งมีพื้นที่จำกัด



รูปที่ 2.16 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ก) co-current (ข) counter-current และ (ค) การไหลแบบผสม (Mixed flow) (C'anosas และคณะ, 2005)

### 3. ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying of spray)

ในขั้นตอนการอบแห้งนี้ น้ำที่ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการละลายสารที่ห่อหุ้มและคอร์เข้าด้วยกัน จะถูกกำจัดออกไปอย่างน้อยที่สุด 90 เปอร์เซ็นต์ โดยขั้นตอนของการอบแห้งเริ่มจากละอองฝอยสัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังละอองฝอย ในขณะที่น้ำจะแพร่ผ่านในทิศทางที่ตรงข้าม ซึ่งการแพร่ผ่านของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนอุณหภูมิของละอองฝอยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศแห้ง ทำให้การแพร่ผ่านของน้ำคงที่ จนความชื้นในละอองฝอยมีค่าต่ำกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งจะไม่มี การแพร่ผ่านของน้ำ และเกิดการฟอร์มตัวของเปลือกชั้นนอกขึ้น โดยกลไกการอบแห้งของละอองฝอยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งปริมาณการกักเก็บสารระหว่างกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตผงแห้ง



รูปที่ 2.17 กลไกการอบแห้งของละอองฝอย (Masters, 1991)

#### - กลไกการกักเก็บกลิ่นโดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ปริมาณการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ในผงแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะใช้อากาศร้อนเป็นสื่อกลางในการกำจัดน้ำออก ปริมาณน้ำที่ลดลงจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยไปเป็นปริมาณมากด้วย ปริมาณการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยจะมีค่ามากกว่าน้ำ เนื่องจากสมบัติของการกลายเป็นไอของน้ำมันหอมระเหยมีค่าสูงกว่าน้ำ แต่ในความเป็นจริงแล้วการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในอนุภาคนั้นมีสัดส่วนที่มากกว่าน้ำมาก โดยไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติของการกลายเป็นไอของน้ำมันหอมระเหย ซึ่ง Thijssen และคณะ (1968) อธิบายการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในอนุภาคที่มีปริมาณมากกว่าน้ำ โดยอาศัยทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่าน (Selective diffusion method)

#### - กลไกการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

Coumans และคณะ (1994) อธิบายกลไกของการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยว่าสามารถเกิดได้จากสาเหตุ ดังต่อไปนี้

### 1. การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยในช่วงของการพ่นฝอย

การสูญเสียในช่วงแรกเกิดขึ้นระหว่างการพ่นฝอย เนื่องจากของเหลวในละอองฝอยเกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรง ซึ่งในช่วงแรกยังไม่มีสารฟอร์มตัวเป็นเยื่อเลือกผ่าน ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยขึ้น

### 2. การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยในช่วงที่อนุภาคเริ่มแห้ง

การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยในช่วงนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วจากอนุภาคเปียก และอนุภาคยังไม่สามารถสร้างเปลือกที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านได้อย่างคงที่ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้น้ำมันหอมระเหยเกิดการสูญเสียไปพร้อมกับการระเหยน้ำออก ซึ่งอัตราการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยนั้นจะสูญเสียไปมากในช่วงแรกและจะลดลงเมื่อเกิดการฟอร์มตัวของเยื่อเลือกผ่าน

### 3. การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยในช่วงที่น้ำในอนุภาคถึงจุดเดือดของน้ำ

การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยในช่วงนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในอนุภาคเกินจุดเดือดของน้ำ ทำให้เกิดการฟอร์มของฟองอากาศภายในอนุภาค และเกิดการระเบิดออกมาอยู่ที่ผิวด้านนอก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยขึ้น ซึ่งเป็นการสูญเสียของน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียในขั้นตอนที่ 1 และ 2

### 4. ขั้นตอนการแยกอนุภาคผงออกจากอากาศ (Separation of dried product from the air)

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนเป็นเครื่องมือสำหรับแยกอนุภาคออกจากอากาศ โดยอากาศจะเคลื่อนเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสที่ใกล้ส่วนบนของเครื่องมือ เมื่ออากาศผ่านเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวน ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง เหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลน และแรงถ่วงซึ่งทำให้อนุภาคตกลงไปยังถังพักข้างล่าง กระแสวนนี้จะเคลื่อนลงจนถึงจุดหนึ่งที่อยู่เกือบปลายโคน อากาศจะหมุนกลับเป็นกระแสวนที่เล็กกว่าเดิม และเคลื่อนที่ขึ้นไปตามตัวไซโคลน ออกไปยังทางที่ออกที่อยู่ที่ส่วนบนของเครื่อง



## 2.7 ความคงตัวของผงแห้ง

การศึกษาความคงตัวของผงแห้งเป็นสิ่งที่ควรศึกษาหลังกระบวนการกักเก็บกลิ่น โดยวิธีการศึกษาความคงตัวของผงแห้งนั้น สามารถทำได้โดยการศึกษาการปลดปล่อยกลิ่น แล้วนำแบบจำลองมาพิจารณาหาค่าอัตราการปลดปล่อยและกลไกการปลดปล่อยด้วย สามารถทำได้โดยวิธีการพีทกราฟด้วยแบบจำลองเหล่านี้

1. Diffusion in a homogenous sphere (Yang S. และคณะ, 2006) เป็นแบบจำลองแบบง่ายที่ใช้ในการศึกษาการปลดปล่อยของยา ซึ่งยาที่นำมาศึกษาการปลดปล่อยต้องไม่เสื่อมสลายไประหว่างกระบวนการปลดปล่อย โดยการปลดปล่อยยาสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.13 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จากกฎข้อที่ 2 ของ Fick ที่ว่าการแพร่ผ่านของสารเกิดจากความเข้มข้นของสารเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยมีสมมติฐาน คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านคงที่และความเข้มข้นของยาเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าการละลายของยาในระบบ

$$\frac{M_t}{M_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D t}{r^2}\right) \quad 2.13$$

เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา $t$
	$M_0$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลานั้น
	$t$	คือ	เวลาในการปลดปล่อย
	$r$	คือ	รัศมีของอนุภาค
	$D$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน

สำหรับการปลดปล่อยที่เวลาสั้นๆ  $M_t/M_0 < 0.4$  สามารถลดรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.14

$$\frac{M_t}{M_0} = 6 \sqrt{\frac{Dt}{r^2 \pi}} - 3 \frac{Dt}{r^2} \quad 2.14$$

สำหรับการปลดปล่อยที่เวลานานๆ  $M_t/M_0 > 0.6$  สามารถลดรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{M_t}{M_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{r^2}\right) \quad 2.15$$

$$\ln\left(1 - \frac{M_t}{M_0}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 Dt}{r^2} \quad 2.16$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (D) สามารถหาได้จากการเขียนสมการในรูปล็อกการิทึม ดังแสดงในสมการที่ 2.16 ทำการวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $\ln\left(1 - \left(M_t/M_0\right)\right)$  และแกน x คือ t โดยค่าความชันมีค่าเท่ากับ  $\pi^2 D/r^2$

2. แบบจำลองของ Higuchi (Yang S. และคณะ, 2006) เป็นแบบจำลองที่อธิบายการปลดปล่อยยากับรากที่สองของเวลา ซึ่งกลไกที่ใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยยานั้นถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่านเพียงอย่างเดียว และเป็นารปลดปล่อยยาจากอนุภาคที่มีความซับซ้อน โดยอนุภาคจะต้องไม่บวมและไม่สามารถเกิดการกัดกร่อน สมการของ Higuchi ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$M_t = \sqrt{Dt(2C_0 - C_s)} \quad 2.17$$

เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา t
	D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน
	$C_0$	คือ	ความเข้มข้นของยาเริ่มต้น
	$C_s$	คือ	ความเข้มข้นของยาที่ละลาย
	t	คือ	เวลาในการปลดปล่อย

3. แบบจำลองของ Peppas (Giovagnoli และคณะ, 2008) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการปลดปล่อยยา โดยใช้กฎของเลขยกกำลังมาอธิบายการปลดปล่อย ดังแสดงในสมการที่

2.18 โดยมีสมมติฐาน คือ อนุภาคสามารถบวมได้ และค่า  $n$  ที่เหมาะสมความพีตกราฟการปลดปล่อยของสารให้อยู่ในช่วง 60%

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n \quad 2.18$$

เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา $t$
	$M_\infty$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลานั้นต์
	$k$	คือ	ค่าตัวแปรคงที่
	$n$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย
	$t$	คือ	เวลาในการปลดปล่อย

จากสมการที่ 2.18 สามารถเขียนสมการในรูปของล็อกการิทึม ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$\ln \frac{M_t}{M_\infty} = n \ln k + n \ln t \quad 2.19$$

สามารถหาค่า  $n$  โดยวาดกราฟระหว่างแกน  $x$  คือ  $\ln t$  และแกน  $y$  คือ  $\ln M_t / M_\infty$  ค่าความชันของสมการ คือ  $n$

โดย	$n = 0.5$	กลไกการปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการแบบแพร่ผ่าน
	$0.5 < n < 1$	กลไกการปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการแบบแพร่ผ่านและเมทริกซ์
	$n = 1$	กลไกการปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการบวมของเมทริกซ์ (zero-order release)
	$n > 1$	กลไกการปลดปล่อยถูกควบคุมมากกว่าบวมของเมทริกซ์

4. แบบจำลองของ Weibull เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายทั้งการละลายและการปลดปล่อยยา ซึ่งสามารถอธิบายการปลดปล่อยได้ทั้งแบบ Fickian หรือ non-Fickian ที่ปลดปล่อยได้ถึง 100% ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \exp(-at^b) \quad 2.20$$

เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา $t$
	$M_\infty$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลานั้น
	$a, b$	คือ	ค่าคงที่
	$t$	คือ	เวลาในการปลดปล่อย

ค่าสัมประสิทธิ์  $a$  และ  $b$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเฉพาะเจาะจงของอนุภาค ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์  $b$  ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคและปริมาณที่โมเลกุลยาแพร่ผ่านอนุภาค นอกจากนี้แล้วสัมประสิทธิ์  $b$  ยังแสดงถึงกลไกการปลดปล่อยได้ทั้งอนุภาคที่เป็นทรงกระบอกหรือทรงกลมอีกด้วย (Papadopoulou และคณะ, 2006)

โดย	$b \approx 0.35-0.39$	การแพร่ผ่านใน substrate morphologically คล้าย percolation cluster
	$0.39 < b < 0.69$	การแพร่ผ่านที่แตกต่างจาก percolation cluster
	$b \approx 0.69-0.75$	การแพร่ผ่านในยูคลิด เมทริกซ์
	$0.75 < b < 1$	การแพร่ผ่านในยูคลิด เมทริกซ์ รวมกับการปลดปล่อยแบบอย่างอื่น
	$b = 1$	การปลดปล่อยเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง (First order)

5. แบบจำลองของ Avrami (Yoshii และคณะ, 2001) เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาเพื่อแสดงการเจริญเติบโตของผลึกของโพลีเมอร์ และใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับแก๊ส หรือของแข็งกับของเหลว สมการ Avrami ดังแสดงในสมการที่ 2.21

$$R = \exp[-(kt)^n] \quad 2.21$$

เมื่อ	R	คือ	ปริมาณกลืนที่คงเหลือ
	k	คือ	ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย
	t	คือ	เวลาในการปลดปล่อย
	n	คือ	ค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย

จากสมการที่ 2.21 สามารถเขียนสมการในรูปของล็อกการิทึม ดังแสดงในสมการที่ 2.22

$$\ln(-\ln R) = n \ln k + n \ln t \quad 2.22$$

สามารถค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) โดยวาดกราฟระหว่างแกน x คือ  $\ln t$  และแกน y คือ  $\ln(-\ln R)$  โดยค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อยสามารถหาได้จากความชันของกราฟ และจุดตัดแกนของกราฟสามารถหาค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย

โดย	n = 1	กลไกการปลดปล่อยเป็นแบบลำดับที่หนึ่ง (First order)
	n < 1	กลไกการปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการแบบแพร่ผ่าน
	n > 1	กลไกการปลดปล่อยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากสมการที่ได้กล่าวข้างต้น การนำแบบจำลองมาใช้พีตกราฟ เพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อย และกลไกการปลดปล่อยนั้น สามารถพิจารณาความแม่นยำได้จากค่า  $R^2$  แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการปลดปล่อยและกลไกการปลดปล่อยที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่มีความแตกต่างกันของจำนวนตัวแปร ควรพิจารณาความแม่นยำจากค่า  $R^2_{adj}$  ของแต่ละแบบจำลอง (Yang S. และคณะ, 2006)

$$R^2_{adjusted} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1-R^2) \quad 2.23$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนของข้อมูล
	P	คือ	จำนวนของตัวแปรในแต่ละแบบจำลอง
	$R^2$	คือ	สัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination)

## 2.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

### 2.8.1 *Candida albican*

*Candida albicans* เป็นยีสต์สายพันธุ์หนึ่ง มีการขยายพันธุ์แบบดิพลอยด์ (2n) พบว่าเป็นสาเหตุสำคัญของโรคติดเชื้อในช่องปาก รอยโรคจะมีลักษณะเป็นแผ่นคราบสีขาว ซึ่งบางครั้งอาจหลุดออกไปเผยให้เห็นเนื้อเยื่อด้านใต้เป็นแผลอักเสบแดง ทำให้เจ็บและรู้สึกแสบร้อนในช่องปาก เสมอเมื่อถูกกระทบ สามารถพบได้ในผู้ที่ใส่ฟันปลอม ผู้ป่วยที่มีความบกพร่องของภูมิคุ้มกัน เช่น ผู้ป่วยโรคเอดส์ หรือผู้ป่วยมะเร็งที่ได้รับการรักษาด้วยเคมีบำบัด และผู้ป่วยเบาหวานที่ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดไม่ได้ เป็นต้น ในปัจจุบันการรักษาโรคที่เกิดจากเชื้อ *Candida albicans* มีข้อจำกัด เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการรักษาโรคนาน จึงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นการรักษาโรคโดยใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

### 2.8.2 เทคนิคการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Candida albicans* ด้วยผงแห้ง โดยทำการศึกษาหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของจุลินทรีย์ที่เวลาต่างๆ ซึ่งเป็นการทดสอบในเชิงปริมาณ โดยเทคนิคการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์เป็นสิ่งที่ต้องศึกษาหลังการทดสอบ โดยวิธีการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

#### 1. การนับโดยตรง (direct count) ด้วยกล้องจุลทรรศน์

i. การนับเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการตรึงและย้อมสี (stained film) วิธีนี้เป็นการนับเชื้อแบคทีเรีย ปริมาตร 0.01 มิลลิลิตร ที่ถูกตรึงและย้อมสีอยู่บนสไลด์ภายในพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร วิธีนี้มีข้อดีตรงที่ทำงาน รวดเร็ว ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่แพง แต่มีข้อเสียตรงที่เป็นการนับจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด (total count) ทั้งเซลล์ที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต นอกจากนี้ตัวอย่างที่จะตรวจนับต้องมีจำนวนเชื้อแบคทีเรียมาก

- ii. การนับเชือบนสไลด์ที่มี counting chamber สไลด์ที่มี counting chamber ได้แก่
- Petroff – Hausser counting chamber นิยมใช้นับจำนวนแบคทีเรีย
  - Haemocytometer ใช้นับ eucaryotic microbe ที่มีขนาดใหญ่



สไลด์พวกนี้จะมีแอ่ง (chamber) ซึ่งรู้ความลึกของ chamber และที่พื้นของ chamber จะมีตารางสี่เหลี่ยมซึ่งทราบความกว้างความยาวของตารางสี่เหลี่ยม ดังนั้นเมื่อหยดเชื้อจุลินทรีย์ลงไป ใน chamber ที่มี cover glass ปิดอยู่ ตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400X ในสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ก็จะทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนเซลล์ต่อมิลลิลิตรของตัวอย่างได้ สำหรับข้อดีข้อเสียของ counting chamber จะเหมือนกับนับด้วยวิธี stained film การนับให้นับเฉพาะเซลล์ที่ตะหรือทับด้านบนหรือด้านขวาของสี่เหลี่ยมจตุรัสแต่จะไม่นับเซลล์ใดก็ตามที่ตะหรือทับด้านล่างและทางซ้ายมือของสี่เหลี่ยมจตุรัส

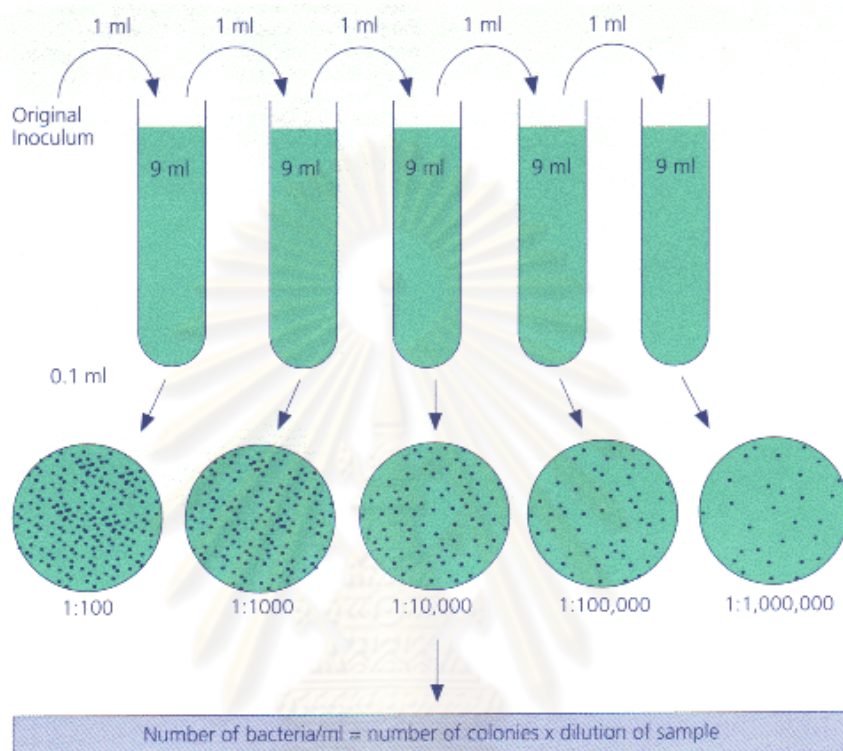
## 2. การนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะบนจานอาหาร (plate count)

ปลายทศวรรษที่ 1800 ได้มีการนำอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสมวุ้น (Agar media) มาประยุกต์ใช้ในการนับจำนวนจุลินทรีย์ด้วยการนับจำนวนโคโลนี วิธีการดังกล่าวมีพื้นฐานจากข้อสมมติ 3 อย่าง คือ

- เซลล์จุลินทรีย์หนึ่งเซลล์เจริญและแบ่งตัวเพื่อสร้างโคโลนีเดียว
- เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Original inoculum) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
- ไม่มีเซลล์ใดๆ ที่อยู่รวมกัน

ในการนับจุลินทรีย์ด้วยวิธีนี้ จำนวนโคโลนีที่เจริญบนจานอาหารมีความสำคัญยิ่ง โดยจำนวนโคโลนีต้องมีจำนวนไม่มากหรือน้อยเกินไป ทัวไปแล้วจะนับเฉพาะจานอาหารที่มีจำนวนเซลล์ระหว่าง 30-300 เซลล์เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้จำนวนโคโลนีที่เจริญบนจานอาหารอยู่ในช่วงดังกล่าว ควรทำการเจือจางเชื้อเริ่มต้นหลายๆครั้ง โดยทั่วไปทำเป็นลำดับๆ ละ 10 เท่า (serial dilution) แล้วทำการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ที่แต่ละระดับการเจือจางลงบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีวุ้นเป็นองค์ประกอบเพื่อให้เกิดความแข็ง ในการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ลงอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งนี้สามารถทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ทำการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีการ Spread plate ซึ่งวิธีนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง เชื้อจุลินทรีย์จะถูกแผ่กระจายทั่วผิวน้ำอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยแท่งแก้วพิเศษที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว (Spreader) วิธีนี้ผู้วิเคราะห์จะสามารถสังเกตลักษณะโคโลนีของจุลินทรีย์ได้ง่าย เมื่อทำการเพาะเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งแล้ว นำไปบ่มเป็นระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง เมื่อเชื้อจุลินทรีย์เจริญบนจานอาหารแล้ว ทำการนับจำนวนโคโลนีและคำนวณหาจุลินทรีย์ต่อกรัมหรือมิลลิลิตรของตัวอย่างได้ การรายงานผลมัก

รายงานเป็น colony forming unit (CFU) มากกว่าจำนวนจุลินทรีย์ เนื่องจากไม่สามารถบอกได้อย่างแน่นอน การนับจำนวนด้วยวิธี plate count จึงเป็นการนับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (viable count)



รูปที่ 2.18 แสดงวิธีการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง

<http://www.sigmaaldrich.com/>

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ohta และคณะ (1999) ศึกษาการสลายตัวของ AITC ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน พบว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถยับยั้งการเสื่อมสลายของ AITC ด้วยวิธีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า AITC สามารถเข้าไปอยู่ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดี เมื่ออุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง AITC กับแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน มีค่าน้อยกว่าการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง AITC กับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน แสดงให้เห็นว่า AITC สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดีกว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน

Fernandes และคณะ (2008) ศึกษาการกักเก็บ *Lippia sidoides* ในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งศึกษาถึงอัตราส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหยต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ 1:10, 1.33:10 และ 2:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกักเก็บด้วยเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณการลดลงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินอิสระที่ใช้ในการกักเก็บ ทำให้เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินไม่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ได้หมด จึงเกิดการสูญเสียกลิ่นไประหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยพบว่าที่อัตราส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหยต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการกักเก็บสูงสุด เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังศึกษาการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างน้ำมันหอมระเหยกับเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) ด้วยการเปรียบเทียบพีคของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินกับพีคของผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่า การปรากฏของพีคใหม่และการหายไปของพีคเดิมนั้น เป็นสิ่งที่ใช้ในการยืนยันการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น โดยเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินปรากฏพีคที่มุม 4.6, 9.1, 9.7, 10.7, 12.9, 13.6 และ 27.3 ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.9, 6.7, 7.0 และ 11.8

Liu และคณะ (2000) ศึกษาการสูญเสีย *l*-menthol ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ด้วยการกักเก็บในโพรงของไซโคลเด็กซ์ทริน โดยศึกษาถึงชนิดของไซโคลเด็กซ์ทริน พบว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถกักเก็บ *l*-menthol ระหว่างกระบวนการอบแห้งได้ดีกว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน นอกจากนี้ยังศึกษาการสูญเสีย *l*-menthol ระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบง่ายในการศึกษา พบว่า ในสายป้อน ณ สภาวะสมดุล *l*-menthol ปรากฏอยู่ 2 รูปแบบ คือ ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับ *l*-menthol และในรูปของ *l*-menthol อิสระ เมื่อสารถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยผ่านหัวฉีดและทำให้เกิดละอองฝอยขึ้น ละอองฝอยสัมผัสกับอากาศร้อน เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับละอองฝอย เกิดการสูญเสีย *l*-menthol อิสระไประหว่างกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสีย *l*-menthol ณ สภาวะสมดุลอีกด้วย เป็นผลให้ *l*-menthol ที่ถูกกักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ทรินถูกปลดปล่อยออกมา เนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนความเข้มข้นของ *l*-menthol อิสระ กับ *l*-menthol ที่กักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ทริน

Shiga และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บโมเดลกลิ่น Shiitake ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเตรียมสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินที่ความเข้มข้น เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของโมเดลกลิ่น lenthionine ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน มีค่าเท่ากับ 49, 14 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ( $\alpha$ CD:MD = 10%wt/20%wt) เปรียบเทียบกับการใช้มอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว (MD = 30wt%) พบว่า ค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นในผงแห้งที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว มีค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น เท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ ค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการฟอร์มเป็นชั้นฟิล์มของมอลโตเด็กซ์ตริน ซึ่งจะช่วยลดการแพร่ผ่านของกลิ่นในระหว่างกระบวนการพ่นฝอยแบบอบแห้ง

Li และคณะ (2007) ศึกษาการปลดปล่อย AITC จากโพรงของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปลดปล่อย AITC มีค่ามากในช่วงแรก หลังจากนั้นการปลดปล่อยของ AITC ค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในช่วงสุดท้ายของการทดสอบ เมื่อใช้สมการ Avrami มาใช้พิจารณาค่าอัตราการปลดปล่อย (k) และกลไกการปลดปล่อย (n) พบว่า อัตราการปลดปล่อย AITC จากโพรงของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าน้อยกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องมาจาก AITC เกิดพันธะกับโพรงของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่แข็งแรงมากกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และกลไกการปลดปล่อยของ AITC จากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าอยู่ในช่วง 0.54 แสดงถึงการปลดปล่อยของสารถูกกำหนดด้วยการแพร่ผ่านของโมเลกุล (Molecular diffusion)

Toro-Sanher และคณะ (2009) ศึกษาการปลดปล่อยของ Thymol จากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการปลดปล่อย พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการปลดปล่อยมีค่าสูงขึ้น การปลดปล่อยของ Thymol มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากน้ำที่เกาะบริเวณผิวของอนุภาคทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เกิดความไม่สมดุลของปฏิกิริยาขึ้น น้ำมันเกิดการถูกแทนที่ด้วยน้ำ ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำที่บริเวณรอบอนุภาคเพิ่มขึ้น จึงทำให้การปลดปล่อยของสารจึงมากขึ้นด้วย

Reineccius และคณะ (2003) ศึกษาการปลดปล่อยซีตรัลของผงแห้งที่เตรียมจากการใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์เป็นสารห่อหุ้ม ในสถานะของสารละลายที่อุณหภูมิ 5-85 องศาเซลเซียส พบว่าการปลดปล่อยซีตรัลจากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าน้อยกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน และแอลไซโคลเด็กซ์ตริน ตามลำดับ และการปลดปล่อยของซีตรัลมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการปลดปล่อยของซีตรัลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงๆ ส่งผลให้การยึดจับของซีตรัลไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินลดลง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 น้ำมันตะไคร้ บริษัท อุตสาหกรรมเครื่องหอมไทย-จีน จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.2 สารห่อหุ้ม
  - แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, บีต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน บริษัท Wacker chemical ประเทศเยอรมันนี
  - มอลโตเด็กซ์ตริน (Maltodextrin, DE 25) บริษัท Nippon Starch Chemicals Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.3 *Candida albicans* ATCC 10231 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค) ประเทศไทย
- 3.1.4 Difco™ Sabouraud Dextrose Broth (SDB) บริษัท Difco ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.5 Difco™ Sabouraud Dextrose Agar (SDA) บริษัท Difco ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.6 Tween 80 (Polyoxyethylene sorbitan mono-oleate) บริษัท VWR international Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ
- 3.1.7 แอโรซอล โอ ที บริษัท Wako Pure Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.8 เฮกเซน บริษัท Wako Pure Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.9 คลอโรฟอร์ม บริษัท Wako Pure Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.10 ไซโคลเฮกซานอน บริษัท Wako Pure Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น

