



ความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซล  
ด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน  
A Possibility of Glycerol Recovery from Crude Glycerol of Biodiesel Process  
Using Cyclodextrin

จันทร์เพ็ญ อิศโร  
Chanphen Issaro

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Environmental Management  
Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                    ความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิต  
                                              ไบโอดีเซลด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน

ผู้เขียน                                นางสาวจันทร์เพ็ญ อิศโร

สาขาวิชา                            การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรจง วิทธีวีรศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
(ดร.พลพัฒน์ รวบรวมเจริญ)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....กรรมการ  
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....  
(ดร.ธันวาคม เตชะภัทวารกุล สุขสาโรจน์)

.....กรรมการ  
(ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิต ไบโอดีเซลด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน
ผู้เขียน	นางสาวจันทร์เพ็ญ อิศโร
สาขาวิชา	การจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอล โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็กซ์ตริน 4 ชนิด พบว่า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟาสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ได้ดีที่สุด รองลงมา คือ ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอะเซทิลเบต้า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ตามลำดับ สำหรับการศึกษานี้ในลำดับถัดมาได้ทำการศึกษาไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าเพียงชนิดเดียว เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าเป็นไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีราคาสูงกว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอื่น เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method เป็นวิธีการที่สามารถทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี evaporation method และ co-precipitation method ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากความสูงของสเปคตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เมื่อนำส่วนของสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method มาศึกษาปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือโดยการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าและปริมาณกลีเซอรอลที่ต่างกัน พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือลดลงได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าและปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมีปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือเท่ากับร้อยละ 13.60 ในส่วนของการศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ พบว่า การเติมสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method เป็นวิธีการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ดีที่สุด การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ โดยวิธี dry mixing method พบว่า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลดิบได้ แต่ให้สเปคตรัมการเลี้ยวเบนของ

รังสีเอ็กซ์ (XRD) ต่างจากกลีเซอรอลบริสุทธิ เมื่อนำกลีเซอรอลดิบไปผ่านกระบวนการฟล็อกกูเลชัน (flocculation) โดยสารพอลิเมอร์ พบว่า ผลึกสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ให้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในตำแหน่งเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ แสดงให้เห็นว่า ในการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลดิบจำเป็นต้องนำกลีเซอรอลดิบไปบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน และลดปัญหาการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับสิ่งปนเปื้อน การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ไซโคลเด็กซ์ทริน เป็นแนวทางในการนำกลีเซอรอลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการจริงจำเป็นต้องศึกษาวิธีการที่เหมาะสมและความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

<b>Thesis Title</b>	A Possibility of Glycerol Recovery from Crude Glycerol of Biodiesel Process Using Cyclodextrin
<b>Author</b>	Miss Chanphen Issaro
<b>Major Program</b>	Environmental management
<b>Academic Year</b>	2009

### **ABSTRACT**

This research aimed to study the inclusion complex of cyclodextrin and glycerol. The inclusion complex of pure glycerol and 4 types of cyclodextrins were compared. The results showed that alpha-cyclodextrin gave the best yield of inclusion complex between cyclodextrin and pure glycerol, followed by acetyl beta-cyclodextrin, gamma-cyclodextrin and beta-cyclodextrin respectively. Beta-cyclodextrin was selected to be used for the next study because its cost was much lower than others. The study of complexation techniques was also conducted. It was found that dry mixing method was the best technique for inclusion complexation between cyclodextrin and pure glycerol, followed by evaporation method and co-precipitation method, respectively. These results were obtained from a comparison of the height of x-ray diffraction peaks of inclusion complexes. The amounts of remaining glycerol in supernatant of complexation with co-precipitation techniques after adding different amounts of beta-cyclodextrin and pure glycerol were studied. It was found that the addition of 10% beta-cyclodextrin and pure glycerol was best for reduction of remaining glycerol (13.6%). The study of interruption of inclusion complexation was also investigated. It was found that addition of 0.034 mol/L NaCl with co-precipitation method was the best technique to interrupt the complexation. An inclusion complexation of beta-cyclodextrin and crude glycerol using dry mixing method was studied. Beta-cyclodextrin could form an inclusion complex with crude glycerol, but gave an x-ray diffraction peak position different from that of inclusion complex with pure glycerol. However, when the crude glycerol was pretreated by polymer flocculation, the x-ray diffraction peak of the complexation had similar position with that of beta-cyclodextrin and pure glycerol. Therefore, the inclusion complex between cyclodextrin and crude glycerol need a pretreatment process for removal of contaminants and reduction of the contaminant complexation. The recovery of pure

glycerol from biodiesel process using cyclodextrin may be an alternative for crude glycerol utilization and waste reduction. Anyway, appropriate technique and a cost-effectiveness evaluation should be further studied for future application.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.ชาคริต ทองอุไร และดร.ธันวดี เดชะภัทวรกุล สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.วิรัช ทวีปรีดา รศ.ดร.บรรจง วิทย์วิรศักดิ์ และดร.พลพัฒน์ รวมเจริญ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินการศึกษาวิจัยและความรู้ในด้านอื่นๆ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เป็นผลวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เจ้าหน้าที่สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์ม และพืชน้ำมัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการอนุเคราะห์ตัวอย่างกลีเซอรอลดิบสำหรับใช้ในการทดลอง และให้ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซล และข้อมูลอื่นๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษานี้

ขอขอบคุณบริษัทอีสต์ เอเชียติก (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลทางห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณคณาจารย์ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อกระจ่าง อิศโร และคุณแม่พันธ์ อิศโร ที่ให้ความรัก ความห่วงใย เป็นกำลังใจให้เสมอมา ตลอดจนให้การสนับสนุนเงินทุนในการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจซึ่งกันและกันมาโดยตลอด ขอมอบคุณความดี และประโยชน์ทั้งหลายที่เกิดจากการทำวิจัยครั้งนี้ แด่ทุกท่านที่มีส่วนร่วมทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จันทร์เพ็ญ อิศโร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
1. ไบโอดีเซล	3
2. ก्लीเซอรอลบริสุทธิ์	5
3. ก्लीเซอรอลดิบ	11
4. การทำก्लीเซอรอลให้บริสุทธิ์	15
5. ไชโคลเด็กซ์ตริน	18
6. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไชโคลเด็กซ์ตริน	21
7. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน	26
8. การแยกสารประกอบเชิงซ้อนของไชโคลเด็กซ์ตริน	29
9. พอลิเมอร์	30
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
วัตถุประสงค์	33
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	33
บทที่ 2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	
1. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์	34
2. วิธีดำเนินการวิจัย	38
3. การรายงานผลและการวิเคราะห์ข้อมูล	46
4. สถานที่ศึกษาวิจัย	46



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	
1. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า	46
2. ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์	47
- การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลในสารละลายที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method	67
3. ประสิทธิภาพการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์	77
4. ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ	91
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	
สรุปผลการทดลอง	108
ข้อเสนอแนะ	110
เอกสารอ้างอิง	111
ภาคผนวก	
ก. ผลการทดลอง	123
ข. ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน	124
ค. สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด	134
ง. การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือ	138
จ. ราคาไซโคลเด็กซ์ตริน	140
ประวัติผู้เขียน	141

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1-1	สมบัติของกลีเซอรอลบริสุทธิ์	8
1-2	ต้นทุนการระเหยน้ำออกจากกลีเซอรอลดิบ	17
1-3	ต้นทุนการกลั่นกลีเซอรอล	17
1-4	คุณสมบัติของไซโคลเด็กซ์ตริน	19
1-5	การดำเนินการที่เหมือนหรือแตกต่างกันของวิธีการเตรียมสารประกอบ เชิงซ้อน	24
2-1	สภาวะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	36
2-2	สภาวะการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด	37
ก-1	การละลายของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าที่อุณหภูมิระหว่าง 30-80 องศา- เซลเซียส	123
ก-2	ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน	124
ก-3	ราคาไซโคลเด็กซ์ตริน	140

## รายการภาพ

ภาพ		หน้า
1-1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Tranesterification) ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือสัตว์	3
1-2	แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มดิบ	5
1-3	สูตร โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล	6
1-4	กระบวนการสะปอนนิฟิเคชันจากการผลิตสบู่	6
1-5	กระบวนการไฮโดรไลซิสจากการผลิตกรดไขมัน	7
1-6	กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากการผลิตเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล	7
1-7	การใช้ประโยชน์กลีเซอรอลดิบ (a) เตากลีเซอริน (b) การใช้เตากลีเซอริน ในการดึงกลับเมทานอลจากกลีเซอรอลดิบ	11
1-8	กระบวนการกลั่นกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์	16
1-9	ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตริน	19
1-10	ลักษณะโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน	20
1-11	การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของสารอื่นกับไซโคลเด็กซ์ตริน	21
1-12	แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	27
1-13	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
1-14	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด	29
2-1	กลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	35
2-2	เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	35
2-3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
2-4	เครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด	37
3-1	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า	46
3-2	ลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าละลายน้ำที่อุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส จากซ้ายไปขวา ตามลำดับ เมื่อนำมาวางที่อุณหภูมิห้อง	47
3-3	ผลึกที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method (a) สารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ผ่านการระเหยน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส	48
3-4	กลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method	49
3-5	ลักษณะสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel	49
3-6	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20	51
3-7	ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลร้อยละ 10	52
3-8	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method	53

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3-9	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟาบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20	54
3-10	ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา ที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลร้อยละ 10	55
3-11	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method	56
3-12	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20	57
3-13	ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา ที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา กับกลีเซอรอลร้อยละ 10	58

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3-14	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเกมมาและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method	59
3-15	ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านการระเหยน้ำ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านการระเหยน้ำเมื่อนำมาเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร	60
3-16	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20	61
3-17	ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลร้อยละ 10	62
3-18	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตาและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method	63

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3-19	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) โซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20	65
3-20	ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าที่เตรียมด้วยวิธี co-precipitation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลร้อยละ 10	66
3-21	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี co-precipitation method	67
3-22	ปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือในสารละลายไซของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method ของการเติมปริมาณโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า 5 10 20 30 40 และ 50 กรัม ตามลำดับ	68
3-23	ปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือในสารละลายไซของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method ของการเติมปริมาณกลีเซอรอล 5 10 20 30 40 และ 50 กรัม ตามลำดับ	69
3-24	ผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับโซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าจากการเตรียมด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) อุณหภูมิห้อง (b) แช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (c) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (d) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	70

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3-25	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง (c) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (e) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	71
3-26	ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (c) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (d) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	72
3.27	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิห้อง	74
3-28	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส	74
3-29	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	75



## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3-30	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	75
3-31	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.34 โมลต่อลิตร	78
3-32	ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์	79
3-33	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร	80
3-34	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรีย (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.0085 โมลต่อ	

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3-35	ลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย	81
3-36	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร	82
3-37	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลต่อลิตร	83
3-38	ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์	85
		86

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3-39	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร	87
3-40	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรีย (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร	88
3-41	ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย	89
3-42	สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร	90
3-43	ตะกอนสีน้ำตาลอ่อนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบด้วยวิธี dry mixing method	92
3-44	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอล	

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
ดิวที่อุณหภูมิต่าง (c) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง 80 องศาเซลเซียส	93
3-45 ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง (c) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิวที่ 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิวที่ 80 องศาเซลเซียส	94
3-46 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง	96
3-47 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง 10 องศาเซลเซียส	96
3-48 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวที่อุณหภูมิต่าง 80 องศาเซลเซียส	97
3-49 ไป โอติเซลบริสุทธิ์	98
3-50 เจลที่มีผลึกสีขาวเป็นองค์ประกอบของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดเบต้ากับไป โอติเซลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method	98

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
3-51	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 1.5 มิลลิลิตร (c) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 3 มิลลิลิตร (d) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 6 มิลลิลิตร	99
3-52	ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์	100
3-53	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์	101
3-54	การกำจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้น (pretreatment) ของกลีเซอรอลดิบโดยการเติมสารผสมระหว่างโพลิเอมีนกับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (a) ตะกอนที่ได้จากการกำจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้นออกจากกลีเซอรอลดิบ (b) ผลึกสีน้ำตาลอ่อนที่ได้จากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน	103
3-55	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (c) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 1 มิลลิลิตร (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่	

ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 2 มิลลิลิตร (e) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 3 มิลลิลิตร	104
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### รายการภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3-56	ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน	105
3-57	สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน	106
ก-1	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกลีเซอรอลบริสุทธิ์	134
ก-2	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกลีเซอรอลดิบ	135
ก-3	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน	135
ก-4	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์	136
ก-5	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของยูเรีย	136
ก-6	สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโซเดียมคลอไรด์	137

# บทที่ 1

## บทนำ

### บทนำสั้นเรื่อง

กลีเซอรอลเป็นสารเคมีที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยนิยมใช้เป็นสารเพิ่มความหวาน สารกันบูด และใช้ในทางการแพทย์ เป็นต้น กลีเซอรอลสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิสจากการผลิตกรดไขมัน กระบวนการสะปอนนิฟิเคชันจากการผลิตสบู่และกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากการผลิตไบโอดีเซล ในปัจจุบันกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกทดแทนการใช้พลังงานน้ำมันจากฟอสซิล

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศโดยเฉพาะน้ำมันเพื่อรองรับความต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี นับเป็นมูลค่าเงินตราที่ต้องสูญเสียให้แก่ต่างประเทศปีละกว่า 300,000 ล้านบาท (คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545) การผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดอัตราการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ประกอบกับรัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลในรถยนต์และเครื่องจักร โดยการจัดสรรงบประมาณให้แก่กองทุนน้ำมัน เพื่อประคองราคาไบโอดีเซลให้มีราคาถูกลงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้ประชาชนหันมาใช้ไบโอดีเซลมากขึ้น

ไบโอดีเซล เป็นคำที่ใช้เรียกน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่นำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล และใช้เรียกเฉพาะน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีแล้วเท่านั้น ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ และไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วให้ความสนใจผลิตและใช้ไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย โดยมีการทดลองผลิตเพื่อใช้เองในครัวเรือน การผลิตในระดับโรงงานต้นแบบ จนถึงระดับการผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม ในสหภาพยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกามีการผลิตและจำหน่ายในประเทศซึ่งได้รับการยอมรับจาก

อุตสาหกรรมผู้ผลิตรถยนต์และผู้ค้าน้ำมัน สำหรับประเทศไทย การใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันจากฟอสซิลได้รับความสนใจมาเป็นเวลานาน และเมื่อมีการประชาสัมพันธ์เรื่องการใช้น้ำมันปาล์มก้นบริสุทธิทดแทนน้ำมันดีเซลตามแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว จึงได้มีการใช้อย่างกว้างขวางและหลายรูปแบบ

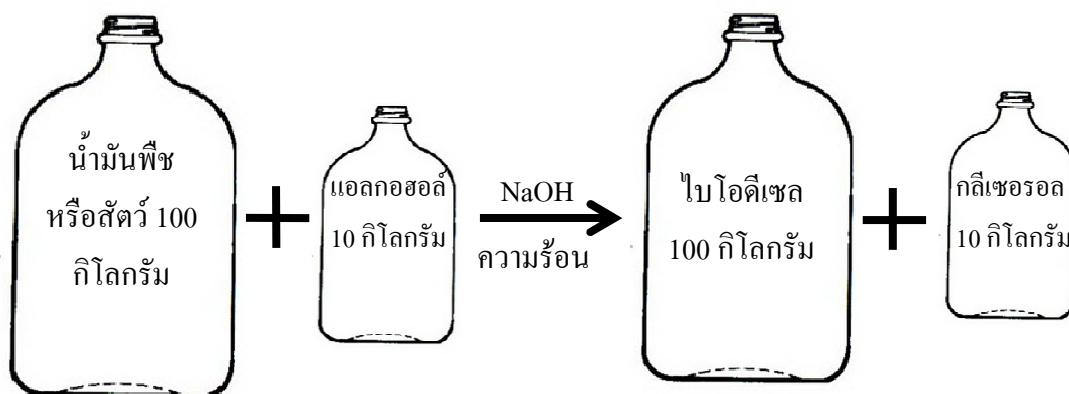
ในการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันหรือไขมันจากพืชและสัตว์ รวมไปถึงน้ำมันที่ผ่านการใช้งานหรือน้ำมันเหลือทิ้งในครัวเรือน ได้กลีเซอรอลเป็นผลผลิตพลอยได้ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ (ศิริพร จงผาดิวุฒิ, 2551) เห็นได้ว่าการผลิตไบโอดีเซลทุกๆ 100 กิโลกรัม ได้กลีเซอรอลเป็นผลผลิตพลอยได้ถึง 10 กิโลกรัม นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก โดยกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นนี้จะมีปริมาณสิ่งปนเปื้อน เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน เมทานอล น้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา กรดไขมันอิสระ ความชื้น และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลค่อนข้างสูง (วัฒนา ปิ่นเสมอ และคณะ, 2549; ประเทืองสุข มณีล้ำ, 2551) เป็นผลให้ไม่สามารถนำกลีเซอรอลดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เกิดเป็นของเสียที่ยากต่อการบำบัด และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ประกอบกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีมูลค่าสูงกว่าไบโอดีเซล จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจหากมีการศึกษาการนำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงคุณภาพ เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซลด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งอาจนำมาเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถนำกลับจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซลต่อไปในอนาคต เพื่อให้สามารถนำกลีเซอรอลกลับมาใช้ประโยชน์ เพิ่มมูลค่าด้วยการทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ผู้ประกอบการ และลดปริมาณของเสียที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง



## การตรวจเอกสาร

### 1. ไบโอดีเซล (biodiesel)

ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงทดแทนประเภทดีเซลจากธรรมชาติ โดยการนำเอาน้ำมันจากพืช ไขมันสัตว์ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการปรุงอาหาร ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (เอทานอล หรือเมทานอล) และมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงโมเลกุลเล็กลงในรูปของเอทิลเอสเทอร์ หรือเมทิลเอสเทอร์ และมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นกลีเซอรอล (glycerol) ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์มีสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เป็นเชื้อเพลิงรากฐานของประเทศ เนื่องจากผลิตได้จากพืชน้ำมันที่สามารถปลูกในประเทศ และใช้เวลาเพียง 3-5 ปี ที่จะให้น้ำมันออกมา เป็นน้ำมันที่ย่อยสลายโดยธรรมชาติ ไม่มีความเป็นพิษ และไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2545; วัฒนา ปิ่นเสมอ และคณะ, 2549) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ทำให้ได้ผลผลิตคือ ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล ดังแสดงในภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือสัตว์

ที่มา: ศิริพร จงผาคิวฒิ (2551)

## 1.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลของสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ใช้ น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2545) ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลดังแสดงในภาพที่ 1-2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถูกเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วถูกนำมากรอง ส่วนในกรณีการใช้น้ำมันปาล์มดิบต้องนำมาจัดขางเหนียวและลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก นำน้ำมันปาล์มดิบใส่ในถังลดกรดให้อุณหภูมิ น้ำมันปาล์มอยู่ในช่วง 80-85 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อลดกรด ตรวจสอบกรด ให้เหลือกรดไม่เกินร้อยละ 1

- จัดน้ำออก โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 20 นาที

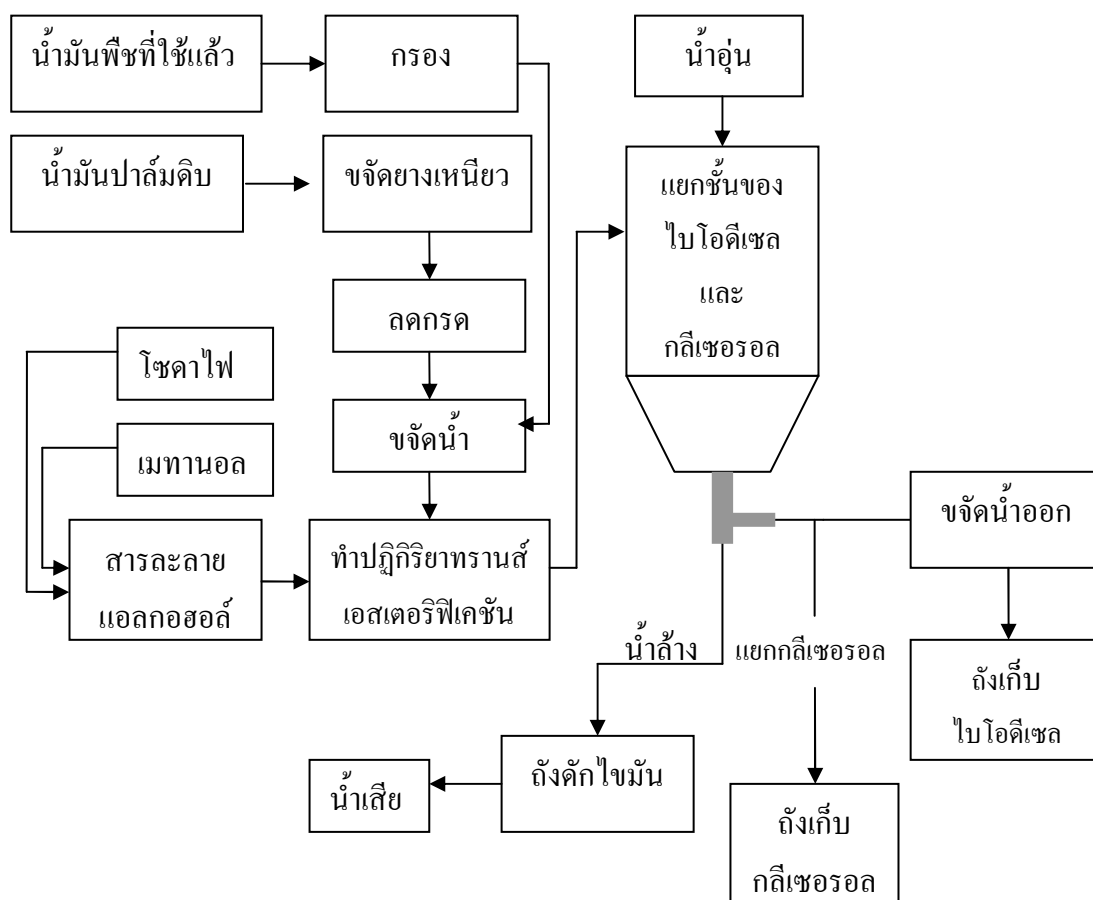
- ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยน้ำมันที่ถูกขจัดน้ำออกแล้วถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทิ้งไว้ประมาณ 3-4 ชั่วโมง

- การแยกกลีเซอรอล กลีเซอรอลจะแยกตัวจากน้ำมันอยู่ที่ก้นถัง ถ่างกลีเซอรอลใส่ภาชนะตั้งทิ้งไว้ เมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวเป็นของแข็ง เนื่องจากกลีเซอรอลที่ได้เกิดการรวมตัวอยู่กับสบู่ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งหากเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้กลีเซอรอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเป็นของเหลว

- การล้างสิ่งปนเปื้อนออก ล้างด้วยน้ำอุ่นหลายครั้ง ซึ่งการล้างครั้งแรกกระทำโดยการฟ้นละอองน้ำลงด้านบนของถังเพื่อให้หยดน้ำเล็กๆ พาส่งปนเปื้อนตกลงด้านล่างของถัง

- การขจัดน้ำออกครั้งสุดท้าย โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 20 นาที เป็นการขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นไบโอดีเซล

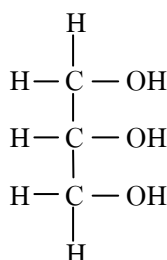
- ถายน้ำมันเก็บในภาชนะ โดยถายน้ำมันที่ผ่านการขจัดน้ำออกครั้งสุดท้ายหลังจากที่ตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิตกลง บรรจุใส่ถัง ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล



ภาพที่ 1-2 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มดิบ  
ที่มา: ดัดแปลงจาก ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2545)

## 2. กลีเซอรอลบริสุทธิ์

กลีเซอรอล (glycerol) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (glycerin) หมายถึง สารจำพวกโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซี 3 หมู่ มีสูตรโครงสร้างเป็น  $C_3H_8O_3$  มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3 – โพรเพนไทรออล (1,2,3 – propanetriol) ดังแสดงในภาพที่ 1-3 ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1779 โดยนักเคมีชาวสวีเดนชื่อ Karl Wilhelm Scheele จากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification) ของน้ำมันมะกอก กลีเซอรอลที่ถูกค้นพบนี้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหวานตามธรรมชาติ แต่มีสมบัติแตกต่างจากน้ำตาลและน้ำผึ้ง ในปี ค.ศ. 1811 นักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ Michel Eugène Chevreul ได้ตั้งชื่อสารให้ความหวานชนิดนี้ว่า กลีเซอรอล มาจากคำว่า glycos ในภาษากรีก แปลว่า หวาน จากการศึกษาต่อมาได้มีการค้นพบว่า กลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบหลักในไขมัน และน้ำมันเกือบทุกชนิด



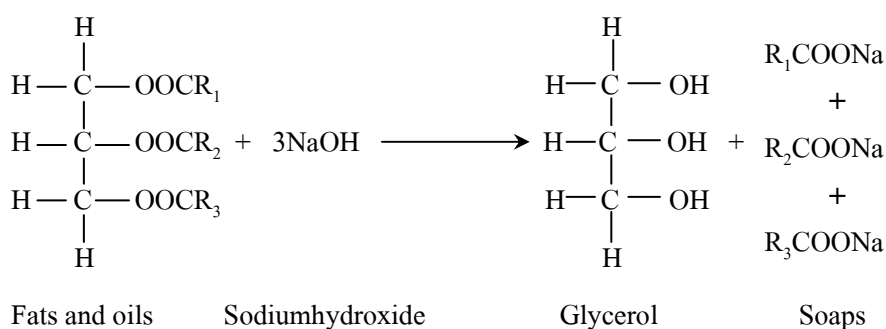
ภาพที่ 1-3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล

ในระยะแรกที่มีการค้นพบกลีเซอรอล ได้มีการนำกลีเซอรอลไปใช้ในการผลิตกาว ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้กาวมีความเหนียว และรวมตัวกันได้ดียิ่งขึ้น ในเวลาต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ในการทำสีย้อม และน้ำหมึก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1867 นักเคมีชาวสวีเดนชื่อ Alfred Nobel ได้คิดค้นวิธีผลิตระเบิดไดนาไมต์ โดยใช้กลีเซอรอลที่ทำให้อยู่ในรูปของไนโตรกลีเซอริน (nitroglycerine) มาผสมกับซิลิกา (silica) ได้สารที่สามารถระเบิดได้ จุดนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการนำกลีเซอรอลมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน (Felter and Lloyd, 2000)

## 2.1 แหล่งที่มาของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จาก 3 กระบวนการหลัก ดังนี้

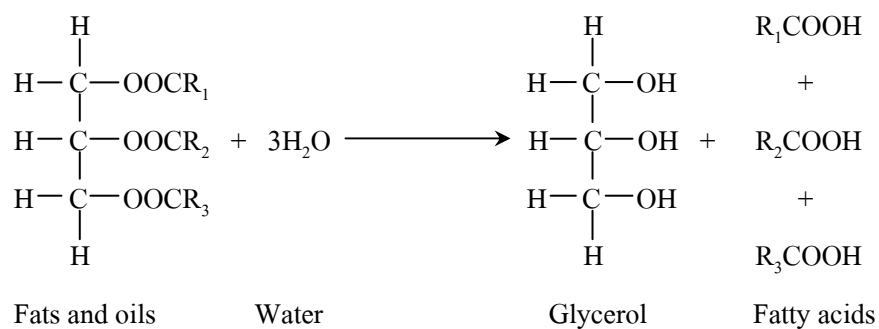
- กระบวนการสะaponนิฟิเคชันจากการผลิตสบู่ ดังแสดงในภาพที่ 1-4



ภาพที่ 1-4 กระบวนการสะaponนิฟิเคชันจากการผลิตสบู่

ที่มา: Jangermann (1991)

- กระบวนการไฮโดรไลซิสจากการผลิตกรดไขมัน ดังแสดงในภาพที่ 1-5

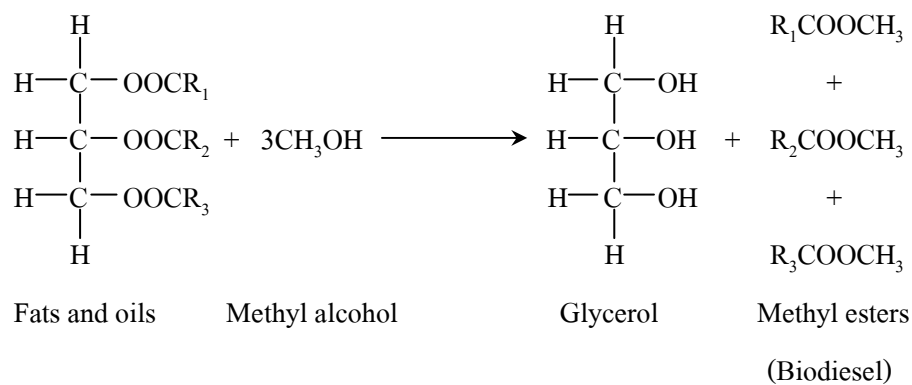


**ภาพที่ 1-5** กระบวนการไฮโดรไลซิสจากการผลิตกรดไขมัน

ที่มา: Jangermann (1991)

- กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากการผลิตเมทิลเอสเตอร์หรือ

ไบโอดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 1-6



**ภาพที่ 1-6** กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากการผลิตเมทิลเอสเตอร์หรือไบโอดีเซล

ที่มา: Jangermann (1991)

กลีเซอรอลบริสุทธิ์มีสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 สมบัติของกลีเซอรอลบริสุทธิ์

สมบัติ	กลีเซอรอลบริสุทธิ์
ลักษณะ	เหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความข้นหนืด
จุดหลอมเหลว	17.8 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	290 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิวิกฤต	492.2 องศาเซลเซียส
ความดันวิกฤต	42.5 ความดันบรรยากาศ
มวลโมเลกุล	92.09
ความถ่วงจำเพาะ	1.26 กรัม/ซม <sup>3</sup>
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ ละลายได้บ้างในตัวทำละลายชนิดอื่น ยกเว้นพวกไฮโดรคาร์บอน

ที่มา: สุธารักษ์ บุญโชติ (2547)

นอกจากนี้กลีเซอรอลยังมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้ (วิภา สุโรจนะเมธากุล, 2546)

- กลีเซอรอลไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ (oxidize) จึงมีความคงตัวสูง (high stability)
- ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และกลิ่นรส เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน
- ละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท
  - ทนต่อสภาวะการแช่เยือกแข็งและการละลาย
  - มีความข้นหนืด จึงสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความเข้มข้น (thickening) หรือสารช่วยเพิ่มเนื้อสาร (body) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหรือเจล
  - มีรสชาติหวานเล็กน้อย โดยมีค่าความหวานประมาณร้อยละ 55-75 ของระดับความหวานน้ำตาลซูโครส (ขึ้นกับระดับความเข้มข้นที่ใช้)
  - ไม่มีกลิ่นรุนแรง จึงสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวานได้ดี โดยไม่มีผลต่อกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์

- กลีเซอรอลมีสมบัติเป็นสารดูดความชื้น (humectants) และสารให้ความยืดหยุ่น (plasticizer) ช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงความนุ่มนวล มีความหยุ่นตัวดี มีลักษณะคล้ายครีม (creaminess) และช่วยยืดอายุของผลิตภัณฑ์
- มีความดันไอต่ำ และไม่ระเหยที่อุณหภูมิปกติ เป็นสารไม่มีพิษ (nontoxic) ต่อระบบการย่อยอาหาร ผิวหนัง และเนื้อเยื่ออ่อนๆ
- ไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม
- กลีเซอรอลได้รับอนุญาตจาก GRAS (generally recognized as safe) จากสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 โดยจัดอยู่ในรายการของสารที่มีคุณสมบัติหลากหลาย

## 2.2 การใช้ประโยชน์กลีเซอรอล

จากคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของกลีเซอรอลที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีและให้สารอนุพันธ์ได้หลายชนิด ประกอบกับการที่กลีเซอรอลไม่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ กลีเซอรอลจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท (วิภา สุโรจนะเมธากุล, 2546; ศิริพร จงผาดิวุฒิ, 2551) ได้แก่

- ผลิตภัณฑ์ดูแลรักษาช่องปาก

กลีเซอรอลถูกนำมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ยาสีฟันและในน้ำยาบ้วนปาก เพราะมีคุณสมบัติในการเก็บรักษาความชื้นได้ดี ช่วยทำให้เนื้อยาสีฟันลื่น และเงา ทำให้ยาสีฟันไม่แข็งตัวเมื่อบรรจุอยู่ในหลอด นอกจากนี้ยังให้รสหวาน และเป็นตัวกลางสำหรับส่วนผสมชนิดอื่นๆ ที่เติมลงไป

- ผลิตภัณฑ์อาหาร

มีการนำกลีเซอรอลมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหลายประเภท โดยใช้ในรูปแบบของวัตถุเจือปนอาหาร ทั้งในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม โดยมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น กลีเซอรอลถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในวนิลลา และสารสกัดอื่นๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและตัวดูดความชื้น ใช้เป็นส่วนผสมของเค้กและไอศกรีมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงรับประทาน และช่วยลดปริมาณน้ำตาลที่ต้องใช้ ลดปัญหาการเกิดราในขนมเค้ก ช่วยป้องกันการระเหย และการตกผลึก ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มในผลไม้อบแห้ง และลูกอม เป็นต้น กลีเซอรอลได้ถูกใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการห่อหุ้มอาหาร เช่น เนื้อสัตว์ และเนยแข็ง เพื่อรักษาความชุ่มชื้นของอาหาร นอกจากนี้ยังมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอล เช่น โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ และสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ อีกด้วย

#### - ผลิภัณฑ์ยาสูบ

ใช้กลีเซอรอลพ่นลงบนใบยาสูบ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเก็บรักษาความชื้น และช่วยให้ใบยาสูบมีความนิ่มและดูใหม่ และนอกจากนี้สารที่เป็นอนุพันธ์ของกลีเซอรอลยังถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของก้นกรองบุหรี่ด้วย

#### - ผลิภัณฑ์น้ำยาทาพื้น สี กาว และสารหล่อลื่น

กลีเซอรอลช่วยให้เกิดความยืดหยุ่น การเติมกลีเซอรอลในส่วนผสมของกาวช่วยให้กาวไม่แห้งเร็วเกินไป ช่วยให้ทำงานสะดวกขึ้น ในสี กลีเซอรอลช่วยให้คุณภาพของสารเคลือบผิวที่อยู่ในส่วนผสมติดกับพื้นผิวที่ต้องการทาได้ดียิ่งขึ้น

#### - ผลิภัณฑ์ยา

กลีเซอรอลถูกนำมาใช้ในผลิภัณฑ์ยาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเนื้อสาร รักษาความชื้นทั้งในยาผงและยาที่เป็นน้ำเชื่อม และใช้เป็นตัวทำละลายสารที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ สำหรับยาเม็ดประเภทแคปซูลใช้กลีเซอรอลเคลือบบนเม็ดยา ส่วนยากลิ้วค้อมักผสมกลีเซอรอลเพื่อเพิ่มความหวาน

#### - ผลิภัณฑ์เครื่องสำอาง

มีการนำกลีเซอรอลมาใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางชนิดต่างๆ เนื่องจากไม่มีพิษและไม่ทำให้เกิดอาการแพ้ เนื่องจากกลีเซอรอลมีสมบัติดูดความชื้นได้ดี กลีเซอรอลจึงถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มความชุ่มชื้น และนุ่มนวลให้กับผิวหนัง และริมฝีปาก ในแชมพู กลีเซอรอลช่วยให้การไหลของแชมพูง่ายขึ้น และเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ในสบู่ สบู่ที่มีกลีเซอรอลช่วยลดอาการผิวแห้งและช่วยบำรุงผิว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังช่วยลดอัตราการเจริญเติบโตและการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในผลิภัณฑ์อีกด้วย

#### - บรรจุกภัณฑ์

กลีเซอรอลสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตบรรจุกภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น กล่องสำหรับบรรจุกอาหาร เพื่อช่วยให้การยืดหยุ่นของบรรจุกภัณฑ์ดีขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์กลีเซอรอลในด้านอื่นๆ เช่น การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ หมึกพิมพ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้เป็นส่วนผสมในสารทำความสะอาด สามารถใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางค์สำหรับนักกีฬา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดการสูญเสีย น้ำของร่างกาย และช่วยให้สามารถออกกำลังกายได้นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม กลีเซอรอลยังมีข้อจำกัดในการใช้สำหรับผู้ที่ เป็นโรคเบาหวาน สตรีมีครรภ์ รวมทั้งผู้ที่มีปัญหาเกี่ยวกับไต หัวใจ และความดันโลหิตสูง



### 3. ก๊าซเซอรอลดิบ

ก๊าซเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะถูกเรียกว่า ก๊าซเซอรอลดิบ หมายถึง ก๊าซเซอรอลที่ยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2538) ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซเซอรอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมทานอล สบู่ กรดไขมัน อิสระหรือน้ำมัน และน้ำ

ด้วยวิกฤตการณ์ราคาพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น และสถานการณ์การเติบโตของ อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลก ทำให้ก๊าซเซอรอลดิบกลายเป็นแหล่งคาร์บอนราคาถูกที่น่าสนใจ ดึงดูดให้นักวิทยาศาสตร์ และผู้ลงทุนให้ศึกษากระบวนการแปรรูปก๊าซเซอรอลดิบ (พิมพ์พรณ มายเออร์, 2551) โดยการใช้ประโยชน์จากก๊าซเซอรอลดิบโดยตรง และการนำก๊าซเซอรอลดิบไปแปรรูปด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่มีมูลค่า

#### 3.1 การใช้ประโยชน์ก๊าซเซอรอลดิบ

การใช้ประโยชน์จากก๊าซเซอรอลดิบโดยตรง ส่วนใหญ่เป็นการใช้ก๊าซเซอรอลดิบเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเตาก๊าซเซอริน ดังแสดงในภาพที่ 1-7 โดยสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ใช้เตาก๊าซเซอรินในการดั่งกลับเมทานอลที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อลดต้นทุนในการจัดซื้อเมทานอล และเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล รวมทั้งสามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเซอรอลดิบได้อีกทางหนึ่งด้วย



ภาพที่ 1-7 การใช้ประโยชน์ก๊าซเซอรอลดิบ (a) เตาก๊าซเซอริน (b) การใช้เตาก๊าซเซอรินในการดั่งกลับเมทานอลจากก๊าซเซอรอลดิบ

ที่มา: สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 3.1.1 การแปรรูปกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

การใช้ประโยชน์กลีเซอรอลดิบ โดยการแปรรูปกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จากการศึกษาของพิมพรรณ มายเออร์ (2551) พบว่า มีการนำกลีเซอรอลดิบไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้แก่

- กระบวนการผลิต 1,3-โพรเพนไดออล (1,3-propanediol)

1,3-โพรเพนไดออล เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตโพลีเอสเตอร์ที่มีชื่อว่า โพลีไตรเมทิลีน เทเรพทาเลต (polytrimethylene terephthalate : PTT) ซึ่งโพลีเอสเตอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่ดีกว่าโพลีเอทิลีน เทเรพทาเลต (polyethylene terephthalate : PET) ในด้านความแข็งแรง ความสวยงาม การยืดหยุ่น และติดสีได้ง่าย (ศิริพร จงผาดิวุฒิ, 2551) จึงเป็นแอลกอฮอล์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตโพลีเอสเตอร์ (polyester) อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมยา (González-Pajuelo *et al.*, 2005) 1,3-โพรเพนไดออลสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรจิโนลิซิส แต่มีข้อเสียคือ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง และต้องใช้ไฮโดรเจนในสถานะความกดดันสูง ส่วนการผลิต 1,3-โพรเพนไดออลด้วยวิธีการทางชีวภาพนั้น ได้ถูกค้นพบมานานแล้ว โดย 1,3-โพรเพนไดออลเป็นผลิตภัณฑ์อันดับแรกๆ ที่ได้จากการหมักกลีเซอรอล (Da silva *et al.*, 2008) ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการหมักกลีเซอรอลคือ *Clostridium Butyricum* แต่แบคทีเรียชนิดนี้มีข้อเสียในเรื่องของการพัฒนาสายพันธุ์เพื่อศักยภาพทางการค้า ต่อมาได้มีการศึกษาและพัฒนาแบคทีเรีย *Clostridium Acetobutylicum* DG1 (pSPD5) ด้วยกระบวนการทางพันธุวิศวกรรมเพื่อใช้ในการแปรรูปกลีเซอรอลดิบให้เป็น 1,3-โพรเพนไดออล (พิมพรรณ มายเออร์, 2551) จากการศึกษาของ González-Pajuelo และคณะ (2005) ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการหมักกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่า แบคทีเรีย *Clostridium Acetobutylicum* DG1 (pSPD5) สามารถย่อยสลายกลีเซอรอลดิบ (มีกลีเซอรอลร้อยละ 65 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ได้ดีเทียบเท่ากับการย่อยสลายกลีเซอรอลบริสุทธิ์

- กระบวนการผลิตเอทานอล (ethanol)

เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักของแป้งและน้ำตาล เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่สามารถใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินจากปิโตรเลียม เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินที่ผสม (พิมพรรณ มายเออร์, 2551) และสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทดแทนเมทานอลที่ผลิตจากก๊าซธรรมชาติ จากการศึกษาของ Ito และคณะ (2005) และ Da silva และคณะ (2008) พบว่า สามารถใช้กลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตเอทานอล โดยอาศัยแบคทีเรีย *Enterobacter*

*Aerogenes* HU 101 ในการย่อยสลายกลีเซอรอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถทำให้เกิดเอทานอล (1 โมลเอทานอลต่อ 1 โมลกลีเซอรอล) และก๊าซไฮโดรเจน (0.89 โมล ก๊าซไฮโดรเจนต่อ 1 โมลกลีเซอรอล) และจากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอล และตั้งปนเปื้อน มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดเอทานอลและก๊าซไฮโดรเจน

- กระบวนการผลิตกรดซิตริก (citric acid)

กรดซิตริกเป็นสารประกอบที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักกากน้ำตาล (molasses) ด้วยรา *Aspergillus Niger* กรดซิตริกถูกใช้อย่างกว้างขวางในการแต่งกลิ่นและรส ของอาหาร เครื่องดื่ม และใช้เป็นส่วนประกอบในผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ยา และเครื่องสำอาง (Da silva *et al.*, 2008) จากการศึกษากระบวนการผลิตกรดซิตริกด้วยการหมักกลีเซอรอลดิบของ Papanikolaou และคณะ (2002) พบว่า ยีสต์สายพันธุ์ *Yarrowia lipolytica* มีความสามารถในการผลิตกรดซิตริกได้เช่นเดียวกับรา *Aspergillus Niger* โดยสามารถผลิตกรดซิตริกได้ 0.42-0.44 กรัม กรดซิตริกต่อกรัมกลีเซอรอล และมีความเข้มข้นของกรดซิตริกเท่ากับ 35 กรัมต่อลิตร ต่อมา Imandi และคณะ (2005) ได้ศึกษาการหมักกลีเซอรอลดิบด้วยยีสต์ *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 ด้วยวิธี Doehlert experimental design โดยเป็นการออกแบบการทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดซิตริก ผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สามารถผลิตกรดซิตริกที่มีความเข้มข้นสูงสุดได้ถึง 77.3999 กรัมต่อลิตร โดยใช้เวลา 0.2682 กรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของกลีเซอรอลดิบเท่ากับ 54.4081 กรัมต่อลิตร

- กระบวนการผลิตโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate)

โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นโพลีเอสเตอร์ที่สามารถพบได้ในเซลล์ของแบคทีเรีย โดยถูกสร้างเป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงานภายในเซลล์ เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (Ashby *et al.*, 2004) ในปัจจุบันจึงมีการนำโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตมาใช้ในอุตสาหกรรมเชิงการแพทย์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเกษตร และอุตสาหกรรมเส้นใย (พิมพ์รณ มายเออร์, 2551) จากการศึกษาของ Ashby และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการแปรรูปกลีเซอรอลให้เป็นโพลีไฮดรอกซีบิวทิเรต (Polyhydroxybutyrate) ซึ่งเป็นโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตชนิดหนึ่ง โดยทำการหมักกลีเซอรอลดิบที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อปริมาตรสารละลาย) ทำการศึกษาในเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด พบว่า แบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas Oleovorans* สามารถผลิตโพลีไฮดรอกซีบิวทิเรตได้ และ *Pseudomonas Corrugate* สามารถผลิตโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตได้ โดย

กลีเซอรอลดิบที่ใช้ในกระบวนการหมักไม่ต้องผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนก่อนการดำเนินการ ส่วนการศึกษาของ Koller และคณะ 2005 พบว่า สามารถใช้ยีสต์ที่เจริญเติบโตได้ดีในสถานะที่มีแรงดันออสโมติกในการผลิตโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต ร่วมกับการใช้กลีเซอรอลดิบเหลวที่มีปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลร้อยละ 70 โดยสามารถผลิตโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตได้ 16.2 กรัมต่อลิตร แต่โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่ผลิตได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือเป็นโซโพลิเมอร์ที่มีสายสั้น

### 3.1.2 การแปรรูปกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการทางเคมี

ในส่วนการใช้ประโยชน์กลีเซอรอลดิบ โดยการแปรรูปกลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการทางเคมี จากการศึกษาของพิมพ์พรรณ มายเออร์ (2551) พบว่า มีการนำกลีเซอรอลดิบไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้แก่

- กระบวนการผลิต 1,2-โพรเพนไดออล (1,2-propanediol)

1,2-โพรเพนไดออล เป็นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร เครื่องสำอาง สารชำระล้าง ผลิตภัณฑ์ยาสูบ สารดูดความชื้น สารปรุงแต่งรส และกลิ่น อุตสาหกรรมเกษตรและอาหารสัตว์ และที่สำคัญสามารถใช้เป็นสารลดจุดเยือกแข็ง (anti-freeze) ทดแทนสารเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นสารเคมีสังเคราะห์ และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต Dasari และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิต 1,2-โพรเพนไดออล พบว่า 1,2-โพรเพนไดออลสามารถผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรจีโนไลซิส (hydrogenolysis) ของน้ำตาล และปฏิกิริยาไฮเดรชันของโพรพิลีนออกไซด์ Suppes และคณะ (2005) ได้จดสิทธิบัตรกระบวนการแปรรูปกลีเซอรอลดิบเป็น 1,2-โพรเพนไดออล เพื่อใช้เป็นสารลดจุดเยือกแข็ง โดยใช้ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของสารละลายกลีเซอรอลดิบ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิไฮโดรเจนต่ำกว่า 25 บาร์ โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 2-96 ชั่วโมง

- กระบวนการผลิตอีเทอร์ (ether)

สารประกอบอีเทอร์ที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลดิบ คือ กลีเซอรอล (โมโน ไค และ ไตร) เทอร์เทียรี บิวทิล อีเทอร์ (mono, di and tri -tertiary butyl ether of glycerol) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างและคุณสมบัติคล้ายกับเมทิล เทอร์เทียรี บิวทิล อีเทอร์ (methyl tertiary butyl ether : MTBE) ซึ่งเป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่ใช้เพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล และเบนซิน สำหรับประเทศไทยใช้ MTBE เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน 95 และสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ แต่ MTBE เป็นสารเคมีที่ย่อยสลายได้ยาก และเป็นสารก่อมะเร็ง (พิมพ์พรรณ มายเออร์, 2551) จากการศึกษากระบวนการผลิตอีเทอร์ของกลี-

เซอร์อลของ Nouredдини และคณะ (1998) โดยใช้กลีเซอรอลดิบทำปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันกับไอโซบิวทีลีน ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง (เรซิน amberlyst 15) ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง โดยกลีเซอรอลดิบที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันนั้นต้องผ่านกระบวนการกำจัดไอออนของโซเดียมด้วยเรซิน amberlyst 15 ก่อน ซึ่งกลีเซอรอลดิบที่ปราศจากไอออนของโซเดียมนี้ สามารถทำปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันให้สารประกอบอีเทอร์เท่ากับการทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และจากผลการทดลองยังระบุว่าสารประกอบอีเทอร์ที่ผลิตได้จากกลีเซอรอลนั้น สามารถนำไปใช้เป็นสารเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อลดค่าความขุ่น และลดความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลได้

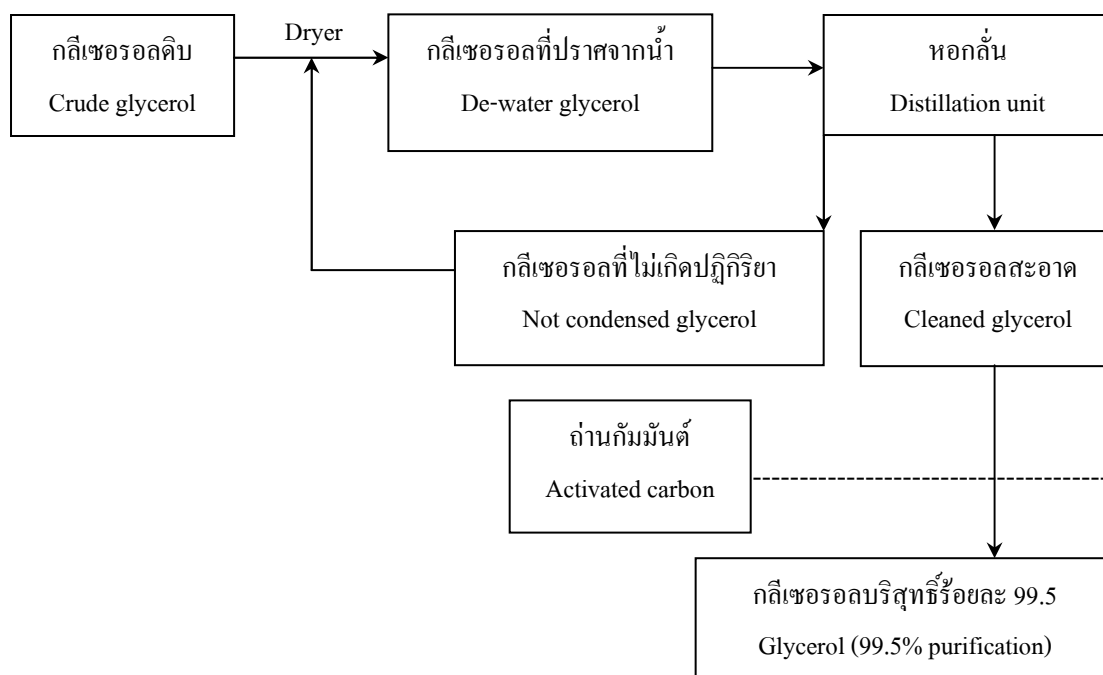
#### 4. การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

การที่กลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะมีมูลค่าและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ต่อไปได้ ต้องนำกลีเซอรอลมาทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น จนมีคุณลักษณะเหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์ กลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถแบ่งได้เป็น 4 ชั้นคุณภาพ (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2538) ได้แก่

- ชั้นคุณภาพเคมี (chemical grade)
- ชั้นคุณภาพไดนาไมต์ (dynamite grade)
- ชั้นคุณภาพอุตสาหกรรม (technical grade)
- ชั้นคุณภาพยา (pharmaceutical grade)

การทำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปใช้กระบวนการกลั่น โดยกลีเซอรอลดิบที่ได้ถูกนำมากำจัดน้ำออก ภายใต้อุณหภูมิที่ควบคุม เพื่อรักษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ จากนั้นกลีเซอรอลดิบที่ปราศจากน้ำแล้วถูกนำเข้าสู่หอกลั่นกลีเซอรอล ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้โดยทั่วไปในการกลั่นกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมอาหาร คือ อุณหภูมิไม่เกิน 255 องศาเซลเซียส เนื่องจากรสชาติ กลิ่น และสี จะเสียไปเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ (จีระพงศ์ รักประสูติ, 2548) ทำให้กระบวนการกลั่นกลีเซอรอลจำเป็นต้องทำภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงๆ เนื่องจากความดันไอของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตรปรอท และกลีเซอรอลจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส การกลั่นกลีเซอรอลจึงต้องทำที่ความดันต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ ได้แก่ ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบของไนโตรเจนจากสารที่มีคุณสมบัติเหมือนโปรตีนในกลีเซอรอลดิบ การเกิดกลีเซอรอลเอสเทอร์จากการทำปฏิกิริยากับสบู่ การเกิดโพลีกลีเซอรอล และการเกิด

อะโครลีน (ปิยนากู อินทนกุล, 2547) ดังนั้นเมื่อต้องการให้กลีเซอรอลกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ต้องดำเนินการกลั่นภายใต้ความดันที่ต่ำกว่า 50 มิลลิเมตรปรอท (สุรารักษ์ บุญโชติ, 2547) ซึ่งเมื่อทำการกลั่นจนได้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ตามที่ต้องการ จะนำไปผ่านการกำจัดสีออกโดยผ่านถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในภาพที่ 1-8



ภาพที่ 1-8 กระบวนการกลั่นกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

เนื่องจากต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลมีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะช่วยให้การผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

ต้นทุนการกลั่นกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โรงงานต้นแบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน คือ การระเหยน้ำออกจากกลีเซอรอลดิบ และการกลั่น โดยใช้กลีเซอรอลเป็นวัตถุดิบตั้งต้น 2,400 กิโลกรัม มีต้นทุนในการดำเนินการดังแสดงในตารางที่ 1-2 และตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-2 ต้นทุนการระเหยน้ำออกจากกลีเซอรอลดิบ

วัตถุดิบตั้งต้น	ลิตร	กิโลกรัม	บาท/หน่วย	รวม	รับ	จ่าย
กลีเซอรอลดิบ (L)	2,400	2,400	4	9,600	-	9,600
เมทานอล 66% (L)	307.26	202.80	15	3,042	3,042	-
เชื้อเพลิง (L)	42.53	-	25	1,063.25	-	1,063.25
พลังงาน (kW-hr)	117.94	-	3	353.82	-	353.82
ระยะเวลาเดินเครื่อง (Running time) (hr)	3.5	-	-	-	-	-
น้ำ (L)	-	4,500	0.013	58.5	-	58.5
แรงงาน (คน)	2	-	250	500	-	500
ระยะเวลา (วัน)	1	-	-	-	-	-

ตารางที่ 1-3 ต้นทุนการกลั่นกลีเซอรอล

วัตถุดิบตั้งต้น	ลิตร	กิโลกรัม	บาท/หน่วย	รวม	รับ	จ่าย
กลีเซอรอลที่ผ่านการ ระเหยน้ำ (L)	2,040.82	-	-	-	-	-
เมทานอล 66% (L)	823.86	378.96	15	5,684.40	5,684.40	-
กลีเซอรอลเข้มข้น	370	466.08	40	18,643.20	18,643.20	-
เชื้อเพลิง (L)	393.16	-	25	9,829	-	9,829
ระยะเวลาเดินเครื่อง (Running time) (hr)	42.42	-	-	-	-	-
น้ำ (L)	-	147,000	0.013	1,911	-	1,911
แรงงาน (คน/วัน)	2	-	250	2,000	-	2,000
ระยะเวลา (วัน)	4	-	-	-	-	-

จากตารางที่ 1-2 และ 1-3 แสดงให้เห็นว่า การกลั่นกลีเซอรอลที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นในปริมาณน้อยนั้น ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ประกอบกับกระบวนการกลั่นกลีเซอรอลที่ดีต้องดำเนินการแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การใช้พลังงานและใช้งบประมาณในการลงทุนสูง จึงได้มีการศึกษาหาแนวทางในการทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น การ

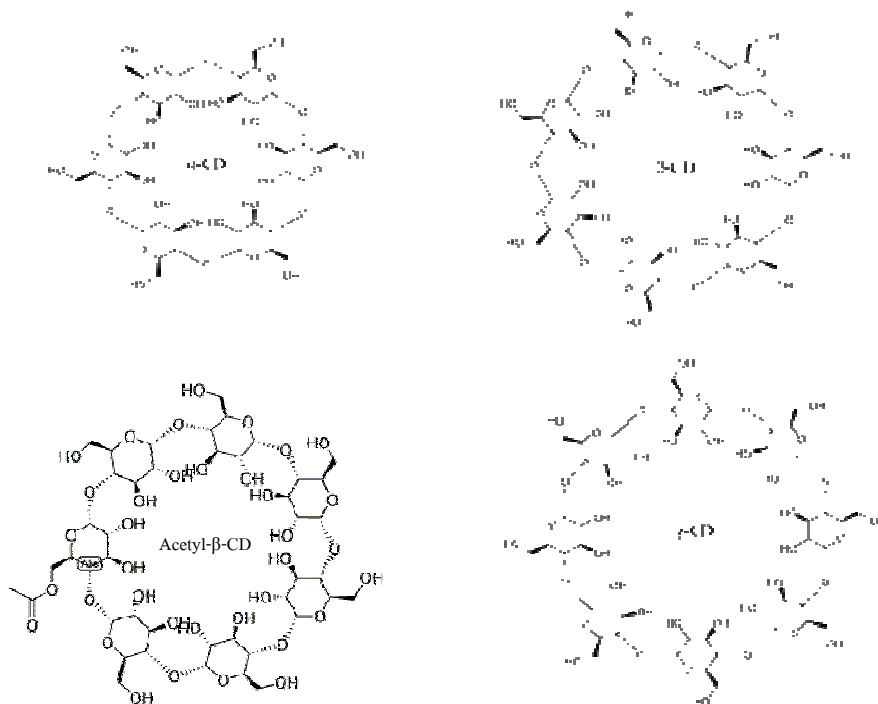
ไซโคลเด็กซ์ตรินเข้าไปรวมตัวกับกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และตกตะกอนลงสู่ด้านล่าง เป็นต้น

## 5. ไซโคลเด็กซ์ตริน (cyclodextrin)

ไซโคลเด็กซ์ตรินจัดอยู่ในกลุ่มไซคลิกโกลิโกแซคคาไรด์ (cyclic oligosaccharide) ที่ได้จากการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ไซโคลเด็กซ์ตรินไกลโคซิลทรานส์เฟอเรส (cyclodextrin glycosyltransferases, CGTases) (Szejtli, 1988) และเอนไซม์ไซโคลเด็กซ์ตรินกลูคาโนทรานส์เฟอเรส (cyclodextrin glucanotransferases, CGTases) ไซโคลเด็กซ์ตรินถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1891 จากการย่อยสลายแป้งด้วยแบคทีเรีย *Bacillus amylobacter* และ *Bacillus macerans* พบว่าการย่อยสลายดังกล่าวทำให้เกิดผลึกเล็กๆ ของไซโคลเด็กซ์ตริน (ประมาณ 3 กรัมต่อกิโลกรัม) ต่อมาในปี ค.ศ. 1903 Schardinger ได้ทำการศึกษาและสามารถแยกผลึกออกเป็น 2 ชนิด ให้ชื่อว่า crystallized dextrin  $\alpha$  และ crystallized dextrin  $\beta$  รวมทั้งสามารถสรุปได้ว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus macerans* เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตไซโคลเด็กซ์ตรินได้ปริมาณมากที่สุด ประมาณร้อยละ 25-30 ของปริมาณแป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น (Szejtli, 1998; Del valle, 2004)