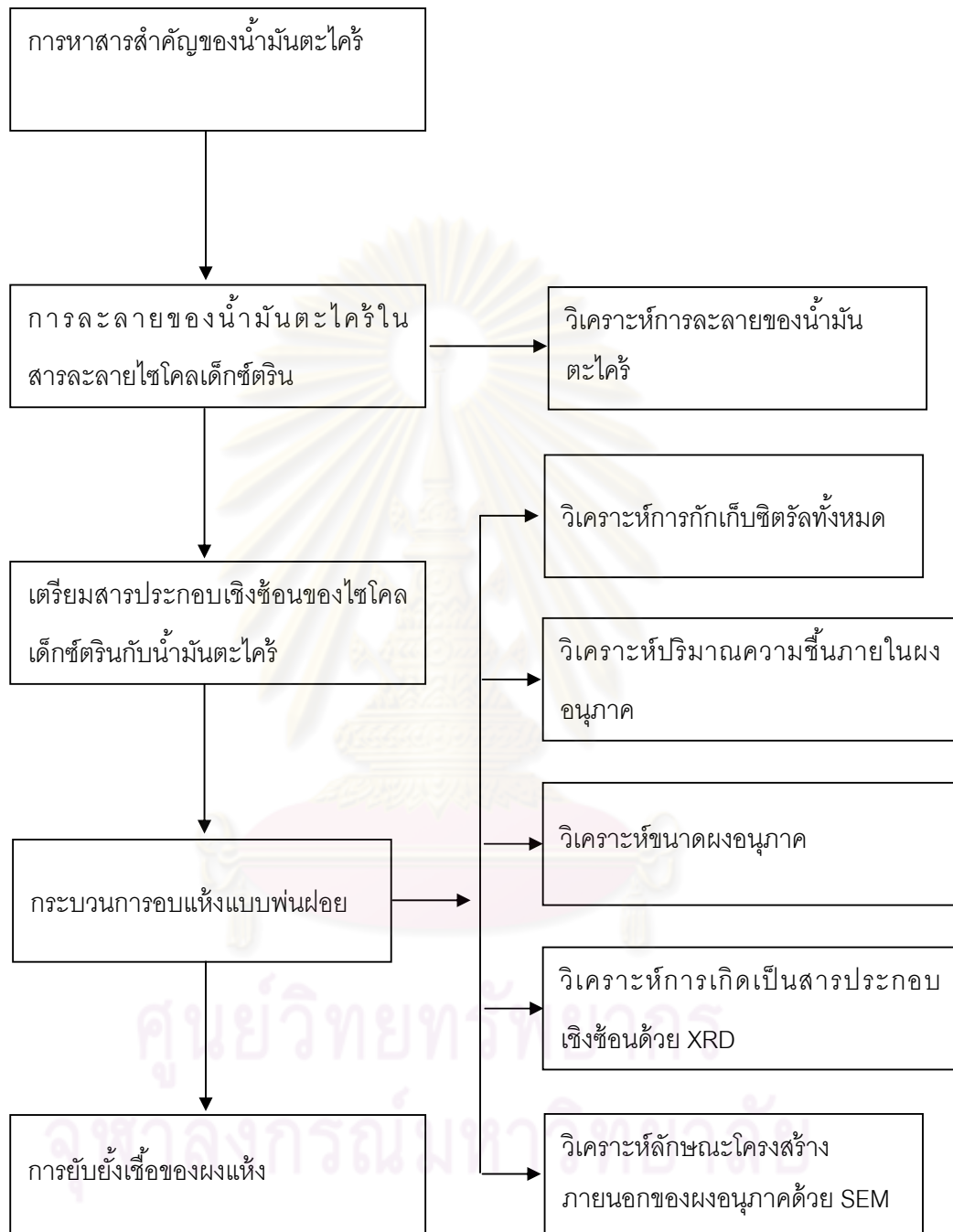
#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 เครื่องเขย่าสาร (Shaking incubator) รุ่น SNR บริษัท Vision scientific ประเทศเกาหลี
- 3.2.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) รุ่น B-290 บริษัท Buchi ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ และรุ่น L-8 บริษัท Ohkawara kakouki ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.3 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-14B และ รุ่น GC 2010 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์ รุ่น Agilent 7890A/5975C บริษัท Agilent Technologies ประเทศ สหรัฐอเมริกา



- 3.2.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Nanoparticle analyzer) รุ่น SALD-7100 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM 6060 บริษัท EVISA ประเทศอังกฤษ
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) รุ่น Discover บริษัท Bruker AXS ประเทศเยอรมันนี
- 3.2.7 เครื่องทดสอบหาความชื้น (Karl Fisher Moisture Titrator) รุ่น MKS-510 บริษัท Kyoto Electronics Manufacturing ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.8 เครื่องปั่นแยกสาร (Centrifuge) รุ่น Centrifuge 2010 บริษัท Kubota ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.9 เครื่องไฮโมจีไนน์เซอร์ รุ่น Polytron PT 3100 บริษัท Kinematica ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.10 เครื่องวอร์แทกซ์ รุ่น Vortex genie 2 บริษัท Scientific Industries ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.11 เตาอบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Chamber) รุ่น BTL-433 บริษัท Espec ประเทศอังกฤษ
- 3.2.12 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง รุ่น SpectraMax M5 Microplate Reader บริษัท Molecular Devices ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น Spectronic Genesys 20 บริษัท Thermo science ประเทศอังกฤษ
- 3.2.13 เครื่อง Spiral plater รุ่น Spiral Biotech Autoplate 4000 บริษัท Advanced Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.14 เครื่อง Colony count รุ่น Flash & Grow บริษัท IUL instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

### 3.3 ขั้นตอนและการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาสารสำคัญของน้ำมันตะไคร้

เนื่องจากน้ำมันตะไคร้เป็นสารผสมของสารสำคัญหลักหลายชนิด ซึ่งมีอัตราส่วนของสารแต่ละชนิดแตกต่างกันไปตามภูมิประเทศที่ปลูก ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์หาปริมาณของสารสำคัญหลักที่แน่นอน เพื่อใช้เป็นสารอ้างอิงในการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ สามารถทำได้โดยละลายน้ำมันตะไคร้ในตัวทำละลายแยกเช่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC/MS) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่สภาวะการทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์

Column	DB-5 MS fuse silica capillary column
Carrier gas	He
Injector temperature (°C)	250
Program	เริ่ม 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 120 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 120 องศาเซลเซียส
Ion source temperature (°C)	230
Ionization conditions	Ion energy 70 eV Mass range scan 30-650 amu
Library	Willey 7n

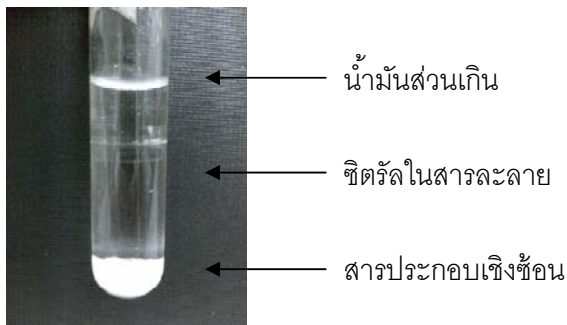


รูปที่ 3.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปคโตรมิเตอร์ รุ่น Agilent 7890A/5975C

### 3.4.2 การหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน

การศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถทำได้โดยทฤษฎีของ Higuchi และ Connors ดังนี้

- เตรียมสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินที่ความเข้มข้น 0 – 10 มิลลิโมลาร์
- เติมน้ำมันตะไคร้ปริมาณที่มากเกินพอ (80  $\mu\text{L}$ ) ลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน
- นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- นำสารละลายที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่นแยกสารที่ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
- นำสารละลายส่วนใส ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ไปวิเคราะห์ซีทีแอลด้วยวิธีการสกัดและนำไปวิเคราะห์ห้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC14B) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ที่สภาวะการทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 ซีตรัลในสารละลาย



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-14B

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น GC-14B

Column	DB-wax
Carrier gas	N <sub>2</sub>
Injector temperature (°C)	210
Detector temperature (°C)	230
Program	เริ่ม 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และเพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 230 องศาเซลเซียส

### 3.4.3 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินกับน้ำมันตะไคร้

การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินกับน้ำมันตะไคร้สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการเขย่า โดยในงายวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการกักเก็บชิตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยดังนี้

#### 1. ผลของความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินต่อการกักเก็บชิตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

- เตรียมสเลอรีของไซโคลเด็กซ์ตรินที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายไซโคลเด็กซ์ตรินในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยวิธีการปั่นกวน จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้องและปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 22 ชั่วโมง
- เติมน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของชิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1
- นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- นำไปอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น B-290 ที่สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.5
- นำอนุภาคผงที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในกักเก็บชิตรัล ด้วยวิธีการสกัดและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC 14B) ดังกล่าวข้างต้นใน 3.4.2

ตารางที่ 3.3 สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น B-290

Air inlet temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	160
Air outlet temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$97\pm 3$
Feed rate (mL/min)	9
Air flow rate ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	38





รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น B-290

## 2. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน ต่อการกักเก็บซิทรัล หลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

- เตรียมสเลอรีของไซโคลเด็กซ์ตรินที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยละลายไซโคลเด็กซ์ตรินในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยวิธีการปั่นกวน จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิห้องและปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- เติมน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1:1.5 และ 1:2
- นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- ก่อนการอบแห้งนำสารประกอบที่ได้ไปโฮโมจีไนน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- นำไปอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ที่สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.4
- นำอนุภาคผงที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การกักเก็บซิทรัล ด้วยวิธีการสกัดและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC-2010) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ที่สภาวะการทำงานดังแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 เครื่องโฮโมจีไนน์เซอร์ รุ่น Polytron PT 3100



รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8



รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น GC-2010

**ตารางที่ 3.4** สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8

Air inlet temperature (°C)	160
Air outlet temperature (°C)	114±3
Feed rate (mL/min)	30
Air flow rate (kg/hr)	110
Rotary atomizer speed (rpm)	30000

**ตารางที่ 3.5** สภาวะการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี รุ่น GC 2010

Column	DB-wax
Carrier gas	N <sub>2</sub>
Inlet pressure (kPa)	70
Injector temperature (°C)	210
Detector temperature (°C)	230
Program	เริ่ม 50 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

**3. ผลของอัตราส่วนการเติมไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน (DE 25) เป็นสารห่อหุ้ม ต่อการกักเก็บซิติรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย**

- เตรียมสเลอริของไซโคลเด็กซ์ตริน โดยละลายไซโคลเด็กซ์ตรินในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวิธีการปั่นกวน จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิห้องและปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- เติมน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิติรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1
- นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- เติम्मอลโตเด็กซ์ตรินที่อัตราส่วนของมอลโตเด็กซ์ตรินต่อของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 0, 20 และ 50 เปอร์เซ็นต์
- ก่อนการอบแห้งนำสารประกอบที่ได้ไปโฮโมจีไนน์ ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- นำไปอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรุ่น L-8 และวิเคราะห์ความสามารถในกักเก็บซิติรัล ด้วยวิธีการสกัดและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมา

โตกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC-2010) เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2

#### 3.4.4 วิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บซีตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บซีตรัลหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถทำได้ โดย นำผงแห้งที่เตรียมได้ไปสกัดและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยวิธีการสกัดสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- ชั่งผงแห้ง 0.05 มิลลิกรัม
- ละลายด้วยน้ำ 4 มิลลิลิตร และคลอโรฟอร์ม 1 มิลลิลิตร (1 มิลลิลิตรต่อ 1 ไมโครลิตร ไฮโครเฮกซาโนน)
- นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 93 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทุกๆ 10 นาที ตัวอย่างถูกนำมาวอแท็กซ์เป็นเวลา 30 วินาที
- นำชิ้นตัวทำละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งปริมาณการกักเก็บซีตรัลในอนุภาคผงสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกักเก็บ} = \frac{\text{ปริมาณซีตรัลในผงแห้ง (Dry basis)} \times 100}{\text{ปริมาณซีตรัลในสายป้อน}} \quad (3.1)$$

#### 3.4.5 วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผงแห้ง

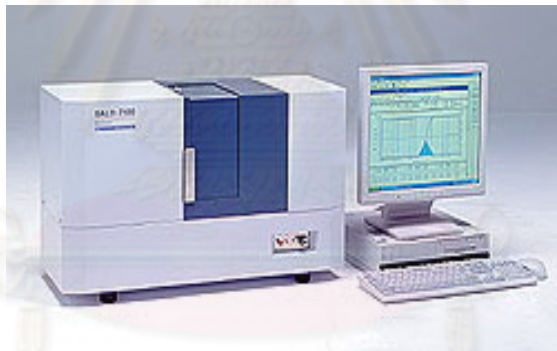
ปริมาณความชื้นในผงแห้งมีผลต่อคุณภาพของผงแห้ง ดังนั้นหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยผงแห้งที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในอนุภาคผง โดยชั่งผงแห้ง 0.15 กรัม ใส่ในตัวทำละลายฮาฮาซี และหาค่าความชื้นในผงแห้งด้วยวิธี Karl Fisher Moisture Titrator ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบหาความชื้น รุ่น MKS-510

#### 3.4.6 วิเคราะห์ขนาดของผงแห้ง

ชั่งผงแห้ง 0.1 กรัม ละลายในเฮกเซน 2 มิลลิลิตร นำไปโซนิคเพื่อให้อนุภาคกระจายตัวเป็นเวลา 10 นาที นำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค รุ่น SALD-7100 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ที่ค่าดัชนีหักเห 1.70-0.2i



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค รุ่น SALD-7100

#### 3.4.7 วิเคราะห์การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วย XRD

การวิเคราะห์การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิค XRD สามารถทำได้โดยนำผงแห้งทดลองในอะลูมิเนียมเพนให้เต็มและนำไปวัดเครื่อง X-ray diffraction ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) รุ่น Discover

### 3.4.8 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งด้วย SEM

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สามารถทำได้โดยนำผงอนุภาคมาติดลงบนคาร์บอนเทปซึ่งติดอยู่บน SEM stub และนำไปเคลือบด้วย Pt-Pd ด้วยเครื่อง magnetron sputters coater



รูปที่ 3.12 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM 6060



### 3.4.9 วิเคราะห์ความคงตัวของผงแห้ง

การทดสอบความคงตัวของผงแห้งสามารถทำได้โดยการชั่งผงแห้ง 0.05 กรัม ใส่ในขวดฝาเปิด และนำไปวางไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 วัน โดยทุกๆ 1 วัน ผงแห้งจะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณซีตรัลที่เหลือ ด้วยวิธีการสกัดและนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph, GC: Shimadzu GC-2010) เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.13 เตาอบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Chamber) รุ่น BTL-433

### 3.4.10 วิเคราะห์หาปริมาณเชื้อเริ่มต้นของ *Candida albicans* ATCC 10231

การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *C. albicans* ATCC 10231 ด้วยผงแห้ง สิ่งหนึ่งที่ต้องศึกษาก่อนการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ คือ การหาปริมาณเชื้อเริ่มต้น เพื่อให้การทดสอบแต่ละครั้งมีปริมาณเชื้อทดสอบที่เท่ากัน โดยวิธีการหาปริมาณเชื้อเริ่มต้นสามารถทำได้ดังนี้

- นำกล้าเชื้อ *C. albicans* มาเพาะในอาหาร Sabouraud Dextrose Agar (SDA) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- คัดเลือกโคโลนีเดียวจากอาหาร SDA ถ่ายลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Sabouraud Dextrose Broth (SDB) วอกแท็กซ์เพื่อให้เชื้อกระจายตัวออกจากกัน และนำไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- วัดค่าการดูดกลืนแสงของเชื้อที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยสมมติว่าที่ OD เท่ากับ 1.5, 0.5, 0.5, 0.35, 0.25 และ 0.20 มีปริมาณเชื้อเริ่มต้น เท่ากับ  $10^8$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร
- ทำการเจือจางเชื้อแต่ละ OD ด้วยน้ำเกลือ (NaCl 0.85% โดยน้ำหนัก) และนำไป spread ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ SDA ด้วยเครื่อง Spiral plater ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ตรวจสอบจำนวนเชื้อด้วยวิธีการนับโคโลนี ด้วยเครื่องนับโคโลนี ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง รุ่น Spectronic Genesys 20



รูปที่ 3.15 เครื่อง Spiral plater รุ่น Spiral Biotech Autoplate 4000



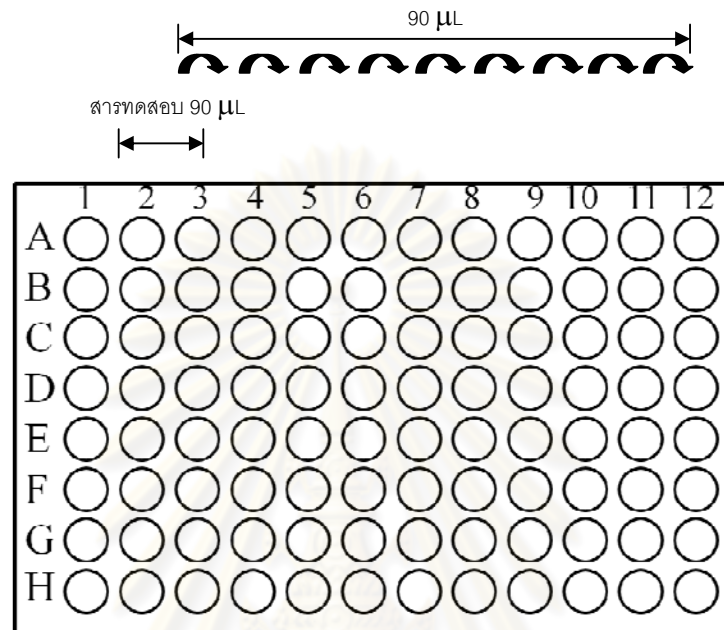
รูปที่ 3.16 เครื่องนับโคโลนี

### 3.4.11 วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้

การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันตะไคร้ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *C.albicans* ATCC 10231 สามารถทำได้โดยวิธีการเจือจางสารทดสอบ (Broth dilution method) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบในเชิงปริมาณ ทำให้สามารถทราบถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้ ดังนี้

- นำกล้าเชื้อ *C.albicans* มาเพาะในอาหาร Sabouraud Dextrose Agar (SDA) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- คัดเลือกโคโลนีเดี่ยวจากอาหาร SDA ถ่ายลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Sabouraud Dextrose Broth (SDB) วอแท็กซ์เพื่อให้เชื้อกระจายตัวออกจากกัน และนำไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ปรับปริมาณเชื้อทดสอบเริ่มต้น เท่ากับ  $10^6$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยวัดความขุ่นให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร เท่ากับ 0.35
- เตรียมสารทดสอบความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการละลายน้ำมันตะไคร้หรือซิตรอลในน้ำกลั่นที่มี Tween 80 (0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เป็นตัวช่วยในการละลาย
- ทำการเจือจางสารทดสอบในไมโครไตเตรท 96-well โดยปิเปตดูอาหารเลี้ยงเชื้อ SDB 90 ไมโครลิตร ใส่ลงในแถว A-D ของหลุมที่ 2-12 จากนั้นทำการปิเปตดูสารทดสอบ 90 ไมโครลิตร ใส่ลงในแถว A-D ของหลุมที่ 1 และ 2 ผสมสารในหลุมที่ 2 ให้เข้ากัน ทำการเจือจางสารทดสอบแบบสองเท่า (2-fold dilution) โดยปิเปตดูสารในหลุมที่ 2 ใส่ลงในหลุมที่ 3 และทำซ้ำไปจนถึงหลุมที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งหลุมที่ 12 จะมีเพียงอาหารเลี้ยงเชื้อเพียงอย่างเดียว
- ปิเปตดูเชื้อทดสอบ 10 ไมโครลิตร ใส่ลงในแถว B-D ของหลุมที่ 1-12 นำไมโครไตเตรท 96-well ไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- นำไปวัดความขุ่นด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตรวจผลความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ
- หาความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อของสารทดสอบได้โดย นำสารในหลุมที่ทดสอบหาค่า MIC ที่ไม่มีความขุ่นทุกหลอดไป streak ลงบนอาหารแข็ง SDA แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ

37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจสอบผลดูว่าที่ความเข้มข้นใดไม่พบโคโลนีปรากฏบนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยจะถือว่าความเข้มข้นนั้นเป็นความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ



ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อ (มิลลิลิตร)	0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
ความเข้มข้นสารทดสอบ (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	2000	1000	500	250	125	62.5	31.25	15.63	7.81	3.91	1.95	0
ปริมาณเชื้อทดสอบ (ยกเว้นแถว A) (มิลลิลิตร)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

รูปที่ 3.17 แผนภูมิสรุปขั้นตอนวิธีการเจือจางสารทดสอบ (Broth dilution method)



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง รุ่น SpectraMax M5 Microplate Reader

### 3.4.12 วิเคราะห์การยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยผงแห้ง

การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันตะไคร้ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโต *C.albicans* ATCC 10231 ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคเด็กซ์ตรินกับน้ำมันตะไคร้ สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- การเตรียมปริมาณเชื้อทดสอบเริ่มต้น เท่ากับ  $10^6$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.4.11
- ผงแห้งที่เตรียมได้หลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยถูกนำไปฆ่าเชื้อก่อนการทดสอบด้วยการนำผงแห้งไปผ่าน UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำผงแห้งที่ได้ไปเตรียมสารทดสอบที่ความเข้มข้นของซีทรอล เท่ากับ MIC โดยทำการละลายผงแห้งในอาหารเลี้ยงเชื้อ SDB ที่มี Tween 80 (0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เป็นตัวช่วยในการละลาย
- ปิเปตดูดเชื้อทดสอบ 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารทดสอบ 18 มิลลิลิตร นำไปดูอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อที่เวลา 0, 1, 3, 5 และ 7 ชั่วโมง
- ปิเปตดูดสารที่เวลาต่างๆ มา 0.5 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำเกลือ (NaCl 0.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 4.5 มิลลิลิตร
- นำไป spread ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ SDA และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- ตรวจสอบการเจริญเติบโตของเชื้อที่เวลาต่างๆ ด้วยวิธีการนับโคโลนี ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อสามารถหาได้ ดังสมการที่ 3.2

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อ} = \frac{(A-B) \times 100}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ A คือ จำนวนเชื้อที่อยู่ในอาหาร  
B คือ จำนวนเชื้อที่ถูกยับยั้งด้วยสารทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การศึกษาหาสารสำคัญและปริมาณของสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้

น้ำมันตะไคร้เป็นน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากการกลั่นของเหง้าและใบของต้นตะไคร้ ซึ่งในน้ำมันตะไคร้จะมีสารสำคัญผสมกันอยู่หลายชนิด โดยมีอัตราส่วนของสารสำคัญเหล่านั้นแตกต่างกันไปตามภูมิประเทศที่เพาะปลูก ดังนั้นในการนำน้ำมันตะไคร้มาใช้ในงานวิจัย จึงจำเป็นต้องนำน้ำมันตะไคร้มาวิเคราะห์หาปริมาณของสารสำคัญหลักที่แน่นอน เพื่อใช้เป็นสารอ้างอิงในการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ ในการศึกษาหาสารสำคัญและปริมาณสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้ สามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หาชนิดของสารองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันผสมได้ค่อนข้างแม่นยำ จากการทดลองพบว่าสารสำคัญหลักของน้ำมันตะไคร้ คือ ซิตรัล คิดเป็นร้อยละ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งซิตรัลประกอบด้วย 2 ไอโซเมอร์ คือ E-citral และ Z-citral นอกจากนี้ยังพบว่าในน้ำมันตะไคร้ยังมีสารสำคัญอื่นๆ อีก เช่น  $\beta$ -myrcene, geraniol, geranyl acetate และ linalool โดยมีปริมาณดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ยึดเอา E-citral และ Z-citral เป็นสารอ้างอิงในการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้

ตารางที่ 4.1 สารสำคัญและปริมาณของสารสำคัญในน้ำมันตะไคร้

สารสำคัญ	ปริมาณของสารสำคัญ (%โดยน้ำหนัก)
E-citral	45.83
Z-citral	35.02
$\beta$ -myrcene	5.47
Geraniol	5.03
Geranyl acetate	2.00
Linalool	1.1
อื่นๆ	5.55



## 4.2 การศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน

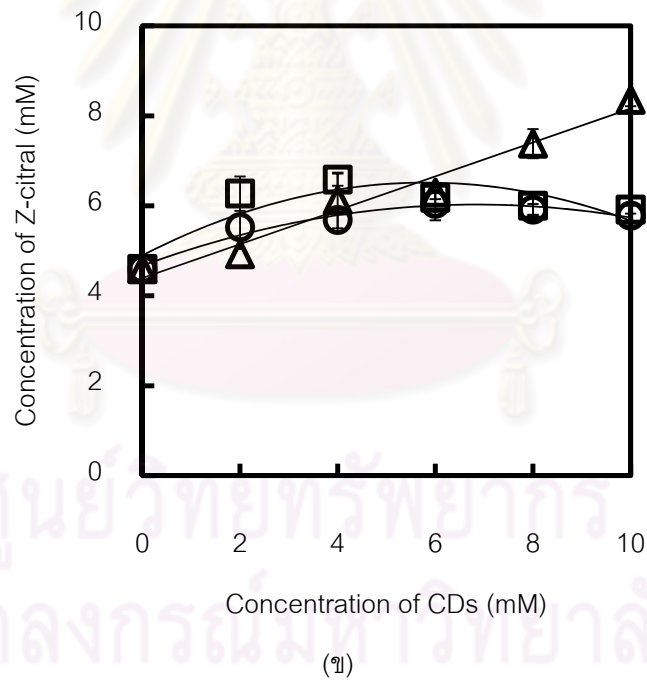
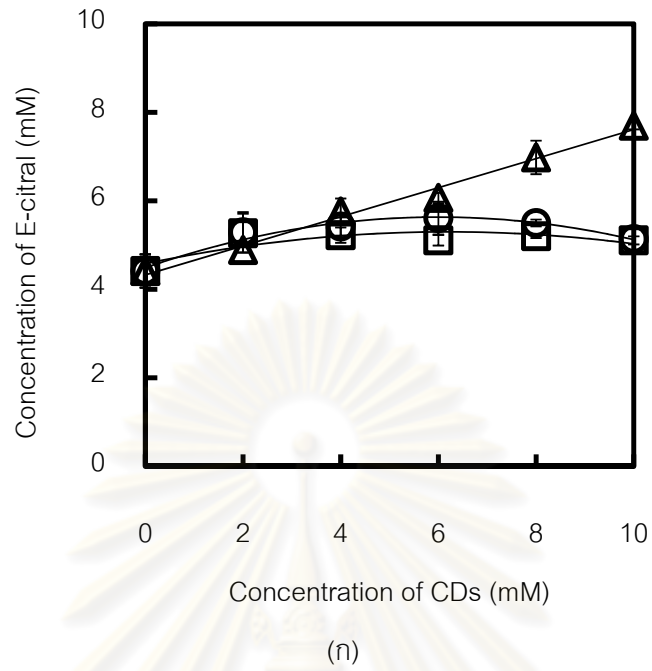
### 4.2.1 ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อการละลายของน้ำมันตะไคร้

ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับซิทรัล ซึ่งเป็นสารสำคัญหลักในน้ำมันตะไคร้ พบว่าแรงที่ใช้ในการดึงดูดระหว่างโมเลกุลสามารถเป็นได้ทั้ง แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) แรงแวนเดอร์ วาลส์ (Van der waals forces) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งนอกจากการศึกษาหาปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับซิทรัล ณ สภาวะสมดุลนั้น สามารถหาได้จากการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน อีกทั้งยังสามารถหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาได้อีกด้วย โดยประยุกต์ใช้เฟสการละลาย (Phase solubility) ซึ่ง Higuchi และคณะ (1965) ได้อธิบายการหาปริมาณสารสัมพันธ์และค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (ดังหัวข้อ 2.4.3)

จากการศึกษาชนิดของไซโคลเด็กซ์ตรินต่อการละลายของน้ำมันตะไคร้ แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเฟสการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะแบบ  $A_L$  แสดงถึงโมเลกุลของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน 1 โมเลกุล เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของซิทรัล 1 โมเลกุล (ทั้ง E-citral และ Z-citral) ซึ่งแสดงในสมการที่ 4.1