โครงสร้างของไซโคลเด็กซ์ตรินประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคไพราโนส (glucopyranose unit) เชื่อมต่อกันเป็นวงกลมด้วยพันธะแอลฟา 1,4 (alpha bond 1,4) สามารถจำแนกได้เป็นไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา ( $\alpha$ -cyclodextrin หรือ Schardinger's  $\alpha$ -dextrin, cyclomaltohexaose, cyclohexaglucan, cyclohexaamylose,  $\alpha$ CD, ACD, C6A) ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ( $\beta$ -Cyclodextrin หรือ Schardinger's  $\beta$ -dextrin, cyclomaltoheptaose, cycloheptaglucan, cyclohepta-amylose,  $\beta$ CD, BCD, C7A) และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา ( $\gamma$ -cyclodextrin หรือ Schardinger's  $\gamma$ -dextrin, cyclomaltooctaose, cyclooctaglucan, cyclooctaamylose,  $\gamma$ CD, GCD, C8A) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคไพราโนส 6, 7 และ 8 โมเลกุล ตามลำดับ (Szejtli, 2004) ส่วนไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอะเซทิลเบต้า (acetyl- $\beta$ -cyclodextrin หรือ  $\beta$ -cyclodextrin acetate, triacetyl- $\beta$ -cyclodextrin) เป็นอนุพันธ์ของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคไพราโนส 7 โมเลกุล เช่นเดียวกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า (Chemical book, 2008) ดังแสดงในภาพที่ 1-9 และมีคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1-4





ภาพที่ 1-9 ชนิดของไซโคลเด็กซ์ตริน

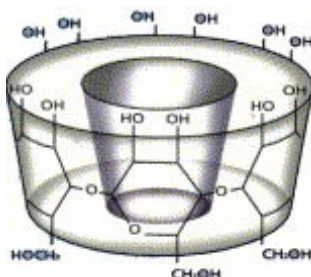
ที่มา: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Cyclodextrin.svg> และ [http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8389479\\_EN.htm#MSDSA](http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8389479_EN.htm#MSDSA)

ตารางที่ 1-4 คุณสมบัติของไซโคลเด็กซ์ตริน

Property	$\alpha$ -CD	$\beta$ -CD	$\gamma$ -CD	Acetyl- $\beta$ -CD
Number of glucopyranose units	6	7	8	7
Molecular weight (g/mol)	972	1135	1297	1177
Solubility in water at 25 °C (% w/v)	14.5	1.85	23.2	no data available
Outer diameter (Å)	14.6	15.4	17.5	no data available
Cavity diameter (Å)	4.7-5.3	6.0-6.5	7.5-8.3	no data available
Height of torus (Å)	7.9	7.9	7.9	no data available
Cavity volume (Å <sup>3</sup> )	174	262	427	no data available

ที่มา: Del valle (2004) และ [http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8389479\\_EN.htm#MSDSA](http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8389479_EN.htm#MSDSA)

โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินมีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอก มีรูปร่างคล้ายโดนัท หรือมีลักษณะคล้ายกรวยที่ถูกตัดยอด โดยมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำอยู่ด้านใน ประกอบด้วย  $\text{CH}_2$  และ ether group และมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งชอบน้ำอยู่ด้านนอกโมเลกุล หมู่ไฮดรอกซิลหมู่แรกจะอยู่ด้านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหมู่ไฮดรอกซิลหมู่ที่สอง ดังแสดงในภาพที่ 1-10



**ภาพที่ 1-10** ลักษณะโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน

ที่มา: Guo, *et al.* (2006)

จากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้านนอกโมเลกุล ทำให้ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถละลายน้ำได้ และไม่ละลายในสารละลายอินทรีย์ เมื่อไซโคลเด็กซ์ทรินอยู่ในรูปของสารละลายจะไม่เสถียร ช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ทรินที่ยึดเกาะด้วยโมเลกุลของน้ำเสถียรและเกิดการแทนที่อย่างรวดเร็วด้วยโมเลกุลของสารอื่นที่มีขั้วน้อยกว่าน้ำ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น (Szejtli, 2004)

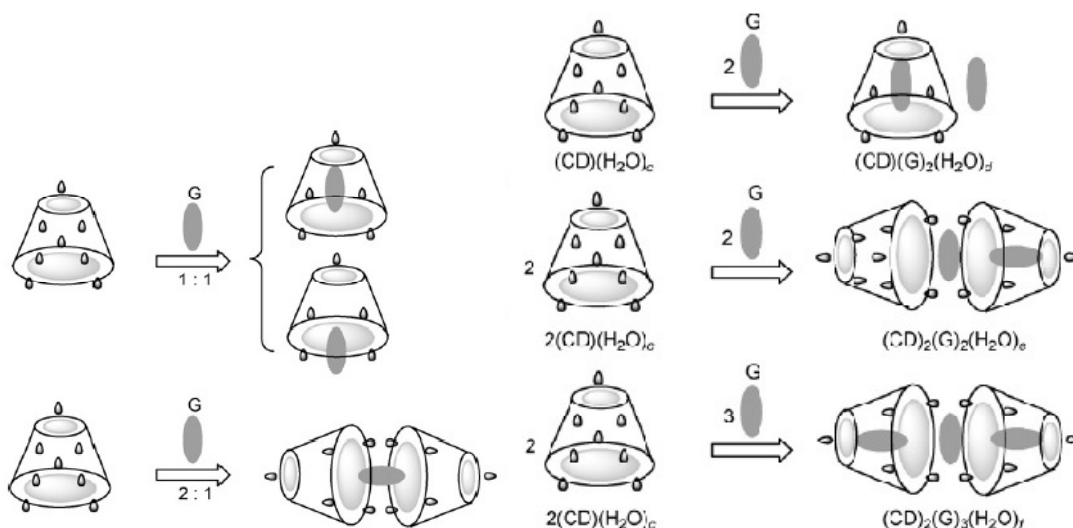
เมื่อเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลของสารอื่น ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และเคมีของสารนั้นๆ ได้ เช่น ความสามารถในการละลายของสาร ทำให้โมเลกุลของสารมีความเสถียรมากขึ้น สามารถลดการเกิดการระเหย (volatilization) การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidation) และการสีกกร่อน หรือการย่อยสลาย (degradation) จากแสงแดดและความร้อน ป้องกันการเกิดรสชาติและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี และสามารถแยกส่วนประกอบที่ไม่ต้องการออกได้ (Bastos, *et al.*, 1997; Hedgse 1998; Del valle, 2004)

ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสารอื่นที่ไม่ชอบน้ำได้หลายชนิด เช่น โมเลกุลของสารอะโรมาติก ฮาไลด์ เอสเตอร์ แอลดีไฮด์ คีโตน กรดอินทรีย์ กรดไขมัน แอลกอฮอล์ และอื่นๆ โดยไซโคลเด็กซ์ทรินเกิดการรวมตัวได้ดีกับโมเลกุลของสารอื่นที่มีขนาดพอดีกับช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ทริน และมีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยา (Del valle, 2004)

## 6. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทริน

ไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถรวมตัวเกิดเป็นผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนได้กับ โมเลกุลของสารอื่นที่มีลักษณะต่างๆ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยยึดเกาะโมเลกุลของ สารอื่นไว้ภายในช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ทริน การยึดเกาะโมเลกุลของสารอื่นของไซโคล- เด็กซ์ทรินไม่มั่นคง แต่ค่อนข้างมีความสมดุล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความพอดีของขนาดโมเลกุลของสาร อื่นกับช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ทริน และการเกิดปฏิกิริยาภายในระหว่างพื้นผิวภายนอกของ โมเลกุล

ความสัมพันธ์ทางตัวเลขของโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินบ่งชี้ว่าไซโคลเด็กซ์- ทรินสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสารอื่นในสัดส่วน 1:1 โดย โมเลกุลของสารอื่น 1 โมเลกุล เข้าไปทำปฏิกิริยายึดเกาะกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน แต่ใน กรณีที่โมเลกุลของสารอื่นมีมวล โมเลกุลต่ำ โมเลกุลของสารอื่นสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยายึดเกาะ ภายในช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ทรินได้มากกว่า 1 โมเลกุล และในกรณีที่โมเลกุลของสารอื่น มีมวลโมเลกุลสูง โมเลกุลของสารอื่น 1 โมเลกุลสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยายึดเกาะกับไซโคลเด็กซ์- ทรินได้มากกว่า 1 โมเลกุล (Szejtli, 2004; Song, *et al.*, 2008) ดังแสดงในภาพที่ 1-11



ภาพที่ 1-11 การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลของสารอื่น

ที่มา: Song, *et al.* (2008)

## 6.1 วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (Hedges, 1998; Del valle, 2004)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถเกิดได้จากหลายวิธีการ ได้แก่ evaporation method, co-precipitation method, slurry method, paste method, dry mixing method, damp mixing and heating และ extrusion เป็นวิธีการที่สามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้โดยใช้น้ำในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนปฏิกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) ภายในโมเลกุลของสารอื่นกับช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ทริน นอกจากนี้ยังเป็นตัวกลางที่สามารถละลายได้ทั้งไซโคลเด็กซ์ทรินและโมเลกุลของสารอื่นได้อีกด้วย

### 6.1.1 Evaporation method

Evaporation method เป็นวิธีการที่ใช้ในการแยกสารที่มีองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด โดยต้องมียุทธศาสตร์ที่เป็นตัวทำละลายขององค์ประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย การเตรียมสารด้วยวิธี evaporation method จำเป็นต้องเลือกสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการระเหยขององค์ประกอบแต่ละชนิด โดยเมื่อทำการระเหยสารด้วยวิธีการนี้จะทำให้เกิดองค์ประกอบที่กลายเป็นไอและองค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งที่รวมตัวกันเป็นผลึก จากนั้นนำผลึกที่ได้ไปทำการศึกษาต่อไป (Skelly and Jackson, 1994)

### 6.1.2 Co-precipitation method

Co-precipitation method เป็นวิธีการที่ใช้อย่างกว้างขวางในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถดำเนินการได้โดยการเตรียมสารละลายไซโคลเด็กซ์ทริน จากนั้นนำโมเลกุลของสารอื่นมาทำการเติมลงในสารละลาย แล้วนำไปทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิที่มากเกินความสามารถในการละลายได้ของสารประกอบเชิงซ้อน เพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและตกผลึกด้วยวิธีการกรอง (filtration) หรือวิธีการหมุนเหวี่ยงให้ตกตะกอน (centrifugation) สำหรับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ซึ่งเป็นไซโคลเด็กซ์ทรินที่สามารถละลายน้ำได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง ดำเนินการเตรียมสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเติมโมเลกุลของสารอื่น แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้อง เมื่อได้ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนแล้ว นำผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งต่อไป

การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method นี้ เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีการที่สามารถสังเกตการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และการหายไปของโมเลกุลของสารอื่นได้อย่างชัดเจน แต่เป็นวิธีการที่

ใช้น้ำปริมาณมากในการดำเนินการ จึงเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมหากนำไปประยุกต์ใช้จริงในสถานประกอบการ

#### 6.1.3 Slurry method

สำหรับ slurry method ไชโคลเด็กซ์ตรินที่จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจำเป็นต้องละลายไม่หมด โดยมีความเข้มข้นของไชโคลเด็กซ์ตรินแขวนลอยในน้ำประมาณร้อยละ 40-45 โดยน้ำหนัก (w/w) จากนั้นนำโมเลกุลของสารอื่นมาเติมในสารละลายหนืดของไชโคลเด็กซ์ตริน เพื่อให้เกิดการรวมตัว และตกผลึกเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของไชโคลเด็กซ์ตริน วิธี slurry method ดำเนินการโดยใช้ความร้อน และเวลาเป็นปัจจัยสนับสนุนที่ช่วยให้สารประกอบเชิงซ้อนรวมตัวกันได้ดียิ่งขึ้นเมื่อได้ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนแล้ว นำผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งต่อไปเช่นเดียวกับ co-precipitation method

#### 6.1.4 Paste method

Paste method เป็นวิธีการที่ใช้น้ำในการดำเนินการประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก (w/w) paste method ดำเนินการโดยผสมไชโคลเด็กซ์ตริน น้ำ และโมเลกุลของสารอื่นด้วยเครื่องผสมสาร ได้สารละลายที่มีความหนืดสูง และสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้โดยใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 30 นาที ในการศึกษาบางส่วน ได้ทำการศึกษา paste method โดยแบ่งการดำเนินการออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง และนำสารละลายหนืดที่ได้ไปให้ความร้อน เพื่อให้สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดียิ่งขึ้น

#### 6.1.5 Dry mixing method

Dry mixing method เป็นวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของสารอื่น ดำเนินการโดยการผสมไชโคลเด็กซ์ตรินเข้ากับโมเลกุลของสารอื่นโดยไม่มีน้ำเป็นตัวกลาง มีระยะเวลาในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่แน่นอน โมเลกุลของสารอื่นที่ดำเนินการด้วยวิธีการนี้ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารละลายที่ไชโคลเด็กซ์ตรินสามารถละลายได้ (solvent)

#### 6.1.6 Damp mixing and heating

วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแบบ damp mixing and heating เป็นวิธีการที่ใช้น้ำในการดำเนินการน้อย หรือไม่ใช้น้ำในการดำเนินการ จากนั้นทำการเติมโมเลกุลของสารอื่นประมาณร้อยละ 20-25 ของสารทั้งหมด นำไชโคลเด็กซ์ตรินและโมเลกุลของสารอื่นที่ผ่านการผสมแล้วไปบรรจุในภาชนะ ปิดผนึก และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้

สารประกอบเชิงซ้อนแห่ง ทั้งนี้ปริมาณของน้ำ ระดับความร้อน และระยะเวลาในการดำเนินการ ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลของสารอื่นที่ใช้ในการดำเนินการ

#### 6.1.7 Extrusion

วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแบบ extrusion เป็นการดำเนินการโดยให้ความร้อน และทำการผสมแบบต่อเนื่อง โดยจะทำการผสมไซโคลเด็กซ์ตริน โมเลกุลของสารอื่น และน้ำ ในเครื่อง extruder ที่ควบคุมอัตราการผสม อุณหภูมิ และเวลาในการดำเนินการ จากนั้นนำสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำให้แห้ง วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแบบ extrusion มีข้อดีคือ เป็นกระบวนการที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง และใช้น้ำในการดำเนินการน้อย เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดความร้อนในตัวเอง เหมาะสำหรับการดำเนินการกับ โมเลกุลของสารอื่นที่มีอุณหภูมิในการสลายตัวไม่มั่นคง

การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละวิธีมีการดำเนินการที่เหมือนหรือแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1-5

ตารางที่ 1-5 การดำเนินการที่เหมือนหรือแตกต่างกันของวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน

วิธีเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน	การดำเนินการ
Evaporation method	ต้องมีองค์ประกอบที่เป็นตัวทำละลายขององค์ประกอบอื่น เช่น น้ำ เป็นต้น เลือกสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการระเหยขององค์ประกอบแต่ละชนิด
Co-precipitation method	ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิที่มากเกินไปความสามารถในการละลายได้ของสารประกอบเชิงซ้อน ใช้น้ำปริมาณมาก สามารถสังเกตการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและการหายไปของโมเลกุลของสารอื่นได้อย่างชัดเจน
Slurry method	การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของไซโคลเด็กซ์ตริน ดำเนินการโดยใช้ความร้อนและเวลาเป็นปัจจัยสนับสนุนในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน
Paste method	ใช้น้ำในการดำเนินการประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 30 นาที ใช้ความร้อนในการดำเนินการ
Dry mixing method	ไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ดำเนินการโดยใช้ความร้อน และมีระยะเวลาในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่แน่นอน

ตารางที่ 1-5 การดำเนินการที่เหมือนหรือแตกต่างกันของวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน	การดำเนินการ
Damp mixing and heating	ใช้น้ำในการดำเนินการน้อยหรือไม่ใช้น้ำในการดำเนินการ ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการดำเนินการขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลของสารอื่น
Extrusion	ใช้น้ำในการดำเนินการน้อย มีการควบคุมอัตราการผสม อุณหภูมิและเวลาในการดำเนินการ

## 6.2 การทำสารประกอบเชิงซ้อนให้แห้ง (Del valle, 2004)

การทำสารประกอบเชิงซ้อนให้แห้ง สามารถดำเนินการได้โดยการใช้เตาอบ (oven) เครื่องขจัดความชื้นแบบฟลูอิดเบดไดร์เออร์ (fluid bed dryer) หรือเครื่องขจัดความชื้นชนิดอื่นๆ ที่ไม่ทำลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน การทำสารประกอบให้แห้งสามารถดำเนินการได้ด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้

### 6.2.1 Highly volatile guests

กระบวนการทำให้แห้งด้วยวิธี highly volatile guests เป็นกระบวนการที่ใช้เมื่อโมเลกุลของสารอื่นที่รวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีจุดเดือดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ดำเนินการโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดของโมเลกุลของสาร เพื่อลดการสูญเสียโมเลกุลของสารอื่นระหว่างการดำเนินการ

### 6.2.2 Spray drying

กระบวนการทำให้แห้งด้วยวิธี spray drying สามารถดำเนินการได้โดยการทำให้ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก หรือฉีดผ่านหัวฉีดแบบละอองฝอยสำหรับโมเลกุลของสารอื่นที่ระเหยได้ จำเป็นต้องมีสถานะในการดำเนินการที่เหมาะสม เพื่อลดอัตราการสูญเสียโมเลกุลของสารระหว่างการดำเนินการ กระบวนการทำให้แห้งด้วยวิธี spray drying นี้ ไม่เหมาะสำหรับโมเลกุลของสารที่ระเหยได้ง่าย และสารที่มีจุดเดือดไม่คงที่

### 6.2.3 Low temperature drying

กระบวนการทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ เป็นการดำเนินการโดยใช้เครื่องดูดความชื้น (desiccators) หรือเครื่องขจัดความชื้นโดยใช้ความเย็น (freeze dryer) ในการดำเนินการ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำสามารถลดการสูญเสียโมเลกุลของสารที่เป็นสารระเหยง่ายมาก

(extremely volatile guest) การขจัดความชื้นด้วยความเย็นเป็นกระบวนการทำให้แห้งที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารอื่นที่มีจุดเดือดไม่คงที่ และสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปของสารละลาย

## 7. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) (พรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์, 2548)

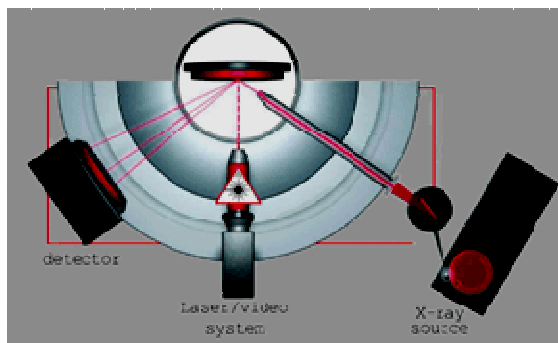
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( x-ray diffraction, XRD ) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้น ดังแสดงในภาพที่ 1-12

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคได้แก่

- Single-crystal methods โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น ( laue method ) ใช้ผลึกติดอยู่กับที่ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว ทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันใช้วิธีทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้ใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม  $q$  โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

- Powder methods เป็นวิธีการที่ใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยใช้บอกร่องค์ประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ single-crystal methods คือ แต่เดิมนั้นใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันใช้เครื่องมือที่เรียกว่า x-ray powder diffractometer และสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้





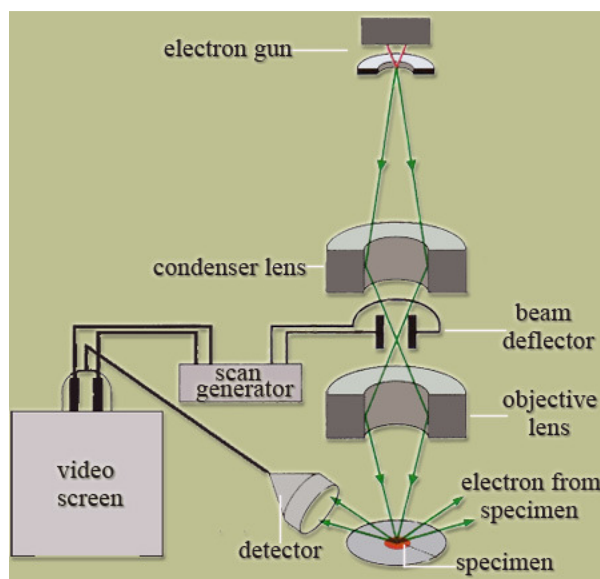
ภาพที่ 1-12 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ที่มา: พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์ (2548)

**กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)** (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2553)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้เป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 1-13 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดควรปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



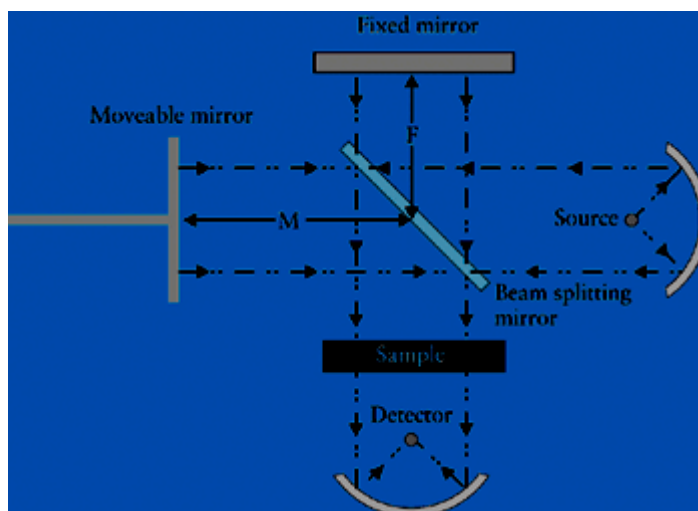
ภาพที่ 1-13 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
ที่มา: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล (2553)

เครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) (พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์,  
2548)

เทคนิคการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการ  
จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์ในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึง  
ปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด

หลักการทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 1-14 เริ่มต้นจากรังสีอินฟราเรดจาก  
แหล่งกำเนิดถูกฉายไปยัง interferometer ประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่  
กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง ที่ตัวแยกแสง ลำ  
รังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่งสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถ  
เคลื่อนที่ได้ และสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้น  
ลำรังสีจะผ่านไปยังตัวอย่าง และตกลงบนเครื่องตรวจวัด path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยก  
ออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ  
interferometer ขาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณ  
ที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้มีลักษณะของ  
interferogram เป็นรูปคลื่น sine โดยกราฟพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้  
และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ ขนาดของแอมพลิจูด

จะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ fourier transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่



ภาพที่ 1-14 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด  
ที่มา: พรหมทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์ (2548)

## 8. การแยกสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทริน

การรวมตัวกันของไซโคลเด็กซ์ทรินและโมเลกุลของสารอื่นในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ไม่สามารถนำโมเลกุลของสารอื่นมาใช้ประโยชน์ จึงได้มีการศึกษาหลักการแยกสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทริน โดย Shieh และ Hedges (1994) ได้ทำการจดสิทธิบัตรกระบวนการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อน กระบวนการดังกล่าวดำเนินการโดยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 1-5 ลงในสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูป slurry ภายใต้อุณหภูมิในการดำเนินการ 100-150 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการดำเนินการประมาณ 5 นาที - 2 ชั่วโมง และดำเนินการที่ความดัน 15-70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psia) เพื่อป้องกันการเดือดของสารประกอบเชิงซ้อน และเพื่อให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนแยกออกเป็นไซโคลเด็กซ์ทริน และโมเลกุลของสารอื่น โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับโมเลกุลของสารอื่นที่เป็นโมเลกุลของไขมัน และใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ในการทำปฏิกิริยา จากการศึกษากิจกรรมการแยกและทำไซโคลเด็กซ์ทรินให้บริสุทธิ์ของ Blesley (1989) พบว่า การแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจาก

สารประกอบเชิงซ้อน เมื่อไซโคลเดกซ์ทรินอยู่ในสถานะของสารละลาย จำเป็นต้องดำเนินการโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส

## 9. พอลิเมอร์

### 9.1 โพลีเอมีน (polyamine)

โพลีเอมีนเป็นสารเคมีที่ช่วยในการรวมตัวของตะกอนชนิดฟล็อกกูแลนต์ (floculants) ที่ใช้ในการกำจัดสี และของแข็งในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และการกำจัดสลัดจ์ในระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสีและของแข็งในระบบบำบัดน้ำเสียได้ในขั้นตอนเดียว สามารถลดต้นทุนด้านสารเคมีในการดำเนินการ และเกิดสลัดจ์ในระบบบำบัดน้อย (Wang, *et al.*, 2009)

### 9.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminiumchloride)

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ช่วยในการรวมตัวของตะกอนชนิดโคแอกกูแลนต์ (coagulants) ที่ใช้ในการกำจัดสี และสารอินทรีย์ในน้ำ (Bogoeva-Gaceva, *et al.*, 2008) มีประสิทธิภาพสูงที่สถานะความเข้มข้น และอุณหภูมิต่ำ และสามารถดำเนินการได้ในช่วงพีเอช (pH) กว้าง โดยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำดื่ม และระบบบำบัดน้ำเสีย

### 9.3 สารผสมระหว่างโพลีเอมีนและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

สารผสมระหว่างโพลีเอมีนและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ประกอบด้วย โพลีเอมีนร้อยละ 6 และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก (w/w) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เป็นสารเคมีที่ช่วยในการรวมตัวของตะกอน จากการศึกษาของ Chen และคณะ (2009) พบว่า การใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสี และสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียว

## 10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการศึกษาการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอล โดยกระบวนการ titration ที่ 15 25 35 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่า การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เมื่อกลีเซอรอลเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในจุดกึ่งกลางของไซโคลเด็กซ์ตรินด้านที่กว้างกว่า และมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลและไซโคลเด็กซ์ตริน โดยโมเลกุลของทั้งคู่มีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลเกิดขึ้นในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล และไม่เกิดการรวมตัวในส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยควรใช้สารตั้งต้นในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสถานะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับโมเลกุลของสารอื่นเกิดได้ไม่ดีภายใต้สภาวะการทดลองที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไซโคลเด็กซ์ตรินมีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยา (Bastos, *et al.*, 1997; Moreir. and Bastos, 2000; Nakano, *et al.*, 2003) ซึ่งจากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวเลขทางเคมีระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล บรีสุทธีพบว่าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ได้ในสัดส่วน 1:1 และสามารถตรวจสอบโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Song, *et al.*, 2008) จากการศึกษาของ Jouni และคณะ (2000) ซึ่งได้ทำการศึกษาการใช้ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟาในการแยกโคเอซิลกลีเซอรอลออกจากลิโปโปรตีน (lipoproteins) ของแมลง พบว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟาสามารถรวมตัวกับโคเอซิลกลีเซอรอลได้ เมื่อโคเอซิลกลีเซอรอลเคลื่อนที่จากลิโปโปรตีนของแมลงเข้าสู่ไซโคลเด็กซ์ตริน จากผลการศึกษาไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟาสามารถดึงโคเอซิลกลีเซอรอลออกจากลิโปโปรตีนของแมลงได้ประมาณร้อยละ 83-87 กระบวนการดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ตริน และอุณหภูมิในการดำเนินการ และจากการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ ของ Shimada และคณะ (1992) พบว่าความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตริน ยังขึ้นอยู่กับความยาวโซ่ของกรดไขมันที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ตรินอีกด้วย Rusa และ Tonelli (2000) ได้ทำการศึกษาการแยกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันออกจากสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้ยูเรีย และไซโคลเด็กซ์ตริน และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC), fourier transform infrared

spectroscopy (FTIR) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction pattern, XRD) พบว่า ยูเรียและไซโคลเด็กซ์ทรินมีประสิทธิภาพในการแยกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ออกจากสารประกอบเชิงซ้อนได้ และอธิบายโครงสร้างของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินว่า โครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินสามารถเกิดได้ใน 2 รูปแบบ คือ cage type และ channel type ซึ่งในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับพอลิเมอร์พบว่า โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบ channel type เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่เป็นโซ่สายยาว

จากการศึกษาในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินกับ โมเลกุลของสารอื่น ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ ปริมาณ ความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทริน ชนิด ขนาด และปริมาณความเข้มข้นของโมเลกุลของสารอื่น และอุณหภูมิในการดำเนินการ

เมื่อไซโคลเด็กซ์ทรินรวมตัวกับกลีเซอรอลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จำเป็นต้องทำการแยกสารประกอบเชิงซ้อนนั้น เพื่อให้ได้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และไซโคลเด็กซ์ทรินที่สามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ได้ โดยกระบวนการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อนสามารถทำได้โดยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ประมาณร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักของสารประกอบเชิงซ้อน (Shieh and Hedges, 1994) จากนั้นสามารถทำการดึงกลับไซโคลเด็กซ์ทรินที่ได้จากการแยกสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการดึงกลับไซโคลเด็กซ์ทรินจากสารประกอบเชิงซ้อนสามารถดำเนินการได้โดยการนำสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลอื่นไปผ่านเรซินดูดซับที่เต็มไปด้วยรูพรุนที่ไม่ชอบน้ำ และไม่มีขั้ว ที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส และไม่สูงกว่าจุดเดือดของสารละลาย โดยเรซินที่ใช้เป็น cross-linked copolymer ของ styrene กับ divinylbenzene เรซินจะทำการดูดซับ โมเลกุลของสารอื่น เพื่อแยกออกจากสารประกอบเชิงซ้อน พบว่าสามารถนำกลับไซโคลเด็กซ์ทรินได้ถึงร้อยละ 68.9 โดยไซโคลเด็กซ์ทรินที่แยกได้จากสารประกอบเชิงซ้อนจะมีความบริสุทธิ์และมีประสิทธิภาพในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ดีเมื่อ โมเลกุลของสารอื่นที่มารวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น แอลกอฮอล์ โกลเตสเตอร์อล กรดไขมัน และกลีเซอไรด์ของกรดไขมัน เป็นต้น รวมทั้งต้องทำการปรับพีเอช (pH) ให้เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยา (Nakamura, *et al.*, 1995)

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าเพื่อการแยกกลีเซอรอลออกจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการดึงกลับไซโคลเด็กซ์ตรินจากสารประกอบเชิงซ้อน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบแนวทางในการทำกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้พลังงานในการดำเนินการต่ำ และเกิดของเสียจากการดำเนินการน้อย
2. ลดต้นทุนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์จากเดิมที่ใช้กระบวนการกลั่น รวมทั้งเป็นการลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล และเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ผู้ประกอบการได้อีกทางหนึ่งด้วย
3. ทราบแนวทางในการนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และลดปริมาณของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### 1. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

##### 1.1 สารเคมี

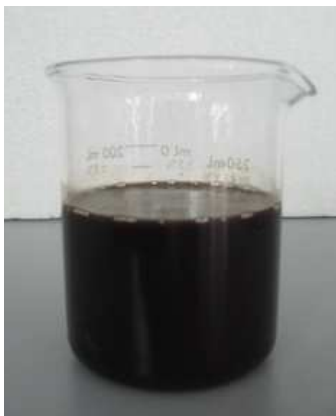
- กลีเซอรอลบริสุทธิ์  $C_3H_8O_3$  ผลิตภัณฑ์ Ajax fine chem.
- ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า  $C_{42}H_{70}O_{35}$  ผลิตภัณฑ์ Xi'an hongchang pharmaceuticals co., ltd
- ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอะเซทิลเบต้า  $C_{44}H_{72}O_{36}$  ผลิตภัณฑ์ Wacker
- ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา  $C_{36}H_{60}O_{30}$  ผลิตภัณฑ์ Cavamax<sup>®</sup> W8 Wacker
- ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา  $C_{48}H_{80}O_{40}$  ผลิตภัณฑ์ Cavamax<sup>®</sup> W6 Wacker
- ยูเรีย  $NH_2CONH_2$  ผลิตภัณฑ์ Ajax fine chem.
- โซเดียมคลอไรด์ NaCl ผลิตภัณฑ์ Ajax fine chem.