ในขณะที่เฟสการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะแบบ  $B_S$  แสดงถึงความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ถูกจำกัดด้วยคอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้น โดยการละลายของน้ำมันตะไคร้ในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแบบ  $A_L$  และที่ความเข้มข้นของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเท่ากับ 2 มิลลิโมลาร์ ความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้มีค่าคงที่ ในการหาปริมาณสารสัมพันธ์และค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา สามารถหาได้จากกราฟในช่วงเส้นตรง สอดคล้องกับการทดลองของ Haiyee และคณะ (2009) ได้ศึกษาการละลายของ 1,8-cineole และ tumerone ในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน พบว่าเฟสการละลายมีลักษณะแบบ  $B_S$  โดยที่ความเข้มข้นของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน 5 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซีตรัล ((ก) E-citral, (ข) Z-citral) และความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ ( $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

2 มิลลิโมลาร์ ความสามารถในการละลายของ 1,8-cineole และ tumerone มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาสามารถหาได้จากกราฟช่วงแรกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง และสมมติให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในช่วงแรกมีค่าเท่ากับ 1:1 โดยค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในระบบ 2 เฟส (ไซโคลเด็กซ์ตริน + เกสท์) และระบบ 3 เฟส (ไซโคลเด็กซ์ตริน + เกสท์ + คอมเพล็กซ์) นั้น Ono และคณะ (2001) กล่าวว่าไม่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง E-citral กับแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน มีค่าเท่ากับ 122.47, 184.55, และ 204.19  $M^{-1}$  ตามลำดับ และค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Z-citral กับแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน มีค่าเท่ากับ 157.07, 205.68 และ 253.22  $M^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีค่ามาก แสดงถึงความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกว่าค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่ต่ำ

#### 4.3 การศึกษาปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน

##### 4.3.1 ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

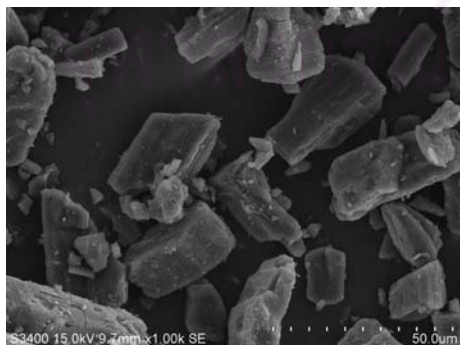
การศึกษาผลของปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อนต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ สามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะโครงสร้างของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้หัวฉีดแบบพ่นแรงดัน สามารถพบโครงสร้างของผงแห้งได้ 2 รูปแบบ คือ อนุภาคทรงกลมและผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข-ง) ซึ่งที่ปริมาณการเติมแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอนุภาคทรงกลมมากกว่าการเติมแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากความสามารถในการละลายของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีผลต่อการเกิดเป็นอนุภาคทรงกลม ดังนั้นเมื่อปริมาณแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้พบลักษณะโครงสร้างของผลึกมากกว่าทรงกลม แต่ในความเป็นจริงแล้วอนุภาคทรงกลมในทุกอัตราส่วนมีปริมาณเท่ากัน

โครงสร้างของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) ส่วนผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกเช่นเดียวกับโครงสร้างของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากเบต้าไซโคล

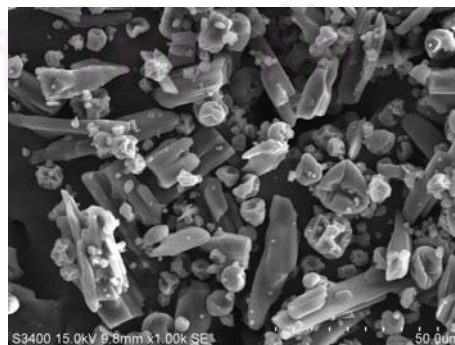
เด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ และในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นอนุภาคได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Fernandes และคณะ (2008) ศึกษาการกักเก็บ Lippia sidodes ไว้ภายในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ที่อัตราส่วนการเติม Lippia sidodes ต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:10, 1.33:10 และ 2:10 โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าผงแห้งที่เตรียมได้จากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นผลึก

สำหรับโครงสร้างของเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นอนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวกัน (Agglomerates) โดยที่ปริมาณการเติมแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคที่มากกว่าปริมาณการเติมแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินน้อยๆ เนื่องจากแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายในน้ำได้ดีกว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ดังนั้นที่ปริมาณความเข้มข้นของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินสูงๆ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย นอกจากอนุภาคจะยึดติดกันด้วยการชนของอนุภาคแล้ว ยังเกิดการเชื่อมต่อกันจากแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ละลายน้ำ กล่าวได้ว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ละลายน้ำทำหน้าที่เป็นไบเดอร์ (Binder) ในการยึดติดอนุภาคเข้ากัน

โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแห้งที่เตรียมได้การใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 17-28 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มพบว่า มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า อยู่ในช่วง 7-11 ไมโครเมตร เนื่องจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ จึงทำให้ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นอนุภาคได้

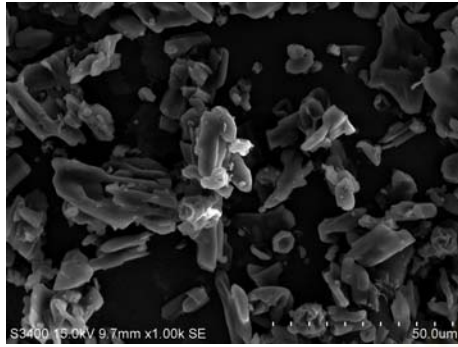


(ก)

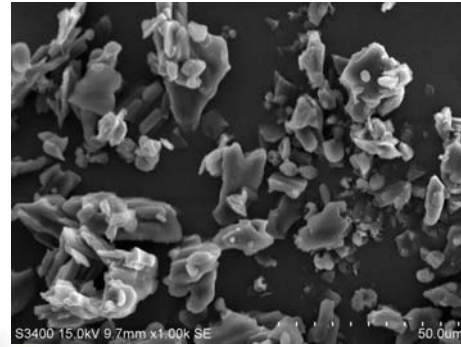


(ข)



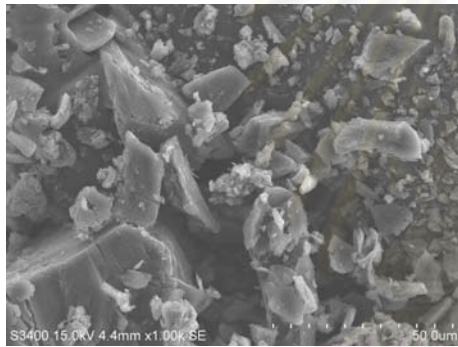


(ค)

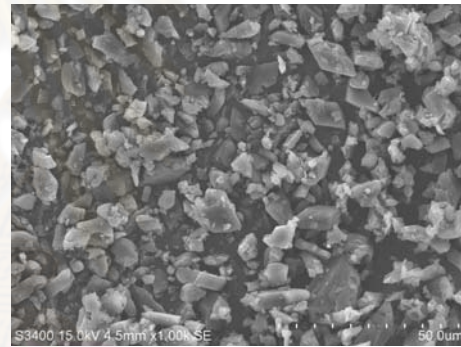


(ง)

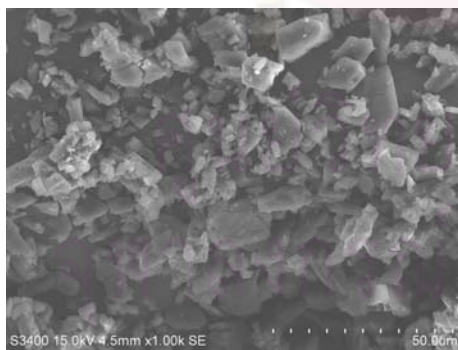
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีพแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งเมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



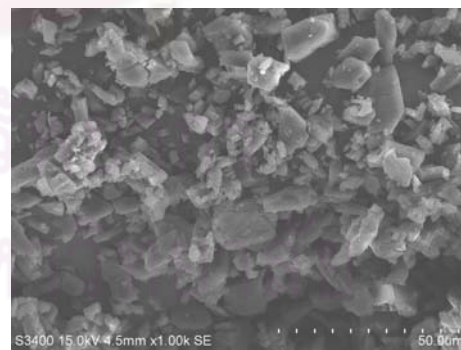
(ก)



(ข)

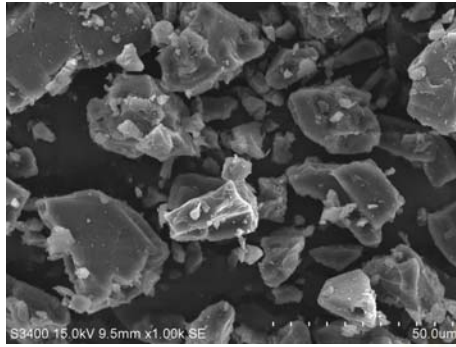


(ค)

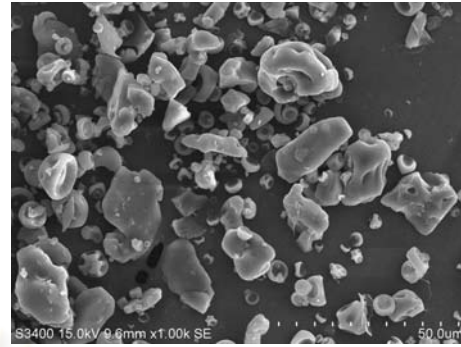


(ง)

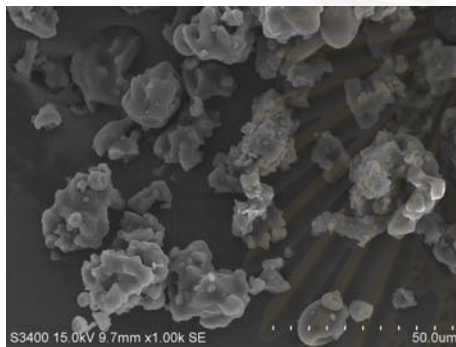
รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีพเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งเมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



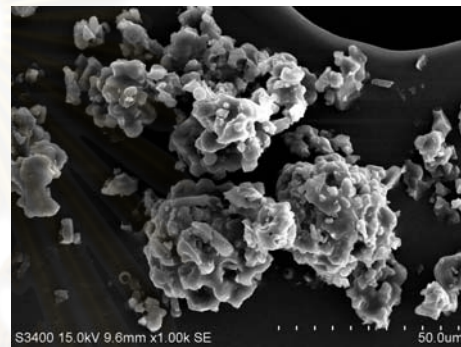
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปที่ 4.4** ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีพแกมมาไฮโดรเด็คซ์ตริน และผงแห้งเมื่อใช้แกมมาไฮโดรเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไฮโดรเด็คซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.3.2 ปริมาณไฮโดรเด็คซ์ตรินที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิริลในผงแห้ง

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการกำจัดน้ำออกโดยใช้อากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งนอกจากน้ำจะถูกกำจัดออกไปในกระบวนการอบแห้งแล้วนั้น ยังมีการสูญเสียซิริลไประหว่างกระบวนการอบแห้งอีกด้วย ซึ่งปริมาณการสูญเสียซิริลนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บของกระบวนการ โดยแสดงในรูปของค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิริล ซึ่งค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิริลขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเด็คซ์ตรินในสายป้อนและค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (K)

จากการศึกษาปริมาณไฮโดรเด็คซ์ตรินในสายป้อนต่อค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิริลในผงแห้ง โดยทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างซิริลต่อไฮโดรเด็คซ์ตริน เท่ากับ 1:1



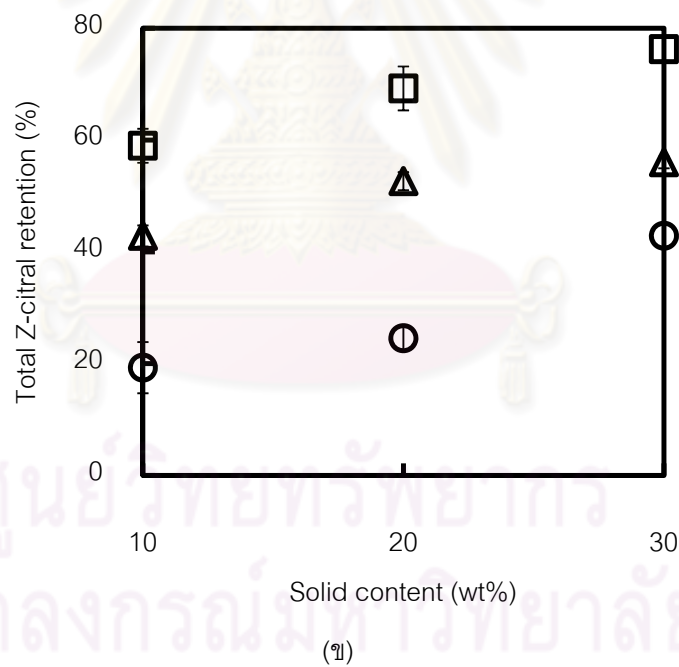
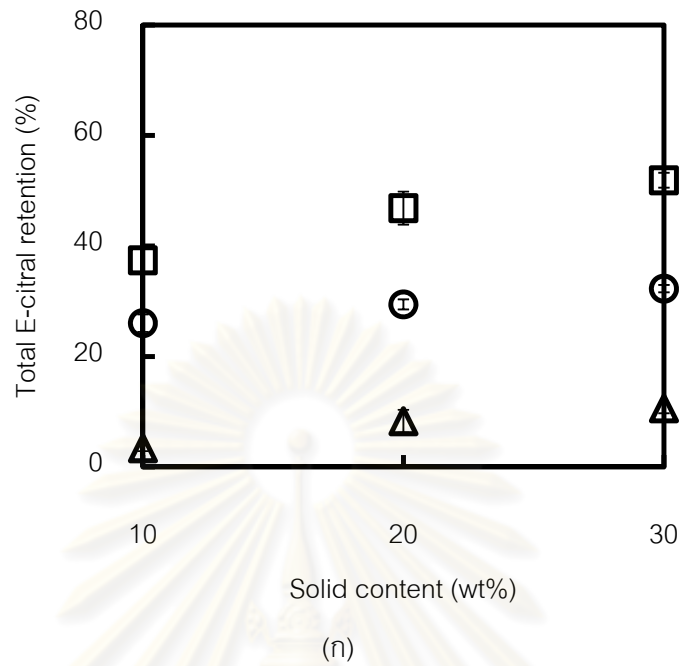
พบว่าเมื่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อนเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการคงอยู่ของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงในรูปที่ 4.5 โดยค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) ในผงแห้งนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นในสัดส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เนื่องจากกระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินอาศัยกลไกการจับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินไว้ภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการกักเก็บสารด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินไม่ได้ขึ้นอยู่กับการพอร์มเป็นเปลือก ดังนั้นเมื่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อนเพิ่มมากขึ้น จึงไม่ทำให้ระยะเวลาในการพอร์มตัวของเปลือกเร็วขึ้น โดยค่าร้อยละการคงอยู่ของซิตรัลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมต่อกันต่อกันระหว่างอนุภาค ดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคจะช่วยลดการสูญเสียซิตรัลไประหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) ในไซโคลเด็กซ์ตรินแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ค่าคงที่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิตรัล (E-citral และ Z-citral) กับไซโคลเด็กซ์ตริน พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) ในโพรงของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่ามากกว่า เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ที่พบ  $K_{\gamma CD} > K_{\beta CD} > K_{\alpha CD}$  แสดงให้เห็นว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับซิตรัล (E-citral และ Z-citral) ในขั้นตอนของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่อัตราส่วนโดยโมลของซิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ได้ดีกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน

2. ความสามารถในการละลายของไซโคลเด็กซ์ตริน จากรูปที่ 4.5 (ข) พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของ Z-citral ในแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีมากกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ดังนั้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจึงเกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาค ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียซิตรัลไประหว่างกระบวนการอบแห้ง

3. ขนาดโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินและลักษณะโครงสร้างของซิตรัล พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของ Z-citral ในไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่ามากกว่า E-citral เนื่องจากผลของลักษณะโครงสร้างของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) มีผลต่อการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดย E-citral มีลักษณะโครงสร้างที่มีแขนที่เกะกะกว่า Z-citral จึงทำให้ความสามารถของ E-citral เข้าไปอยู่ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินได้ยากกว่า Z-citral



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล ((ก) E-citral, (ข) Z-citral) ต่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อนที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

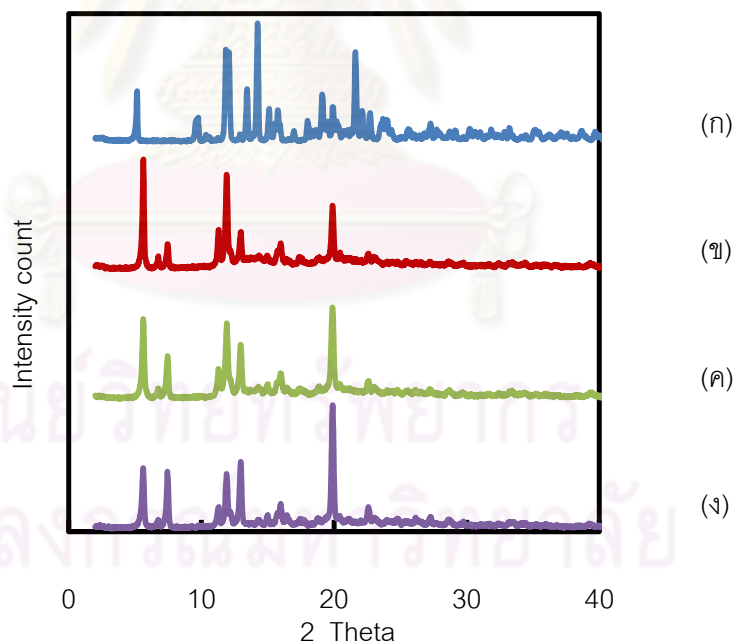
#### 4.3.3 ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินและชิตรัล สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพันธ์ของพีค โดยการยืนยันการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินและชิตรัลนั้น สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพีคของเนทีฟไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศกับพีคของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้จากไซโคลเด็กซ์ตริน พบว่าการปรากฏของพีคใหม่และการหายไปของพีคเดิมนั้น เป็นสิ่งที่ใช้ในการยืนยันการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น นอกจากนี้แล้ว ความเข้มของพีคยังบ่งบอกถึงปริมาณของวัฏภาคที่เป็นผลึกภายในสารตัวอย่างอีกด้วย

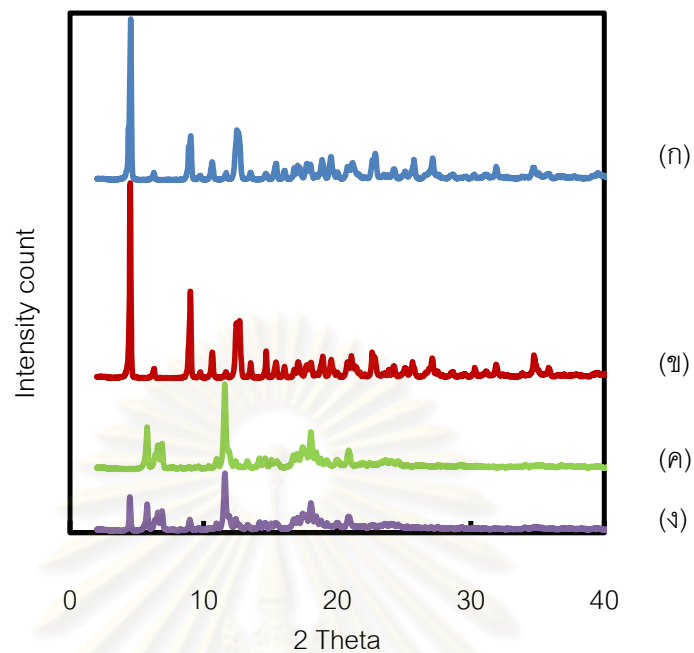
จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟ XRD ของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\alpha$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.6 ก) และผงแห้งที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ 10 (รูปที่ 4.6 ข), 20 (รูปที่ 4.6 ค) และ 30 (รูปที่ 4.6 ง) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 5.1, 9.7, 11.8, 13.4, 14.2 และ 21.6 ซึ่งเป็นพีคของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ปรากฏพีคใหม่ที่มุม 6.7 และ 7.4 นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงความเข้มของพีคที่ได้ระหว่างเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินกับผงแห้งน้ำมันตะไคร้ พบว่าความเข้มของพีคเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าสูงกว่าความเข้มของพีคผงแห้งน้ำมันตะไคร้ แสดงให้เห็นว่าเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีความเป็นผลึกมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีความเป็นผลึก ในขณะที่ผงแห้งนั้นมีทั้งอนุภาคที่เป็นทรงกลมและผลึกบางส่วน

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟ XRD ของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\beta$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.7 ก) และผงแห้งที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ 10 (รูปที่ 4.7 ข), 20 (รูปที่ 4.7 ค) และ 30 (รูปที่ 4.7 ง) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 4.56, 8.98 และ 12.35 ซึ่งเป็นพีคของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินในขณะที่ผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.7 และ 11.5

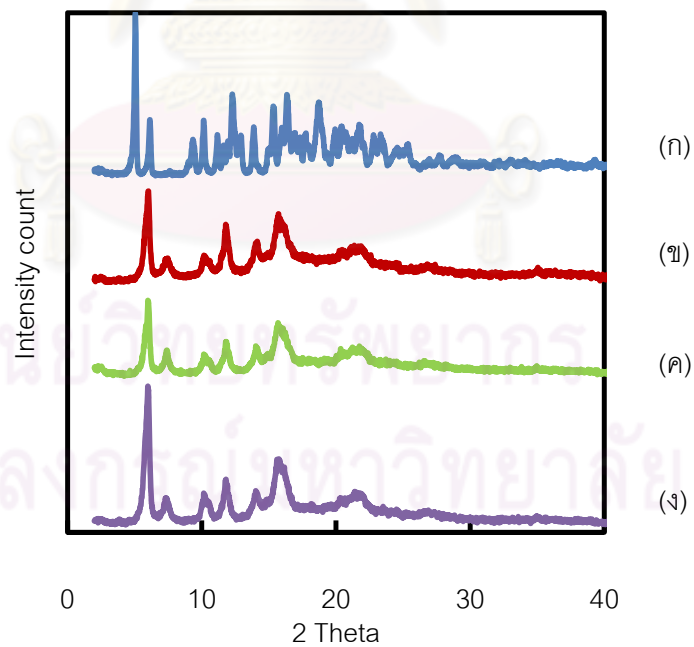
จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟ XRD ของเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\gamma$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.6 ก) และผงแห้งที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ 10 (รูปที่ 4.6 ข), 20 (รูปที่ 4.6 ค) และ 30 (รูปที่ 4.6 ง) เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 5.05, 6.14, 9.34, 10.15, 12.39, 14.97, 15.35, 16.37 และ 18.71 ซึ่งเป็นพีคของเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.0, 18.7 และ 19.3 นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงความเข้มของพีคที่ได้ระหว่างเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินกับผงแห้งน้ำมันตะไคร้ พบว่าความเข้มของพีคเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าสูงกว่าความเข้มของพีคผงแห้งน้ำมันตะไคร้ แสดงให้เห็นว่าเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีความเป็นผลึกมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีความเป็นผลึก ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มพบลักษณะโครงสร้างที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค



รูปที่ 4.6 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 4.7** กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเดกซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเดกซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 4.8** กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเดกซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเดกซ์ตรินในสายป้อน เท่ากับ (ข) 10, (ค) 20 และ (ง) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.4 การศึกษาปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อน

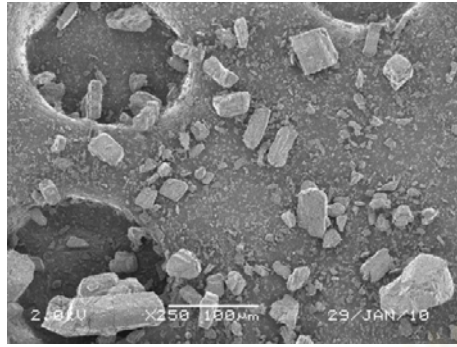
##### 4.4.1 ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

การศึกษาปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อนต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้งน้ำมันตะไคร้สามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าโครงสร้างของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก), 4.10 (ก) และ 4.11 (ก) ตามลำดับ ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ซึ่งผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้หัวฉีดแบบจานหมุน มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกขรุขระ แสดงในรูปที่ 4.9 (ข-ง) และ 4.11 (ข-ง) ซึ่งการพอร์มเป็นอนุภาคทรงกลมของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากความสามารถในการละลายของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินบางส่วนในสเลอรี เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคจากไซโคลเด็กซ์ตรินที่ละลายน้ำ อาจกล่าวได้ว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ละลายน้ำทำหน้าที่เป็นไบเดอร์ (Binder) เชื่อมต่อระหว่างอนุภาค ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก ไม่สามารถพอร์มเป็นอนุภาคทรงกลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข-ง) เนื่องจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

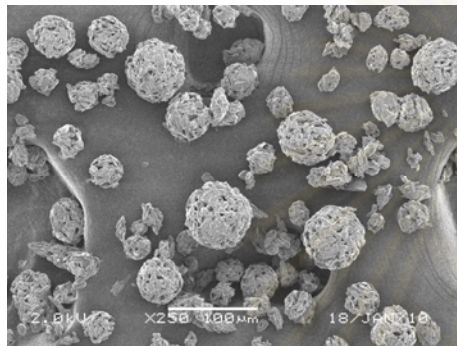
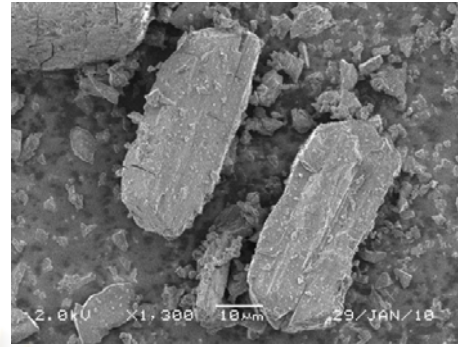
นอกจากนี้ได้มีการพิจารณาถึงลักษณะโครงสร้างภายในของอนุภาคทรงกลมที่เกิดขึ้นจากการใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่า อนุภาคทรงกลมเกิดขึ้นจากการพอร์มตัวของผลึกหลายๆ อันมาเชื่อมต่อกัน

โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแห้งที่เตรียมได้การใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 10-16 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มพบว่า มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า อยู่ในช่วง 8-9 ไมโครเมตร เนื่องจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ จึงทำให้ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยไม่สามารถพอร์มตัวเป็นอนุภาคได้

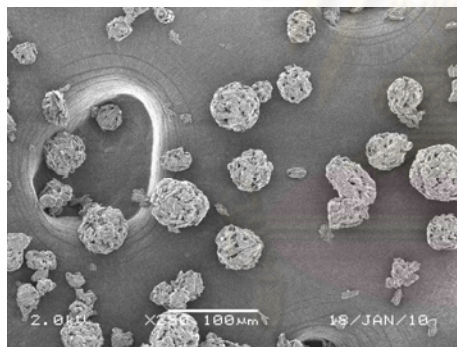
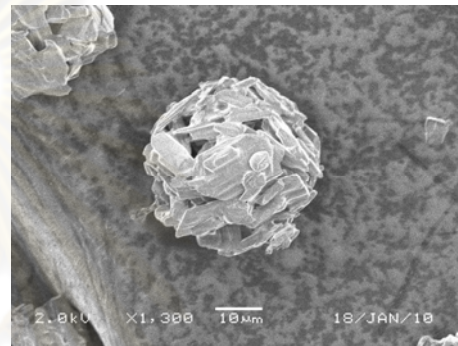




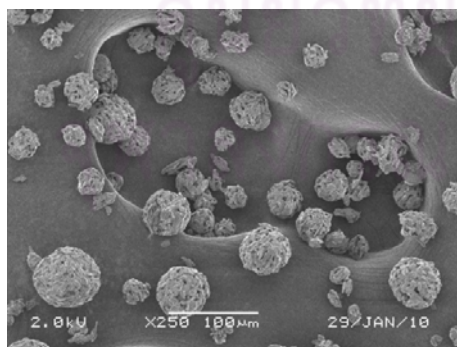
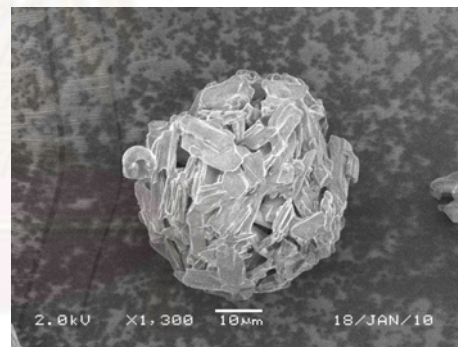
(ก)



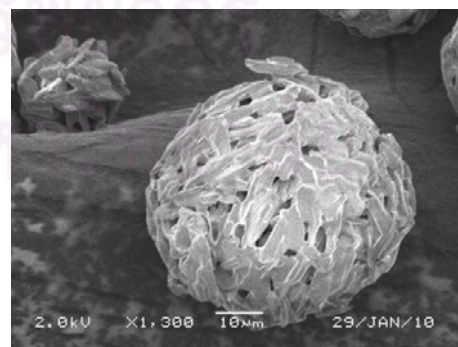
(ข)



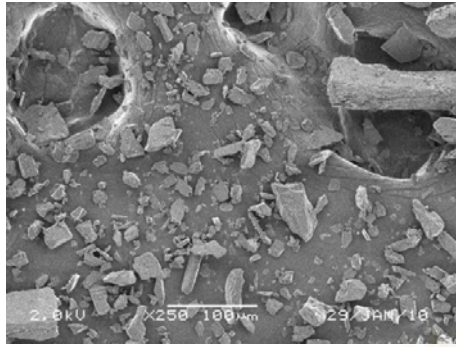
(ค)



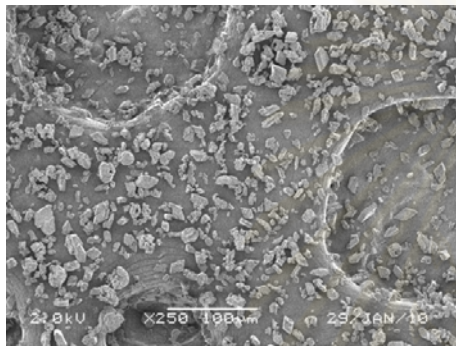
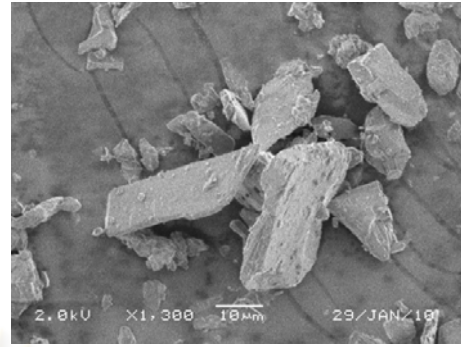
(ง)



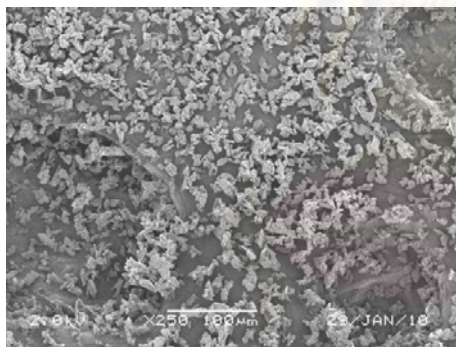
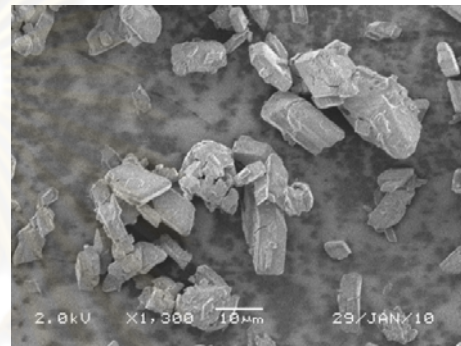
รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1



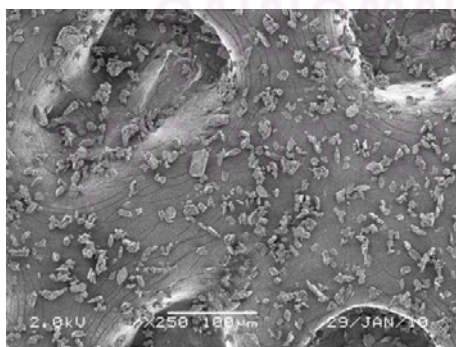
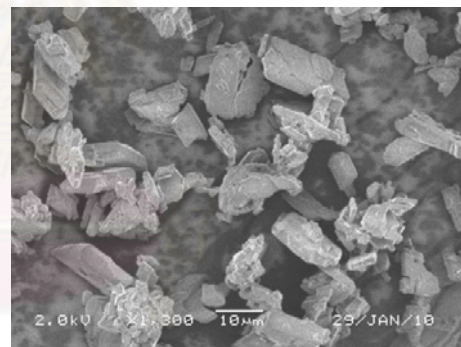
(ก)



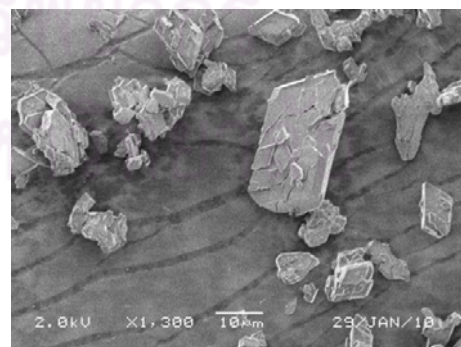
(ข)



(ค)

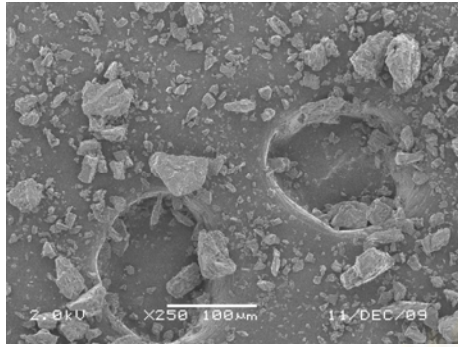


(ง)

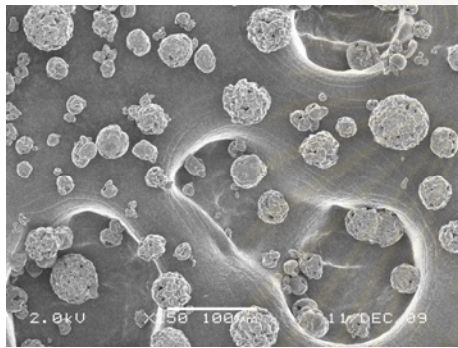
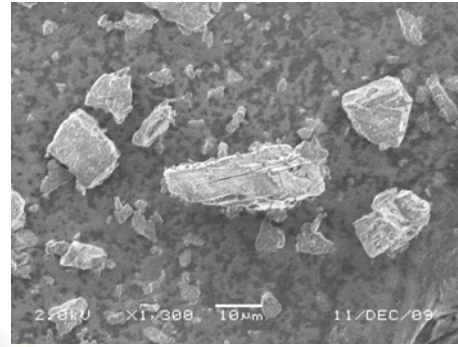


รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งที่อัตราส่วนโดยมวลของซีตรัลต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1

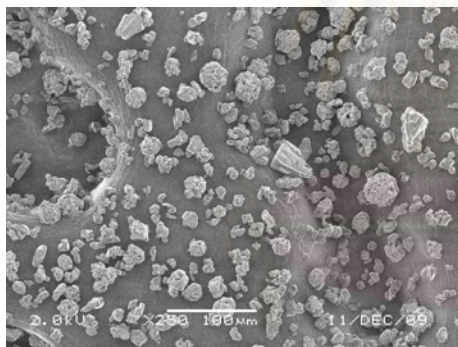
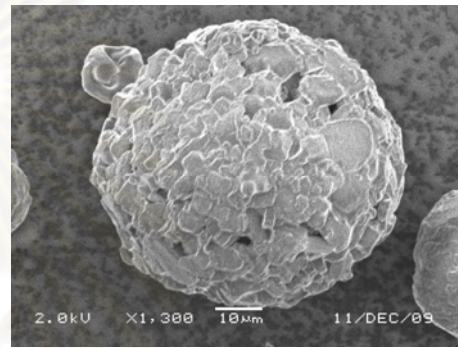




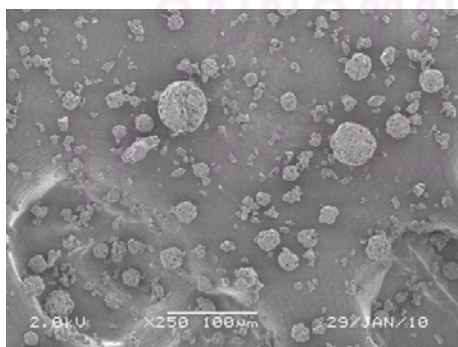
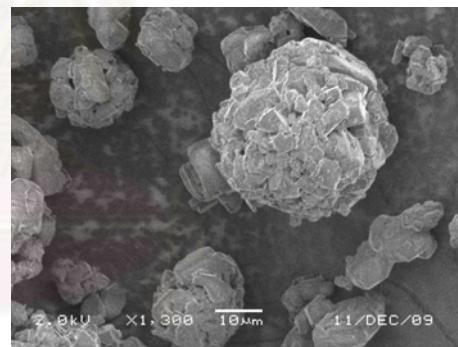
(ก)



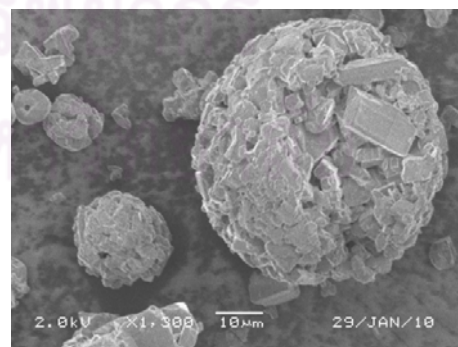
(ข)



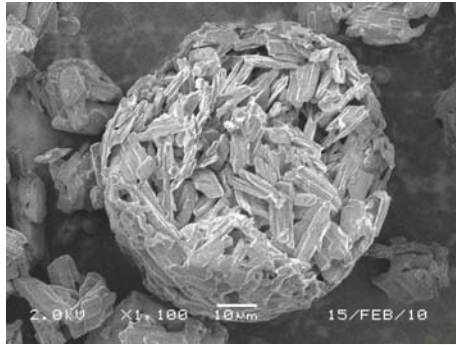
(ค)



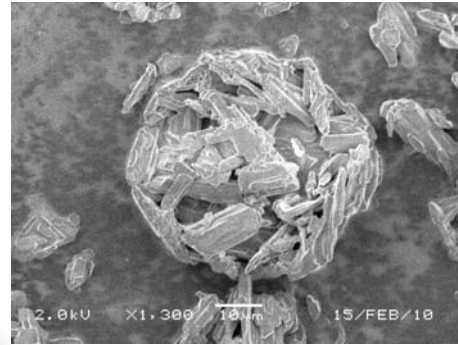
(ง)



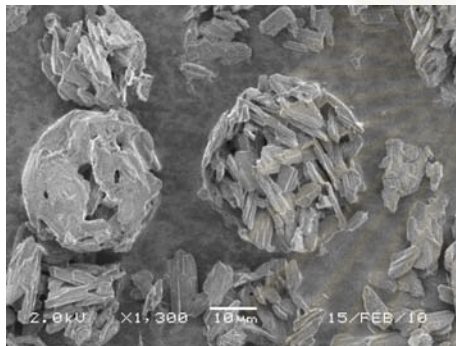
รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ทรินและผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1



(ก)

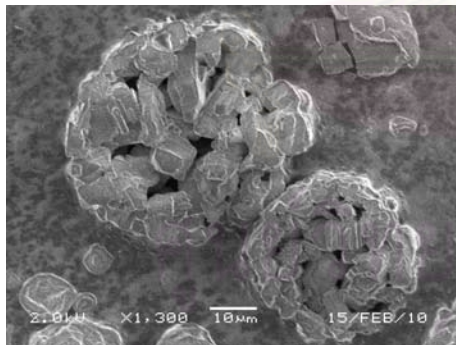


(ข)

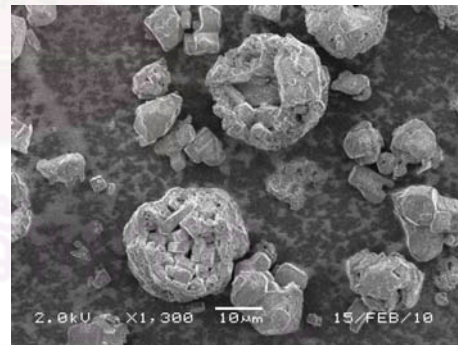


(ค)

รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็คซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1 (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1



(ง)



(จ)

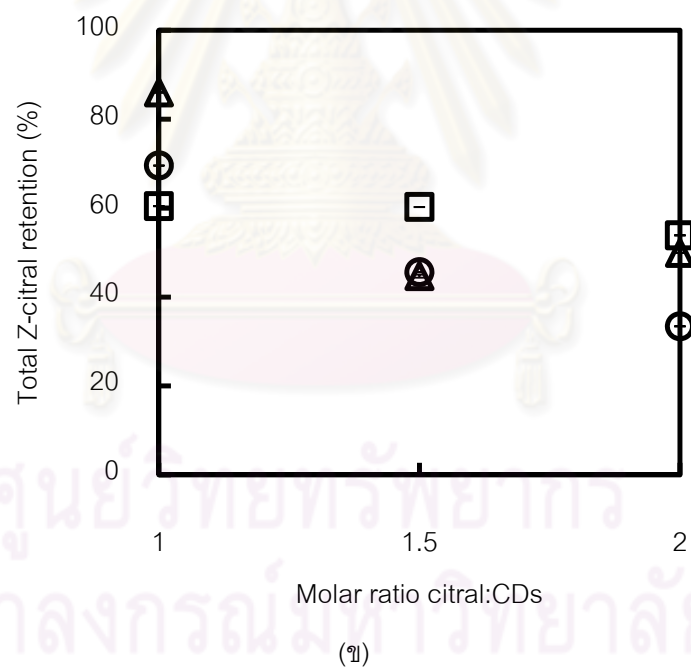
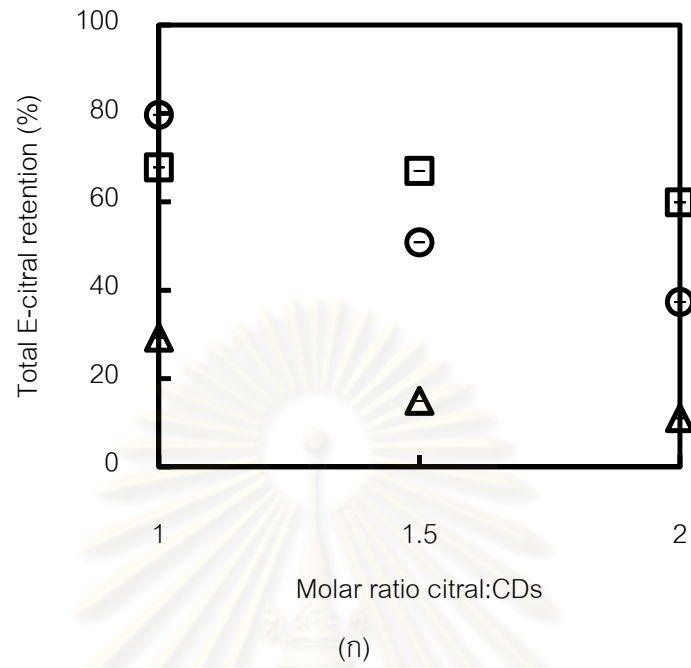




น้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนการเติม Thymol: $\beta$ -CD เท่ากับ 8:92 ให้ค่าการกักเก็บ Thymol สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าจุดนี้เป็นจุดอิ่มตัวของโพรงเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และถูกพิจารณาว่าเป็นจุด ณ สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาระหว่าง Thymol กับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน

จากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) พบว่าแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถกักเก็บ Z-citral และเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถกักเก็บ E-citral ได้ดีที่สุด นอกจากค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิทรัลที่แตกต่างกันของไซโคลเด็กซ์ตรินแต่ละชนิด จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการสูญเสียซิทรัลระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยอีกด้วย เป็นผลมาจากขนาดโพรงที่แตกต่างกันของไซโคลเด็กซ์ตรินและลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของซิทรัลแต่ละไอโซเมอร์ โดยขนาดโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีขนาดที่พอดีกับซิทรัล (E-citral และ Z-citral) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Reineccius และคณะ (2002) ซึ่งได้ศึกษาการกักเก็บกลิ่นที่มีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน ด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองพบว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถกักเก็บกลิ่นที่มีโครงสร้างของเอทิลและหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์ได้ดีกว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากขนาดของโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เอทิลและเอสเทอร์สามารถเข้าไปอยู่ในโพรงที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่าโพรงที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบว่า กลิ่นที่มีโครงสร้างของแอลดีไฮด์สามารถกักเก็บด้วยแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับกรกักเก็บด้วยเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินแล้ว การสูญเสียซิทรัลออกจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยยังสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2000) ศึกษาการกักเก็บ *l*-menthol ด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบง่ายในการศึกษาการกักเก็บ *l*-menthol ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าในสายป้อน ณ สภาวะสมดุล *l*-menthol สามารถอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนและในรูปของ *l*-menthol อิสระ เมื่อสารถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยผ่านหัวฉีดและทำให้เกิดละอองฝอยนั้น ละอองฝอยจะสัมผัสกับอากาศร้อน เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับละอองฝอย เกิดการสูญเสีย *l*-menthol อิสระไประหว่างกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ยังเกิดสูญเสีย *l*-menthol ณ สภาวะสมดุลอีกด้วย เป็นผลให้ *l*-menthol ที่ถูกกักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินถูกปลดปล่อยออกมา เนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนความเข้มข้นของ *l*-menthol อิสระ กับ *l*-menthol ที่กักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน





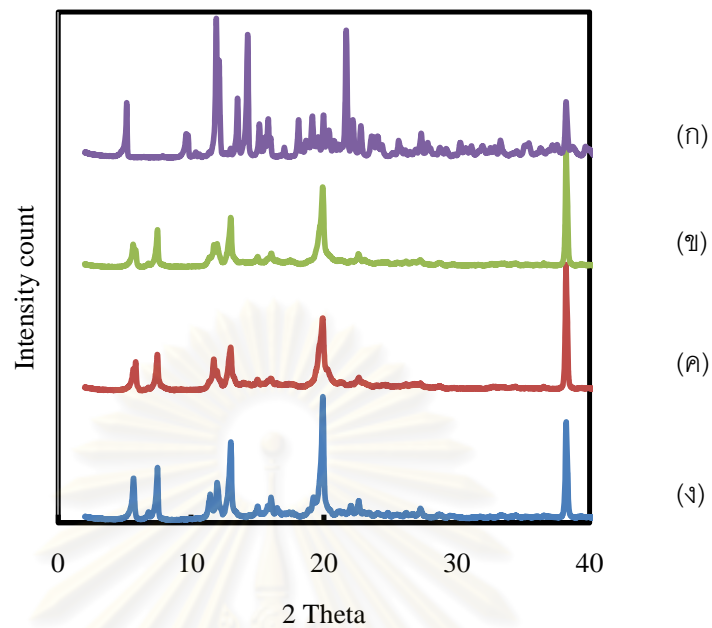
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล ((ก) E-citral, (ข) Z-citral) ต่อปริมาณซีตรัลในสายป้อน ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; △ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, ○ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ □ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

#### 4.4.3 ปริมาณน้ำมันตะไคร้ที่มีผลต่อลักษณะการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

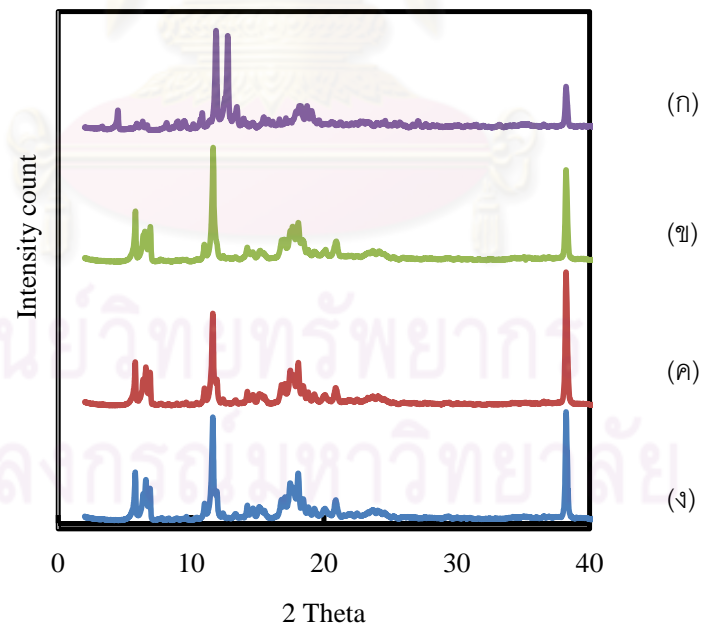
จากรูปที่ 4.15 แสดงกราฟ XRD ของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\alpha$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.15 ก) และผงแห้งที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 (รูปที่ 4.15 ข), 1.5:1 (รูปที่ 4.15 ค) และ 2:1 (รูปที่ 4.15 ง) พบว่าเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 5.1, 9.5, 11.8, 13.4, 14.2, และ 21.6 ซึ่งเป็นพีคของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.4, 7.3, 12.8 และ 19.8 นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงความเข้มของพีคที่ได้ระหว่างเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินกับผงแห้ง พบว่าความเข้มของพีคเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าสูงกว่าความเข้มของพีคผงแห้ง แสดงให้เห็นว่าเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินมีความเป็นผลึกมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.4.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของเนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีความเป็นผลึก ในขณะที่ผงแห้งนั้นมีทั้งอนุภาคที่เป็นทรงกลม

จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟ XRD ของเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\beta$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.16 ก) และผงแห้งที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 (รูปที่ 4.16 ข), 1.5:1 (รูปที่ 4.16 ค) และ 2:1 (รูปที่ 4.16 ง) พบว่าเนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 4.26, 11.78, 12.74 และ 38.16 ซึ่งเป็นพีคของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.74, 5.80 และ 11.6

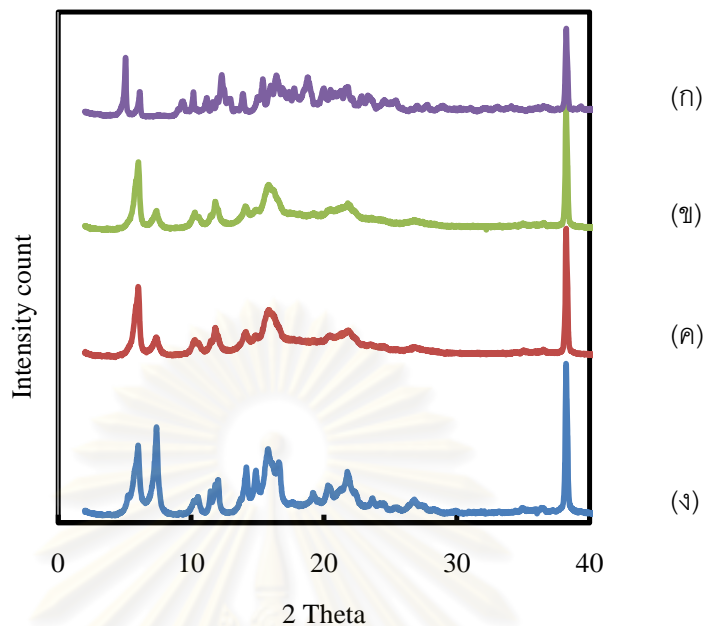
จากรูปที่ 4.17 ของเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการอบแห้งแบบสูญญากาศ ( $\gamma$ -CD dehydrate) (รูปที่ 4.17 ก) และผงแห้งที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 (รูปที่ 4.17 ข), 1.5:1 (รูปที่ 4.17 ค) และ 2:1 (รูปที่ 4.17 ง) พบว่าเนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินปรากฏพีคที่มุม 5.04, 5.14, 12.2, 12.92, 18.6 และ 38.14 ซึ่งเป็นพีคของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินที่ไม่มีผลึกของน้ำในโพรงของแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน ในขณะที่ผงแห้งที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มปรากฏพีคใหม่ที่มุม 5.82 และ 7.36



รูปที่ 4.15 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1



รูปที่ 4.16 กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ทริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1



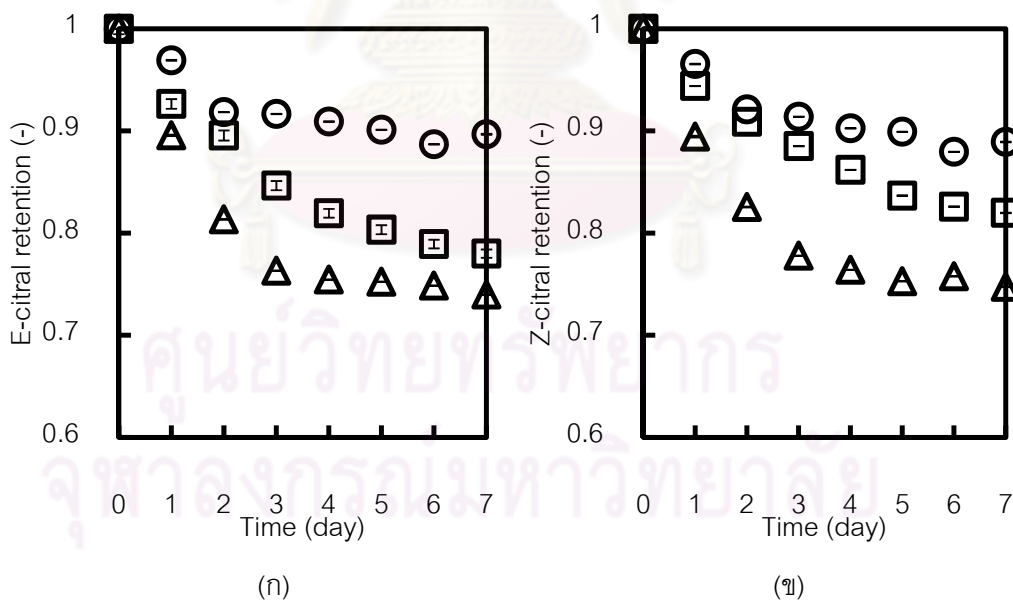
**รูปที่ 4.17** กราฟ XRD ของ (ก) เนทีฟแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน และผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ (ข) 1:1, (ค) 1.5:1 และ (ง) 2:1