หมายเหตุ : สารเคมีที่ใช้เป็นสารเคมีเกรดวิเคราะห์

##### 1.2 วัสดุดิบ

กลีเซอรอลดิบในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังแสดงในภาพที่ 2-1





ภาพที่ 2-1 กอลลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

### 1.3 อุปกรณ์

- เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer, XRD) ผลิตภัณฑ์ Philips x'pert MPD ดังแสดงในภาพที่ 2-2 และมีสภาวะการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2-1



ภาพที่ 2-2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

ตารางที่ 2-1 สภาวะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

โปรแกรม/โหมด	สภาวะการทำงาน
เทคนิคการทดสอบ	เอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน
สภาวะการทดสอบ	
- X-ray tube	CU tube
- Sample preparation	Pressed powder
- Objective	Comparison
Scan program	
- Start angle ( $2\theta$ )	5.00
- End angle ( $2\theta$ )	90.00
- Step size ( $2\theta$ )	0.05
- Time per step (s)	0.6
- Scan speed ( $2\theta/s$ )	0.08333
- Number of step	1700
- Total time (h:m:s)	0 : 17 : 01
- kV	30 mA, 40 kV

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) JSM-5800LV ผลิตภัณฑ์ JEOL ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบอิเล็กตรอนไมโครกราฟ และสภาวะการทดสอบแบบ High vacuum mode ถ่ายภาพที่กำลังขยาย 500, 1,000 และ 5,000 เท่า



ภาพที่ 2-3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- เครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ผลิตภัณฑ์ Bruker EQUINOX 55 ดังแสดงในภาพที่ 2-4 และมีสภาวะการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-4 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 2-2 สภาวะการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด

โปรแกรม/โหมด	สภาวะการทำงาน
Frequency range	4,000-400 $\text{cm}^{-1}$
Sample scans	32
Resolution	4
Zero filling	2

- เครื่องทำแห้งด้วยความเย็น (freeze dryer) ผลิตภัณฑ์ FTS Systems Duradry และ FTS Systems Flexidry

- เครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำ (water bath) รุ่น W760 ผลิตภัณฑ์ Memmert เลขที่ สวล.46-110/2537-1-2

- เครื่องให้ความร้อน (hotplate) ผลิตภัณฑ์ Gerhardt เลขที่ สวล.01-238/2539-1-18

- ตู้อบความร้อน (hot air oven) ผลิตภัณฑ์ Contherm เลขที่ สวล.43-200/2540-1-

2(2/2)

- เครื่องเขย่าสาร ผลิตภัณฑ์ Heidolph promax 2020 เลขที่ สวล.45-120/2539-1-1

- เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Mettler toledo รุ่น AB 204

- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

- แผ่นกรอง No.1 ผลิตภัณฑ์ Whatman เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายของไซโคลเด็กซ์ตริน

นำน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตรมาทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำ จากนั้นนำไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ามาทำการละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเลือกอุณหภูมิในการละลายที่ 30 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

### 2.2 การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทรีกับไซโคลเด็กซ์ตริน

กลีเซอรอลมีความสามารถในการละลายน้ำได้เป็นอย่างดี เกิดเป็นสารละลายใส ทำให้สังเกตการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทรีกับไซโคลเด็กซ์ตรินได้ยาก จึงได้มีการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธีการเตรียมสารที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ evaporation method, co-precipitation method และ dry mixing method ซึ่งมีปริมาณการใช้น้ำในการดำเนินการที่แตกต่างกัน

#### 2.2.1 Evaporation method ของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา

Evaporation method เป็นวิธีการที่ใช้ในการแยกสารที่มีองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด โดยต้องมียุทธวิธีที่เป็นการทำให้ตัวทำละลายขององค์ประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย เมื่อทำการระเหยสารด้วยวิธีการนี้จะทำให้เกิดองค์ประกอบที่กลายเป็นไอและองค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งที่รวมตัวกันเป็นผลึก จากนั้นนำผลึกที่ได้ไปทำการศึกษาต่อไป (Skelly and Jackson, 1994) ซึ่งดำเนินการโดย

- ละลายไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า 12 กรัม ในน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10 แบ่งใส่บีกเกอร์ๆ ละ 30 มิลลิลิตร
- ในส่วนของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา ทำเช่นเดียวกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า
- เติมกลีเซอรอลบริสุทรีลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ตริน ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 1.5 3 และ 6 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 และ 20 ตามลำดับ
- นำสารละลายที่ได้ไปทำการระเหยน้ำด้วยเครื่องให้ความร้อน ที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส จนเกิดเป็นผลึกสีขาว
- นำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry (Hedges, 1998)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

**Evaporation method ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต้า** ดำเนินการ  
ศึกษาโดย

- ละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต้า 12 กรัม ในน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10 แบ่งใส่บีกเกอร์ๆ ละ 30 มิลลิลิตร
- เติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ทริน ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 1.5 3 และ 6 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 และ 20 ตามลำดับ
- นำสารละลายที่ได้ไปทำการระเหยน้ำด้วยเครื่องให้ความร้อน ที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสารละลายหนืด ใส และแข็งตัวเมื่อวางไว้ที่อุณหภูมิห้องและเกิดเป็นผลึกสีขาวเมื่อทำการเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- นำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค Freeze dry (Hedges, 1998)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

### 2.2.2 Co-precipitation method

- ละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า 12 กรัม ในน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10 แบ่งใส่บีกเกอร์ๆ ละ 30 มิลลิลิตร

- เติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 1.5 3 และ 6 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 และ 20 ตามลำดับ
- นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นสารละลายใส
- นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนเกิดเป็นผลึกสีขาว
- นำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry (Hedges, 1998)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2523)

- ชั่งสารตัวอย่าง 0.1000 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร หยดโบรโมโทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5-7 หยด แล้วทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลต่อลิตร โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาณสารละลายกรดที่ใช้
- ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร อย่างระมัดระวังจนได้สารละลายสีฟ้าซึ่งไม่มีสีเขียวปนอยู่เลย บันทึกปริมาณสารละลายด่างที่ใช้
- ทำแบลนค์ (blank) โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแทนตัวอย่าง
- ใช้ปิเปตดูดสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในตัวอย่างและแบลนค์ แก้วบีกเกอร์เบาๆ แล้วปิดด้วยกระดาษฟิคาหรือใช้แผ่นอะลูมิเนียมปิดให้สนิท วางทิ้งไว้ในที่มีดที่อุณหภูมิห้อง (ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้น

เติมสารละลายอีเทนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร แก้วบีกเกอร์เบาๆ แล้ววางทิ้งไว้ในที่มีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

- เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 300 มิลลิลิตร (น้ำกลั่นที่เติม เท่ากับ 300-(ปริมาณน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร+ปริมาณ โซเดียมเปอร์ไอโอเดต 50 มิลลิลิตร+ปริมาณอีเทนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร+สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลต่อลิตร+สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร)) หยดโบรโมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5-7 หยด นำไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อถึงจุดยุติ แล้วบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

### 2.2.3 Dry mixing method

- ชั่งไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ใส่บีกเกอร์ๆ ละ 4 กรัม จำนวน 4 บีกเกอร์

- เติมหีสเซอร์อลบริสุทธิ บีกเกอร์ละ 5 มิลลิลิตร

- แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้แก่

- อุณหภูมิห้อง

- แช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

- ให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

- ให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

- นำผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Hedges, 1998) เนื่องจากสารตัวอย่างไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจึงไม่สามารถนำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการให้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

## 2.3 การศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์

### 2.3.1 Evaporation method

- ละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า 24 กรัม ในน้ำกลั่น 240 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10 แบ่งใส่บีกเกอร์ๆ ละ 30 มิลลิลิตร
- เติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบีกเกอร์ละ 3 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10
- แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่
- เติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ (Shieh and Hedges, 1994) ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 0.017 และ 0.034 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- เติมสารละลายยูเรีย (Rusa and Tonelli, 2000) ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 0.017 และ 0.034 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- นำสารละลายที่ได้ไปทำการระเหยน้ำด้วยเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส จนเกิดเป็นผลึกสีขาว
- นำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

### 2.3.2 Co-precipitation Method

- ละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า 24 กรัม ในน้ำกลั่น 240 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10 แบ่งใส่บีกเกอร์ๆ ละ 30 มิลลิลิตร
- เติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ลงในสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบีกเกอร์ละ 3 มิลลิลิตร คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 10
- แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่



- เติมน้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Shieh and Hedges, 1994) ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 0.017 และ 0.034 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- เติมน้ำสารละลายยูเรีย (Rusa and Tonelli, 2000) ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 0.017 และ 0.034 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นสารละลายใส
- นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนเกิดเป็นผลึกสีขาว
- นำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

#### 2.4 การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ ด้วยวิธี dry mixing method

การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ ด้วยวิธี dry mixing method ดำเนินการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใน 3 ส่วน คือ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (pretreatment) ซึ่งการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบดำเนินการโดย

- ชั่งไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าใส่บีกเกอร์ๆ ละ 3 กรัม จำนวน 3 บีกเกอร์
- นำกลีเซอรอลดิบมาละลายด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 เนื่องจากกลีเซอรอลดิบมีความเข้มข้นสูง และมีสิ่งปนเปื้อนอื่นผสมอยู่เป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องทำการเจือจางกลีเซอรอลดิบเพื่อให้รวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ง่ายขึ้น
- เติมกลีเซอรอลดิบละลายน้ำ 3 มิลลิลิตรลงในไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า

- แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้แก่

- อุณหภูมิห้อง
- แช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส
- ให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

- นำผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Hedges, 1998) เนื่องจากสารตัวอย่างไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่สามารถนำผลึกที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry

- นำไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

#### การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ด้วยวิธี dry mixing method

- ชั่งไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ไซบีกเกอร์ๆ ละ 3 กรัม จำนวน 3 บีกเกอร์

- เติมไบโอดีเซลบริสุทธิ์บีกเกอร์ละ 1.5 3 และ 6 มิลลิลิตร ตามลำดับผสมให้เข้ากัน และวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- นำผลึกที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน ด้วยวิธี **dry mixing method**

- ชั่งไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าไสบีกเกอร์ๆ ละ 3 กรัม จำนวน 3 บีกเกอร์
- นำกลีเซอรอลดิบ 150 มิลลิลิตร มาทำการเติมสารผสมระหว่างโพลีเอมีนกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 50 มิลลิลิตร คิดเป็นอัตราส่วน 3:1 คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำสารละลายใสที่ได้เติมลงในไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า 1 2 และ 3 มิลลิลิตร ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Hedges, 1998) เนื่องจากสารตัวอย่างไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยการใช้ความเย็นด้วยเทคนิค freeze dry
- นำไปตรวจสอบการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- นำผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปถ่ายภาพลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- นำผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ไปตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

### 3. การรายงานผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

อธิบายผลการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) โดยใช้ภาพประกอบ และการบรรยาย

### 4. สถานที่ศึกษาวิจัย

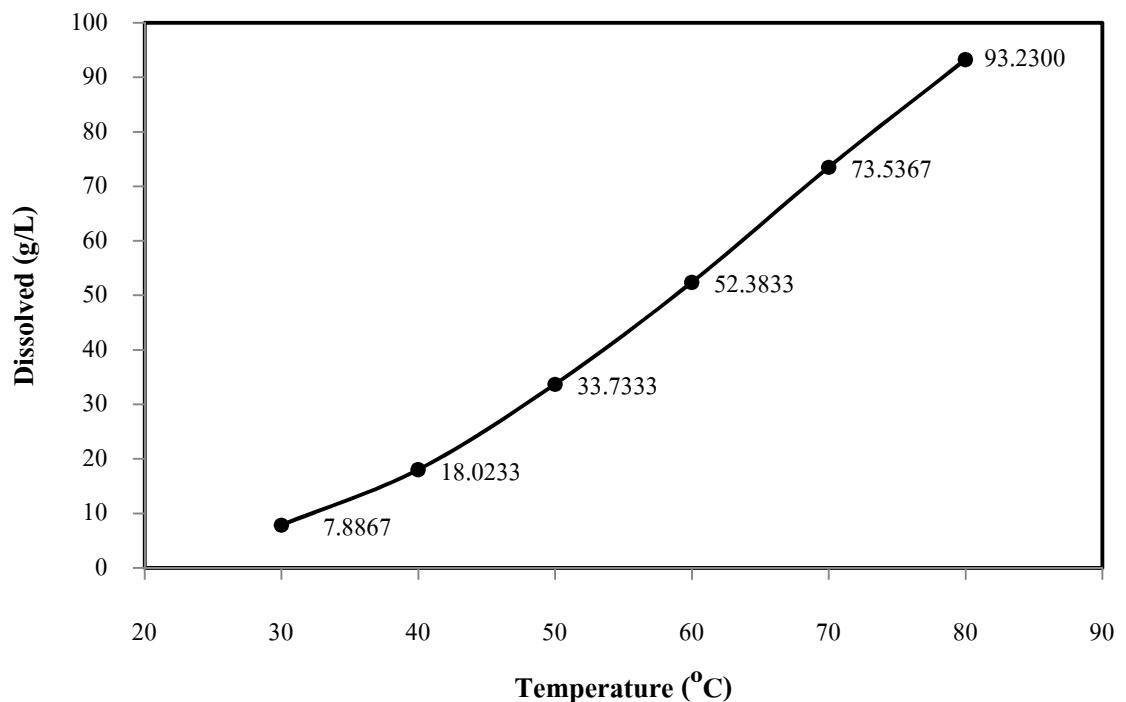
ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

### บทที่ 3

#### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### 1. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ามีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Loftsson (1992) ซึ่งพบว่าไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 30-150 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมามีผลต่อการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ดังแสดงในภาพที่ 3-1 แต่เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการทดลองข้างต้นมาวางที่อุณหภูมิห้องจะตกผลึก โดยมีลักษณะเป็นผลึกใสและมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า



**ภาพที่ 3-2** ลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าละลายน้ำที่อุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส จากซ้ายไปขวา ตามลำดับ เมื่อนำมาวางที่อุณหภูมิห้อง

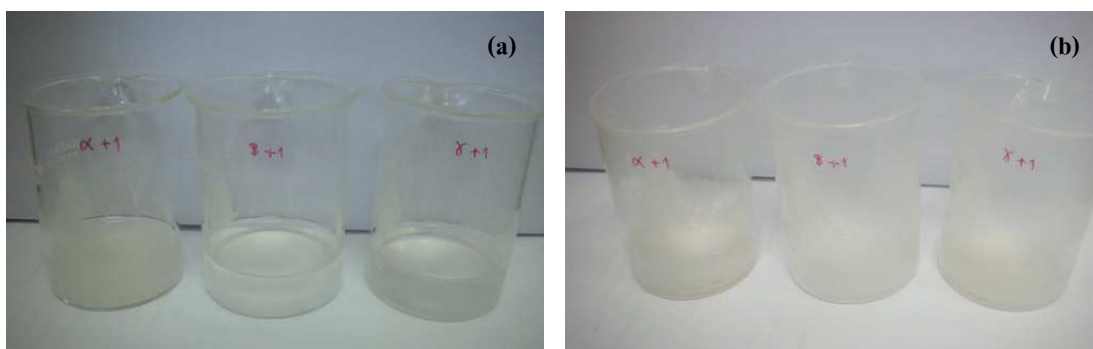
จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับโมเลกุลของสารอื่นด้วยวิธี co-precipitation method เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่จำเป็นต้องใช้สารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน นอกจากนี้การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method และ dry mixing method เป็นวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่มีปัจจัยของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเช่นเดียวกัน

## 2. ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธ์

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทริน เป็นการรวมตัวระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลของสารอื่น และสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารนั้นๆ ได้ ซึ่งการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธ์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกกลีเซอรอลออกจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ 3 วิธี ได้แก่ evaporation method, co-precipitation method และ dry mixing method

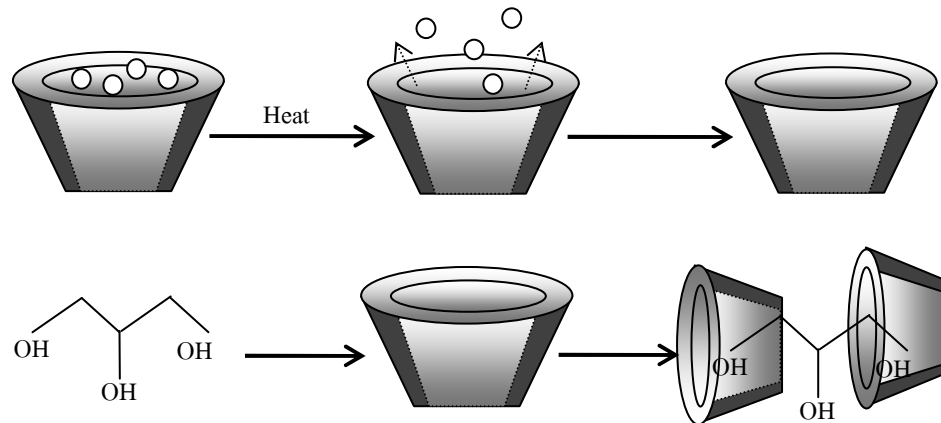
## 2.1 Evaporation method

การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method เป็นการศึกษาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตริน 4 ชนิด คือ ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอะเซทิลเบต้า และตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ มีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใกล้เคียงหรือแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ผลการทดลองการศึกษการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นผลึกสีขาวทันทีหลังจากการผสมสารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และเกิดผลึกสีขาวมากขึ้นเมื่อนำสารละลายไปทำการระเหยน้ำจนผลึกแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3-3



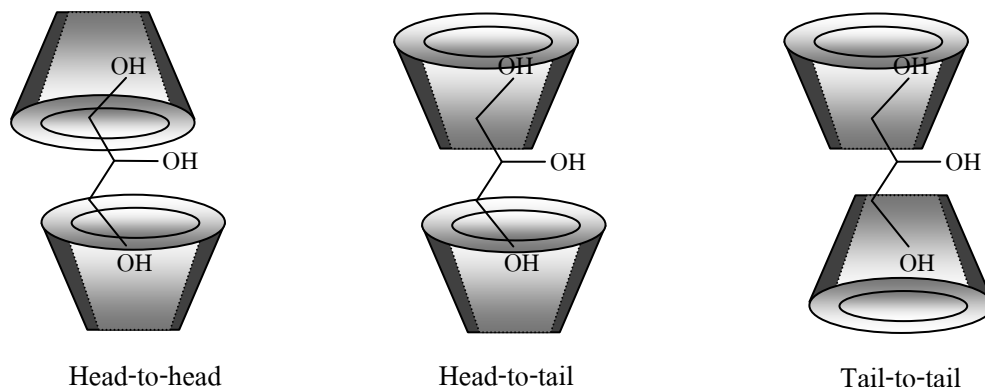
ภาพที่ 3-3 ผลึกที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method (a) สารละลายไซโคลเด็กซ์ตรินผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ผ่านการระเหยน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส

การระเหยน้ำที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตริน (Giordano *et al.*, 2001) การระเหยน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำที่รวมตัวอยู่กับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินหลุดออกจากช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ตริน และระเหยไปโดยความร้อน ทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถเกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ตรินได้มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-4 นอกจากนี้การระเหยน้ำยังทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้มากขึ้นด้วย



ภาพที่ 3-4 กลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method

เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ มาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากไฮโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์ กลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไฮโคลเด็กซ์ทรินได้โดยโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์แทรกสอดเข้าไปในช่องว่างกลวงของไฮโคลเด็กซ์ทริน และสามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของไฮโคลเด็กซ์ทรินมาชนกันแบบ head-to-head head-to-tail และ tail-to-tail ทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel (Taweepreda, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3-5

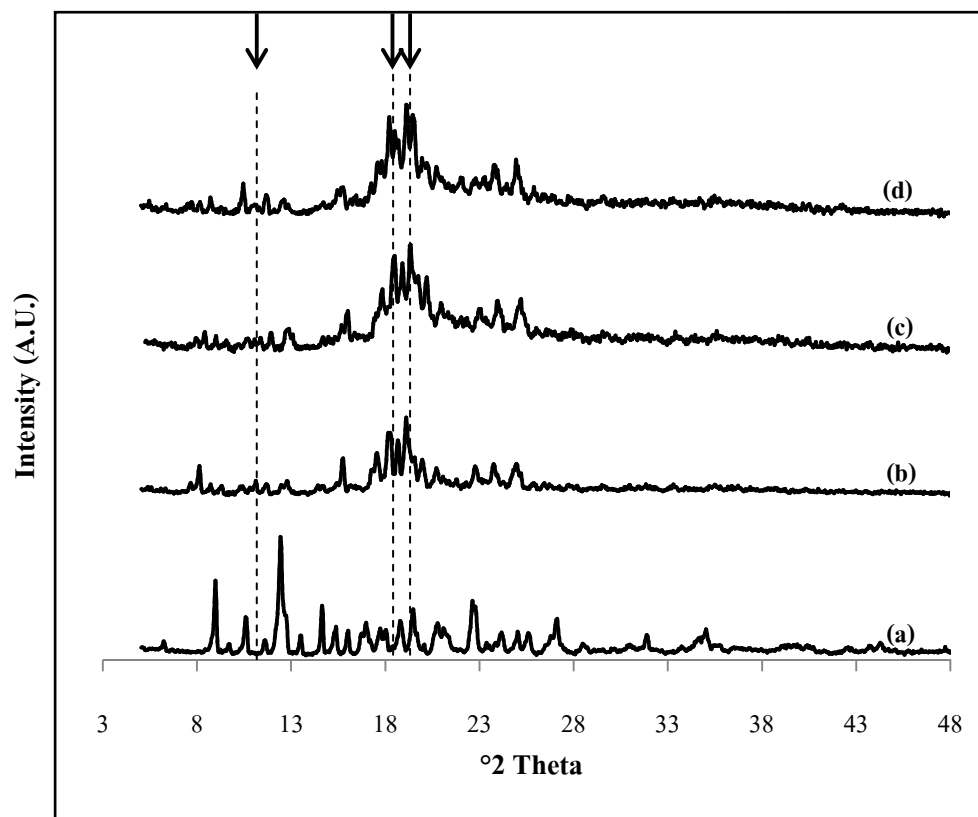


ภาพที่ 3-5 ลักษณะสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel

### 2.1.1 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธี ด้วยวิธี evaporation method

เมื่อนำผลึกสีขาวที่ได้มาทำการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงถึงผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธีที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^{\circ}$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) ประมาณ  $18.7^{\circ}$  และประมาณ  $19.7^{\circ}$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Shen, *et al.*, 2005; Farcas, *et al.*, 2006; Kane, *et al.*, 2009) โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ก่อนข้างต่ำ แนวโน้มการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธีมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธีมากกว่าร้อยละ 5 ดังแสดงในภาพที่ 3-6 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณความเข้มข้นของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าต่อกลีเซอรอลบริสุทธี พบว่าไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลกลีเซอรอลบริสุทธี โดยถูกเหนี่ยวนำด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบ channel เมื่อทำการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธีทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จากแรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่พยายามดึงโมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีปริมาณของไซโคลเด็กซ์ทรินและกลีเซอรอลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเป็นอย่างมาก

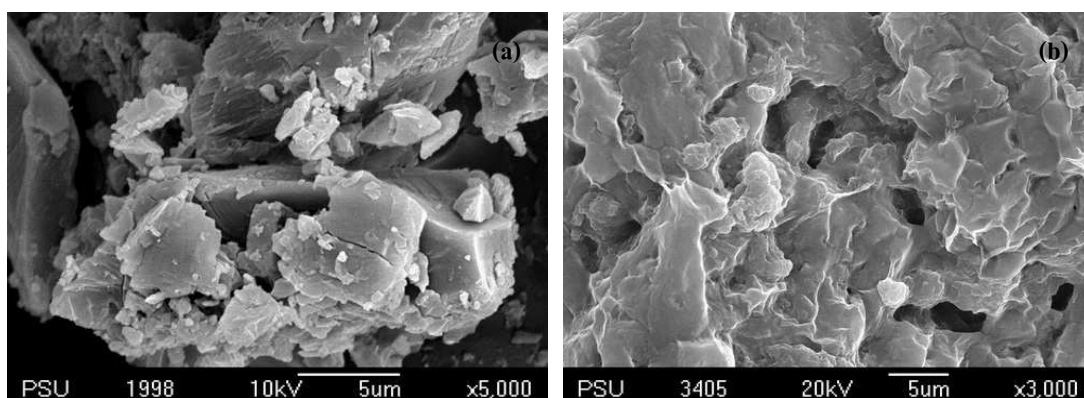




**ภาพที่ 3-6** สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคล-เด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าบริสุทรี (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์-ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซ-โคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีร้อยละ 20

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีไปทำการศึกษาค้นคว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ผ่านการระเหยน้ำของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าร้อยละ 10 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี พบว่า ผลึกของไซโคลเด็กซ์-ตรินชนิดเบต้าร้อยละ 10 มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกัน ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีให้ผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 3-7 สอดคล้องกับการศึกษาของ Sourbaji และคณะ (1999) Ficarra และคณะ (2000) Nalluri และคณะ (2003)

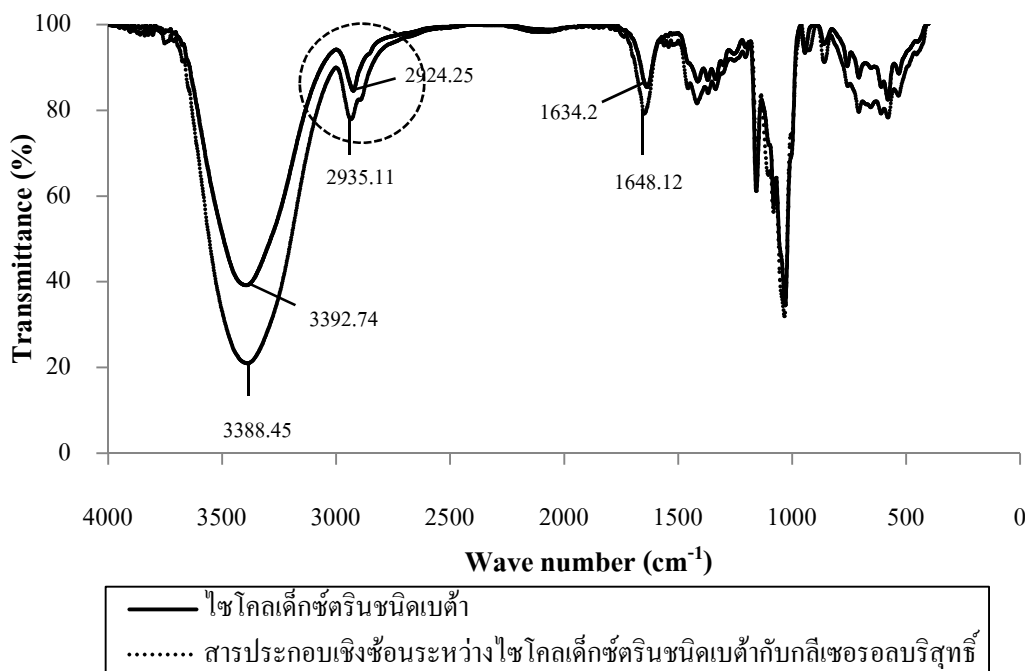
Reddy และคณะ (2004) Bilensoy และคณะ (2006) Farcas และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่าผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม และมีลักษณะของรูปร่างที่ไม่แน่นอน