#### 4.4.4 ผลต่อความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง

การศึกษาคงตัวของผงแห้งน้ำมันตะไคร้เป็นสิ่งที่ควรศึกษาหลังกระบวนการกักเก็บสาร โดยวิธีการศึกษาคงตัวของผงแห้งนั้น สามารถทำได้โดยการศึกษาการปลดปล่อยซิตรัลจากผงแห้ง ด้วยการนำผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ซึ่งที่อัตราส่วนนี้พบว่ามีความคงอยู่ของซิตรัลมากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของซิตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตรินอื่นๆ ทำการทดสอบการปลดปล่อยที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.18) พบว่าอัตราการปลดปล่อยของซิตรัล (E-citral และ Z-citral) จากผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม มีค่าน้อยกว่าผงแห้งที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม เนื่องจากขนาดโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีขนาดที่พอดีกับขนาดของซิตรัล จึงทำให้การยึดจับของซิตรัลในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินดีกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน

โดยการปลดปล่อยของซีตรัล (E-citral และ Z-citral) ออกจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้นั้นมีค่ามากในช่วงแรก ซึ่งการปลดปล่อยของซีตรัลในช่วงนี้เกิดจาก 2 ปัจจัย คือ การสูญเสียซีตรัลที่ไม่ได้ถูกกักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินและการสูญเสียซีตรัลจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากการยึดจับของซีตรัลในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน อาจเกิดจากการกักเก็บไว้ได้เพียงบางส่วน และการปลดปล่อยของซีตรัลค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ ซึ่งการปลดปล่อยของซีตรัล (E-citral และ Z-citral) มีค่าคงที่ เนื่องจากเกิดสภาวะสมดุลของความเข้มข้นของซีตรัลที่อยู่ภายนอกกับความเข้มข้นของซีตรัลที่อยู่ภายในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน จึงทำให้การปลดปล่อยของซีตรัล (E-citral และ Z-citral) มีค่าคงที่

ในการหากลไกการปลดปล่อยและอัตราการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้สามารถอธิบายด้วยการพิทกราฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของ Higuchi, แบบจำลองของ Pappas และแบบจำลองของ Avrami มาใช้ในการพิทกราฟเพื่อหากลไกการปลดปล่อยและอัตราการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้ ซึ่งสามารถพิจารณาความแม่นยำได้จากค่า  $R^2_{adj}$  ของแต่ละแบบจำลอง



**รูปที่ 4.18** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ E-citral (น), Z-citral (ข) ที่คงเหลือและเวลาในการปลดปล่อย ของผงแห้งที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

- I. แบบจำลองของ Higuchi เป็นแบบจำลองที่อธิบายการปลดปล่อยสารจากอนุภาคที่มีความซับซ้อน โดยอนุภาคที่ศึกษาต้องไม่บวมและไม่สามารถเกิดการกักกร่อนได้ และกลไกที่ใช้ในการปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่านเพียงอย่างเดียว

Higuchi's equation; 
$$M_t = \sqrt{Dc_m(2c_t - c_s)t}$$

$$M_t = k\sqrt{t}$$

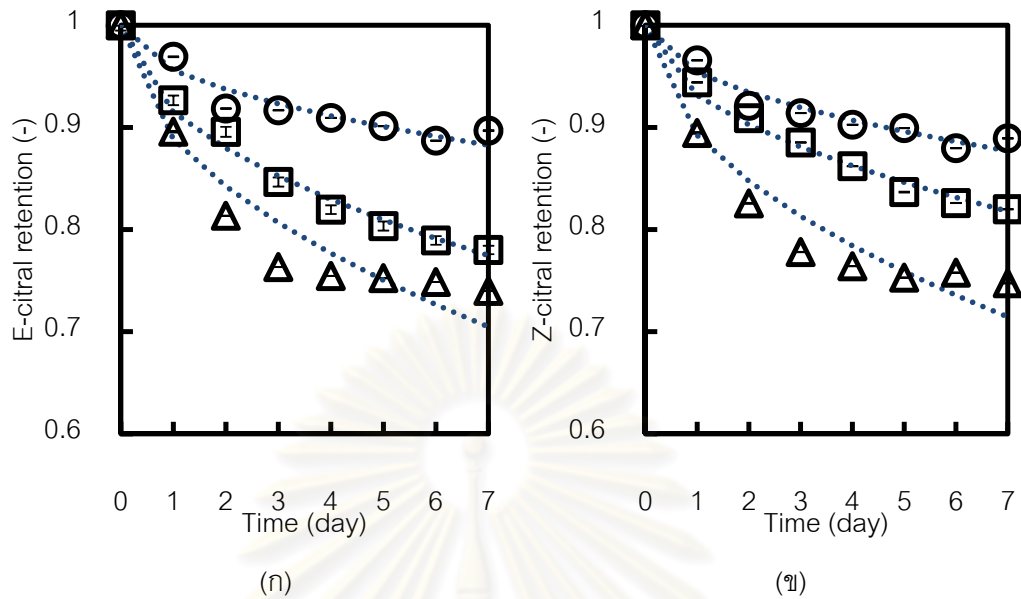
เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา t
	D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน
	$c_m$	คือ	การละลายของยาในเมทริกซ์
	$c_t$	คือ	ความเข้มข้นของยาเริ่มต้น
	$c_s$	คือ	การละลายของยาใน bulk เฟส
	t	คือ	เวลาในการปลดปล่อย
	k	คือ	ค่าคงที่

จากรูปที่ 4.18 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Higuchi ได้โดยวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $M_t$  และแกน x คือ  $\sqrt{t}$  โดยค่าคงที่ (k) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.3 และสามารถนำค่าตัวแปรในสมการมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Higuchi ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อใช้ไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม	k ( $10^{-2}$ /day)		$R^2_{adj}$	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD	11.16	10.79	0.918	0.934
$\beta$ -CD	4.44	4.65	0.925	0.944
$\gamma$ -CD	8.52	6.88	0.986	0.986





รูปที่ 4.19 กราฟการปลดปล่อย E-citral (น) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Higuchi เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน

- II. แบบจำลองของ Peppas เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการปลดปล่อยกับอนุภาคที่สามารถบวมได้

Peppas' equation; 
$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n$$

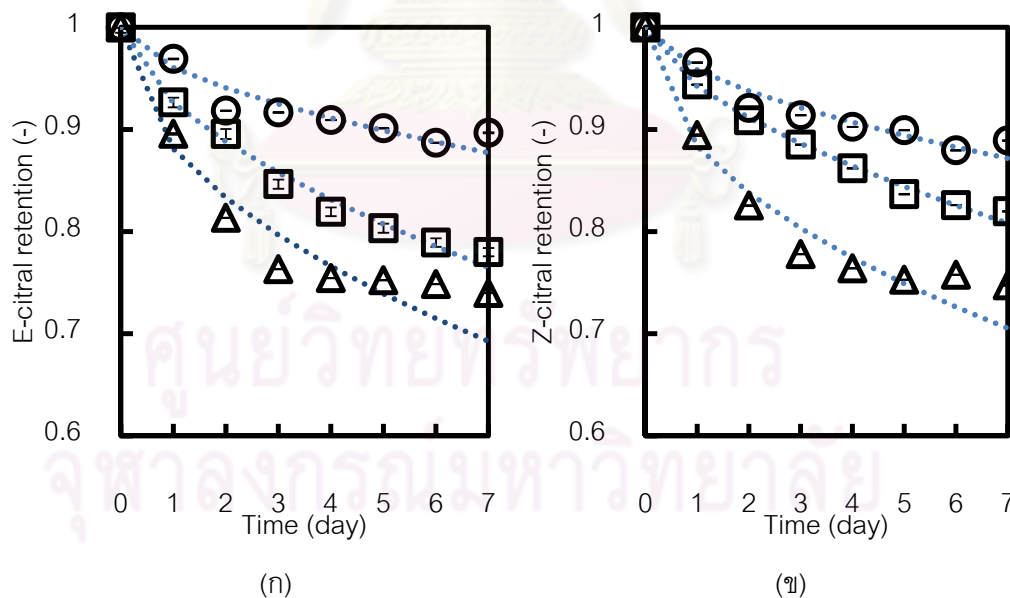
$$\ln \frac{M_t}{M_\infty} = n \ln k + n \ln t$$

เมื่อ	$M_t$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลา t
	$M_\infty$	คือ	ปริมาณยาที่ถูกปลดปล่อย ณ เวลานั้น
	k	คือ	ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย
	n	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย
	t	คือ	เวลาในการปลดปล่อย

จากรูปที่ 4.18 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Peppas ได้โดยวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $\ln \frac{M_t}{M_\infty}$  และแกน x คือ  $\ln t$  โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ และอัตราการปลดปล่อยค่าคงที่ (k) สามารถหาได้จากจุดตัดแกน ดังตารางที่ 4.4 และสามารถนำค่าตัวแปรมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Peppas ดังแสดงในรูปที่ 4.20

**ตารางที่ 4.3** ค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) และค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) จากสมการ Peppas เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม	n (-)		k ( $10^{-3}/\text{day}$ )		$R^2 \text{adj}$	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD	0.49	0.48	12.7	11.0	0.855	0.899
$\beta$ -CD	0.58	0.58	3.86	4.05	0.791	0.859
$\gamma$ -CD	0.59	0.62	12.40	9.77	0.985	0.985



**รูปที่ 4.20** กราฟการปลดปล่อย E-citral (น) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Peppas เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

- III. แบบจำลองของ Avrami เป็นแบบจำลองที่ใช้ศึกษาทั้งการละลายและการปลดปล่อยของสาร ซึ่งสามารถอธิบายการปลดปล่อยของสารที่สามารถปลดปล่อยได้ 100%

$$\text{Avrami's equation; } R = \exp[-(kt)^n]$$

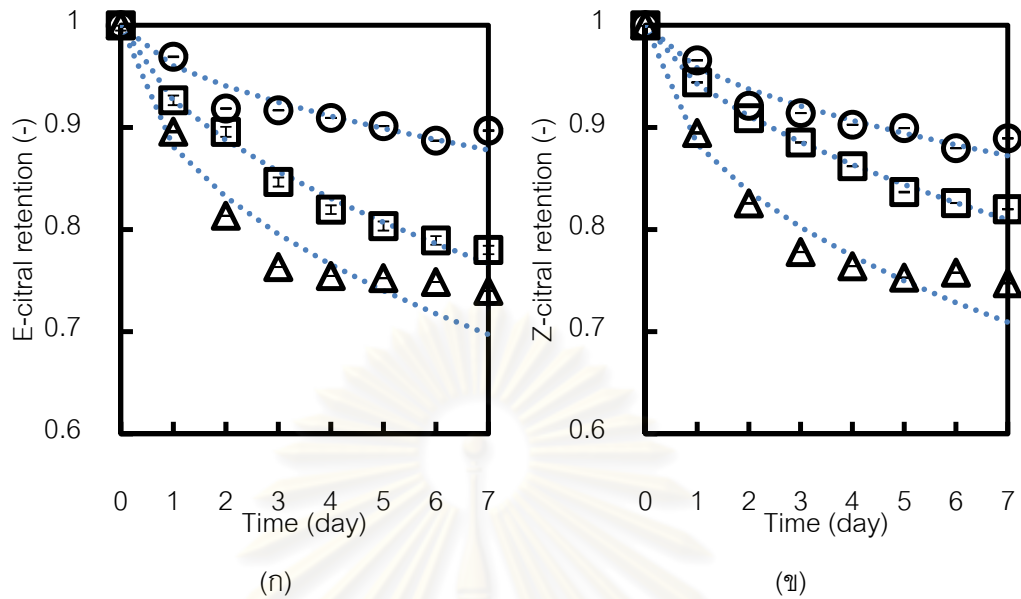
$$\ln(-\ln R) = n \ln k + n \ln t$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าการคงอยู่ของกลี็น
	t	คือ	เวลาในการปลดปล่อย
	k	คือ	ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย
	n	คือ	ค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย

จากรูปที่ 4.18 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Avrami ได้โดยวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $\ln(-\ln R)$  และแกน x คือ  $\ln t$  โดยค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) สามารถหาได้จากจุดตัดแกน และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.2 และสามารถนำค่าตัวแปรในสมการมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Avrami ดังแสดงในรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการของ Avrami ที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ

สารห่อหุ้ม	n (-)		k ( $10^{-3}/\text{day}$ )		R <sup>2</sup> adj	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD	0.54	0.52	21.40	18.62	0.881	0.918
$\beta$ -CD	0.60	0.60	4.79	5.10	0.824	0.882
$\gamma$ -CD	0.64	0.65	17.89	13.21	0.824	0.882



รูปที่ 4.21 กราฟการปลดปล่อย E-citral (ก) และ Z-citral (ข) ตามแบบจำลองของ Avrami เมื่อใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน

จากการใช้แบบจำลองทั้ง 3 มาใช้พีตกกราฟเพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยและกลไกการปลดปล่อยซีตรัลจากผงแห้ง พบว่าให้ค่าอัตราการปลดปล่อยซีตรัลที่คล้ายคลึงกัน คือ การปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าน้อยกว่า แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยของซีตรัลนั้นถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่านของสาร เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยการพิจารณาค่า  $R^2_{adj}$  พบว่าแบบจำลองของ Higuchi เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายกลไกการปลดปล่อยซีตรัลจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดีกว่าแบบจำลองของ Avrami และ Peppas เนื่องจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม เป็นอนุภาคที่มีความซับซ้อน และลักษณะโครงสร้างของอนุภาคหลังการปลดปล่อยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่า  $k_{\beta-CD} < k_{\gamma-CD} < k_{\alpha-CD}$  แสดงค่าอัตราการปลดปล่อยของซีตรัลจากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าน้อยกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน และแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เนื่องจากโมเลกุลของซีตรัลมีขนาดที่พอดีกับโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมากกว่า จึงทำให้การยึดจับของซีตรัลในโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินดีกว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reineccius และคณะ (2003) ศึกษาการปลดปล่อยซีตรัลของผงแห้ง ที่ใช้แอลฟา

ไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์เป็นสารห่อหุ้ม โดยทำการปลดปล่อยชิตรัลในสภาวะของสารละลายที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการปลดปล่อยของชิตรัลจากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าน้อยกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน และแอลไซโคลเด็กซ์ตริน นอกจากนี้ พบว่าการปลดปล่อยของชิตรัลมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการปลดปล่อยของชิตรัลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงๆ แรงที่ใช้ในการยัดจับชิตรัลไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าลดลง

ตามสมมติฐานของแบบจำลองของ Higuchi สามารถสรุปว่ากลไกการปลดปล่อยชิตรัลจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน ถูกกำหนดด้วยการกลไกการแพร่ผ่านของสาร (Molecular diffusion) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการปลดปล่อยได้ดังนี้ เมื่อผงแห้งสัมผัสกับความชื้น ความชื้นที่เกาะบริเวณผิวด้านนอกของอนุภาคเกิดการดูดซับเข้าไปภายในอนุภาค ความชื้นทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (-OH) ของไซโคลเด็กซ์ตริน เกิดการเสียสมดุลขึ้น ทำให้ชิตรัลเกิดการถูกแทนที่ด้วยความชื้น (น้ำในสภาวะก๊าซ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างชิตรัลกับไซโคลเด็กซ์ตริน (ดังสมการ 2.1) สอดคล้องกับการทดลองของ Toro-Sanchez และคณะ (2009) ศึกษาการปลดปล่อยของ Thymol จากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน โดยศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการปลดปล่อย Thymol พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการปลดปล่อยมีค่าสูงขึ้น การปลดปล่อยของ Thymol มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณความชื้นที่บริเวณด้านนอกของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการปลดปล่อยของ Thymol มีค่ามากขึ้นด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของผงแห้งต่อการปลดปล่อย พบว่าการปลดปล่อยของชิตรัลไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของผงแห้ง แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของไซโคลเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการห่อหุ้ม โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแห้งที่เตรียมได้การใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 10-16 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผงแห้งที่ใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มพบว่ามีความขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า อยู่ในช่วง 8-9 ไมโครเมตร

#### 4.5 การศึกษาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อน

##### 4.5.1 ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

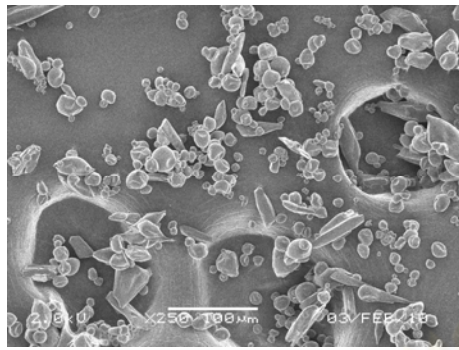
การศึกษาถึงปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อนต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะโครงสร้างภายนอก

ของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) และ (ค) ตามลำดับ มีลักษณะโครงสร้างของอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกมีความเรียบมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคจากแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินที่สามารถละลายน้ำได้แลวมอลโตเด็กซ์ตรินยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานใช้อนุภาคยึดติดกันมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshii และคณะ (2005) ศึกษาการกักเก็บกลิ่น Shiitake ด้วยการใช้อัลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่าเมื่อปริมาณการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น ผงแห้งที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่มีความเรียบมากขึ้น นอกจากนี้มอลโตเด็กซ์ตรินจะทำหน้าที่เป็นไบเดอร์ (Binder) และยังทำหน้าที่ฟอร์มตัวเป็นชั้นฟิล์มอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของมอลโตเด็กซ์ตรินต่อแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 80:20 ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างทั้งอนุภาคทรงกลมและผลึก เนื่องจากเกิดการกักเก็บที่แยกส่วนกันระหว่างแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตริน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก)

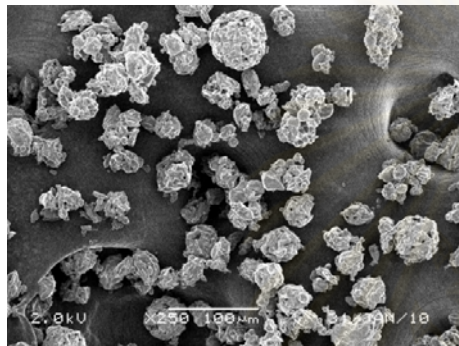
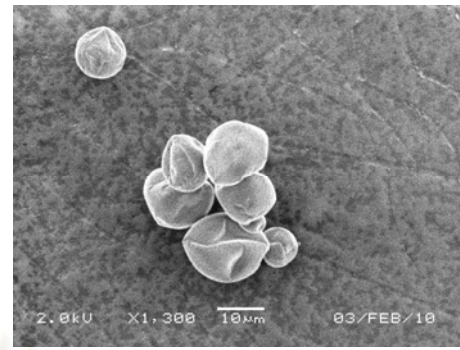
จากรูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่เตรียมจากมอลโตเด็กซ์ตรินต่อเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ที่อัตราส่วนการเติมเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 60 (รูปที่ 4.23 ข) และ 80 (รูปที่ 4.23 ค) พบว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากการใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม มีลักษณะโครงสร้างเป็นอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกขรุขระ เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินทำหน้าที่เป็นไบเดอร์ (Binder) ในการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเข้าด้วยกัน เกิดการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคทรงกลมในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกที่ไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นอนุภาคทรงกลมได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าอนุภาคทรงกลมเกิดขึ้นการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคทรงกลมจากผลึกหลายๆ อันมาเชื่อมต่อกัน

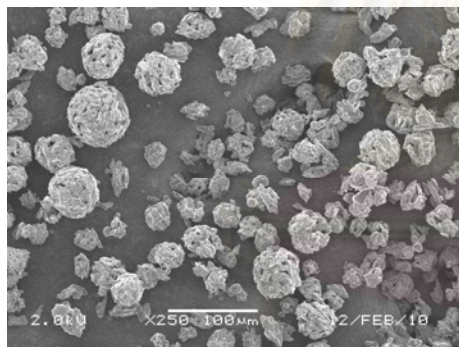
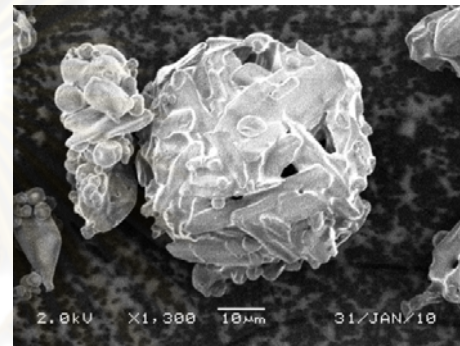




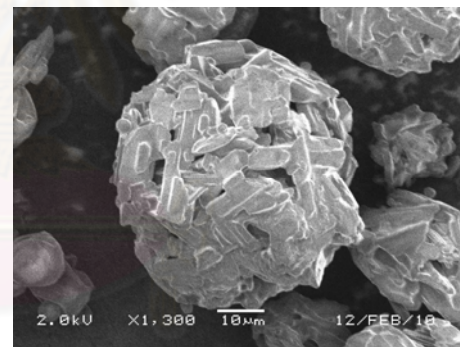
(ก)



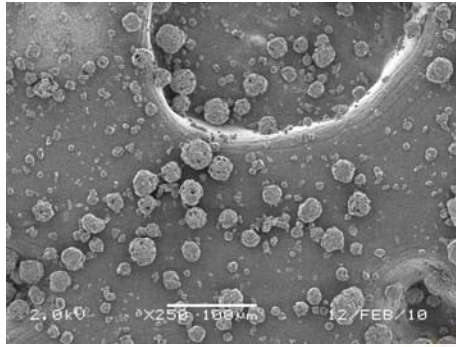
(ข)



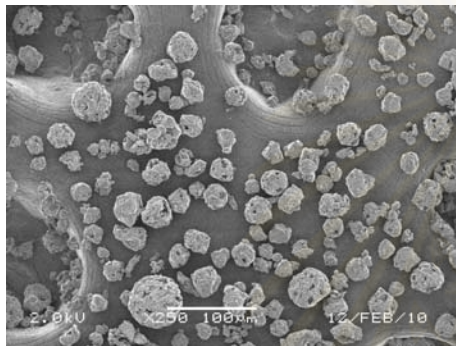
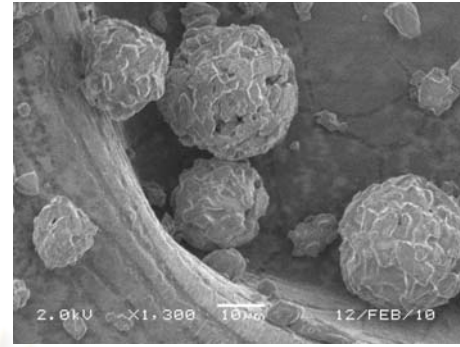
(ค)



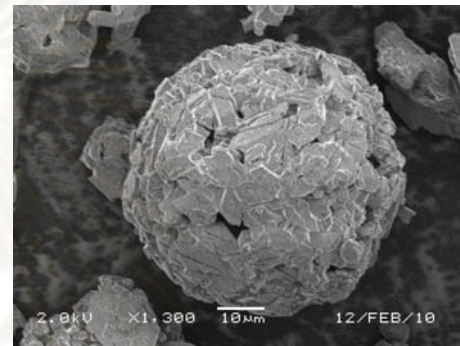
รูปที่ 4.22 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ (ก) 20, (ข) 60 และ (ค) 80 เปอร์เซ็นต์



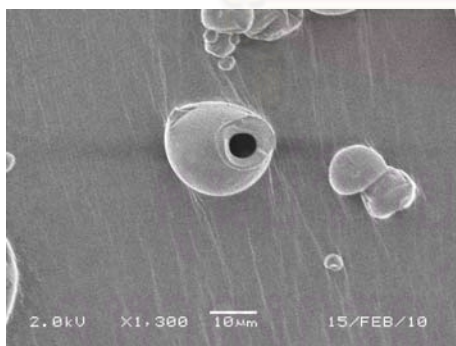
(ก)



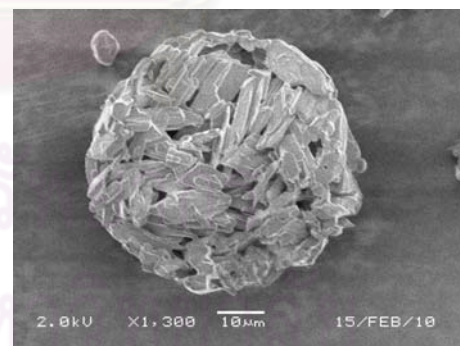
(ข)



รูปที่ 4.23 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็คซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของเบต้าไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ (ก) 60 และ (ข) 80 เปอร์เซ็นต์



(ก)

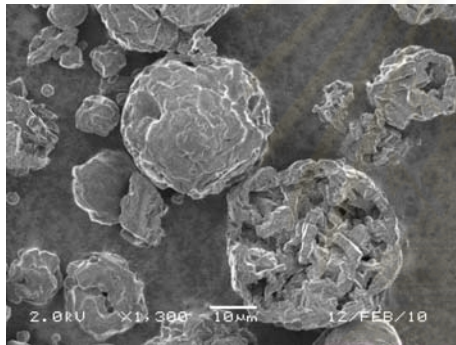


(ข)

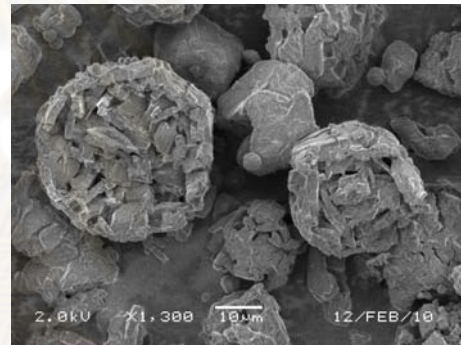


(ค)

รูปที่ 4.24 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ (ก) 20, (ข) 60 และ (ค) 80 เปอร์เซ็นต์



(ก)



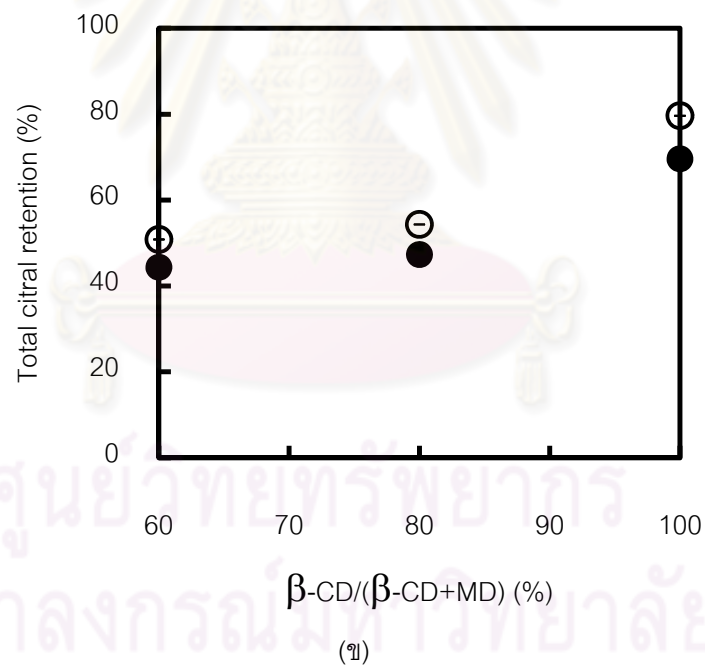
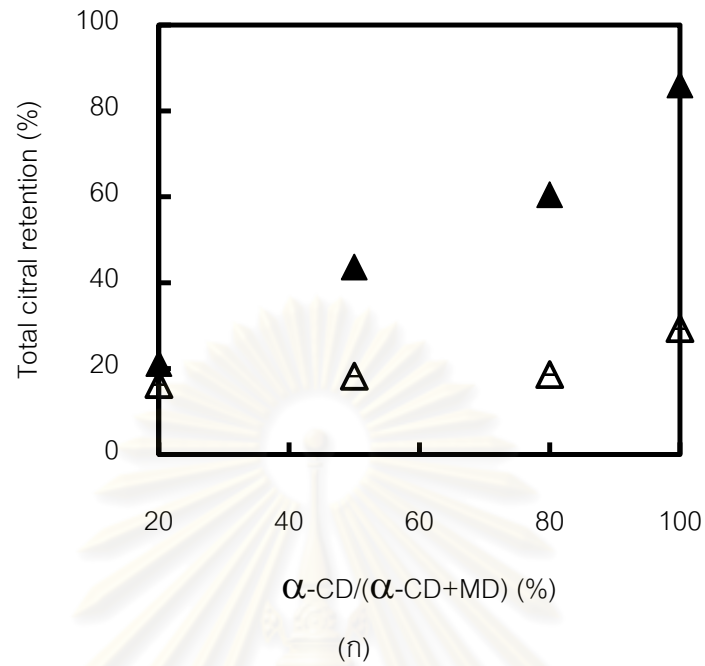
(ข)

รูปที่ 4.25 ลักษณะโครงสร้างภายในของผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็คซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม (20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณของเบต้าไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ (ก) 60 และ (ข) 80 เปอร์เซ็นต์

#### 4.5.2 ปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของชิตรัลในผงแห้ง

การศึกษาปริมาณการเติมน้ำมันตะไคร้ในสายป้อนทำให้ทราบว่าไซโคลเด็คซ์ตรินแต่ละชนิดสามารถกักเก็บชิตรัลได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลของชิตรัลต่อไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ซึ่งค่าร้อยละของการคงอยู่ของชิตรัลในผงแห้งนั้นมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 80% เพื่อเป็นการเพิ่มค่าร้อยละของการคงอยู่ของชิตรัลในผงแห้งให้มีค่าเพิ่มขึ้น จึงได้มีการศึกษาถึงการใส่ไซโคลเด็คซ์ตรินร่วมกับมอลโตเด็คซ์ตรินเพื่อเป็นสารห่อหุ้มต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของชิตรัลในผงแห้ง





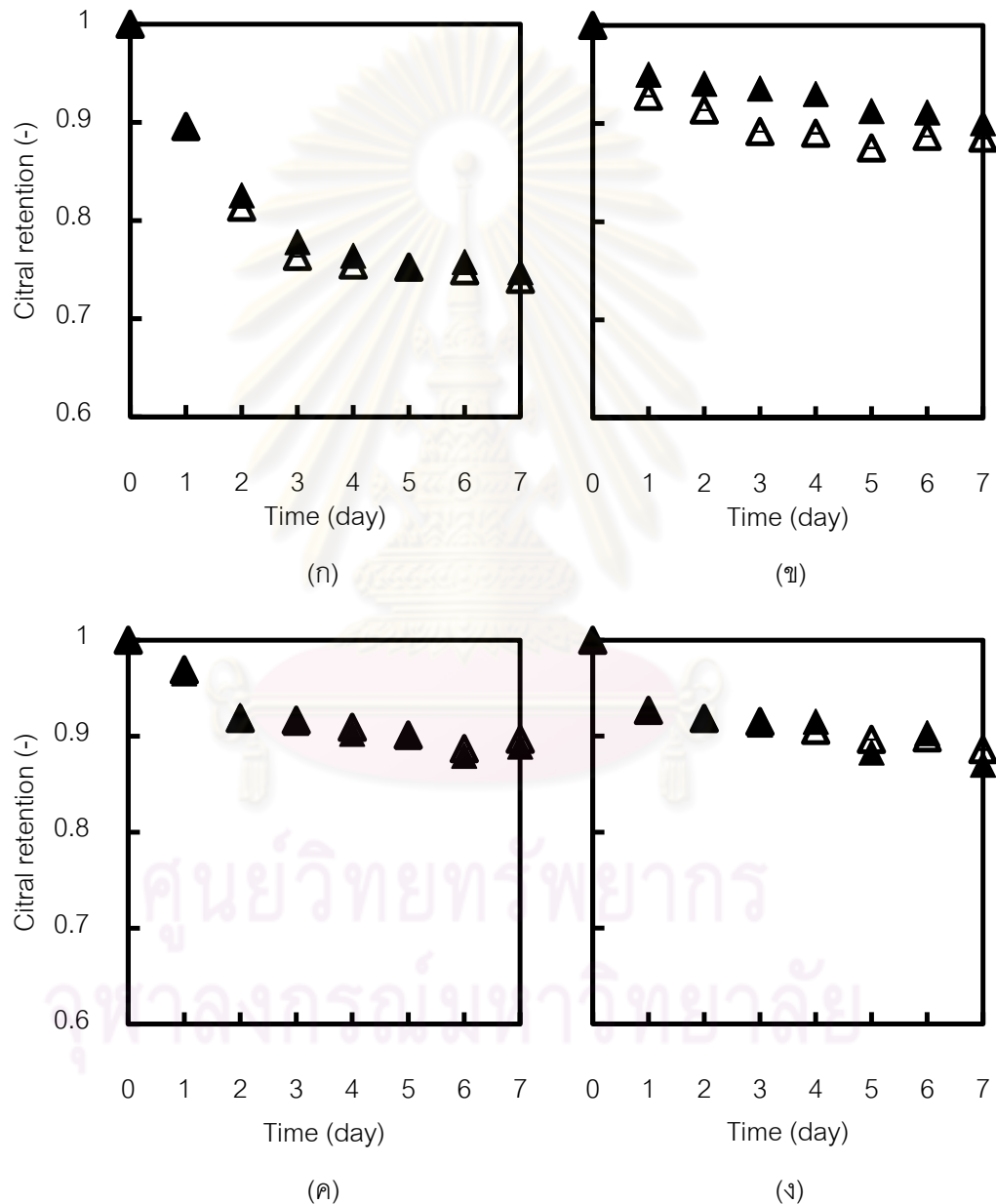
**รูปที่ 4.26** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการคงอยู่ของ E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) โดยเปรียบเทียบแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข)

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกักเก็บซีตรัลต่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อน พบว่าเมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัลในผงแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากค่าร้อยละของการคงอยู่ของซีตรัลส่วนใหญ่เกิดจากการกักเก็บซีตรัลไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตริน เมื่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินลดลง ส่งผลให้ซีตรัลที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารที่ไม่มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ จึงส่งผลให้การกักเก็บซีตรัลมีค่าลดลง ซึ่งในงานวิจัยของ Yoshii และคณะ (2005) ศึกษาการกักเก็บกลิ่น Shiitake ด้วยการใช้อัลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น Shiitake เมื่อใช้อัลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน (10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เป็นสารห่อหุ้ม มีค่าเท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ และค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่น Shiitake เมื่อใช้มอลโตเด็กซ์ตริน (30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เป็นสารห่อหุ้ม มีค่าเท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่น Shiitake เมื่อใช้อัลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตริน ( $\alpha$ -CD 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก/MD 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เป็นสารห่อหุ้ม มีค่าเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการพอร์มเป็นชั้นฟิล์มของมอลโตเด็กซ์ตริน ช่วยลดการแพร่ผ่านของกลิ่นในระหว่างกระบวนการพ่นฝอยแบบอบแห้ง นอกจากนี้แล้วยังพบว่าอัลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถกักเก็บ Z-citral ได้ดีกว่า E-citral ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 และ 4.4.2 เนื่องจากโครงสร้างของ E-citral มีโครงสร้างที่มีแขนที่เกะกะมากกว่า Z-citral จึงทำให้ E-citral เข้าไปอยู่ภายในโพรงของอัลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินได้น้อยกว่า Z-citral ในขณะที่เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริลสามารถกักเก็บ E-citral ได้ดีกว่า Z-citral เนื่องจากขนาดของโพรงเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีขนาดที่พอดีกับโครงสร้างของ E-citral จึงทำให้สูญเสีย E-citral ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้น้อยกว่า Z-citral ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข)

#### 4.5.3 ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีผลต่อความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง

จากรูปที่ 4.27 เป็นการศึกษาการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินต่อไซโคลเด็กซ์ตรินเท่ากับ 20:80 ซึ่งที่อัตราส่วนนี้พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัลมากกว่าที่อัตราส่วนการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินต่อไซโคลเด็กซ์ตรินอื่นๆ โดยเปรียบเทียบกับผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากไซโคลเด็กซ์ตริน 100% ทำการทดสอบการปลดปล่อยที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม มีอัตราการปลดปล่อยซีตรัลน้อยกว่าผงแห้งที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

เพียงอย่าง เนื่องจากวงแหวนที่ได้นอกจากจะเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคของแอลฟาไซโคลเด็กซ์ทรินที่สามารถละลายน้ำได้แล้ว ยังพบว่ามอลโตเด็กซ์ทรินทำหน้าที่เป็นตัวประสานทำให้อนุภาคยึดติดกันมากขึ้นอีกด้วย จึงช่วยลดการปลดปล่อยของซีตรัลจากวงแหวนที่ใช้มอลโตเด็กซ์ทรินและไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม สามารถอธิบายกลไกการปลดปล่อยและอัตราการปลดปล่อยของซีตรัลได้ด้วยแบบจำลองต่างๆ ดังนี้



**รูปที่ 4.27** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ E-citral (ไปรง), Z-citral (ทีบ) ที่คงเหลือและเวลาในการปลดปล่อยของวงแหวน (ก)  $\alpha$ -CD 100 เปอร์เซ็นต์, (ข)  $\alpha$ -CD 80 เปอร์เซ็นต์ + MD 20 เปอร์เซ็นต์, (ค)  $\beta$ -CD 100 เปอร์เซ็นต์และ (ง)  $\beta$ -CD 80 เปอร์เซ็นต์ + MD 20 เปอร์เซ็นต์

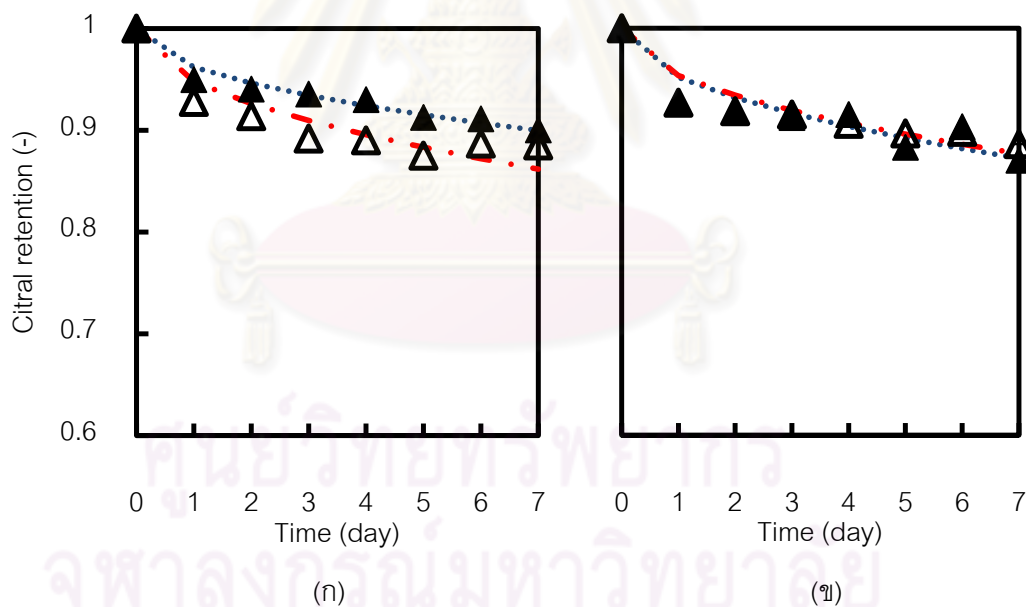


### I. แบบจำลองของ Higuchi

จากรูปที่ 4.27 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Higuchi ได้โดยวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $M_t$  กับ แกน x คือ  $\sqrt{t}$  โดยค่าคงที่ (k) สามารถหาได้จากชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.6 และสามารถนำตัวแปรมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Higuchi ดังแสดงในรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ (k) จากสมการ Higuchi เมื่อใช้มอลโตเดกซ์ตรินและไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม	k ( $10^{-2}/\text{day}$ )		$R^2_{\text{adj}}$	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD80wt% + MD20wt%	5.22	3.79	0.850	0.963
$\beta$ -CD80wt% + MD20wt%	4.66	4.83	0.863	0.857



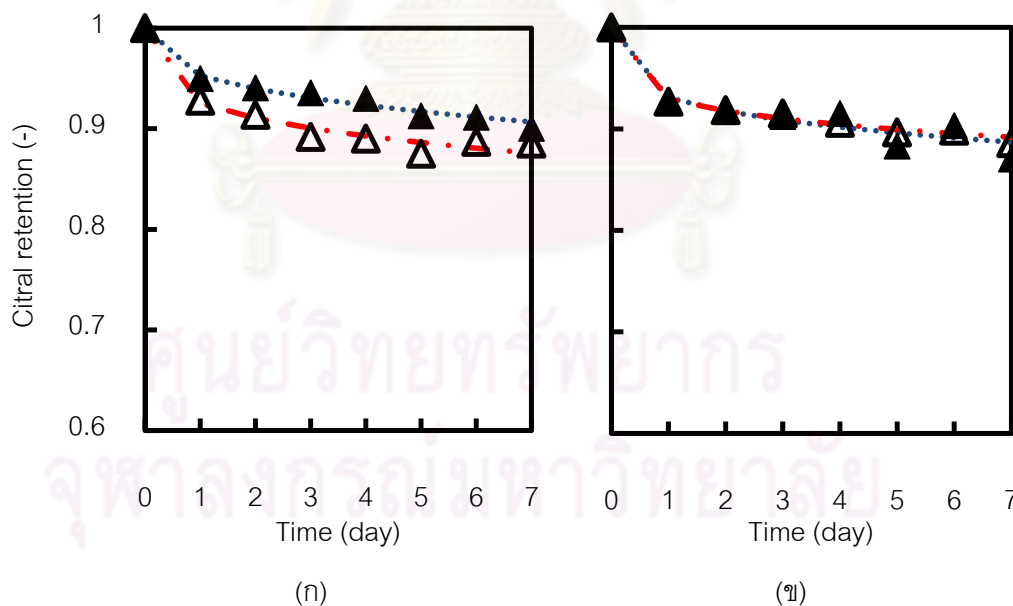
รูปที่ 4.28 ลักษณะการปลดปล่อย E-citral (โปร่ง) และ Z-citral (ทึบ) ตามแบบจำลองของ Higuchi (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเดกซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเดกซ์ตรินและเบต้าไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข)

## II. แบบจำลองของ Peppas

จากรูปที่ 4.27 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Peppas ได้โดยวาดกราฟระหว่าง แกน y คือ  $\ln \frac{M_t}{M_\infty}$  กับ แกน x คือ  $\ln t$  โดยค่าคงที่ (k) สามารถหาได้จากจุดตัดแกน และค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.7 และสามารถนำตัวแปรมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Peppas ดังแสดงในรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงกลไกการปลดปล่อย (n) และค่าคงที่ (k) จากสมการ Peppas เมื่อใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม	n (-)		k ( $10^{-5}/\text{day}$ )		$R^2_{\text{adj}}$	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD80%/MD20%	0.35	0.26	15.6	5.13	0.920	0.854
$\beta$ -CD80%MD20%	0.25	0.21	2.38	0.55	0.661	0.925



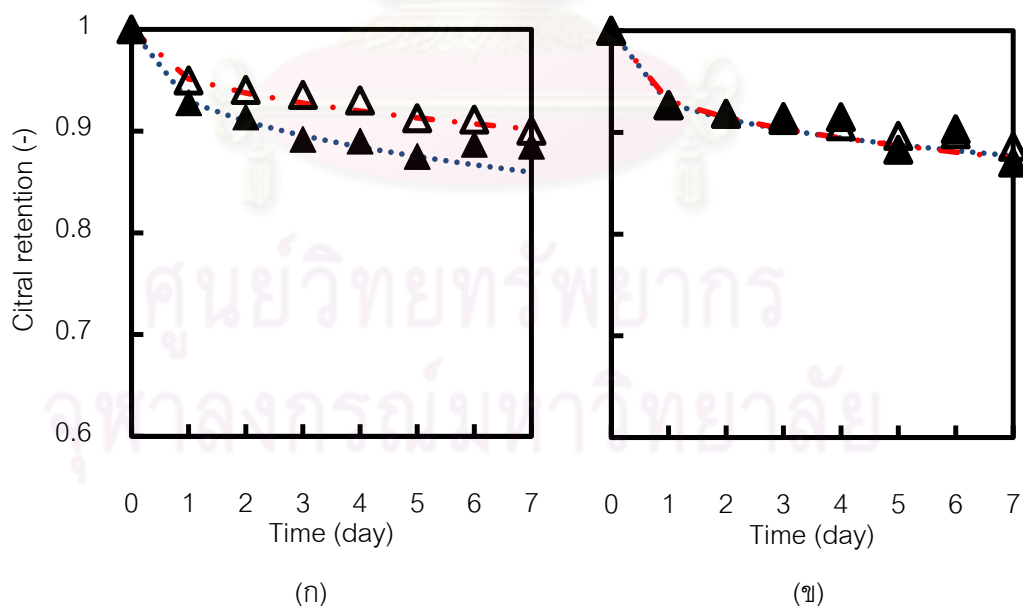
รูปที่ 4.29 ลักษณะการปลดปล่อย E-citral (ไปรง) และ Z-citral (ที่บ) ตามแบบจำลองของ Peppas (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเด็คซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข)

### III. แบบจำลองของ Avrami

จากรูปที่ 4.27 สามารถหาค่าตัวแปรในสมการ Avrami ได้โดยวาดกราฟระหว่างแกน y คือ  $\ln(-\ln R)$  และแกน x คือ  $\ln t$  โดยค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) สามารถหาได้จากจุดตัดแกน และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.5 และสามารถนำตัวแปรมาวาดกราฟตามแบบจำลองของ Avrami ดังแสดงในรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย (k) และค่าตัวแปรที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) จากสมการ Avrami เมื่อใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้ม	n (-)		k ( $10^{-4}/\text{day}$ )		$R^2_{\text{adj}}$	
	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral	E-citral	Z-citral
$\alpha$ -CD80%/MD20%	0.37	0.37	8.85	3.32	0.973	0.986
$\beta$ -CD80%/MD20%	0.29	0.32	1.37	2.77	0.984	0.914



รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะการปลดปล่อย E-citral (ไปรง) และ Z-citral (ทีป) ตามแบบจำลองของ Avrami (เส้นปะ) เมื่อใช้มอลโตเด็คซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ก) และมอลโตเด็คซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม (ข)

จากการใช้แบบจำลองทั้ง 3 มาใช้พิกกราฟเพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยและกลไกการปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้ง พบว่าให้ค่าอัตราการปลดปล่อยชิตรัลที่คล้ายคลึงกัน คือ การปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้งที่ใช้ไซโคลเด็คซ์ตรินและมอลโตเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าน้อยกว่า การใช้ไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว และกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยของชิตรัลนั้นถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่านของสาร เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยการพิจารณาค่า  $R^2_{adj}$  พบว่าแบบจำลองของ Avramil เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายกลไกการปลดปล่อยได้ดีกว่าแบบจำลองของ Peppas และ Higuchi เนื่องจากการปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากการใช้ไซโคลเด็คซ์ตรินและมอลโตเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีการปลดปล่อยที่น้อยกว่าการปลดปล่อยจากผงแห้งที่ใช้ไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว

จากการพิกกราฟด้วยแบบจำลองของ Avramil เพื่อหาค่าอัตราการปลดปล่อยและกลไกการปลดปล่อยนั้น พบว่าการปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้งที่เตรียมจากมอลโตเด็คซ์ตรินและไซโคลเด็คซ์ตรินมีค่าการปลดปล่อยที่น้อยกว่าผงแห้งที่ใช้ไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมอลโตเด็คซ์ตรินทำหน้าที่เป็นตัวประสานใช้อนุภาคยึดติดกันมากขึ้นแล้ว ยังทำหน้าที่พอร์ตัวเป็นชั้นฟิล์ม ดังแสดงในหัวข้อ 4.5.1 ซึ่งการเติมมอลโตเด็คซ์ตรินนั้นจะช่วยลดการปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้ง เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกกลไกการปลดปล่อย (n) ในตารางที่ 4.5 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.29-0.37 แสดงถึงกลไกการปลดปล่อยของชิตรัลออกจากผงแห้งถูกกำหนดด้วยการแพร่ผ่านของสาร (Molecular diffusion)

#### 4.6 การศึกษาผลของชนิดเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

##### 4.6.1 ผลต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง

การศึกษาถึงผลของชนิดเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้ง โดยเปรียบเทียบผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของชิตรัลต่อไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ 1:1 ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale; Buchi B290) เป็นหัวฉีดแบบของเหลวและอากาศไหลทางเดียว (Two-Fluid nozzle) และระดับอุตสาหกรรม (Plan scale; Ohkawara kakouki) เป็นหัวฉีดแบบจานหมุน (Rotary nozzle) พบว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็คซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็คซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ผ่านหัวฉีดแบบจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) และ 4.11 (ข) ตามลำดับ มีลักษณะเป็นอนุภาคทรง

กลม ผิวด้านนอกขรุขระ โดยอนุภาคทรงกลมเกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกจากแอลฟาไฮโดรเจนและแกมมาไฮโดรเจนที่ละลายน้ำทำหน้าที่เป็นไบเดอร์ (Binder) ในการเชื่อมต่อบริเวณอนุภาค และแรงที่ใช้ในการยึดติดกันระหว่างอนุภาคเป็นแรงยึดติดกันระหว่างอนุภาคของแข็ง (Solid bridges) ในขณะที่ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไฮโดรเจนและแกมมาไฮโดรเจนเป็นสารหล่อลื่น ผ่านหัวฉีดแบบของเหลวและอากาศไหลทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) 4.4 (ข) ตามลำดับ มีลักษณะอนุภาคเกิดการรวมตัวกัน (Agglomerates) ไม่ใช่อนุภาคทรงกลม

โดยสาเหตุของชนิดเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อลักษณะโครงสร้างของผงแห้งที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากละอองฝอยที่ผ่านหัวฉีดแบบจานหมุนจะมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 30-120 ไมโครเมตร ในขณะที่ละอองฝอยที่ผ่านหัวฉีดแบบของเหลวและอากาศไหลทางเดียวจะมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นโอกาสที่อนุภาคขนาดเล็กจะมาชนกันและเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคมีมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้หัวฉีดแบบของเหลวและอากาศไหลทางเดียวไม่เหมาะกับสารแขวนลอย เพราะไม่สามารถควบคุมการผลิตละอองฝอยได้ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งอนุภาคที่ได้จึงมีลักษณะโครงสร้างเป็นอนุภาคที่เกิดการรวมตัวกันมากกว่า

#### 4.6.2 ผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิริลในผงแห้ง

การศึกษาถึงผลของชนิดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของซิริลในผงแห้งน้ำมันตะไคร้ โดยเปรียบเทียบผงแห้งที่อัตราส่วนโดยโมลของซิริลต่อไฮโดรเจนเท่ากับ 1:1 พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของซิริลในผงแห้งที่เตรียมจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยระดับอุตสาหกรรม (Plan scale; Ohkawara kakouki) เป็นหัวฉีดแบบจานหมุน (Rotary nozzle) ให้ค่าร้อยละการคงอยู่ของซิริลมากกว่าผงแห้งที่เตรียมจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยระดับปฏิบัติการ (Lab scale; Buchi B290) เป็นหัวฉีดแบบแรงดัน (Pressure nozzle) เนื่องจากในขั้นตอนการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยระดับอุตสาหกรรม ได้อนุภาคมีลักษณะโครงสร้างเป็นอนุภาคทรงกลมที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค (ดังแสดงในหัวข้อ 6.4.1) จึงทำให้การสูญเสียซิริลในระหว่างกระบวนการอบแห้งน้อยกว่า นอกจากนี้ในขั้นตอนของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่เตรียมผงแห้งแบบใช้เครื่องระดับอุตสาหกรรมได้มีการใช้ไฮโมจีไนเซอร์ ซึ่งการใช้ไฮโมจีไนเซอร์อาจทำให้ซิริลเข้าไปอยู่ในโพรงของไฮโดรเจนได้มากกว่า



#### 4.7 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Candida albicans* ATCC 10231

##### 4.7.1 ความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้

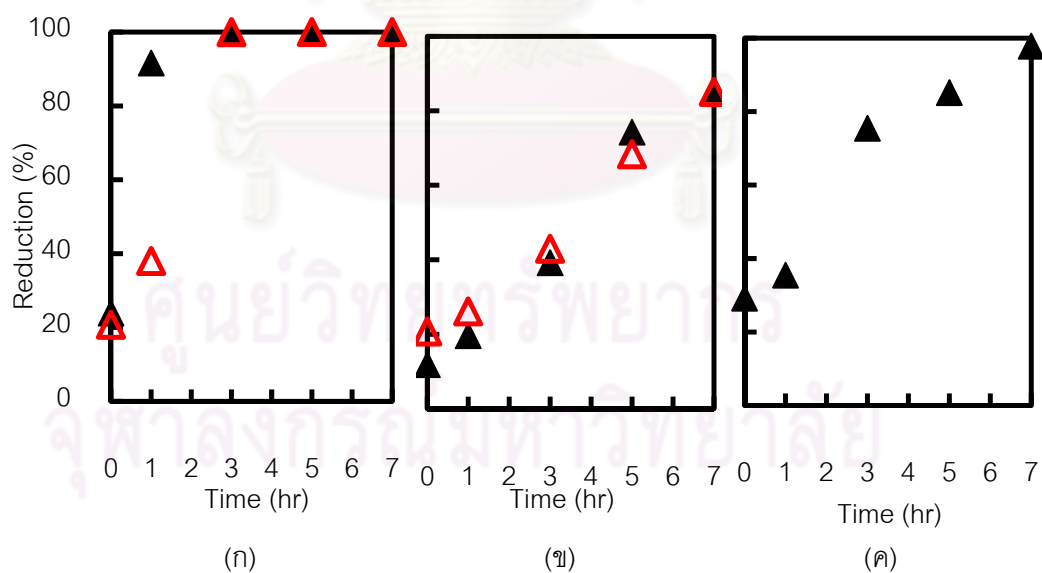
การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันตะไคร้ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *C.albicans* ATCC 10231 สามารถทำได้โดยวิธีการเจือจางสารทดสอบ (Broth dilution method) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบในเชิงปริมาณ ทำให้ทราบถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ (MBC) ของน้ำมันตะไคร้ จากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อของซีตรัลมีค่าเท่ากับ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำมันตะไคร้ แสดงให้เห็นว่าซีตรัลเป็นสารสำคัญหลักในการออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อของซีตรัลและน้ำมันตะไคร้มีค่าเท่ากับ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Onawunmi (1989) ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *C.albicans* ATCC 10231 ด้วยน้ำมันตะไคร้และซีตรอล พบว่า ค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อของซีตรัลและน้ำมันตะไคร้มีค่าเท่ากับ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

##### 4.7.2 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Candida albicans* ATCC 10231 ของผงแห้ง

การศึกษากการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *C.albicans* ATCC 10231 ของผงแห้งน้ำมันตะไคร้เป็นการนำวิธีการทดสอบ MIC มาประยุกต์ใช้ โดยศึกษากการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ความเข้มข้นของปริมาณซีตรัลที่อยู่ในผงเท่ากับ ความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ในการยับยั้งเชื้อ (MIC) และศึกษาหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของจุลินทรีย์ที่เวลาต่างๆ ด้วยเทคนิคการนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง จากรูปที่ 4.31 พบว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อ *C.albicans* ได้ดีกว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ตริน โดยพบว่าที่เวลา 1 ชั่วโมง ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อได้ 91.65 เปอร์เซ็นต์ และสามารถยับยั้งได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งการออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของ *C.albicans* เนื่องจากการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลองการปลดปล่อยของซีตรัลจากผงแห้ง