ภาพที่ 3-7 ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษารูปร่างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$ ,  $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3388.45\text{ cm}^{-1}$ ,  $2935.11\text{ cm}^{-1}$  และ  $1648.12\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-8 โดยสเปกตรัมที่เกิดในช่วงระหว่าง  $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนหมู่ OH (OH groups) สเปกตรัมที่เกิดในช่วงระหว่าง  $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงหมู่  $\text{-CH}$  และ  $\text{-CH}_2$  ( $\text{-CH}$  and  $\text{-CH}_2$  groups) และสเปกตรัมที่เกิดในช่วงประมาณ  $1650\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Lamcharfi, *et al.*, 1995; Dollo, *et al.*, 1996; Hedges, 1998; Fernandes, *et al.*, 2002; Lee, *et al.*, 2002; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Ndlebe, *et al.*, 2004;

Rodriguez-Tenreiro, *et al.*, 2004; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumane, 2005; Bratu, *et al.*, 2009; Kane, *et al.*, 2009)

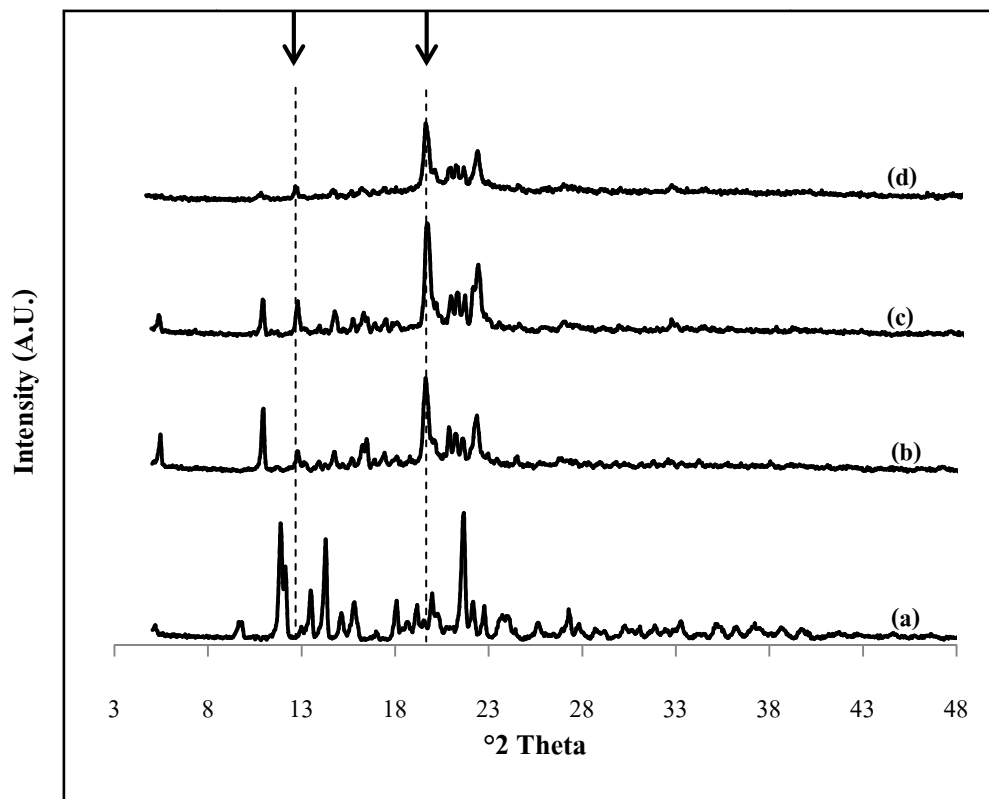


ภาพที่ 3-8 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์กับกลีเซอรอลบริสุทธ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method

### 2.1.2 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์แอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธ์ ด้วยวิธี evaporation method

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์แอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธ์ ทำให้เกิดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่แสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ที่ตำแหน่งประมาณ  $12.5^\circ$  (Taweepreda, 2005; Xue, *et al.*, 2006) และตำแหน่งประมาณ  $20.0^\circ$  (Rusa and Tonelli, 2000; Li, *et al.*, 2003; He, *et al.*, 2005; Xue, *et al.*, 2006; Jara, *et al.*, 2008) ซึ่งปรากฏในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์แอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธ์ และไม่ปรากฏในโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ บริสุทธ์ ดังแสดงในภาพที่ 3-9 จากการศึกษพบว่าปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลร้อยละ 10 สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ได้ดีที่สุด และมีแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอล บริสุทธ์ เนื่องจากการหลงเหลือของกลีเซอรอลบริสุทธ์ที่แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของ

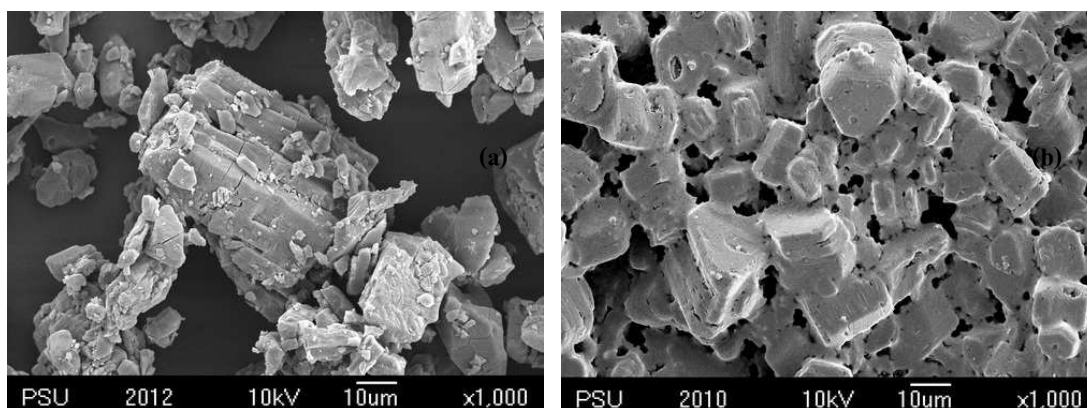
สารประกอบเชิงซ้อนทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน



ภาพที่ 3-9 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคล-เด็คซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟาบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคล-เด็คซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20

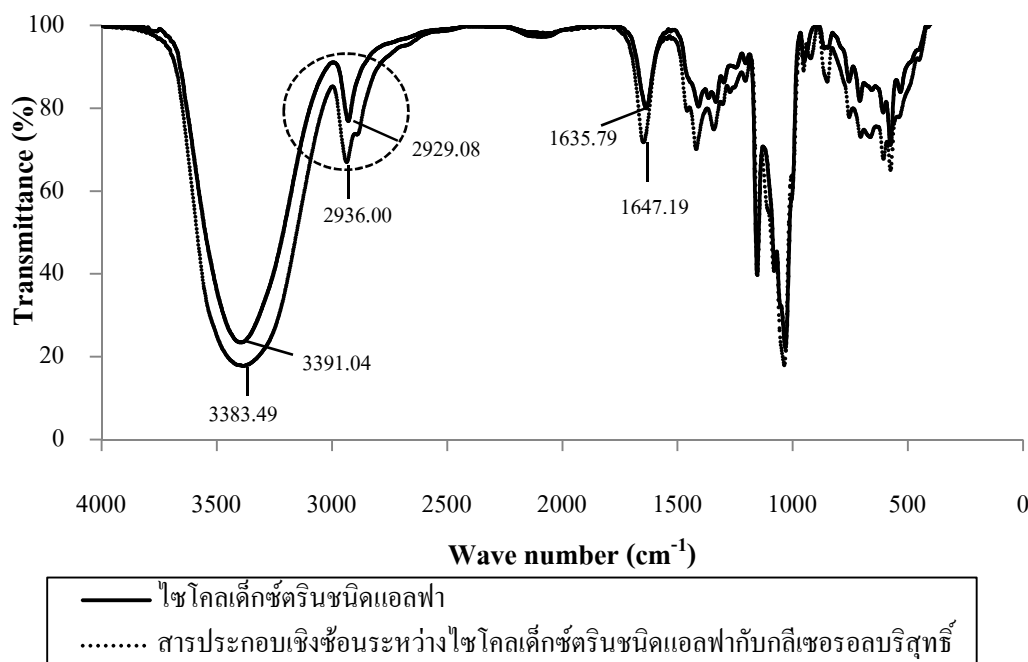
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟาไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ผ่านการระเหยน้ำระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟาร้อยละ 10 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟา กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ พบว่า ผลึกของไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟาร้อยละ 10 มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็คซ์ทรินชนิดแอลฟาให้ผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า และมีลักษณะของผลึกที่ไม่แน่นอน แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกของ

ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟาร้อยละ 10 ดังแสดงในภาพที่ 3-10 สอดคล้องกับการศึกษาของ Nalluri และคณะ (2003) He และคณะ (2005) และ Jara และคณะ (2008) ซึ่งทำการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟา พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟาทำให้เกิดผลึกที่มีลักษณะรูปร่างของผลึกที่ไม่แน่นอน



ภาพที่ 3-10 ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟาที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟากับกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟาบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3391.04\text{ cm}^{-1}$   $2929.08\text{ cm}^{-1}$  และ  $1635.79\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3383.49\text{ cm}^{-1}$   $2936.00\text{ cm}^{-1}$  และ  $1647.19\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-11 สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแอลฟากับกลีเซอรอล สอดคล้องกับการศึกษาของ Hedges (1998) Lee และคณะ (2002) Perdomo-López และคณะ (2002) Li และคณะ (2003) Bongiorno และคณะ (2005) และ Charumanee (2005) โดยการที่ตำแหน่งสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการเชื่อมต่อนพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลของกลีเซอรอล และรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ตำแหน่งสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิม

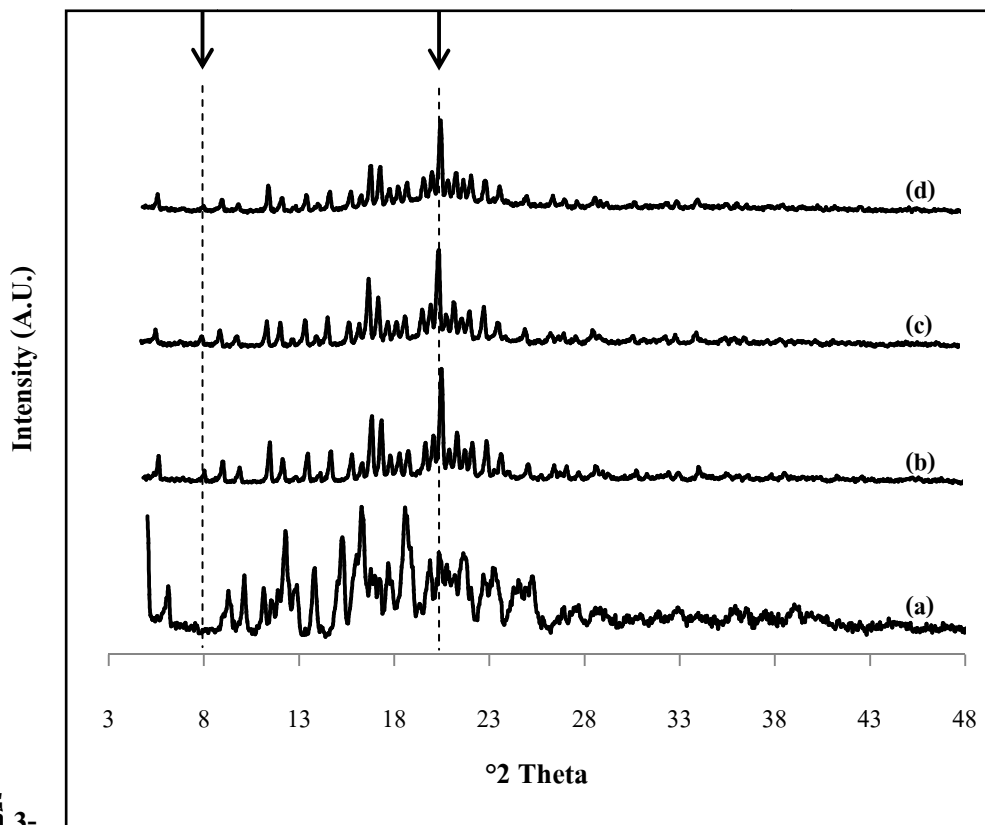


ภาพที่ 3-11 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีเอทิลีนไกลคอลและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method

### 2.1.3 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ด้วยวิธี evaporation method

ในส่วนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ทำให้ได้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $7.9^\circ$  (Taweepreda, 2005) และตำแหน่งประมาณ  $21.0^\circ$  (Veiga and Merino, 2002) โดยแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 5 ดังแสดงในภาพที่ 3-12 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 พบว่าอัตราส่วนของโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็น 1:1 แต่เนื่องจากช่องว่างกลางของโพลีเอทิลีนไกลคอลมีขนาดใหญ่พอที่จะอนุญาตให้โมเลกุลของกลีเซอรอลอาศัยอยู่ได้มากกว่า 1 โมเลกุล ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์จึงเป็นอัตราส่วน

1:2 เห็นได้ว่านอกจากปริมาณของไซโคลเด็กซ์ตรินและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแล้ว ขนาดช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ตรินยังเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเช่นกัน

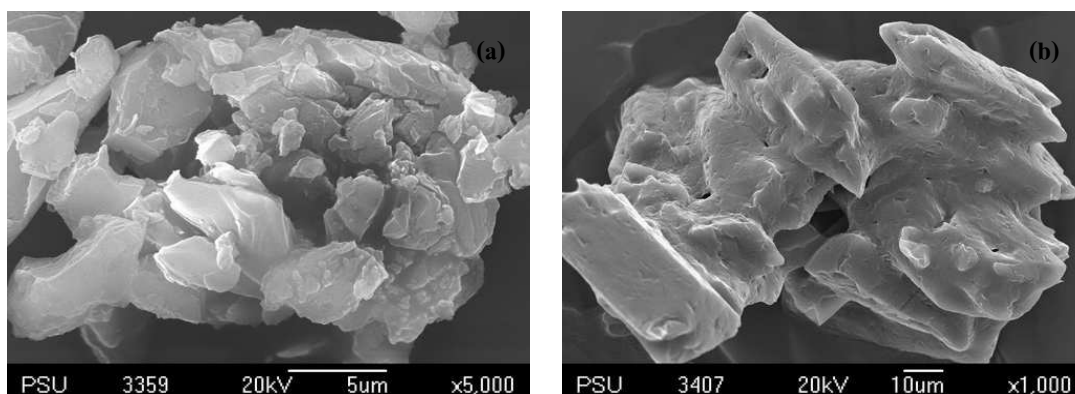


ภาพที่ 3-

12 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมาบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ผ่านการระเหยนํ้าระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมาร้อยละ 10 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ พบว่า ผลึกของ

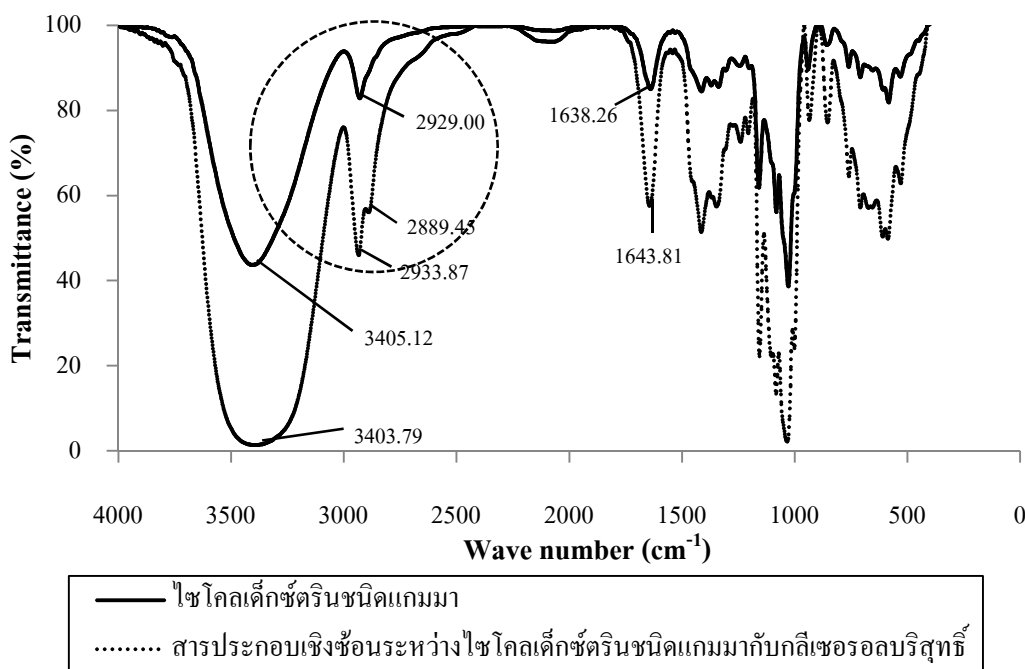
ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาร้อยละ 10 ผลึกมีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกันเป็นชั้น ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทรีกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมามีลักษณะของผลึกที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มและมีรูปร่างไม่แน่นอน ดังแสดงในภาพที่ 3-13 สอดคล้องกับการศึกษาของ Nalluri และคณะ (2003) และ Toropainen และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมา พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาทำให้เกิดผลึกที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน และผลึกมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม



ภาพที่ 3-13 ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทรี (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษาร่วมของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3405.12\text{ cm}^{-1}$   $2929.00\text{ cm}^{-1}$  และ  $1638.10\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทรีให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3403.79\text{ cm}^{-1}$   $2933.87\text{ cm}^{-1}$   $2889.45\text{ cm}^{-1}$  และ  $1643.81\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-14 สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทรี โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลและโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ตำแหน่งสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิม (Hedges, 1998; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumanee, 2005)

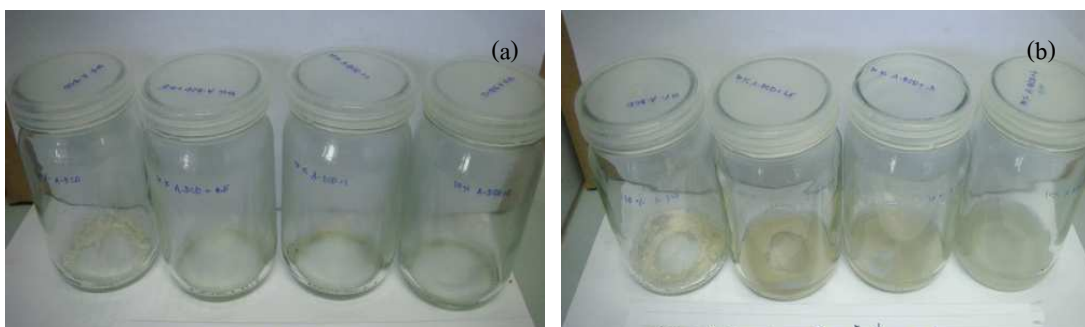




ภาพที่ 3-14 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมาและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดแกมมากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method

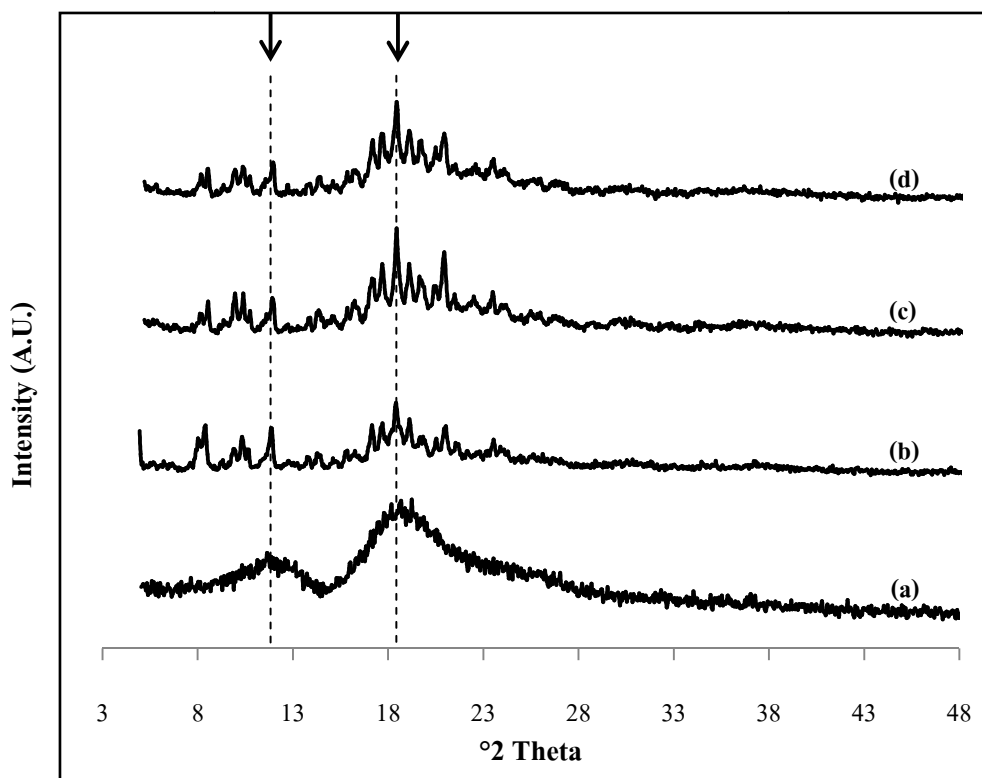
#### 2.1.4 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ด้วยวิธี Evaporation method

ในส่วนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เมื่อนำสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต้ามผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์มาทำการระเหยน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส ได้สารละลายใสที่มีความหนืด และแข็งตัวเมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนให้ผลึกสีขาวทันทีเมื่อทำการเติมน้ำกลั่น ดังแสดงในภาพที่ 3-15 ทั้งนี้เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตาสารรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีเมื่อได้รับความร้อนในระดับหนึ่ง และจำเป็นต้องใช้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกสอดระหว่างโมเลกุลของของแข็งที่ได้จากการระเหยเพื่อช่วยในการตกผลึกของสารประกอบเชิงซ้อน



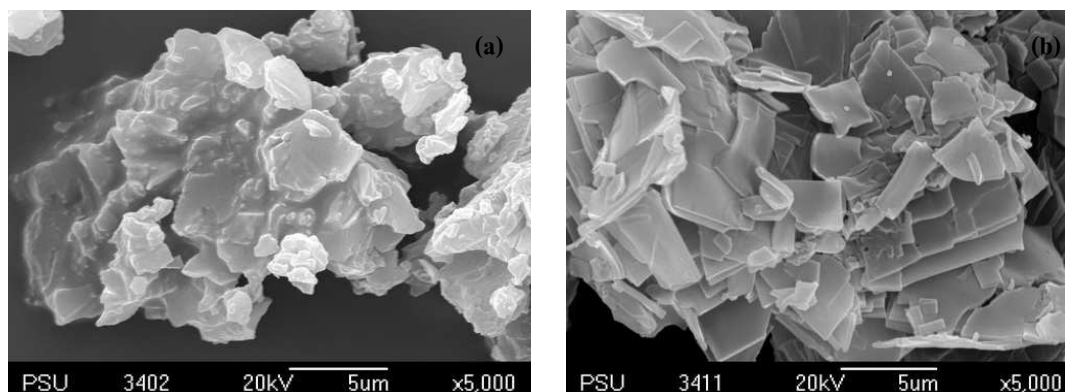
ภาพที่ 3-15 ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านการระเหยน้ำ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านการระเหยน้ำเมื่อนำมาเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร

เมื่อนำผลึกสีขาวที่ได้ไปศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า สามารถทำให้เกิดสเปกตรัมที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^\circ$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) และประมาณ  $18.7^\circ$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2006; Kane, *et al.*, 2009) เช่นเดียวกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่าเป็นอนุพันธ์ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าจึงทำให้ได้สเปกตรัมที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่มีความสูงของสเปกตรัมที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่างกัน โดยแนวโน้มการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 5 ดังแสดงในภาพที่ 3-16 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่าต่อกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 เป็นไปได้ว่าไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่าอาจรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel กับโมเลกุลน้ำและถูกเหนี่ยวนำด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel เมื่อทำการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจากแรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่พยายามดึงโมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ทริน



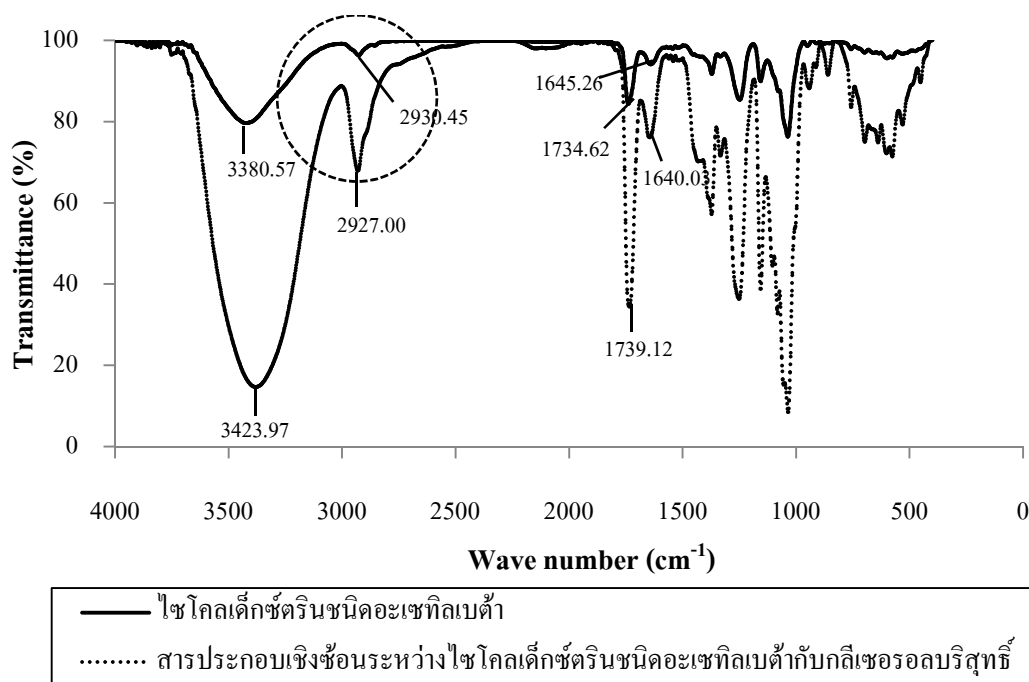
ภาพที่ 3-16 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 20

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ไปทำการศึกษาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ผ่านการระเหยน้ำระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตาร้อยละ 10 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์พบว่า ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตาร้อยละ 10 มีลักษณะเป็นผลึกแผ่นบางซ้อนทับกันและรวมเป็นกลุ่ม ทำให้มีรูปร่างของผลึกที่ไม่แน่นอน ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้ผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันและสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบตากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (a) ผลึกของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่าที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธี evaporation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่ากับกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษารูปทรงผลึกของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3423.97\text{ cm}^{-1}$   $2927.00\text{ cm}^{-1}$   $1739.12\text{ cm}^{-1}$  และ  $1640.03\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอะเซทิลเบต่ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3380.57\text{ cm}^{-1}$   $2930.45\text{ cm}^{-1}$   $1734.62\text{ cm}^{-1}$  และ  $1645.26\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-18 สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน สอดคล้องกับการศึกษาของ Hedges (1998) Perdomo-López และคณะ (2002) และ Charumane (2005) โดยการที่ตำแหน่งสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการเชื่อมต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเดกซ์ทรินกับโมเลกุลของกลีเซอรอล และรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ตำแหน่งสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 3-18 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ชนิดอะซีทิลเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดอะซีทิลเบต้ากับกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method

จากผลการศึกษาการรวมตัวเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดต่างๆ กับกราฟีนออกไซด์ ด้วยวิธี evaporation method เมื่อนำผลึกที่ได้มาทำการศึกษารวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์กับกราฟีนออกไซด์เกิดขึ้นได้ดีที่สุดในโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดแอลฟา รองลงมาคือ โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดอะซีทิลเบต้า โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดแกมมา และโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดเบต้า ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากความสูงของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ตำแหน่งที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อนำผลึกที่ได้ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ พบว่าลักษณะของผลึกที่ได้มีความแตกต่างจากลักษณะผลึกของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์อย่างชัดเจน นอกจากนี้เมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ พบว่า สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนมีการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสเปกตรัมของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์กับกราฟีนออกไซด์ โดยการ

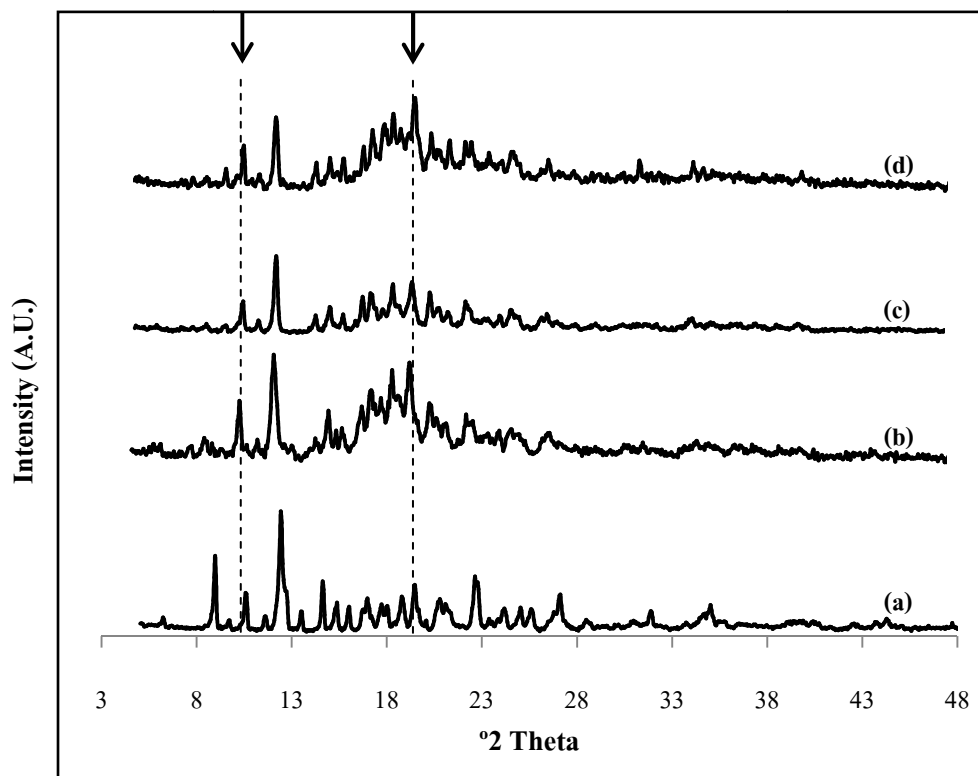
เชื่อมต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเดกซ์ทรินกับโมเลกุลของกลีเซอรอล ทำให้ได้สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม

ในส่วนของการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method และ dry mixing method เป็นการศึกษาการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าเพียงชนิดเดียว เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย และเนื่องจากไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าเป็นไซโคลเดกซ์ทรินชนิดที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด และมีราคาถูกกว่าไซโคลเดกซ์ทรินชนิดอื่น

## 2.2 Co-precipitation method

ผลการทดลองการศึกษการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method ด้วยอ่างอังไอน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นผลึกสีขาวทันทีหลังจากอุณหภูมิลดลง เนื่องจากไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถละลายในน้ำได้น้อยที่อุณหภูมิต่ำ

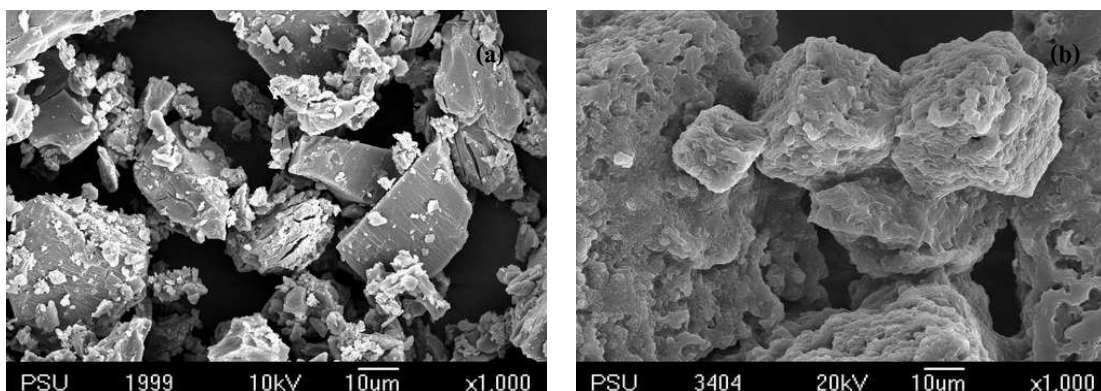
เมื่อแยกผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^{\circ}$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) และประมาณ  $19.7^{\circ}$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2005; Kane, *et al.*, 2009) แนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 5 ดังแสดงในภาพที่ 3-19 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าต่อกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5 พบว่า อัตราส่วนของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้าต่อกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็น 2:1 เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ทำการละลายไซโคลเดกซ์ทรินที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 10 และมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:1 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Song และคณะ (2008) แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจากแรงเหวี่ยงนำระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่พยายามดึงโมเลกุลของกลีเซอรอลอีกโมเลกุลหนึ่งออกจากช่องว่างกลางของไซโคลเดกซ์ทรินชนิดเบต้า เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีปริมาณของไซโคลเดกซ์ทรินและกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 3-19 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี evaporation method (a) ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ร้อยละ 5 (c) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ร้อยละ 10 และ (d) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ร้อยละ 20

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ผ่านการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method ระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าร้อยละ 10 และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ พบว่า ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าร้อยละ 10 มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันและรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ให้ผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อกันเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 3-20 สอดคล้องกับการศึกษาของ Sourbaji

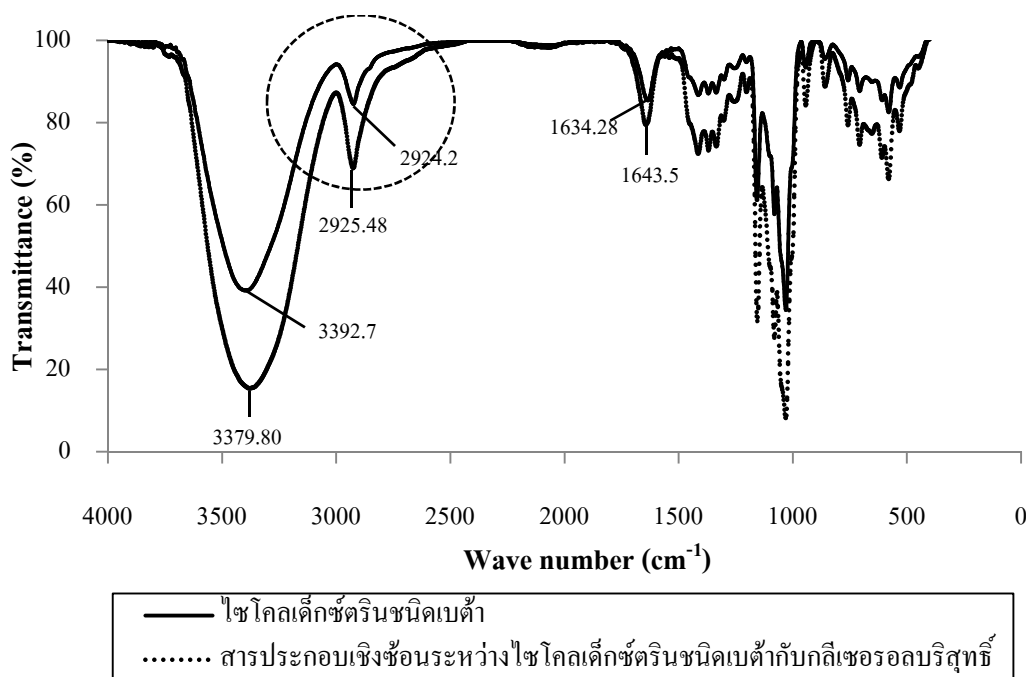
และคณะ (1999) Ficarra และคณะ 2000 Nalluri และคณะ (2003) Reddy และคณะ (2004) Bilensoy และคณะ (2006) Farcas และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่าผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม และมีลักษณะของรูปร่างที่ไม่แน่นอน



ภาพที่ 3-20 ภาพถ่ายผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ (a) ผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าที่เตรียมด้วยวิธี co-precipitation method (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3379.80\text{ cm}^{-1}$   $2925.48\text{ cm}^{-1}$  และ  $1643.53\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-21 สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ (Lamcharfi, *et al.*, 1995; Dollo, *et al.*, 1996; Hedges, 1998; Fernandes, *et al.*, 2002; Lee, *et al.*, 2002; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Ndebe, *et al.*, 2004; Rodriguez-Tenreiro, *et al.*, 2004; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumane, 2005; Bratu, *et al.*, 2009; Kane, *et al.*, 2009)





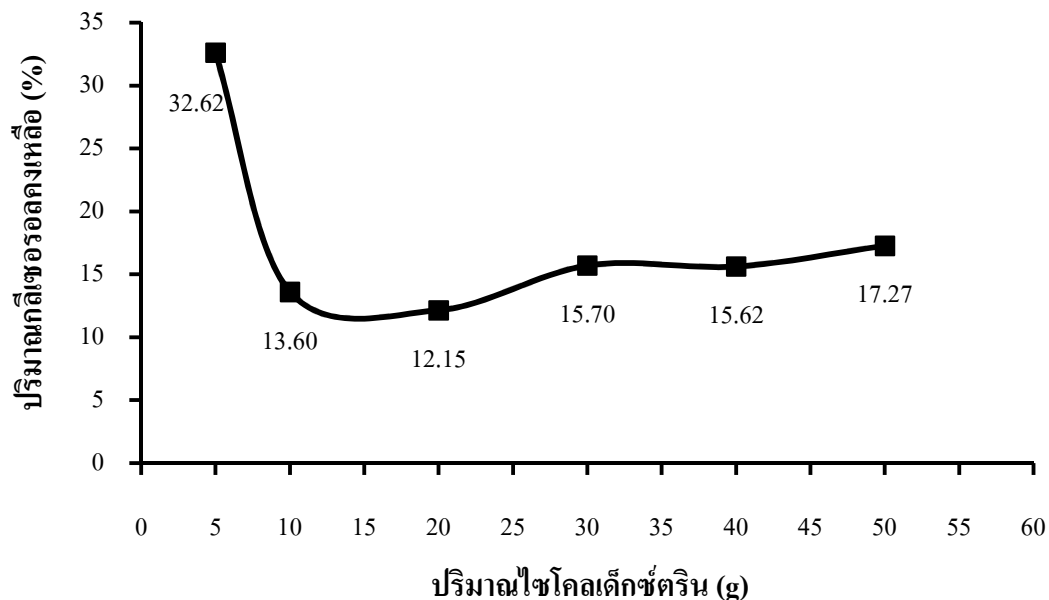
ภาพที่ 3-21 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี co-precipitation method

### การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลในสารละลายที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method

การศึกษากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method นอกจากทำให้กลีเซอรอลรวมตัวเกิดผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนแล้ว ยังมีส่วนของสารละลายไซซึ่งน่าจะมิกลิเซอรอลบริสุทธิ์หลงเหลืออยู่ จึงได้มีการศึกษากการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลเพื่อให้ทราบปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือที่ละลายอยู่ในส่วนของสารละลายไซ โดยทำการศึกษาในส่วนของปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าที่แตกต่างกัน และปริมาณกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน

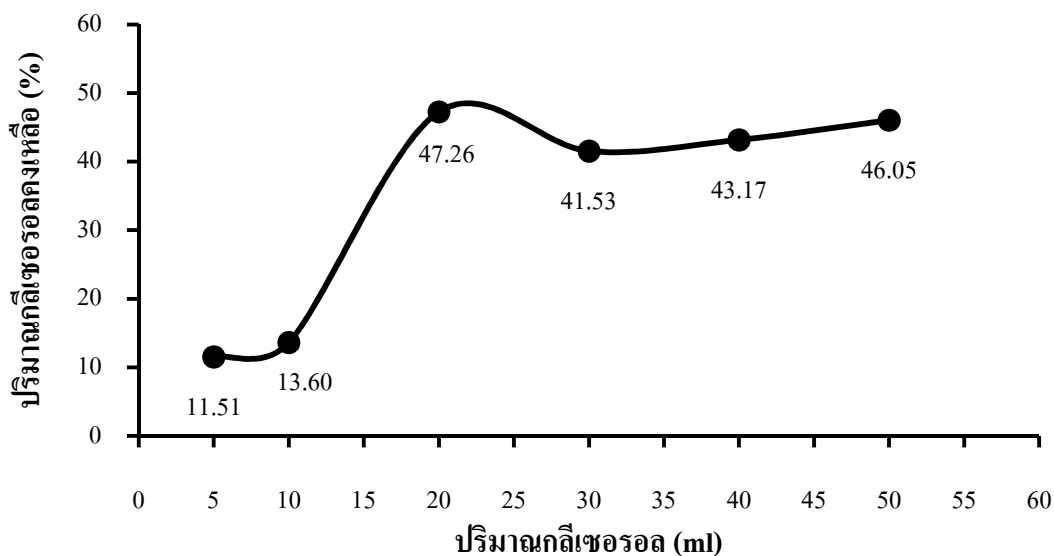
จากผลการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือโดยการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินแตกต่างกันที่ปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินร้อยละ 5 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือลดลงเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินมากกว่าร้อยละ 5 และมีปริมาณกลีเซอรอลคงเหลืออยู่ในระดับใกล้เคียงกันเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ดังแสดงในภาพที่ 3-22 โดยปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือสามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า

ซึ่งพบว่ากลีเซอรอลสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าได้  
ประมาณร้อยละ 67.38-87.85



**ภาพที่ 3-22** ปริมาณกลีเซอรอลคองเกลือในสารละลายไซของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วย  
วิธี co-precipitation method ของการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า 5 10 20  
30 40 และ 50 กรัม ตามลำดับ

จากผลการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลคองเกลือโดยการเติมปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์แตกต่างกันที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 5 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลคองเกลือเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินมากกว่าร้อยละ 10 และมีปริมาณกลีเซอรอลคองเกลืออยู่ในระดับใกล้เคียงกันเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ตรินร้อยละ 20 30 40 และ 50 ดังแสดงในภาพที่ 3-23 โดยปริมาณกลีเซอรอลคองเกลือสามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ซึ่งพบว่ากลีเซอรอลสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 5-10



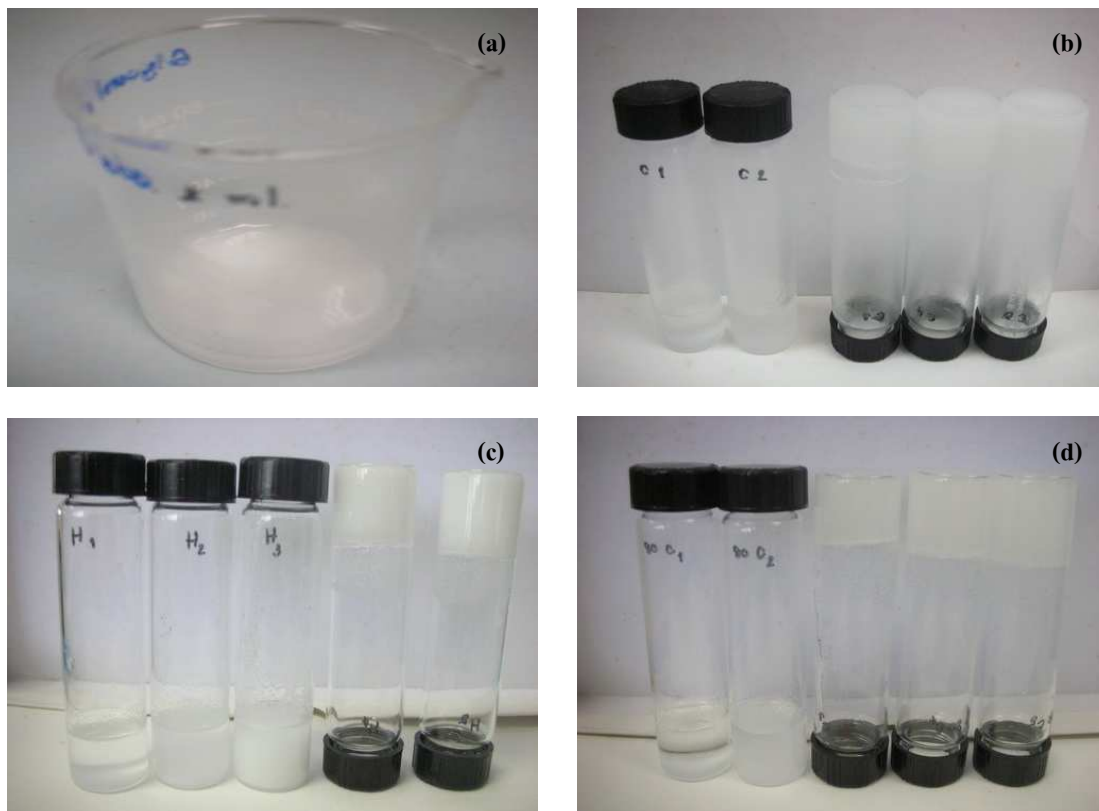
ภาพที่ 3-23 ปริมาณเกลือเซอรอลคั่งเหลือในสารละลายใสของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method ของการเติมปริมาณเกลือเซอรอล 5 10 20 30 40 และ 50 กรัม ตามลำดับ

จากผลการศึกษาปริมาณเกลือเซอรอลคั่งเหลือในสารละลายใสที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและปริมาณเกลือเซอรอลที่ต่างกัน พบว่า การลดลงของปริมาณเกลือเซอรอลคั่งเหลือลดลงได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและปริมาณเกลือเซอรอลร้อยละ 10 โดยมีปริมาณเกลือเซอรอลคั่งเหลือเท่ากับร้อยละ 13.60 สอดคล้องกับผลการศึกษากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับเกลือเซอรอล ซึ่งพบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเกิดได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและปริมาณเกลือเซอรอลร้อยละ 10

### 2.3 Dry mixing method

ผลการทดลองการศึกษากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเกลือเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าด้วยวิธี dry mixing method พบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นผลึกสีขาวทันทีเมื่อทำการผสมไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับเกลือเซอรอลบริสุทธิ์ และให้ผลึกสีขาวมากขึ้นเมื่อวางไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 3-24 พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ผลึกสามารถรวมตัวได้มากขึ้นและเกิดการเหนียวนำโมเลกุลของผลึกไว้ด้วยกัน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิด

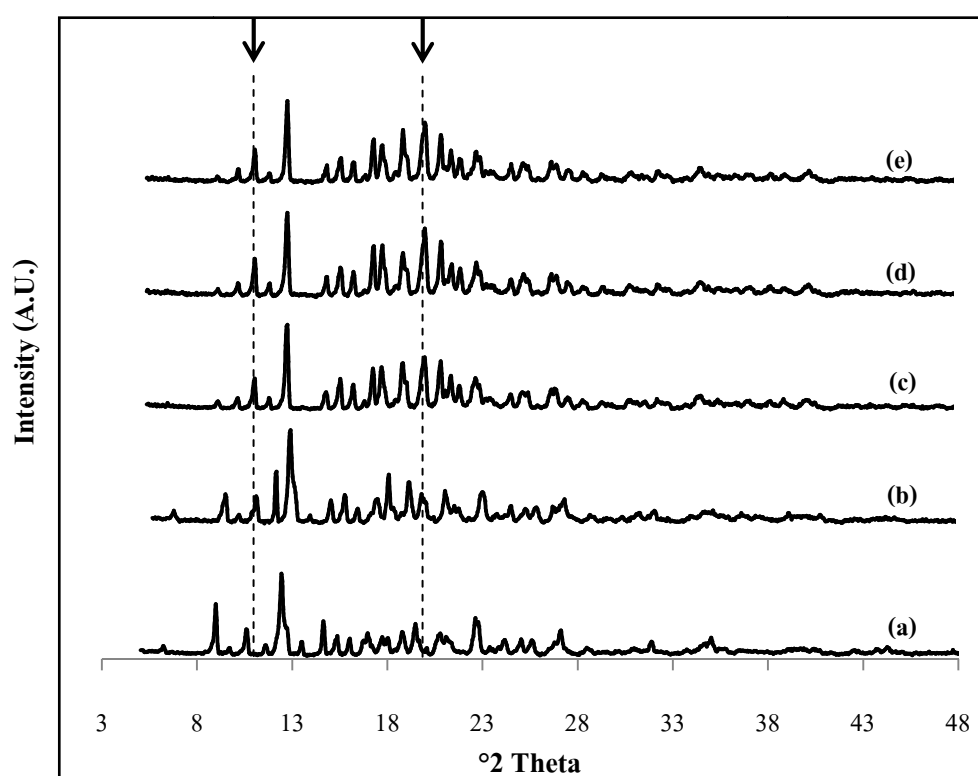
สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ด้วยวิธี dry mixing method



ภาพที่ 3-24 ผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธ์กับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าจากการเตรียมด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) อุณหภูมิห้อง (b) แช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (c) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (d) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เมื่อนำผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^{\circ}$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) และประมาณ  $19.7^{\circ}$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2006; Kane, *et al.*, 2009) แนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใกล้เคียงกันเมื่อทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงเมื่อทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง และมีแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนลงที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ

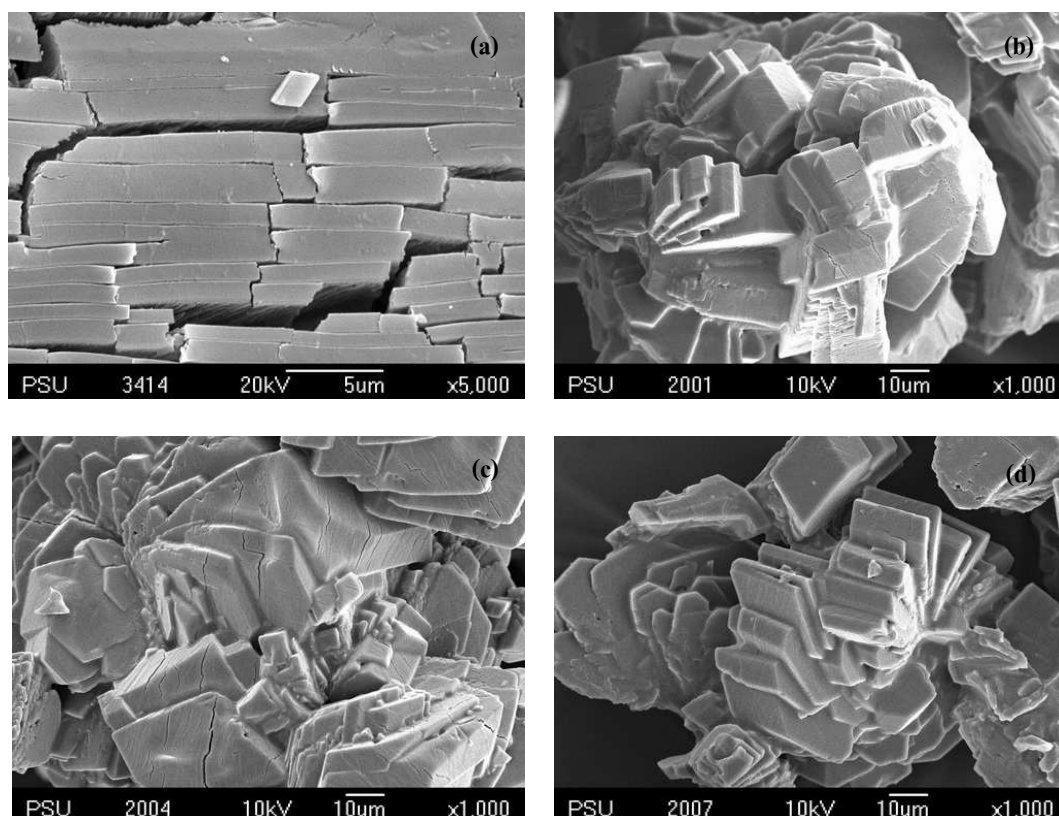
ที่ 3-25 สอดคล้องกับการศึกษา Giordano และคณะ (2001) ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อ ไชโคลเด็กซ์ตรินและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไชโคลเด็กซ์ตริน พบว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไชโคลเด็กซ์ตรินเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส (ทำการศึกษา ในช่วงอุณหภูมิ 25-300 องศาเซลเซียส) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยมีแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-25 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) ไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าบริสุทรี (b) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง (c) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (e) สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

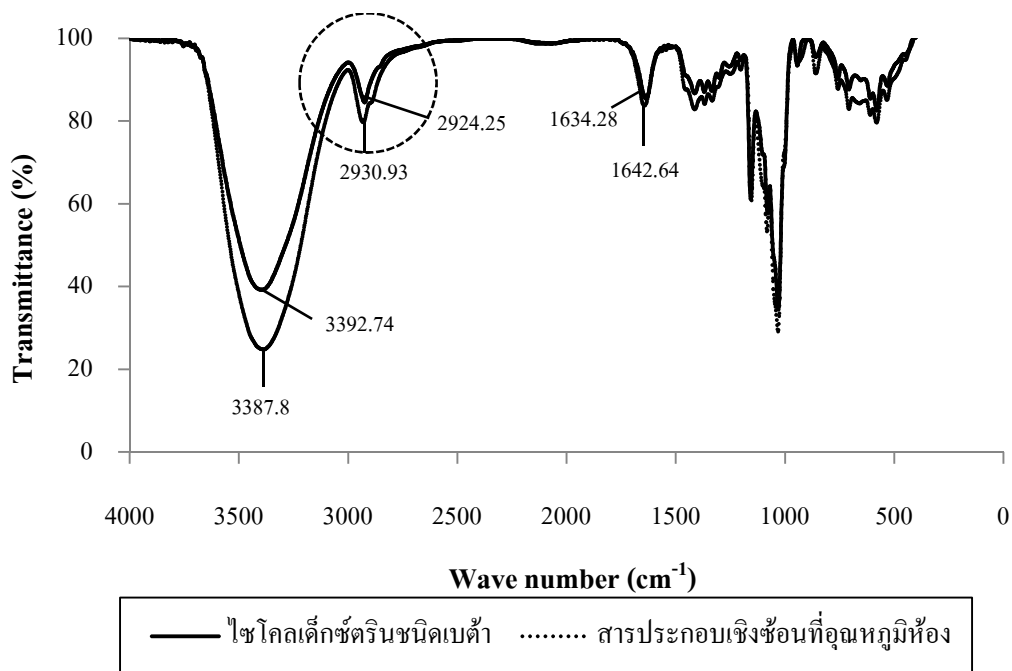
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ได้จากการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ

แตกต่างกันพบว่า ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ให้ผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ อย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะการซ้อนทับกันของผลึกที่ซ้อนทับในระนาบเดียวกัน แสดงถึงลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Shen, *et al.*, 2005) ต่างจากผลึกที่ทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำๆ ที่มีลักษณะของผลึกเป็นแผ่นซ้อนทับกัน และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 3-26 สอดคล้องกับการศึกษาของ Sourbaji และคณะ (1999), Ficarra และคณะ (2000), Nalluri และคณะ (2003), Reddy และคณะ (2004), Bilensoy และคณะ (2006), Farcas และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่าผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม และมีลักษณะของรูปร่างที่ไม่แน่นอน

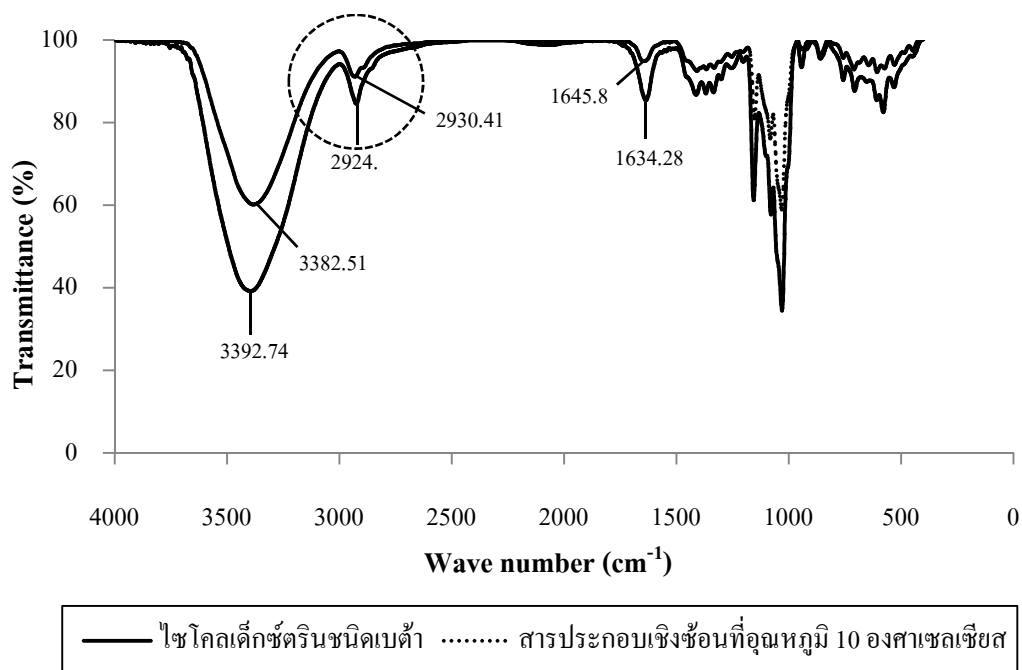


ภาพที่ 3-26 ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (c) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (d) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3387.82\text{ cm}^{-1}$   $2930.93\text{ cm}^{-1}$  และ  $1642.64\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-27 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3382.51\text{ cm}^{-1}$   $2930.41\text{ cm}^{-1}$  และ  $1645.89\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-28 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3374.50\text{ cm}^{-1}$   $2927.73\text{ cm}^{-1}$  และ  $1645.47\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-29 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3377.85\text{ cm}^{-1}$   $2927.51\text{ cm}^{-1}$  และ  $1645.31\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-30 สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Lamcharfi, *et al.*, 1995; Dollo, *et al.*, 1996; Hedges, 1998; Fernandes, *et al.*, 2002; Lee, *et al.*, 2002; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Ndlebe, *et al.*, 2004; Rodriguez-Tenreiro, *et al.*, 2004; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumane, 2005; Bratu, *et al.*, 2009; Kane, *et al.*, 2009)