น้ำมันตะไคร้ที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4.4 พบว่าอัตราการปลดปล่อยของชิตรัลจากแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดได้ดีกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *C.albicans* ด้วยผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากแอลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว ( $\alpha$ -CD 100%) กับผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้จากการผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ( $\alpha$ -CD 80%/MD 20%) พบว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียวสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อ *C.albicans* ได้ดีกว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้ที่เตรียมได้จากการผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินและแอลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม เนื่องจากการปลดปล่อยของชิตรัลจากผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่ใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียวมีอัตราการปลดปล่อยของชิตรัลได้มากกว่าผงแห้งที่เตรียมได้จากการผสมระหว่างมอลโตเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.5.2 ซึ่งอัตราการปลดปล่อยของชิตรัลที่มากกว่าในเวลาเดียวกันจึงทำให้การออกฤทธิ์ยับยั้ง *C.albicans* ดีกว่า



**รูปที่ 4.31** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อต่อเวลา ของผงแห้ง (ก) แอลฟาไซโคลเด็กซ์, (ข) เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ (ค) แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน เมื่อ CDs 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ทีบ) และ CDs 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก + MD20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (โปรง)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเป็นการศึกษาการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน คือ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน โดยอาศัยเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยช่วยในการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของผงแห้ง จากการทดลองสรุปได้ว่า การกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถกักเก็บ Z-citral และ E-citral ได้ดีที่สุด ตามลำดับ โดยค่าร้อยละของการคงอยู่ของซิทรัลมีค่ามากที่สุด ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 และผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกขรุขระ ขณะที่ด้านในเกิดจากผลึกหลายๆ อันมาเชื่อมต่อกัน สำหรับผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีลักษณะเป็นอนุภาคผลึกที่ไม่เกิดการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคทรงกลม และเมื่อนำมาพิจารณาถึงความคงตัวของซิทรัลในผงแห้ง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปลดปล่อยซิทรัลจากโพรงของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีค่าน้อยกว่าแกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินและแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน โดยกลไกการปลดปล่อยของซิทรัลออกจากโพรงของไซโคลเด็กซ์ตรินถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่านของสาร นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินลงในแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน โดยศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1 พบว่าค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัลมีค่าลดลง เมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อนเพิ่มขึ้น และผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ผิวด้านนอกราบเรียบขึ้น เมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อนเพิ่มขึ้น ขณะที่ด้านในเกิดจากผลึกหลายๆ อันมาเชื่อมต่อกัน และเมื่อนำมาพิจารณาถึงความคงตัวของซิทรัลในผงแห้ง พบว่าการปลดปล่อยของซิทรัลจากผงแห้งที่ใช้มอลโตเด็กซ์ตรินและไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มมีค่าการปลดปล่อยที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผงแห้งที่ใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้ยังนำมาศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *C. albicans* ATCC 10231 โดยนำผงแห้งมาทดสอบที่ความเข้มข้นของซิทรัล เท่ากับ ความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้ในการยับยั้งเชื้อ คือ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมจากแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อเชื้อได้ดีที่สุด

โดยที่เวลา 1 ชั่วโมง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อได้ 91.65% และสามารถยับยั้งได้ 100% ที่เวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับผงที่เตรียมได้จากแกมมาไฮโคลเด็กซ์ตรินและเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อการกักเก็บน้ำมันตะไคร้ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ควรมีการศึกษาและพัฒนาผงแห้งน้ำมันตะไคร้ ดังต่อไปนี้

- ศึกษาคุณภาพผงแห้งน้ำมันตะไคร้ที่เตรียมได้กับการใช้งานจริง
- ศึกษาชนิดของสารห่อหุ้มชนิดอื่นที่มีความเหมาะสมกว่ามอลโตเด็กซ์ตรินในการใช้งานร่วมกับไฮโคลเด็กซ์ตรินเพื่อเป็นสารห่อหุ้มต่อกักเก็บชีตรอล เพื่อช่วยลดทุนในการใช้งานไฮโคลเด็กซ์ตริน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- Al-Muqarram Holding Sdn Bhd. Lemongrass [online]. 2008. Available from: <http://lemongrassworld.com/pages/home.php> [1 September 2010]
- Astray, G., Gonzalez-Barreiro, C., Mejuto, J.C., Rial-Otero, R., Simal-Ga'ndara, J. A review on the use of cyclodextrins in foods. Food Hydrocolloids 23 (2009): 1631–1640.
- Barbosa-C'anvas, G.V. Food powder-Physical properties, Processing and Functionality. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
- Benita, S. Microencapsulation method and Induxtriak applications. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- Coumans, W.J., Kerkhof, J.A.M., Bruin, S. Theoretical and practical aspect of aroma retention in spray drying and freeze drying. Drying Technology 12 (1994): 99-149.
- Fernandes, L.P., Oliveira, W.P., Sztatisz, J., Szil'agy'i, I.M., Nov'ak, Cs. Solid state studies on molecular inclusions of Lippia Sidoides oil obtained by spray drying. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2008): 1-9.
- Filkova, I., Huang, L.X., Mujumdar, A.S. Industrial Spray Drying Systems. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- Giovagnoli, S., Biasi, P., RICCI, P., Schoubben, A., Perioli, L., Rossi, C. Physicochemical characterization and release mechanism of a novel prednisone biodegradable microsphere formulation. Journal of Pharmaceutical Science 97 (2008): 303-317.
- Haiyee, Z.A., Saim, N., Said, M., Illias, R. Characterization of cyclodextrin complexes with turmeric oleoresin. Food Chemistry 114 (2009): 459-465.
- Hedges, A.R. Industrial Applications of Cyclodextrins. Chem. Rev. 98 (1998): 2035-2044.
- Helena, D. Cyclodextrins and Their Complexes. New York: Wiley-VCH, 2006.
- Higuchi, T., Connors, K. A. Phase solubility technique. Advances in Analytical Chemistry and Instrumentation 4 (1965): 117–212.
- Jafari, S.M., Assadpoor, E., Bhandari, B., He, Y. Nano-particle encapsulation of fish oil by spray drying. Food Research International 41 (2008): 172-183.



- Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y., Bhandari, B. Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. Drying Technology 26 (2008): 816–835.
- Karathanos, V.T., Mourtzinou, I., Yannakopoulou, K., Andrikopoulos, N.K. Study of the solubility, antioxidant activity and structure of inclusion complex of vanillin with  $\beta$ -cyclodextrin. Food Chemistry 101 (2007): 652-658.
- Kimura, K., Nishimura, H., Iwata, I., Mizutani, J. Deterioration mechanism of lemon flavor formation mechanism of off-odor substance arising from citral. Journal Agriculture Food Chem 31 (1983): 801-804.
- King, A.H. Encapsulation of Food Ingredients—a Review of Available Technology, Focusing on Hydrocolloids. In Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients 590 (1995): 26–39.
- Li, X., Jin, Z., Wang, J. Complexation of allyl isothiocyanate by  $\alpha$ - and  $\beta$ -cyclodextrin and its controlled release characteristics. Food Chemistry 103 (2007): 461-466.
- Li, Z., Wang, M., Wang, F., Gu, Z., Du, G., Wu, J., Chen, J.  $\gamma$ - Cyclodextrin: a review on enzymatic production and applications. Appl Microbiol Biotechnol 77 (2007): 245–255.
- Liu, X.D., Furuta, T., Yoshii, H., Linko, P., Coumans, W.J. Cyclodextrin encapsulation to prevent the loss of l-menthol and its retention during drying. Biosci. Biotechnol. Biochem. 64 (2000): 1608-1613.
- Loftsson, T., Jarho, P., Másson, M., Järvinen, T. Cyclodextrins in drug delivery. Expert Opinion Drug Delivery 2 (2005): 335-351.
- Lu, Z., Cheng, B., Hub, Y., Zhang, Y., Zou, G. Complexation of resveratrol with cyclodextrins: Solubility and antioxidant activity. Food Chemistry 113 (2009): 17-20.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., Desobry, S. Flavour encapsulation and controlled release—a review. International Journal of Food Science and Technology 41 (2006): 1–21.
- Martin Del Valle, E.M. Cyclodextrins and their uses: a review. Process Biochemistry 39 (2004): 1003-1046.

- Masters, Keith. Spray drying handbook. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- Ohata, Y., Takataki, K., Kawakishi, S. Kinetic and thermodynamic analyses of the Cyclodextrin-Allyl Isothiocyanate inclusion complex in an aqueous solution. Biosci. Biotechnol. Biochem. 63 (1999): 190-193.
- Onawumi, G.O. Evaluation of antimicrobial activity of citral. Letters in Applied Microbiology 9 (1989): 105-108.
- Ono, N., Hirayama, F., Arima, H., Uekama, K. Analysis of the phase solubility diagram of a Phenacetin/Competitor/ $\beta$ -Cyclodextrin ternary system, Involving Competitive Inclusion Complexation. Chem. Pharm. Bull. 49 (2001): 78—81
- Papadopoulou, V., Kosmidis, K., Vlachou, M., Macheras, P. On the use of the Weibull function for the discernment of drug release mechanisms. International Journal of Pharmaceutical 309 (2006): 44-50.
- Paviani, L., Pergher, S.B.C., Dariva, C. Application of molecular sieves in the fraction of lemongrass oil from high-pressure carbon dioxide extraction. Brazilian Journal of Chemical Engineering 23 (2006): 219-225.
- Reineccius, T.A., Reineccius, G.A., Peppard, T.L. Encapsulation of Flavors using Cyclodextrins: Comparison of Flavor Retention in Alpha, Beta, and Gamma Types. Journal of Food Science 67 (2002): 3271-3279.
- Reineccius, T.A., Reineccius, G.A., Peppard, T.L. Flavor release from cyclodextrin complexes: comparison of Alpha, Beta, and Gamma types. Journal of Food Science 68 (2003): 1234-1239.
- Shiga, H. and others Encapsulation of Shiitake (*Lentinus Edodes*) flavors by spray drying. Biosci. Biotechnol. Biochem. 68 (2004): 66-71.
- Szejtli, J. Past, present, and future of cyclodextrin research. Pure Applied Chem. 76 (2004): 1825–1845.
- Thijssen, H.; Rulkens, W.H. Retention of aromas in drying food liquids. De Ingenieur 47 (1968): 45–56.

Toro-Sanchez, C.L. and others Controlled release of antifungal volatiles of thyme essential oil from  $\beta$ -cyclodextrin capsules. Journal Incl Phenom Macrocycl Chem (2010): 1-11.

WIKIPIDIA The free Encyclopedia. Maltodextrin [online]. 2007. Available from:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Maltodextrin> [1 September 2010]

Yoshii, H. and others Flavor release from spray-dried maltodextrin gum arabic or soy matrices as a function of storage relative humidity. Innovative Food Science & Emerging Technologies 2 (2001): 55-61.

Yoshii, H., Yasuda, M., Furuta, T., Kuwahara, H., Ohkawara, M., Linko, P. Retention of Cyclodextrin complexed Shiitake (*Lentinus edodes*) flavors with spray drying. Drying Technology 23 (2005): 1205-1215.



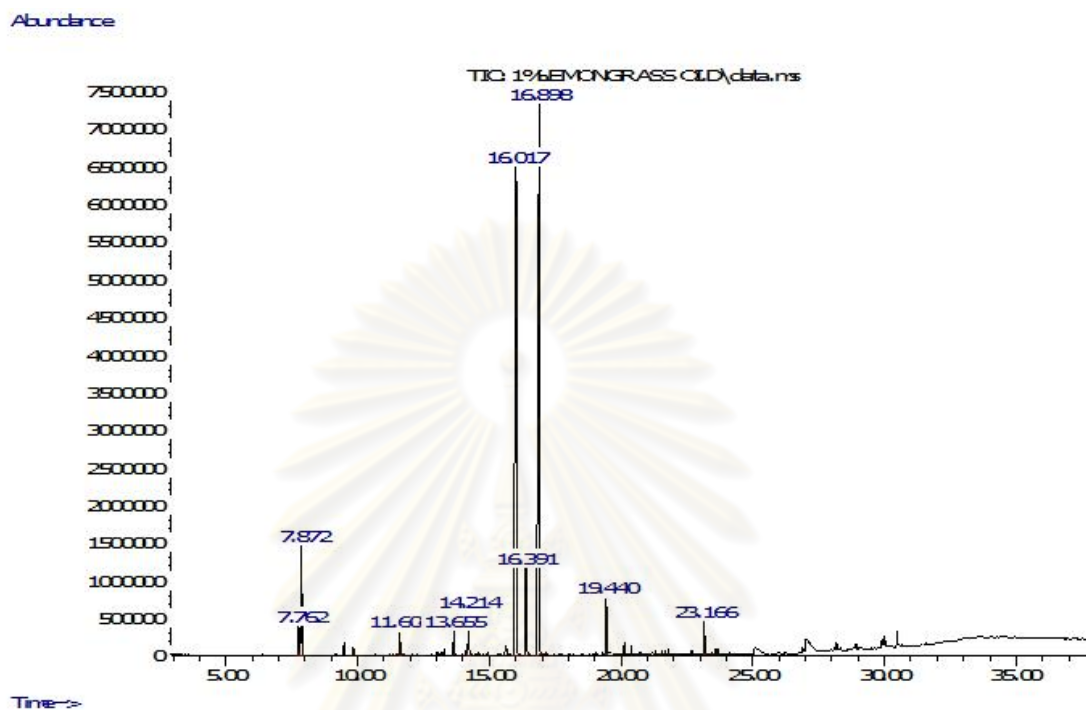
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบการศึกษาหองค์ประกอบและปริมาณขององค์ประกอบในน้ำมันตะไคร้



รูปที่ ก-1 โครมาโทแกรมของน้ำมันตะไคร้จากเครื่อง GC/MS

ตารางที่ ก-1 ผลองค์ประกอบของน้ำมันตะไคร้ที่ได้จากเครื่อง GC/MS

Peak	Compound	R.T.	Area	Height	Pct Max	Pct Total (%)
1	6-methyl-5-hepten-2-one	7.762	10485601	385089	3.25	1.491
2	$\beta$ -myrcene	7.872	38503137	1432293	11.94	5.474
3	Linalool	11.604	7938475	302661	2.46	1.129
4	-	13.655	7579253	318968	2.35	1.078
5	-	14.214	13170789	550472	4.09	1.872
6	Z-citral	16.017	2.46E+08	6463519	76.41	35.017
7	geraniol	16.391	35408780	1145500	10.98	5.034
8	E-citral	16.898	3.22E+08	7511850	100	45.826
9	geranyl acetate	19.44	14108036	736361	4.38	2.006
10	selina-6-en-4-ol	23.166	7559433	426930	2.35	1.075



ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันตะไคร้ในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน

ตารางที่ ข-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับการละลายของน้ำมันตะไคร้ ในสารละลายแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน

[ $\alpha$ -CD] mM	Sample	Cyclohexanone			Z-citral			E-citral		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	1	1.878	16755	1281	9.292	24380	491	11.432	25132	529
	2	1.895	16529	1113	9.355	26219	557	11.459	27975	634
2	1	1.888	18772	1256	9.379	30593	633	11.413	33197	740
	2	1.888	18772	1256	9.379	30593	633	11.413	33197	740
4	1	1.877	17205	1156	9.322	32371	666	11.404	34563	746
	2	1.874	15666	1227	9.31	34014	687	11.427	33808	735
6	1	1.889	18885	1281	9.332	39983	814	11.406	42006	918
	2	1.885	17835	1188	9.286	36551	750	11.382	38579	835
8	1	1.878	17402	1185	9.224	41206	786	11.375	42248	881
	2	1.879	17964	1213	9.302	45269	926	11.358	47088	1029
10	1	1.885	17067	1114	9.343	46651	960	11.397	47150	1040
	2	1.864	16784	1274	9.28	46991	937	11.392	47067	993

ตารางที่ ข-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับการละลายของน้ำมันตะไคร้ ในสารละลายเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน

[β-CD] mM	Sample	Cyclohexanone			Z-citral			E-citral		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	1	1.878	16755	1281	9.292	24380	491	11.432	25132	529
	2	1.895	16529	1113	9.355	26219	557	11.459	27975	634
2	1	1.864	15243	1052	9.22	29605	570	11.258	30934	627
	2	1.878	16097	1153	9.295	27605	570	11.345	28934	627
4	1	1.882	16303	1211	9.289	31659	649	11.341	32818	703
	2	1.896	16263	1222	9.274	29642	613	11.338	31020	673
6	1	1.896	16198	1152	9.271	31024	643	11.355	31320	681
	2	1.867	14634	1026	9.31	30537	640	11.343	31076	675
8	1	1.877	14547	1041	9.301	28917	604	11.421	29218	644
	2	1.872	15629	1222	9.287	30138	617	11.397	30775	658
10	1	1.866	15149	1169	9.278	28996	575	11.298	28157	590
	2	1.866	15149	1169	9.278	28996	575	11.298	28157	590

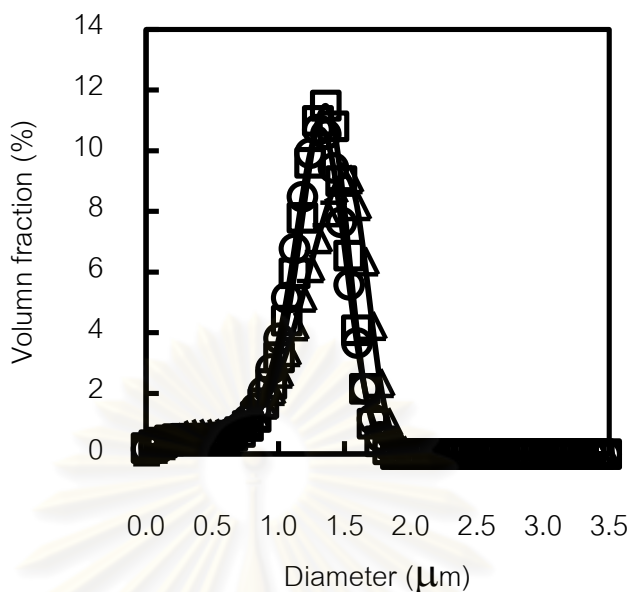
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี สำหรับการละลายของน้ำมันตะไคร้ ในสารละลายแกมมาไซโคลเดกซ์ทริน

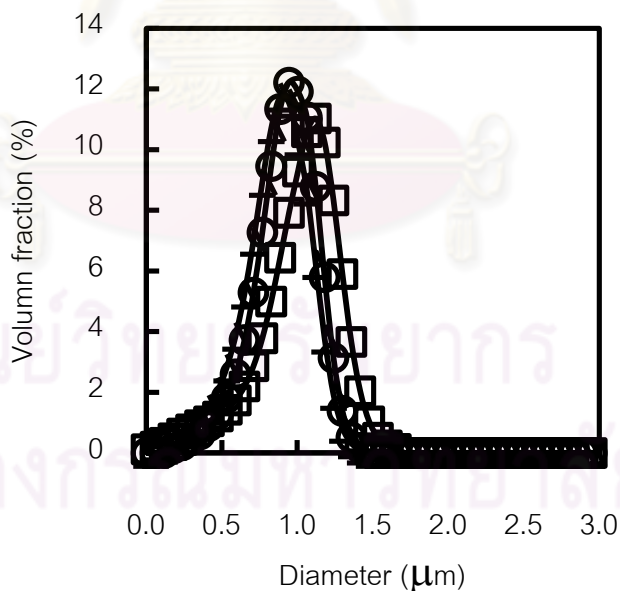
[ $\gamma$ -CD] mM	Sample	Cyclohexanone			Z-citral			E-citral		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	1	1.878	16755	1281	9.292	24380	491	11.432	25132	529
	2	1.895	16529	1113	9.355	26219	557	11.459	27975	634
2	1	1.869	12789	1029	9.216	27699	536	11.269	25802	533
	2	1.881	15596	1122	9.289	30989	654	11.367	27943	598
4	1	1.862	15611	1209	9.237	34518	715	11.301	30182	635
	2	1.873	16243	1169	9.252	34886	742	11.296	29967	627
6	1	1.86	15815	1143	9.232	31821	669	11.246	28732	604
	2	1.848	14550	1027	9.221	30243	641	11.292	27318	581
8	1	1.854	13699	994	9.170	26581	514	11.323	25615	503
	2	1.864	13599	1102	9.223	27653	560	11.318	25729	532
10	1	1.878	14738	1079	9.296	29166	615	11.363	26872	585
	2	1.874	13827	1024	9.218	26793	517	11.306	25854	534

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

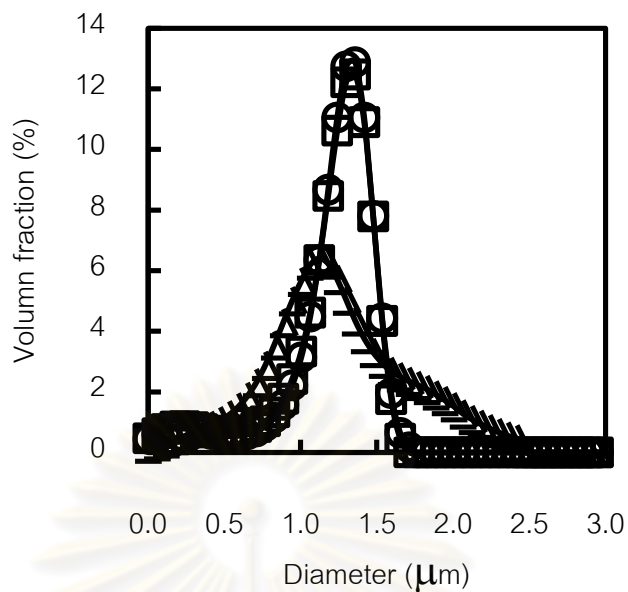
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบการศึกษาปริมาณสารห่อหุ้มในสายป้อน



รูปที่ ค-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเดกซ์ตรินในสายป้อน  $\triangle$  10,  $\circ$  20 และ  $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 24.23, 19.10 และ 19.73 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



รูปที่ ค-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเดกซ์ตรินในสายป้อน  $\triangle$  10,  $\circ$  20 และ  $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 7.65, 8.60 และ 11.25 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



**รูปที่ ค-3** การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อน  $\Delta$  10,  $\circ$  20 และ  $\square$  30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขนาดเฉลี่ย; 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 28.72, 17.70 และ 17.22 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



ตารางที่ ค-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

[ $\alpha$ -CD] (wt%)	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
10	Hexane	0.108	3986177	1266427	0.108	3713787	1266348	0.108	3985301	1266408
	Z-citral	8.424	27041	1106	8.439	25079	1038	8.424	26237	1075
	E-citral	9.313	9399	413	9.315	9886	428	9.325	8935	389
20	Hexane	0.108	3969294	1266366	0.108	3950194	1266337	0.108	3814789	1266370
	Z-citral	8.531	32142	1337	8.445	30702	1268	8.525	30683	1217
	E-citral	9.417	14709	644	9.32	11732	511	9.427	15208	646
30	Hexane	0.191	3963819	1266333	0.116	3957919	1266309	0.108	4025856	1266454
	Z-citral	8.526	33619	1424	8.447	32878	1389	8.433	32639	1361
	E-citral	9.416	15214	665	9.325	16102	704	9.316	16874	741

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

[β-CD] (wt%)	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
10	Hexane	0.108	3969294	1266366	0.108	3950194	1266337	0.108	3814789	1266370
	Z-citral	8.531	14709	644	8.445	11732	511	8.525	15208	646
	E-citral	9.417	28504	1229	9.32	28121	1214	9.427	29924	1217
20	Hexane	0.191	3963819	1266333	0.116	3957919	1266309	0.108	4025856	1266454
	Z-citral	8.526	15214	665	8.447	16102	704	8.433	16874	741
	E-citral	9.416	32142	1337	9.325	30702	1268	9.316	30683	1295
30	Hexane	0.24	12357462	1265080	0.241	12075357	1265053	0.233	12494487	1264935
	Z-citral	8.456	23294	941	8.445	22932	922	8.441	24457	993
	E-citral	9.35	33619	1424	9.342	32878	1389	9.354	32639	1361

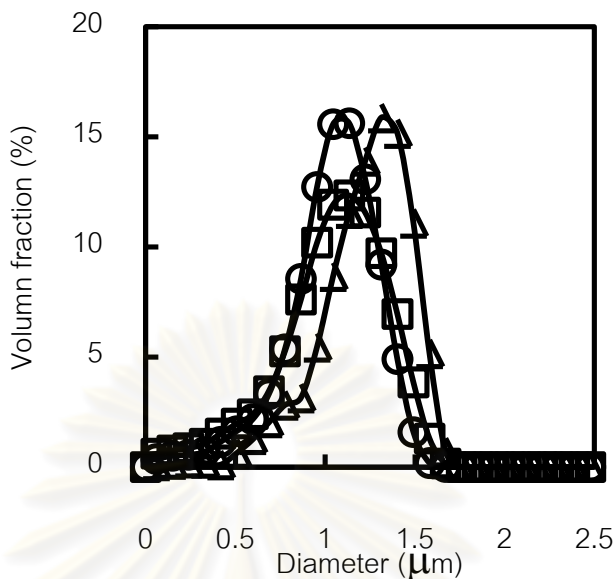
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

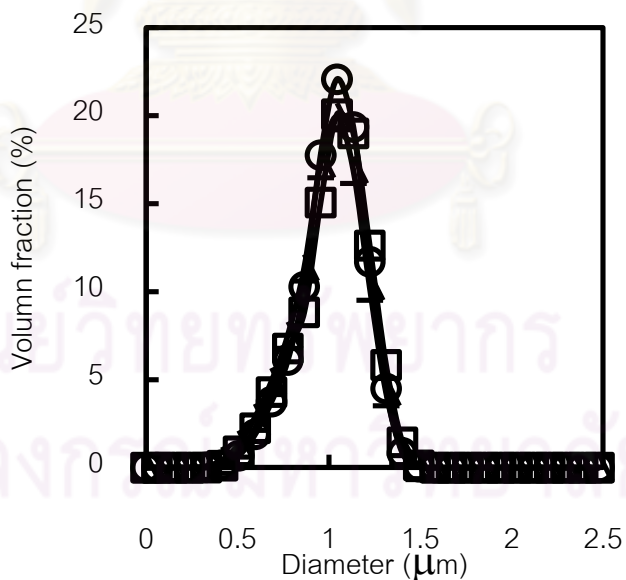
[ $\gamma$ -CD] (wt%)	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
10	Hexane	0.108	4213008	1266576	0.108	4149896	1266434	0.108	4152512	1266162
	Z-citral	8.447	28917	1175	8.446	27127	1104	8.43	26744	1074
	E-citral	9.364	34048	1484	9.367	31908	1382	9.331	31324	1351
20	Hexane	0.108	4083374	1266086	0.108	4017094	1266078	0.108	4096000	1266053
	Z-citral	8.434	30247	1226	8.415	31617	1269	8.405	33265	1326
	E-citral	9.33	36803	1594	9.336	39270	1682	9.334	40665	1756
30	Hexane	0.108	4078535	1266043	0.108	4052080	1266032	0.108	4150794	1266043
	Z-citral	8.416	35447	1416	8.426	33890	1358	8.419	34134	1363
	E-citral	9.325	43383	1863	9.332	41923	1801	9.339	41711	1794