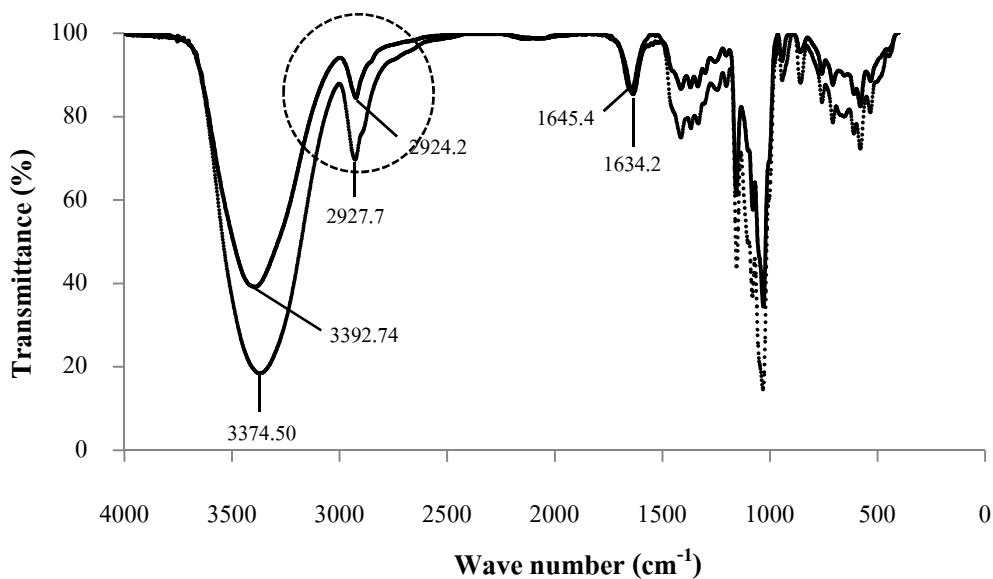


ภาพที่ 3-27 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีเอทิลีนชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิห้อง



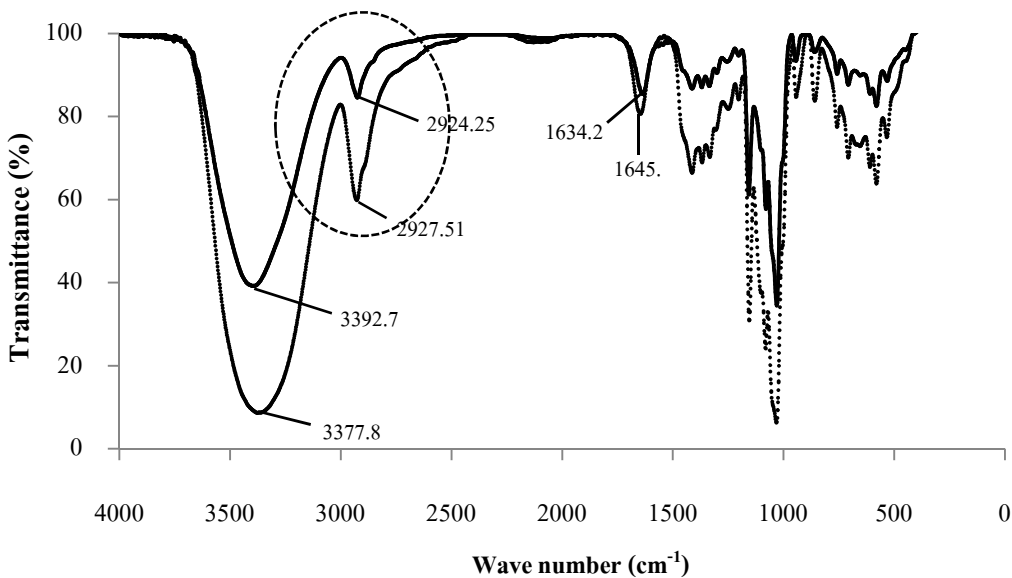
ภาพที่ 3-28 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีเอทิลีนชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีเอทิลีนชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส





— ไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ..... สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 3-29 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



— ไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ..... สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 3-30 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์-ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยศึกษาเปรียบเทียบด้วยวิธีการเตรียมสารที่ต่างกัน เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการเตรียมสารด้วยวิธีที่ต่างกัน มาศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method เป็นวิธีการที่สามารถทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็กซ์ทรินได้ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี evaporation method และ co-precipitation method ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากความสูงของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ตำแหน่งที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า เมื่อนำผลึกที่ได้ไปถ่ายภาพลักษณะของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับไซโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์ พบว่า ลักษณะของผลึกที่ได้มีความแตกต่างจากลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์อย่างชัดเจน นอกจากนี้เมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของไซโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์ พบว่า สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนมีการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสเปกตรัมของไซโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์ แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอล โดยการเชื่อมต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลของกลีเซอรอลเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และทำให้สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือจากส่วนใสของการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและการเติมปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ต่างกัน พบว่า สัดส่วนของการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เหมาะสม คือ การเติมไซโคลเด็กซ์ทรินและกลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยทำให้เกิดปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือที่ประมาณร้อยละ 13.60 ซึ่งพบว่ากลีเซอรอลสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ประมาณร้อยละ 86.40 สอดคล้องกับผลการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล ซึ่งพบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเกิดได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 10

### 3. ประสิทธิภาพการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี

การศึกษาประสิทธิภาพการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าออกจากสารประกอบเชิงซ้อน เพื่อให้ได้กลีเซอรอลบริสุทรี และสามารถนำไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าที่ใช้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งหนึ่ง

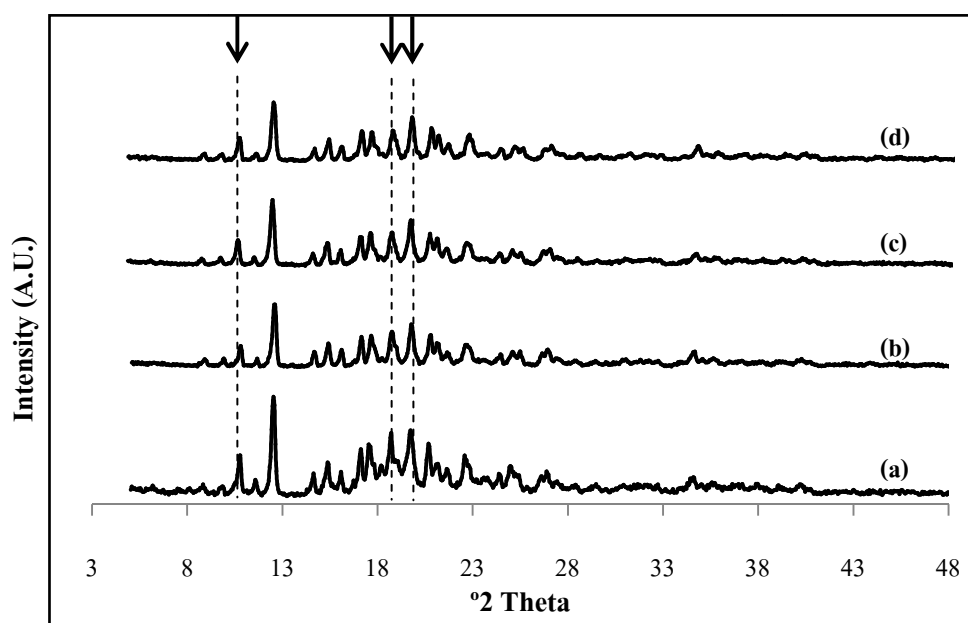
การศึกษาประสิทธิภาพการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีทำการศึกษาโดยใช้สารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.17 โมลต่อลิตร (Szejtli, 1988; Shieh and Hedges, 1994) และสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.17 โมลต่อลิตร (Szejtli, 1988; Rusa and Tonelli, 2000) ในการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และทำการศึกษาด้วยวิธี evaporation method และ co-precipitation method

#### 3.1 Evaporation method

การศึกษาประสิทธิภาพการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีด้วยวิธี evaporation method แบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาโดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ (Shieh and Hedges, 1994) และสารละลายยูเรีย (Rusa and Tonelli, 2000)

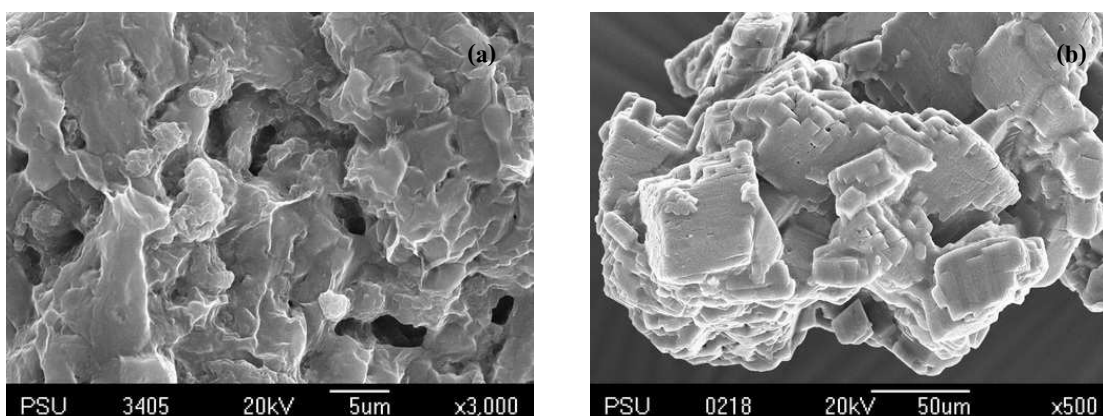
จากการศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ พบว่า เกิดผลึกสีขาวทันทีหลังจากผสมสารละลายไซโคลเด็กซ์ทรินเข้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี และสารละลายไซเดียมคลอไรด์ และให้ผลึกสีขาวมากขึ้นเมื่อนำไประเหยน้ำจนผลึกแห้งที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปคตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรีที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^{\circ}$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) ประมาณ  $18.7^{\circ}$  และประมาณ  $19.7^{\circ}$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2005; Kane, *et al.*, 2009) การลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงมากที่สุด เมื่อทำการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร และมีแนวโน้มการลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนน้อยลง เมื่อปริมาณสารละลายไซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-31 โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลจะให้โครงสร้างผลึกแบบ

channel ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งประกอบด้วย หมู่ -OH เกิดอันตรกิริยากับหมู่ -H และมีกลีเซอรอลแทรกตัวอยู่ในช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ตริน เมื่อทำการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นของ  $\text{Na}^+$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ -OH เกิดการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินแยกเป็นอิสระจากกันและปลดปล่อยโมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลวงของไซโคลเด็กซ์ตริน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shieh and Hedges (1994) ซึ่งทำการศึกษาระบวนการแยกไซโคลเด็กซ์ตรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมในการแยกไซโคลเด็กซ์ตรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อน ดังนั้นเมื่อทำการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน แต่เนื่องจากในการศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ ทำการศึกษาด้วยวิธีระเหยน้ำทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน



ภาพที่ 3-31 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลต่อลิตร

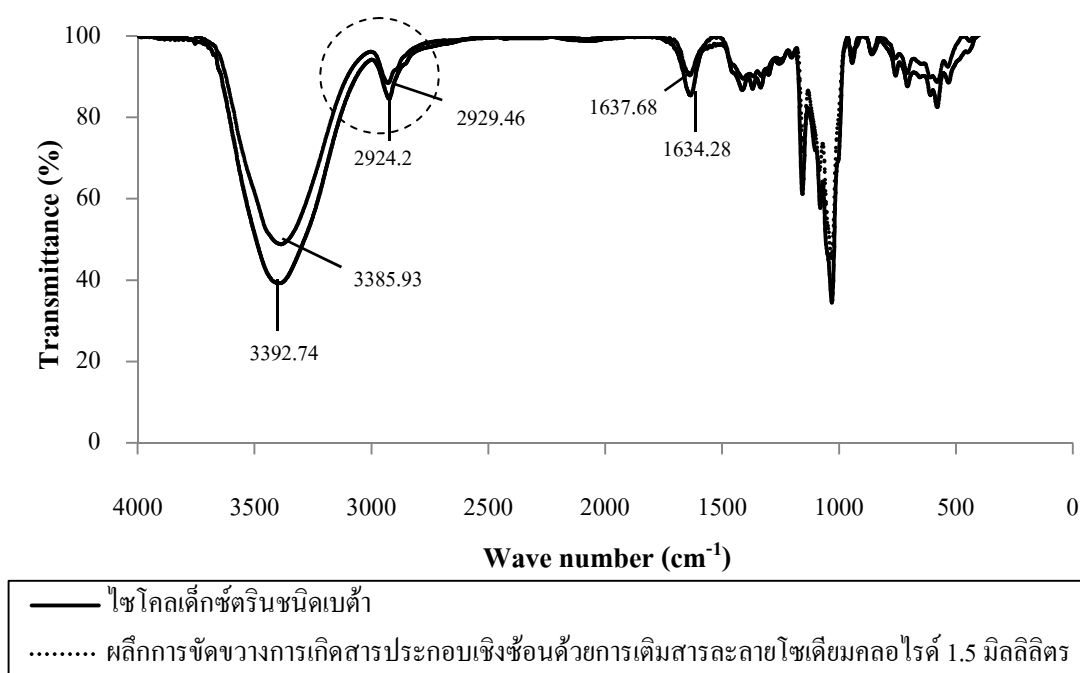
เมื่อนำผลึกสีขาวที่เกิดจากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบระหว่างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า ลักษณะของผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทรีมีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) แต่ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะของผลึกเป็นผลึกสี่เหลี่ยมที่ซ้อนทับกัน และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม คล้ายกับลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทรีที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทรี (Shen, *et al.*, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3-32



ภาพที่ 3-32 ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทรี (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษาค่าประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทรีให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 โมล

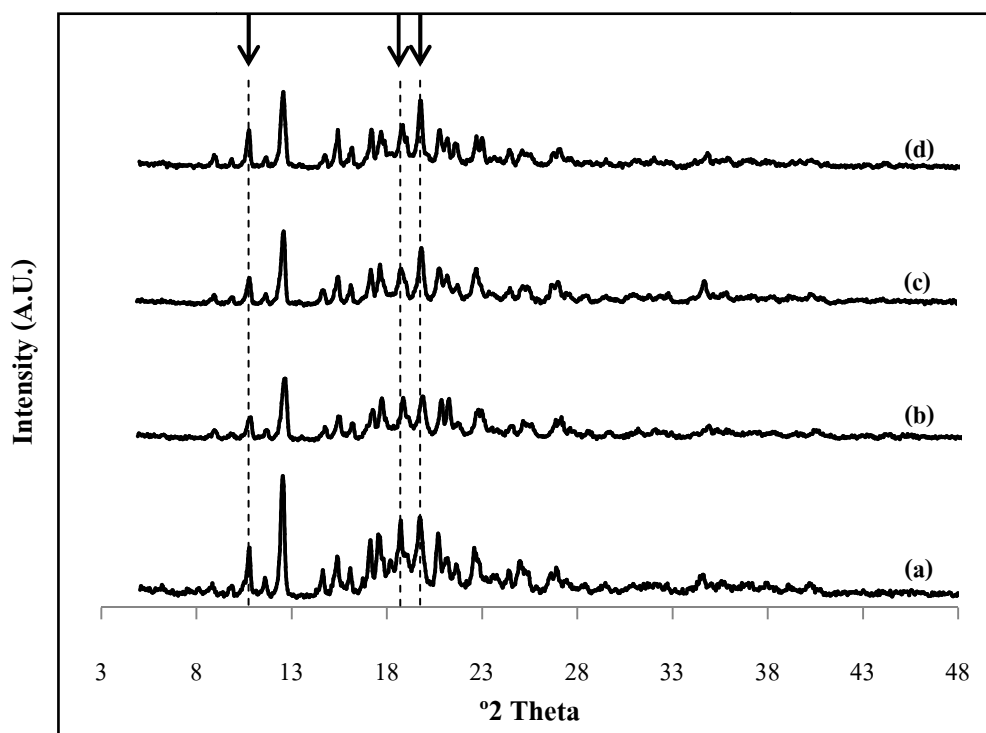
ต่อลิตร ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3385.93\text{ cm}^{-1}$   $2929.46\text{ cm}^{-1}$  และ  $1637.68\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-33 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ต่างกันเพียงขนาดและความสูงของสเปกตรัม แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shieh and Hedges (1994) ซึ่งพบว่า การเติมไซเดียมคลอไรด์สามารถทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนออกเป็นโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินและโมเลกุลของสารอื่นได้



ภาพที่ 3-33 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร

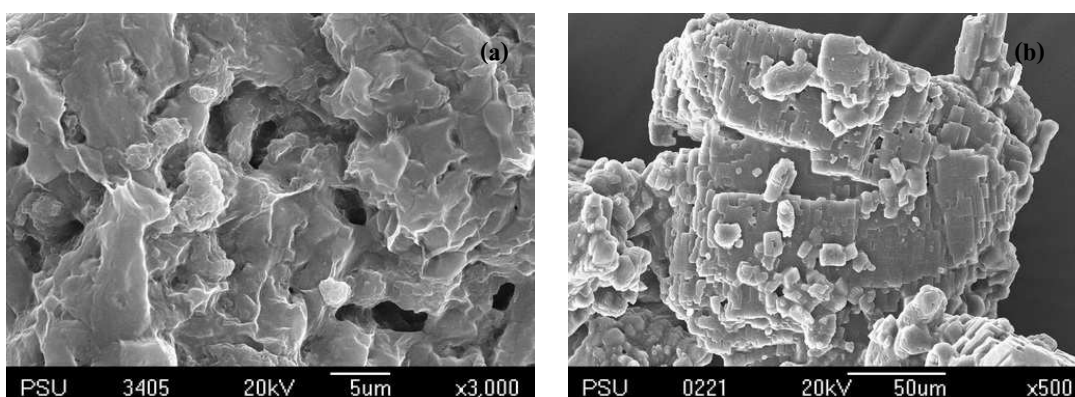
จากการทดลองการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรีย พบว่าเมื่อนำตะกอนสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^\circ$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) ประมาณ  $18.7^\circ$  และประมาณ  $19.7^\circ$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2005; Kane, *et al.*, 2009) โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ซึ่ง

ให้โครงสร้างผลึกแบบ channel และเชื่อมต่อโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งประกอบด้วยหมู่  $-OH$  เกิดอันตรกิริยากับหมู่  $-H$  และมีกลีเซอรอลแทรกตัวอยู่ในช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ตริน เมื่อทำการเติมสารละลายยูเรีย นอกจากเป็นการปรับเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายแล้ว ความแข็งแรงของหมู่  $-NH$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่  $-OH$  เกิดการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ตรินแยกออกจากกันและปลดปล่อยโมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ตริน จากผลการศึกษาพบว่า การลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงมากที่สุดเมื่อทำการเติมสารละลายยูเรีย ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0085 โมลต่อลิตร และมีแนวโน้มการลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนน้อยลงเมื่อปริมาณสารละลายยูเรียเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-34 เนื่องจากสารละลายยูเรียมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่เหนี่ยวนำโมเลกุลสารละลายยูเรียไว้ด้วยกัน ทำให้ไม่สามารถขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลกับไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าได้



ภาพที่ 3-34 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรีย (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอล บริสุทธิ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร

เมื่อนำผลึกสีขาวที่เกิดจากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย 0.0085 โมลต่อลิตร ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบระหว่างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทรี และผลึกที่ได้จากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า ลักษณะของผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทรีมีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) แต่ผลึกที่ได้จากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะของผลึกเป็นผลึกสี่เหลี่ยมที่ซ้อนทับกัน และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม คล้ายกับลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทรีที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทรี (Shen, *et al.*, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3-35

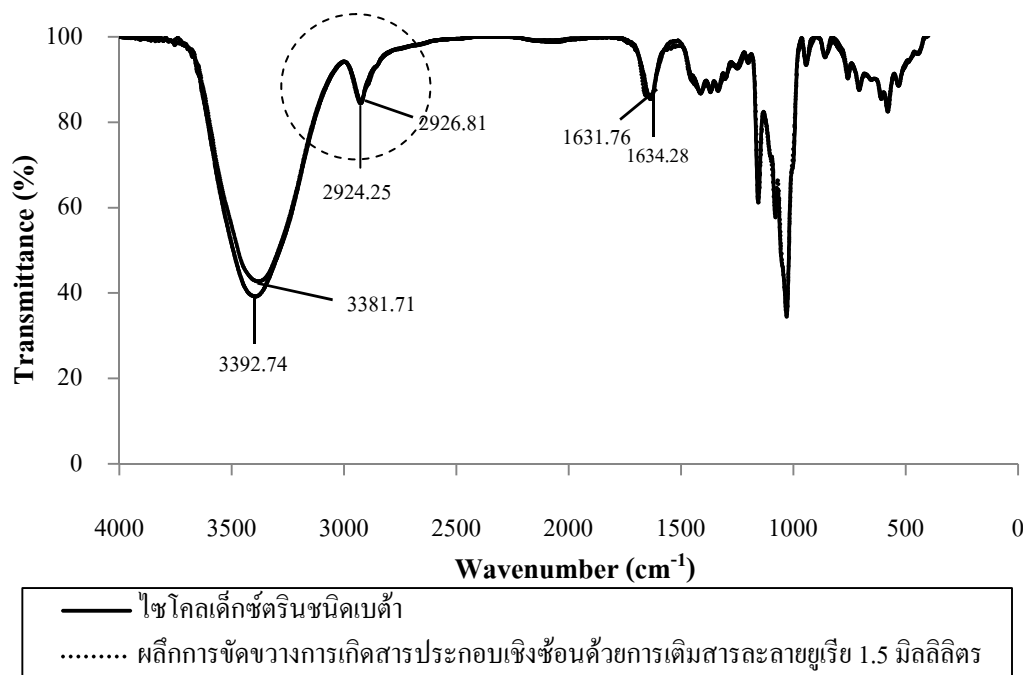


ภาพที่ 3-35 ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทรี (b) ผลึกที่ได้จากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทรีให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$ ,  $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  ผลึกที่ได้จากการจัดขบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3381.71\text{ cm}^{-1}$ ,  $2926.81\text{ cm}^{-1}$  และ  $1631.76\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-36 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทรี



แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้เป็นอย่างดีของการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร (Szejtli, 1988; Rusa and Tonelli, 2000) ด้วยวิธี Evaporation method



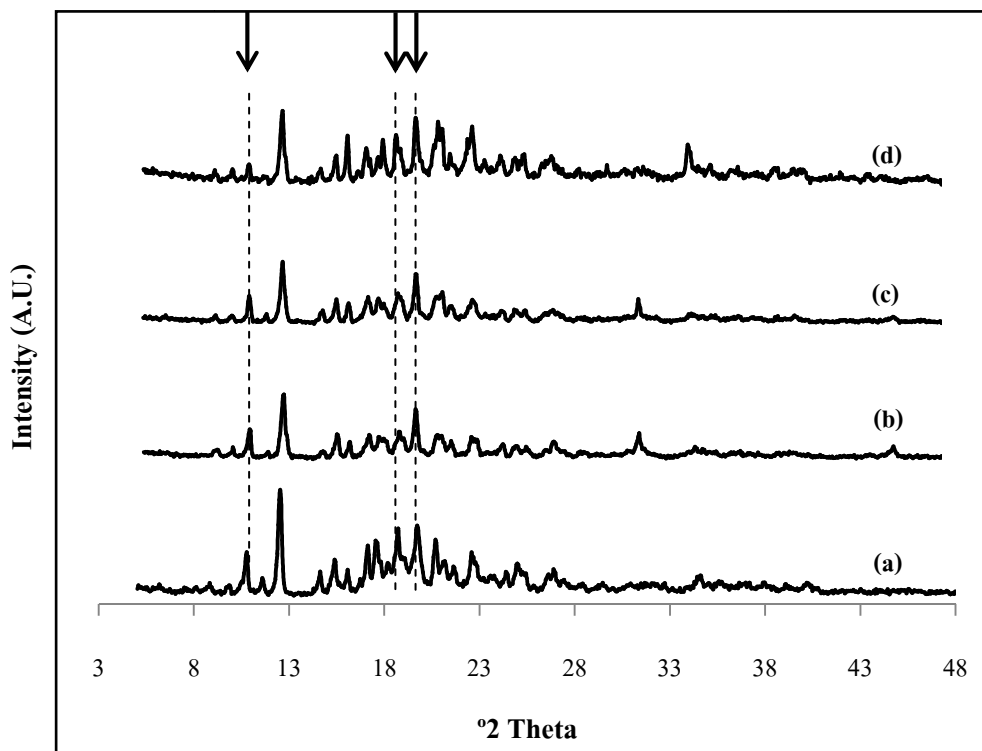
ภาพที่ 3-36 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีไคลด์เต็กซ์ตรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี evaporation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร

### 3.2 Co-precipitation method

การศึกษาประสิทธิภาพการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไคลด์เต็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธีด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Shieh and Hedges, 1994) และสารละลายยูเรีย (Rusa and Tonelli, 2000)

ในส่วนของการศึกษาการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไคลด์เต็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธีด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า เมื่อนำผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไคลด์เต็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธีที่ตำแหน่งประมาณ 11.0° (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) ประมาณ 18.7° และประมาณ 19.7° (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*,

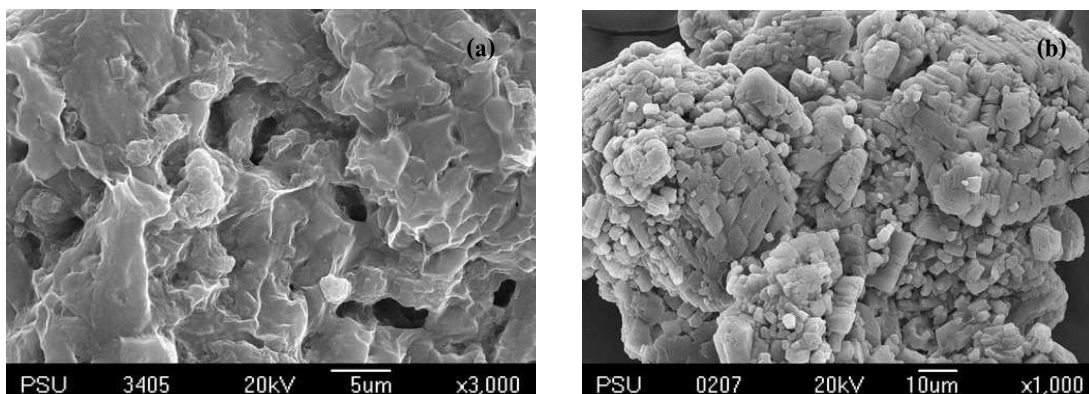
2005; Kane, *et al.*, 2009) การลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงมากที่สุดเมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร และมีแนวโน้มการลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 3-37 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Shieh and Hedges (1994) ซึ่งทำการศึกษาระบวนการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อน จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1-50 โดยน้ำหนักของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน โดยปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 1-5 เป็นปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมในการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนอยู่ในสถานะ slurry แต่เนื่องจากในการศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ ทำการศึกษาด้วยวิธี co-precipitation method สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้อยู่ในสถานะสารละลาย และทำการศึกษาในสถานะที่ต่างกัน เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้แรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่พยายามดึง โมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลางของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน



ภาพที่ 3-37 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอลบริสุทธ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลต่อลิตร

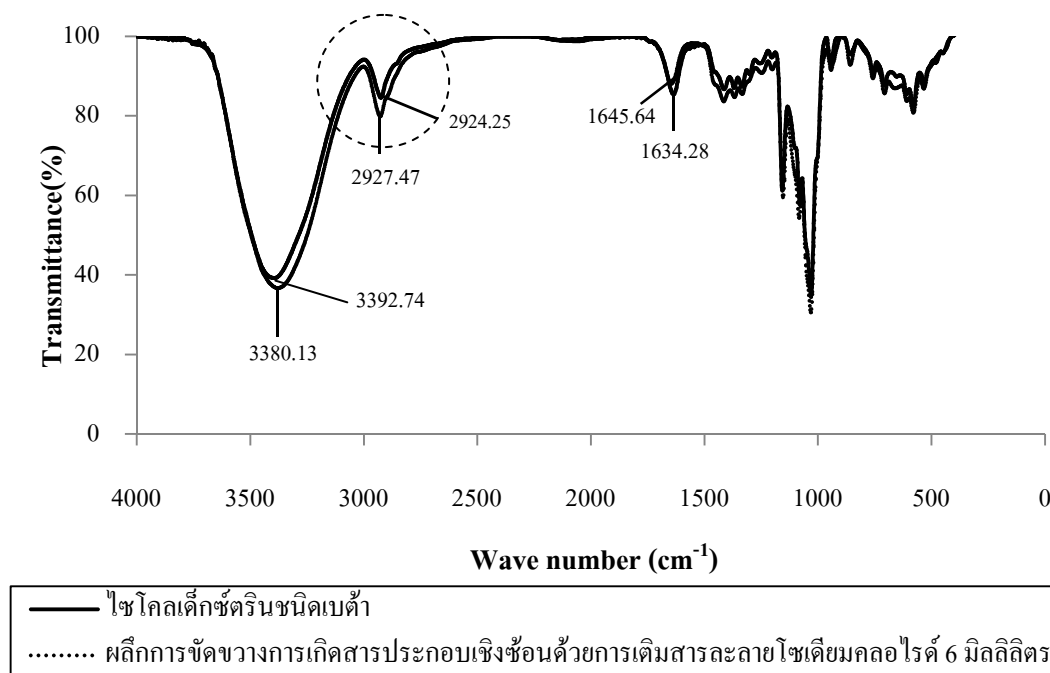
เมื่อนำผลึกสีขาวที่เกิดจากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลต่อลิตร ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบระหว่างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พบว่าลักษณะของผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธ์มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) แต่ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะของผลึกเป็นผลึกสี่เหลี่ยมที่ซ้อนทับกัน และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม คล้าย

กับลักษณะผลึกของไฮโดรเล็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Shen, *et al.*, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3-38



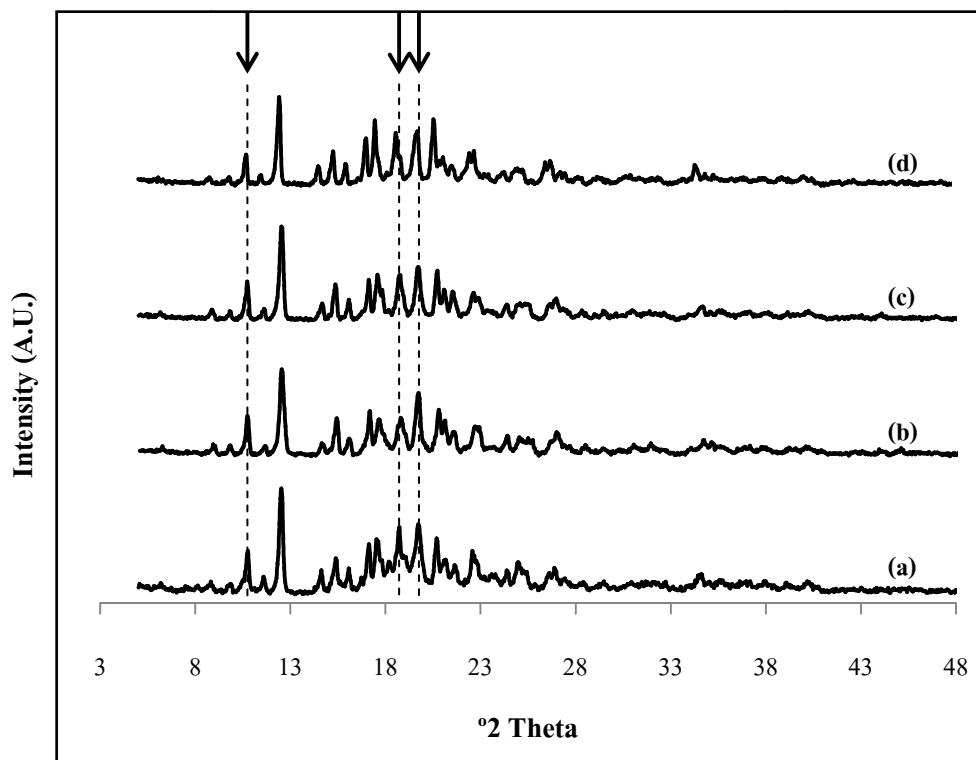
ภาพที่ 3-38 ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสาร ประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮโดรเล็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายไฮเดียมคลอไรด์

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษามงค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไฮโดรเล็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$ ,  $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตรให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3380.13\text{ cm}^{-1}$ ,  $2927.47\text{ cm}^{-1}$  และ  $1645.64\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-39 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของไฮโดรเล็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้เป็นอย่างดีของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร (Shieh and Hedges, 1994) ด้วยวิธี co-precipitation method



ภาพที่ 3-39 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร

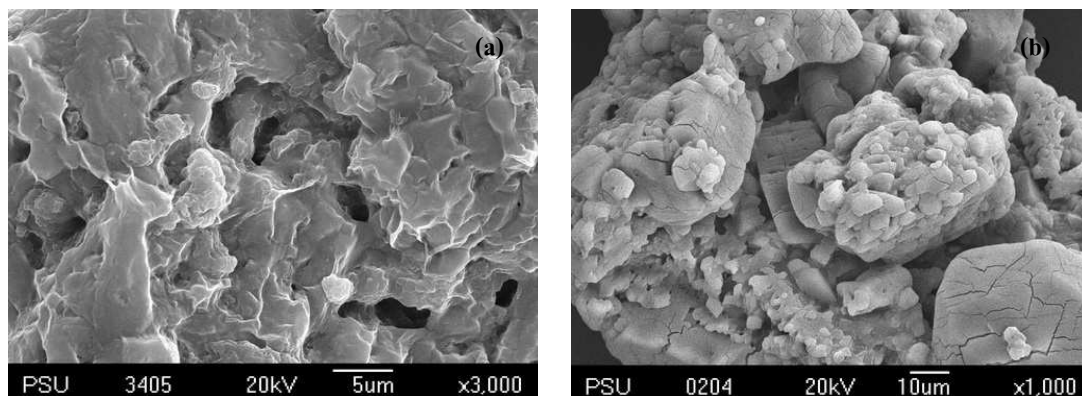
จากการทดลองการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี co-precipitation method ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยการเติมสารละลายยูเรีย พบว่า เมื่อนำผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $11.0^\circ$  (Moyano, *et al.*, 1997; Taweepreda, 2005) ประมาณ  $18.7^\circ$  และประมาณ  $19.7^\circ$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Farcas, *et al.*, 2006; Shen, *et al.*, 2005; Kane, *et al.*, 2009) การลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงมากที่สุดเมื่อทำการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้นเท่ากับ 0.034 โมลต่อลิตร โดยมีแนวโน้มการลดลงของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารละลายยูเรีย ดังแสดงในภาพที่ 3-40 เนื่องจากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ตรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำการศึกษาในสถานะของสารละลายที่อุณหภูมิมากกว่า 65 องศาเซลเซียส (Bleesley, 1989) เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารละลายยูเรียทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลที่พยายามดึงโมเลกุลของกลีเซอรอลออกจากช่องว่างกลวงของไชโคลเด็กซ์ตริน ทำให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลง



ภาพที่ 3-40 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์ด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรีย (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าผสมกลีเซอรอลบริสุทธ์ร้อยละ 10 (b) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.0085 โมลต่อลิตร (c) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร (d) สเปกตรัมของการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร

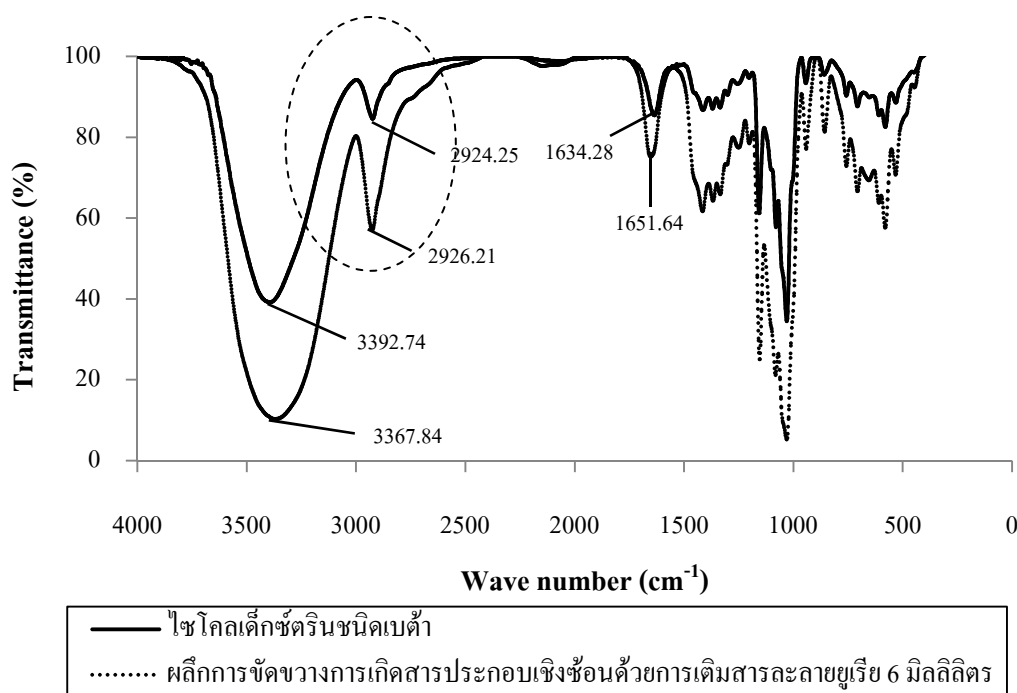
เมื่อนำผลึกสีขาวที่เกิดจากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร ไปทำการศึกษาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบระหว่างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับเซอรอลบริสุทธ์ และผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า ลักษณะของผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธ์มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนทับกันเชื่อมต่อเป็นผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจน (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) แต่ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะของผลึกเป็นผลึกสี่เหลี่ยมที่ซ้อนทับกัน และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม คล้ายกับ

ลักษณะผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Shen, *et al.*, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3-41



ภาพที่ 3-41 ภาพถ่ายผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการเติมสารละลายยูเรีย

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษารูปแบบการประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  ผลึกที่ได้จากการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3367.84\text{ cm}^{-1}$   $2926.21\text{ cm}^{-1}$  และ  $1651.64\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-42 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ต่างกันเพียงขนาดและความสูงของสเปกตรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการหลงเหลืออยู่ของสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้เกิดสเปกตรัมที่แสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล แสดงให้เห็นว่าการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร ไม่สามารถแยกไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าทั้งหมดออกจากสารประกอบเชิงซ้อนได้



ภาพที่ 3-42 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายยูเรีย ด้วยวิธี evaporation method และวิธี co-precipitation method เมื่อนำผลึกสีขาวที่เกิดจากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไปศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method สามารถจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ การเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี evaporation method การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี evaporation method และการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method ตามลำดับ เมื่อนำผลึกสีขาวที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ พบว่า ผลึกที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะของผลึกแตกต่างจากผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนอย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะเป็นแผ่นบางที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม และมีรูปร่างของผลึกที่ไม่แน่นอน ส่วนผลึกที่ได้จากการจัดขวางการ



เกิดการประกอบเชิงซ้อนมีลักษณะเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม เมื่อนำผลึกสีขาวที่ได้จากการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไปศึกษาองค์ประกอบของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) โดยสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน พบว่า การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method สามารถจัดขวางการเกิดสารประกอบได้ดีที่สุด รองลงมาคือ การเติมสารละลายยูเรีย 0.017 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี evaporation method การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี evaporation method และการเติมสารละลายยูเรีย 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method โดยการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ คือ การจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.017 โมลต่อลิตร เนื่องจากใช้สารละลายในการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนน้อยกว่า แต่มีความสามารถในการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใกล้เคียงกับการจัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร

#### 4. ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ

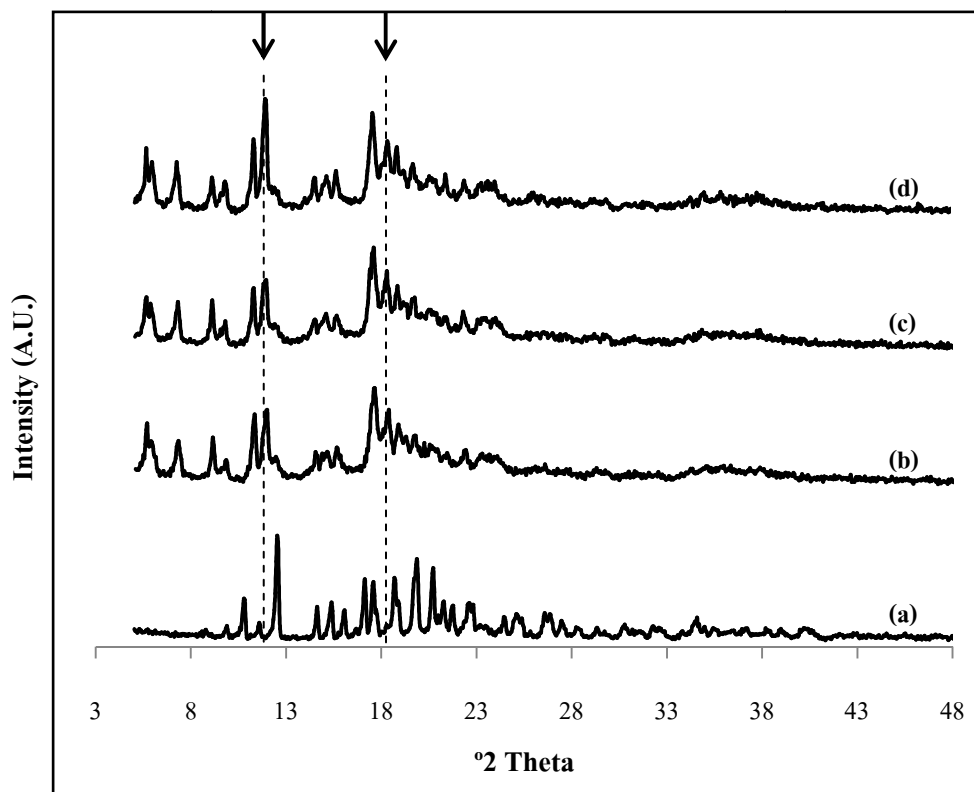
##### 4.1 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ

การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และแยกกลีเซอรอลออกจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆ แทนกระบวนการกลั่น ซึ่งต้องใช้งบประมาณและพลังงานสูงในการดำเนินการ โดยทำการศึกษาด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลอ่อนทันทีหลังจากการผสมกลีเซอรอลดิบเจือจางที่อัตราส่วน 1: 1 เข้ากับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ดังแสดงในภาพที่ 3-43



ภาพที่ 3-43 ตะกอนสีน้ำตาลอ่อนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบด้วยวิธี dry mixing method

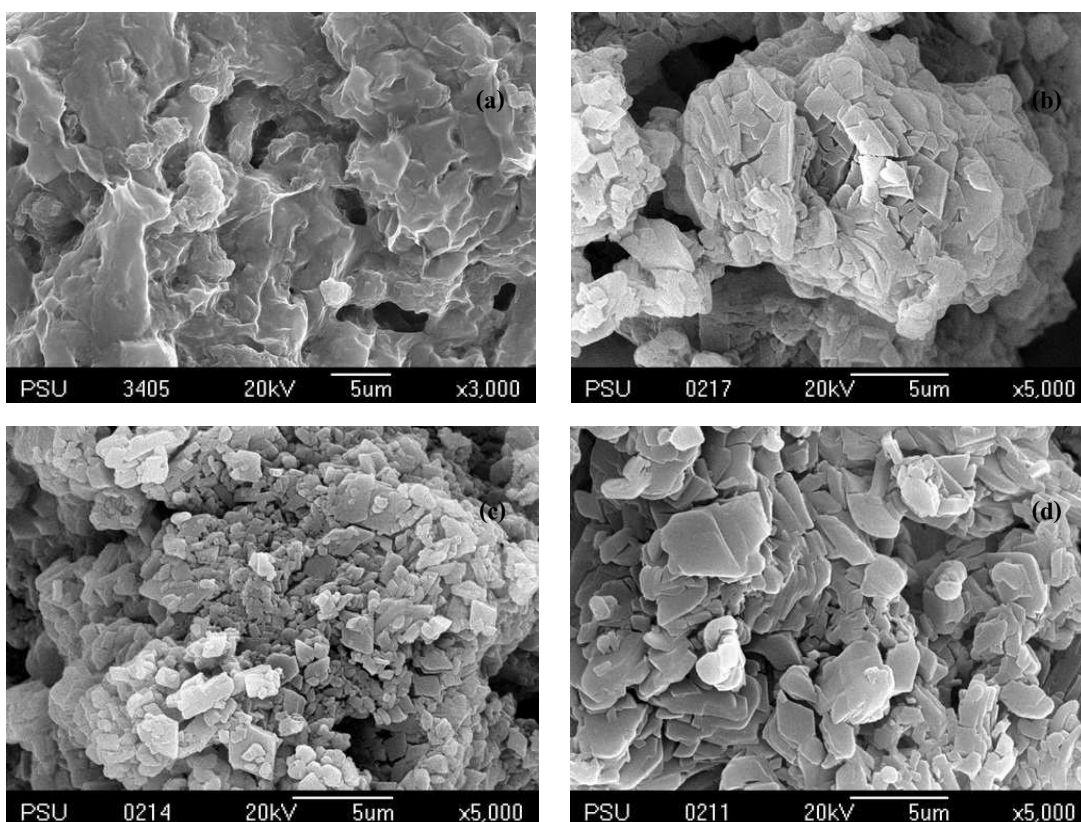
เมื่อนำตะกอนน้ำตาลอ่อนมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ ทำให้เกิดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $12.3^\circ$  และประมาณ  $18.7^\circ$  (Ficarra, *et al.*, 2000; Khan, *et al.*, 2001; Veiga and Merino, 2002) แสดงถึงการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวเป็นสเปกตรัมที่ปรากฏเฉพาะในสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล และไม่ปรากฏในไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ จากการเปรียบเทียบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ พบว่า สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นในตำแหน่งใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งประมาณ  $18.7^\circ$  ดังแสดงในภาพที่ 3-44 ทั้งนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลดิบที่นำไปใช้ในการศึกษานี้เป็นกลีเซอรอลดิบที่ได้มาจากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งมีสิ่งปนเปื้อนอื่นผสมอยู่ ทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ได้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนกัน



ภาพที่ 3-44 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบด้วยวิธี dry mixing method ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิห้อง (c) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

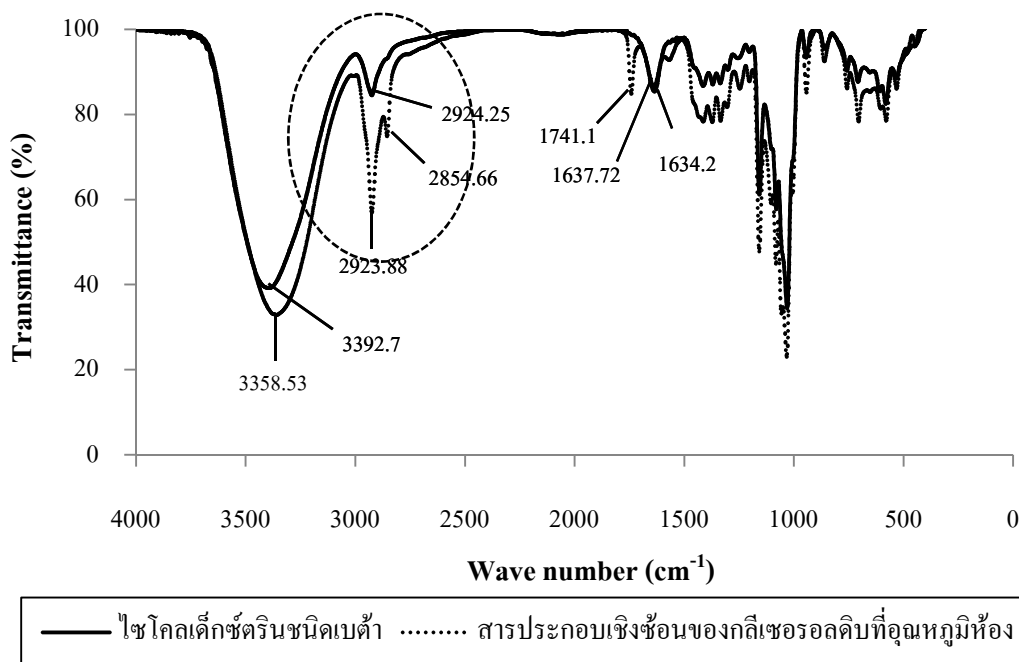
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบไปทำการศึกษากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบผลึกที่ได้จากการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิห้อง แ่งเย็นที่ 10 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบมีลักษณะแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์อย่างชัดเจน โดยผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลี-

เซอร์บอลบริสุทธ์มีลักษณะผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบมีลักษณะผลึกที่เป็นแผ่นบางซ้อนทับกัน และมีรูปร่างผลึกชัดเจน (Brandão, *et al.*, 2003) ดังแสดงในภาพที่ 3-45 ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่กลีเซอรอลคิบมีสิ่งปนเปื้อนบางชนิดที่สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ เช่น กรดไขมันอิสระ ไบโอดีเซล แอลกอฮอล์ และน้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เป็นต้น สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ผลึกที่ได้จากการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลคิบมีลักษณะที่แตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธ์

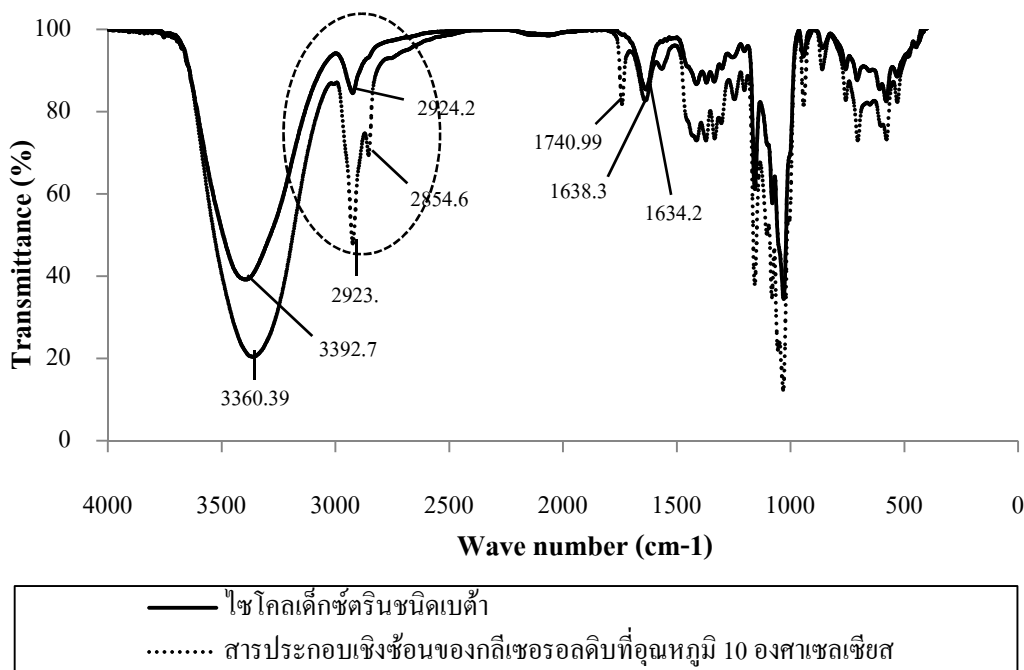


ภาพที่ 3-45 ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิต่างๆ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล บริสุทธ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลคิบที่อุณหภูมิห้อง (c) สารประกอบเชิงซ้อนของ กลีเซอรอลคิบที่ 10 องศาเซลเซียส (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลคิบที่ 80 องศาเซลเซียส

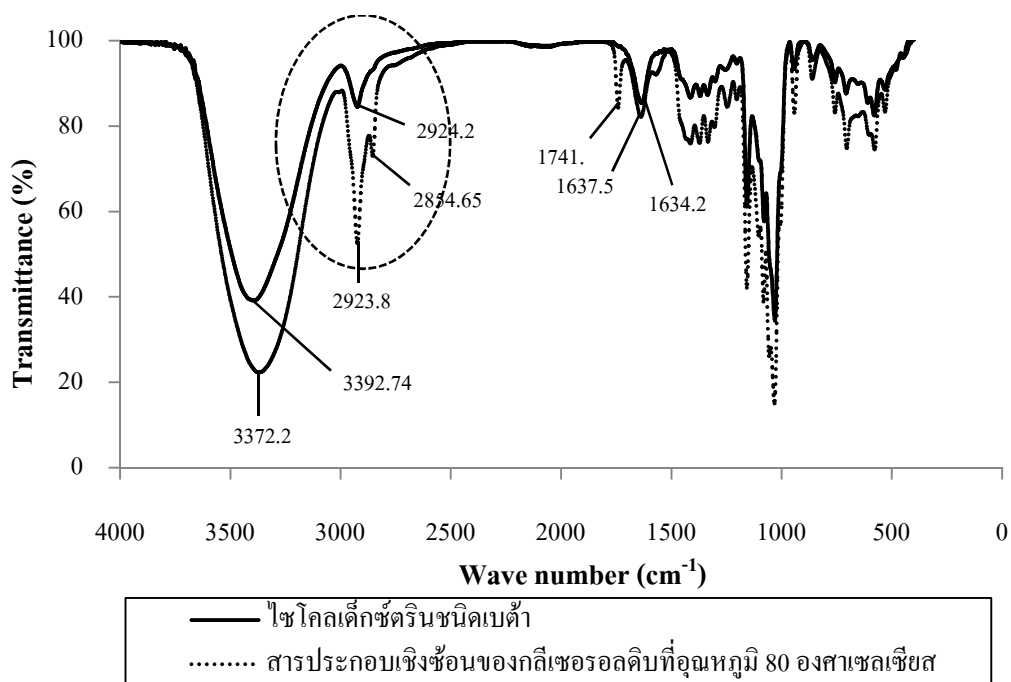
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษารูปแบบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า โซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิห้องให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3358.53\text{ cm}^{-1}$   $2923.88\text{ cm}^{-1}$   $2854.66\text{ cm}^{-1}$   $1741.10\text{ cm}^{-1}$  และ  $1637.72\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-46 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3360.39\text{ cm}^{-1}$   $2923.82\text{ cm}^{-1}$   $2854.61\text{ cm}^{-1}$   $1740.99\text{ cm}^{-1}$  และ  $1638.37\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-47 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้สเปกตรัมในตำแหน่ง  $3372.25\text{ cm}^{-1}$   $2923.82\text{ cm}^{-1}$   $2854.65\text{ cm}^{-1}$   $1741.12\text{ cm}^{-1}$  และ  $1637.54\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-48 จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นในตำแหน่งที่แสดงถึงองค์ประกอบเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลดิบที่ใช้ศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว และมีสิ่งปนเปื้อนอื่นที่อาจรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโซโคลเด็กซ์ทรินได้ เช่น กรดไขมันอิสระไบโอดีเซล แอลกอฮอล์ และน้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เป็นต้น ทำให้เกิดสเปกตรัมที่แสดงถึงองค์ประกอบเดียวกันเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบกับสเปกตรัมของโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมในตำแหน่งเดียวกัน โดยสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของโซโคลเด็กซ์ทริน และเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล (Lamcharfi, *et al.*, 1995; Dollo, *et al.*, 1996; Hedges, 1998; Fernandes, *et al.*, 2002; Lee, *et al.*, 2002; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Ndlebe, *et al.*, 2004; Rodriguez-Tenreiro, *et al.*, 2004; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumanee, 2005; Bratu, *et al.*, 2009; Kane, *et al.*, 2009)



ภาพที่ 3-46 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคเลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคเลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวท์ที่อุณหภูมิต้อง



ภาพที่ 3-47 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคเลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคเลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวท์ที่อุณหภูมิต้อง 10 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-48 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิวต์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

#### 4.2 ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์

เนื่องมาจากการที่กลีเซอรอลดิวต์ของการผลิตไบโอดีเซลมีสิ่งปนเปื้อนอื่นที่สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ เช่น กรดไขมันอิสระ ไบโอดีเซล แอลกอฮอล์ และน้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เป็นต้น จึงได้มีการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยไบโอดีเซลบริสุทธิ์ในการศึกษานี้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-49



**ภาพที่ 3-49** ไบโอดีเซลบริสุทธิ์

ที่มา: สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรม-  
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผลการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ด้วยวิธี dry mixing method พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นเจลที่มีผลึกสีขาวเป็นองค์ประกอบทันทีเมื่อทำการผสมไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับ ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ดังแสดงในภาพที่ 3-50

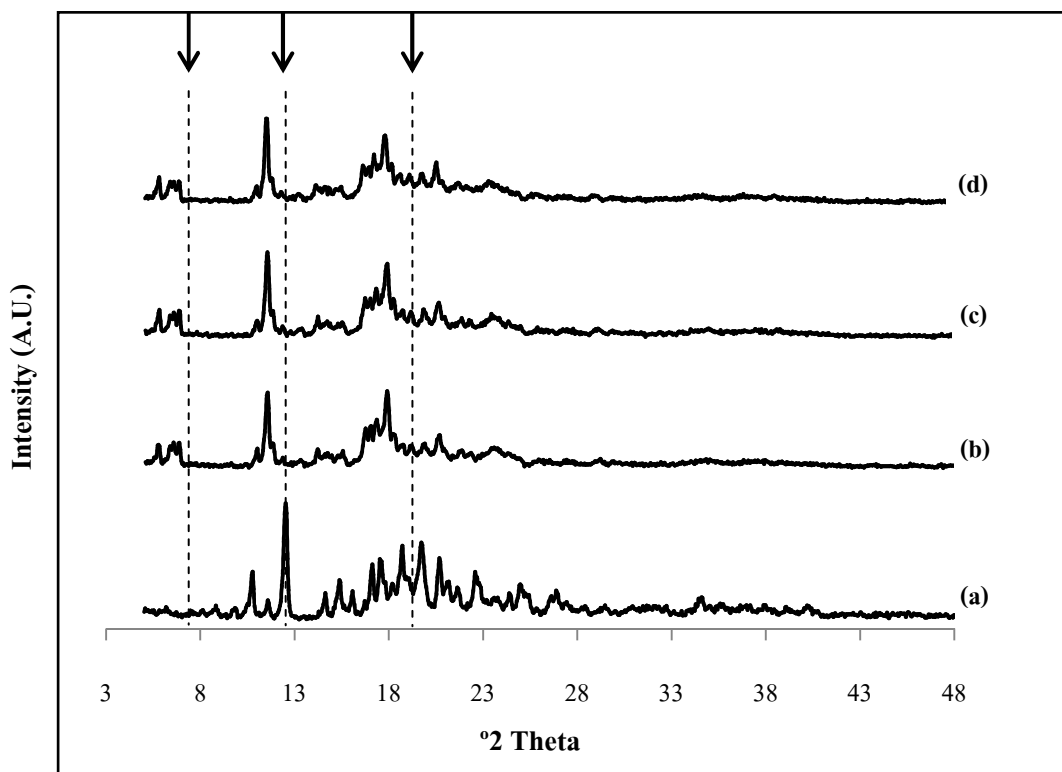


**ภาพที่ 3-50** เจลที่มีผลึกสีขาวเป็นองค์ประกอบของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่เตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method

เมื่อนำผลึกสีขาวมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า ให้สเปกตรัมที่มีลักษณะแตกต่างจากไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $6.2^{\circ}$   $11.0^{\circ}$  และ  $17.9^{\circ}$  (Taweepreda, 2005; Liu and Zhu, 2006) แนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเติมไบโอดีเซลบริสุทธิ์