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

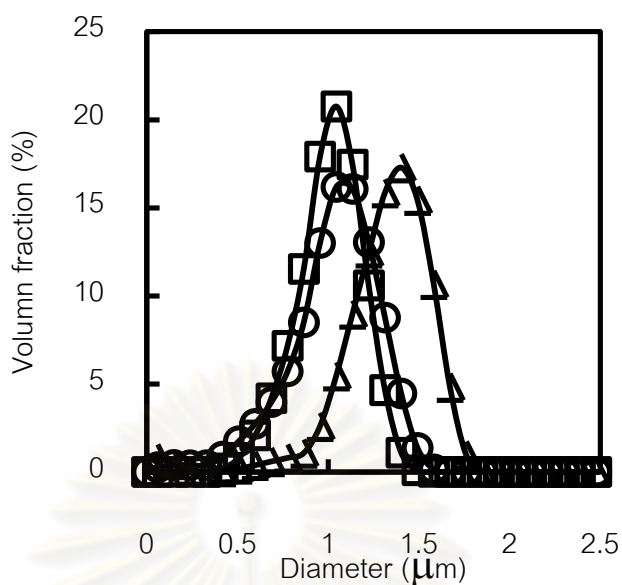
ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบของการศึกษาปริมาณน้ำมันตะไคร้ในสายป้อน



รูปที่ ง-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเดกซ์ตริน  $\triangle$  1:1,  $\circ$  1.5:1 และ  $\square$  2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเดกซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 11.14, 10.06 และ 8.71 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



รูปที่ ง-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเดกซ์ตริน  $\triangle$  1:1,  $\circ$  1.5:1 และ  $\square$  2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อไซโคลเดกซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 8.5, 9.15 และ 8.93 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



รูปที่ ง-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน  $\triangle$  1:1,  $\circ$  1.5:1 และ  $\square$  2:1 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนโดยโมลของซิทรัลต่อไซโคลเด็กซ์ตริน เท่ากับ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 เท่ากับ 16.30, 9.16 และ 9.35 ไมโครเมตร ตามลำดับ)

ตารางที่ ง-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรอล เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

Citral:α-CD	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
1:1	Cyclohexanone	5.933	1795548	300420	5.935	1835228	312288	5.947	1987068	336793
	Z-citral	11.096	4134627	519383	11.095	4202678	524998	11.106	4555176	554150
	E-citral	11.644	1754611	265358	11.643	1768481	268535	11.65	1930325	290422
1.5:1	Cyclohexanone	5.942	1827435	311020	5.936	1803676	308501	5.938	1841095	316869
	Z-citral	11.107	4573332	552357	11.105	4566860	557242	11.112	4855795	582384
	E-citral	11.631	1351936	211687	11.63	1366103	213471	11.635	1457763	226968
2:1	Cyclohexanone	5.936	1756925	303814	5.941	1877314	316782	5.94	1915950	324941
	Z-citral	11.108	4633951	555571	11.12	5138276	601952	11.119	5112999	599465
	E-citral	11.63	1276329	206819	11.638	1409423	228517	11.638	1407438	227777

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ง-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

Citral:β-CD	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
1:1	Cyclohexanone	5.952	1684258	291242	5.947	1526038	267362	5.939	1706981	285504
	Z-citral	11.092	3093132	419478	11.087	2849583	397650	11.096	3306270	439184
	E-citral	11.73	4277870	517620	11.723	3947616	487204	11.735	4584584	543493
1.5:1	Cyclohexanone	5.956	1824867	312650	5.95	1766842	301125	5.958	1836552	310461
	Z-citral	11.103	3426302	453375	11.096	3261659	436099	11.104	3516786	462404
	E-citral	11.742	4605366	553813	11.735	4393956	539852	11.745	4764620	570218
2:1	Cyclohexanone	5.963	1868238	319571	5.952	1754733	301910	5.954	1805838	308174
	Z-citral	11.094	3104540	420335	11.102	3463871	455193	11.098	3307446	440927
	E-citral	11.731	4185388	519607	11.742	4686598	556773	11.737	4477303	545500

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล เมื่อใช้แกมมาไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

Citral:γ-CD	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
1:1	Cyclohexanone	5.937	1763860	296943	5.937	1741224	297537	5.939	1733808	297389
	Z-citral	11.086	3544846	468866	11.088	3513810	465063	11.087	3551207	470819
	E-citral	11.722	4754327	560226	11.725	4708590	550153	11.724	4772357	558432
1.5:1	Cyclohexanone	5.933	1763860	296943	5.937	1741224	297537	5.939	1733808	297389
	Z-citral	11.086	3544846	468866	11.088	3513810	465063	11.087	3551207	470819
	E-citral	11.722	4754327	560226	11.725	4708590	550153	11.724	4772357	558432
2:1	Cyclohexanone	5.939	1483769	258020	5.931	1657353	282948	5.932	1543671	264055
	Z-citral	11.087	3525739	467993	11.097	3918248	504002	11.094	3733091	483583
	E-citral	11.724	4740319	558513	11.737	5247587	600720	11.731	4998987	581543

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

Day	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	Cyclo.	5.933	1795548	300420	5.935	1835228	312288
	Z-citral	11.096	4134627	519383	11.095	4202678	524998
	E-citral	11.644	1754611	265358	11.643	1768481	268535
1	Cyclo.	5.946	1930590	324207	5.944	1841381	309560
	Z-citral	11.107	4356425	531753	11.642	3963654	481972
	E-citral	11.651	1775179	263552	11.642	1640159	228107
2	Cyclo.	5.945	1948516	327769	5.948	1969201	335869
	Z-citral	11.118	4872926	582850	11.103	4198496	524264
	E-citral	11.659	2413125	294358	11.648	1627129	256062
3	Cyclo.	5.948	2005832	333477	5.938	1699165	290881
	Z-citral	11.1	4024087	501103	11.087	3539060	461826
	E-citral	11.645	1638624	244598	11.636	1454937	214069
4	Cyclo.	5.927	1948407	323706	5.917	1736716	287548
	Z-citral	11.073	3922460	496559	11.06	3371047	442479
	E-citral	11.62	1642632	238839	11.611	1452454	202406
5	Cyclo.	5.93	2273287	371660	5.932	2053209	340029
	Z-citral	11.091	4604467	554450	11.085	4191482	524314
	E-citral	11.632	1857616	272079	11.628	1700119	252646
6	Cyclo.	5.944	1802776	308720	5.941	1897475	316097
	Z-citral	11.091	3732962	478261	11.093	3868112	490887
	E-citral	11.638	1414892	229882	11.64	1645295	242130
7	Cyclo.	5.924	1823656	304723	5.933	2161427	352722
	Z-citral	11.07	3595445	466574	11.094	4536784	552637
	E-citral	11.618	1526177	216696	11.635	1827441	268636

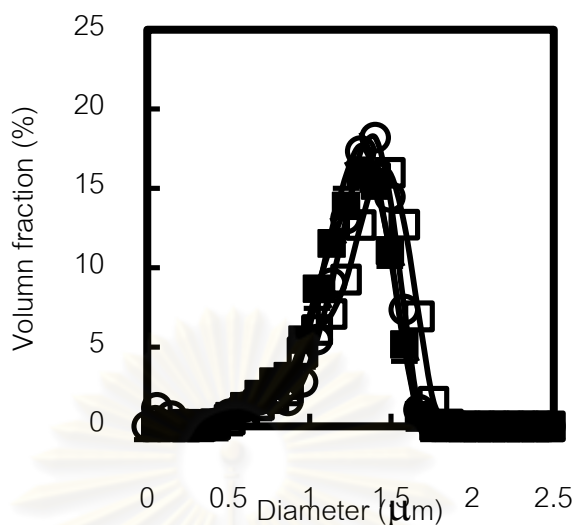
ตารางที่ ง-5 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม

Day	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	Cyclo.	5.952	1684258	291242	5.947	1526038	267362
	Z-citral	11.092	3093132	419478	11.087	2849583	397650
	E-citral	11.73	4277870	517620	11.723	3947616	487204
1	Cyclo.	5.944	1959376	329815	5.944	1941419	326831
	Z-citral	11.084	3435192	454672	11.089	3514272	472890
	E-citral	11.724	4785603	558437	11.729	5027238	585671
2	Cyclo.	5.945	1940042	327159	5.922	1976148	263481
	Z-citral	11.078	3155613	429260	11.078	3374076	448511
	E-citral	11.717	4416902	529360	11.72	4703957	559669
3	Cyclo.	5.937	1817282	306461	5.932	1755326	295846
	Z-citral	11.073	3010896	412482	11.069	2979419	410575
	E-citral	11.711	4237508	517988	11.707	4190875	508086
4	Cyclo.	5.929	1744107	292918	5.927	1675764	282741
	Z-citral	11.065	2820967	390358	11.064	2780477	389053
	E-citral	11.702	3981318	491924	11.702	3932034	485354
5	Cyclo.	5.928	1725732	293868	5.93	1754577	298506
	Z-citral	11.058	2715442	380453	11.061	2805847	392849
	E-citral	11.694	3847202	479950	11.698	3950306	487620
6	Cyclo.	5.955	1991782	336854	5.942	1805193	301883
	Z-citral	11.078	3037314	416125	11.076	2941459	405902
	E-citral	11.715	4276394	517082	11.713	4153852	510411
7	Cyclo.	5.941	1866341	315273	5.935	1730529	292687
	Z-citral	11.074	3147091	422969	11.069	2815177	394261
	E-citral	11.713	4474172	533673	11.706	3971851	488897

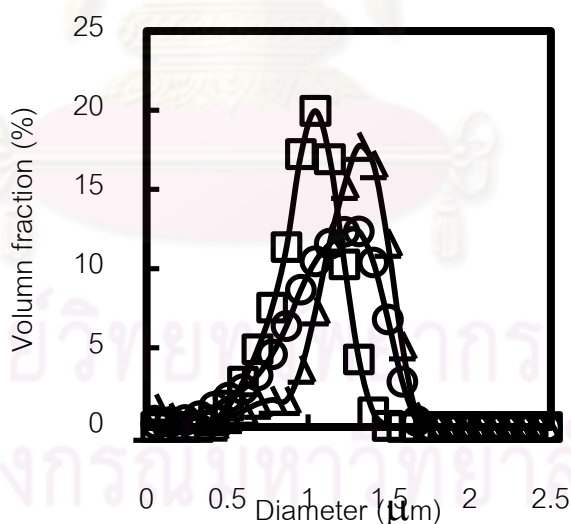
ตารางที่ ง-6 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้แกมมาไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

Day	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	Cyclo.	5.937	1424350	247684	5.93	1690704	290390
	Z-citral	11.041	2038821	305216	11.053	2392423	349210
	E-citral	11.671	2763232	376302	11.685	3235400	422625
1	Cyclo.	5.942	1814164	301915	5.954	1953529	331277
	Z-citral	11.057	2225571	336512	11.065	2288889	356627
	E-citral	11.687	3127081	408607	11.696	3174014	433518
2	Cyclo.	5.945	1867555	314644	5.936	1772539	301405
	Z-citral	11.063	2624202	371740	11.051	2251583	328425
	E-citral	11.694	3514956	446927	11.679	3020190	397765
3	Cyclo.	5.947	1904806	320964	5.941	1835501	306280
	Z-citral	11.055	2346268	344259	11.05	2197268	321292
	E-citral	11.684	3154839	409828	11.678	2962862	389900
4	Cyclo.	5.941	1425012	244136	5.945	2093927	350149
	Z-citral	11.022	2037857	303665	11.038	2285995	318650
	E-citral	11.65	2476764	306512	11.678	3095910	404393
5	Cyclo.	5.937	1844834	311993	5.933	1735221	293180
	Z-citral	11.043	2199158	283597	11.041	1997641	297415
	E-citral	11.67	2864835	371292	11.667	2705747	360736
6	Cyclo.	5.921	1706730	283941	5.919	1629885	271438
	Z-citral	11.025	1982955	270107	11.031	1948762	291516
	E-citral	11.651	2586259	344070	11.652	2632685	350383
7	Cyclo.	5.912	1512566	253548	5.921	1655092	276822
	Z-citral	11.027	1760315	254832	11.026	1933354	288002
	E-citral	11.647	2394535	326910	11.657	2559503	353535

ภาคผนวก ๑ ข้อมูลดิบของการศึกษาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อน



รูปที่ ๑-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารหล่อหุ้ม ที่อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน  $\triangle$  20:80,  $\circ$  50:50,  $\square$  80:20 และ  $\blacksquare$  100:0 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน 20:80, 50:50, 80:20 และ 100:0 เท่ากับ 15.04, 14.82, 19.72 และ 11.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



รูปที่ ๑-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงแห้งน้ำมันตะไคร้เมื่อใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารหล่อหุ้ม ที่อัตราส่วนเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน  $\triangle$  60:40,  $\circ$  80:20 และ  $\square$  100:0 (ขนาดเฉลี่ย; อัตราส่วนแอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินต่อมอลโตเด็กซ์ตริน 60:40, 80:20 และ 100:0 เท่ากับ 16.45, 11.43 และ 8.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ)



ตารางที่ จ-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

$\alpha$ -CD:MD (wt%)	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
20:80	Cyclohexanone	5.945	2013418	335568	5.936	1787575	301563	5.943	1956068	326560
	Z-citral	11.013	1334805	205529	11.009	1194257	181377	11.013	1319192	202929
	E-citral	11.619	1279675	171038	11.615	1125968	143592	11.617	1226491	161166
50:50	Cyclohexanone	5.931	1732307	291408	5.932	1854980	307709	5.933	1792712	296719
	Z-citral	11.054	2611476	363704	11.054	2665562	368969	11.053	2552326	355837
	E-citral	11.62	1347131	189471	11.621	1354437	190365	11.619	1283126	177910
80:20	Cyclohexanone	5.937	1893438	316433	5.946	1971550	330879	5.936	1751206	296358
	Z-citral	11.08	3430010	448295	11.085	3602438	467337	11.088	3675067	473404
	E-citral	11.627	1330204	187717	11.629	1345957	200614	11.631	1349256	199126

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-2 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซิทรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาค่าร้อยละการคงอยู่ของซิทรัล เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ตรินและมอลโตเดกซ์ตริน เป็นสารห่อหุ้ม

$\beta$ -CD:MD (wt%)	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height	Time	Area	Height
60:40	Cyclohexanone	5.913	1764078	297950	5.922	1869984	315229	5.91	1683401	285171
	Z-citral	11.019	2082358	310624	11.026	2196170	322362	11.019	2009709	300826
	E-citral	11.653	2936227	399447	11.66	3092344	415490	11.652	2832338	387069
80:20	Cyclohexanone	5.92	1834117	308071	5.918	1838336	307352	5.914	1675293	284981
	Z-citral	11.031	2335021	338588	11.03	2330076	340135	11.023	2050114	305954
	E-citral	11.666	3276440	431224	11.665	3265647	432289	11.655	2931487	391487

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

Day	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	Cyclo.	1.943	16642	1401	1.938	16806	1424
	Z-citral	9.413	38626	845	9.438	37704	807
	E-citral	11.442	12180	245	11.456	12912	263
1	Cyclo.	1.937	16626	1386	1.964	16594	1356
	Z-citral	9.43	35148	747	9.408	36287	780
	E-citral	11.419	12114	243	11.478	12202	246
2	Cyclo.	1.98	17125	1369	1.939	16973	1413
	Z-citral	9.463	36948	798	9.387	36147	772
	E-citral	11.44	12417	253	11.392	11211	222
3	Cyclo.	1.986	16921	1272	1.942	17671	1445
	Z-citral	9.376	36549	704	9.363	36321	752
	E-citral	11.357	11545	215	11.378	11634	226
4	Cyclo.	1.915	16599	1458	1.916	17567	1450
	Z-citral	9.401	35960	796	9.385	36293	782
	E-citral	11.414	10429	212	11.42	11728	215
5	Cyclo.	2.01	16193	1296	1.957	17558	1433
	Z-citral	9.424	36119	781	9.359	35088	735
	E-citral	11.4	11032	225	11.392	11002	217
6	Cyclo.	2.01	16844	1299	1.948	17843	1443
	Z-citral	9.336	35878	654	9.412	36064	718
	E-citral	11.372	11355	207	11.465	12587	245
7	Cyclo.	2.018	16718	1264	1.968	17353	1376
	Z-citral	9.347	32547	607	9.344	36282	696
	E-citral	11.45	10970	204	11.378	11915	222

ตารางที่ ๑-4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของซีตรัลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับหาความคงตัวของน้ำมันตะไคร้ในผงแห้ง เมื่อใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ตรินและมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม

Day	Peak	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
		Time	Area	Height	Time	Area	Height
0	Cyclo.	1.914	21181	1662	1.915	22825	1816
	Z-citral	9.39	35150	729	9.383	35043	737
	E-citral	11.435	45163	885	11.454	45115	885
1	Cyclo.	1.911	16832	1369	1.904	20953	1679
	Z-citral	9.358	26251	550	9.37	30763	633
	E-citral	11.435	33977	667	11.433	39540	761
2	Cyclo.	1.932	17434	1376	1.914	19806	1576
	Z-citral	9.387	25762	537	9.396	27637	567
	E-citral	11.415	33493	654	11.438	35713	694
3	Cyclo.	1.91	18359	1497	1.919	18511	1485
	Z-citral	9.417	27865	589	9.399	27411	574
	E-citral	11.437	35899	703	11.447	35303	687
4	Cyclo.	1.927	19828	1605	1.911	21163	1649
	Z-citral	9.413	30906	652	9.33	31483	604
	E-citral	11.469	39508	779	11.405	40292	735
5	Cyclo.	1.938	14623	1148	1.92	15523	1225
	Z-citral	9.353	21641	443	9.304	21381	433
	E-citral	11.525	29278	560	11.364	28211	527
6	Cyclo.	1.924	17157	1442	1.923	18147	1476
	Z-citral	9.411	25761	548	9.397	26458	560
	E-citral	11.477	33256	651	11.452	33896	667
7	Cyclo.	1.913	19735	1562	1.958	18588	1447
	Z-citral	9.403	28857	578	9.394	24808	493
	E-citral	11.422	37715	711	11.429	33160	625

ภาคผนวก จ ข้อมูลดิบของการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Candida albicans* ATCC 10231

ตารางที่ จ-1 ปริมาณเชื้อที่ถูกยับยั้งด้วยผงแห้งน้ำมันตะไคร้

Time (hr)	Sample	Colony (CFU/mL)		
		(-1)	(-2)	(-3)
0	Control	249800	278100	234700
		232600	214200	255400
	$\alpha$ -CD 100%	164900	177000	217200
		161500	239000	154700
	$\beta$ -CD 100%	200000	209900	205700
		210200	209000	257300
	$\gamma$ -CD 100%	196200	122200	192100
		199800	132400	194100
	$\alpha$ -CD 80%/MD 20%	156800	307700	224400
		196500	275000	2.764
	$\beta$ -CD 80%/MD 20%	178700	230000	206100
		203500	145700	197500
1	Control	170400	281700	254600
		165700	269100	427900
	$\alpha$ -CD 100%	19880	24500	-
		17490	25450	-
	$\beta$ -CD 100%	158300	186700	276000
		199100	216500	225200
	$\gamma$ -CD 100%	94100	205400	195100
		123100	199200	195500
	$\alpha$ -CD 80%/MD 20%	134300	169000	154800
		139600	179700	195300
	$\beta$ -CD 80%/MD 20%	166700	188900	230400
		196300	198300	179200

ตารางที่ ๑-1 ปริมาณเชื้อที่ถูกลบยั้งด้วยผงแห้งน้ำมันตะไคร้ (ต่อ)

Time (hr)	Sample	Colony (CFU/mL)		
		(-1)	(-2)	(-3)
3	Control	259600	481700	488300
		300900	543500	520000
	$\alpha$ -CD 100%	0	0	0
		0	0	0
	$\beta$ -CD 100%	160200	223100	357000
		189800	341800	306100
	$\gamma$ -CD 100%	97510	100400	
		92800	133600	
	$\alpha$ -CD 80%/MD 20%	100*	50*	0
		140*	10*	0
$\beta$ -CD 80%/MD 20%	165200	286700	226200	
	193600	282000	326600	
5	Control	-	673100	865700
		-	890200	935900
	$\alpha$ -CD 100%	0	0	0
		0	0	0
	$\beta$ -CD 100%	159300	211500	234800
		197200	273700	224200
	$\gamma$ -CD 100%	20490	220000	-
		18130	240000	-
	$\alpha$ -CD 80%/MD 20%	0	0	0
		0	0	0
$\beta$ -CD 80%/MD 20%	188000	323300	244900	
	194400	321700	326700	

หมายเหตุ: \* จำนวนโคโลนี



ตารางที่ ๑-1 ปริมาณเชื้อที่ถูกลบยั้งด้วยผงแห้งน้ำมันตะไคร้ (ต่อ)

Time (hr)	Sample	Colony (CFU/mL)		
		(-1)	(-2)	(-3)
7	Control	-	1306000	1979000
		-	1514000	1846000
	$\alpha$ -CD 100%	0	0	0
		0	0	0
	$\beta$ -CD 100%	151200	300200	274400
		173900	202500	306300
	$\gamma$ -CD 100%	15390	15470	54060
		14588	68190	49890
	$\alpha$ -CD 80%/MD 20%	0	0	0
		0	0	0
	$\beta$ -CD 80%/MD 20%	215700	376700	275400
		195400	213000	213400

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

- การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างน้ำมันตะไคร้กับแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตริน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สมการค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา;

$$K_{1:1} = \frac{\text{Slope}}{CD_0(1 - \text{slope})}$$

วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซีตรัล (แกน X) และความเข้มข้นของไซโคลเด็คซ์ตริน (แกน y) สามารถหาสมการเส้นตรงได้ คือ  $y = 0.3756x + 3.7233$

$$K_{1:1} = \frac{0.3756}{3.7233(1 - 0.3756)}$$

$$K_{1:1} = 0.162 \text{ M}^{-1}$$

## ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล

- อัตราโดยโมลของซีตรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็คซ์ตริน เท่ากับ 1:1

$$\text{ร้อยละการคงอยู่ของซีตรัล} = \frac{\text{ปริมาณซีตรัลในผงแห้ง (Dry basis)} \times 100}{\text{ปริมาณซีตรัลในสายป้อน}}$$

โดย

$$\text{ปริมาณซีตรัลในผงแห้ง (Dry basis)} = \frac{\text{ปริมาณซีตรัลคำนวณจาก Standard curve (กรัม)}}{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดในผงแห้ง (กรัม)}}$$

$$= \frac{0.0027}{0.0456}$$

$$= 0.0597$$

$$\text{ปริมาณซีตรัลในสายป้อน} = \frac{\text{ปริมาณซีตรัลในน้ำมันตะไคร้ (กรัม)}}{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดในสายป้อน (กรัม)}}$$

$$= \frac{15.71}{100}$$

$$= 0.1571$$

$$\text{ดังนั้น ร้อยละของการคงอยู่ของซีตรัล} = \frac{0.0597 \times 100}{0.1571}$$

$$= 20.39$$

#### ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อ

- อัตราส่วนโดยโมลของซีตรัลต่อแอลฟาไซโคลเด็กส์ตริน เท่ากับ 1:1 ที่เวลา 0 ชั่วโมง

เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อ

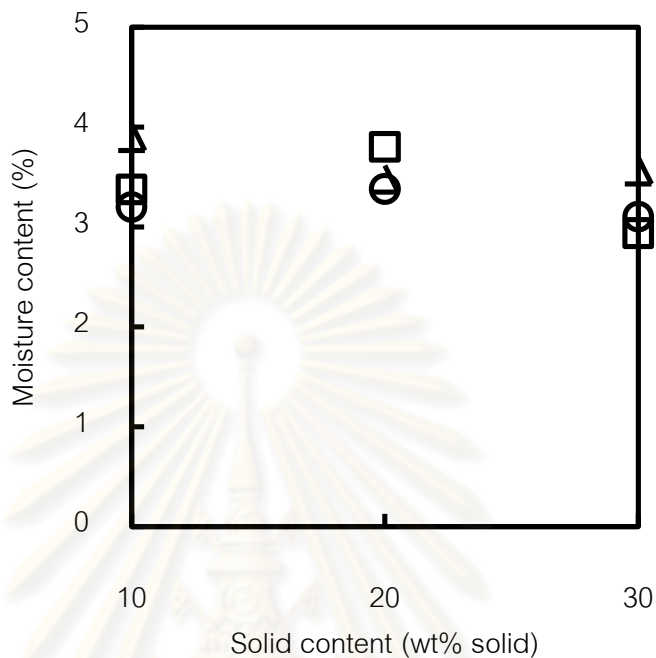
$$= \frac{(\text{จำนวนเชื้อที่อยู่ในอาหาร} - \text{จำนวนเชื้อที่ถูกยับยั้งด้วยสารทดสอบ})}{\text{จำนวนเชื้อที่อยู่ในอาหาร}} \times 100$$

$$= \frac{249800 - 164900}{249800} \times 100$$

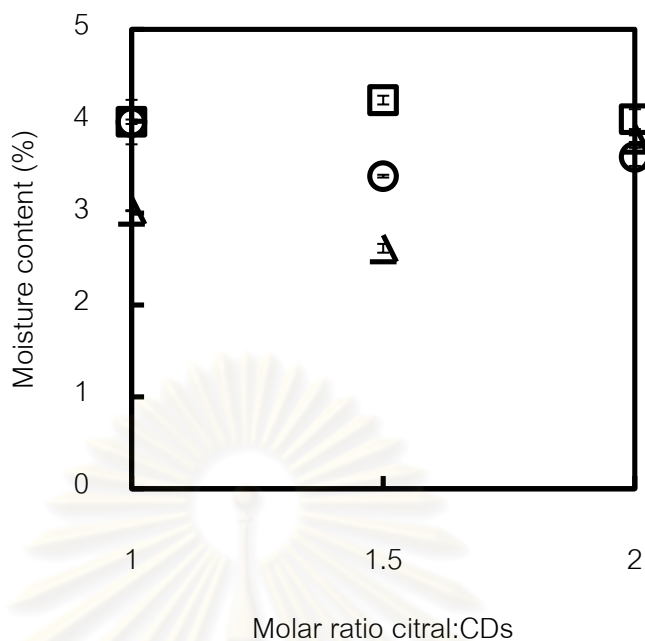
$$= 33.99 \%$$

ดังนั้น ร้อยละการลดลงของเชื้อ เท่ากับ 33.99 เปอร์เซ็นต์

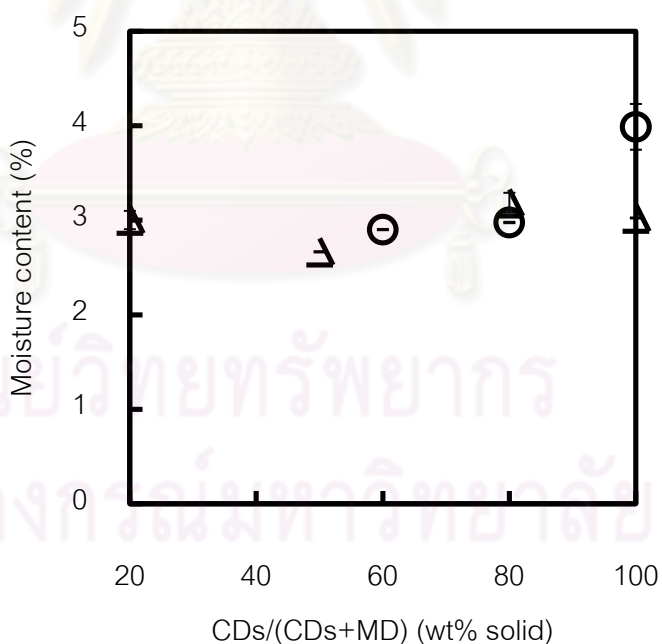
ภาคผนวก ซ  
ผลความชื้นของผงแห้งน้ำมันตะไคร้



รูปที่ ฅ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินในสายป้อนที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ; △ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน, ○ เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ □ แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ ๓-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณซิทรัลในสายป้อนที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน,  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\square$  แกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ ๓-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในผงแห้งต่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อนที่ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ;  $\Delta$  แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตริน และ  $\circ$  เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ศรัญญา พันปี เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนชลประทานวิทยา จากนั้นศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปี 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปี 2553



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย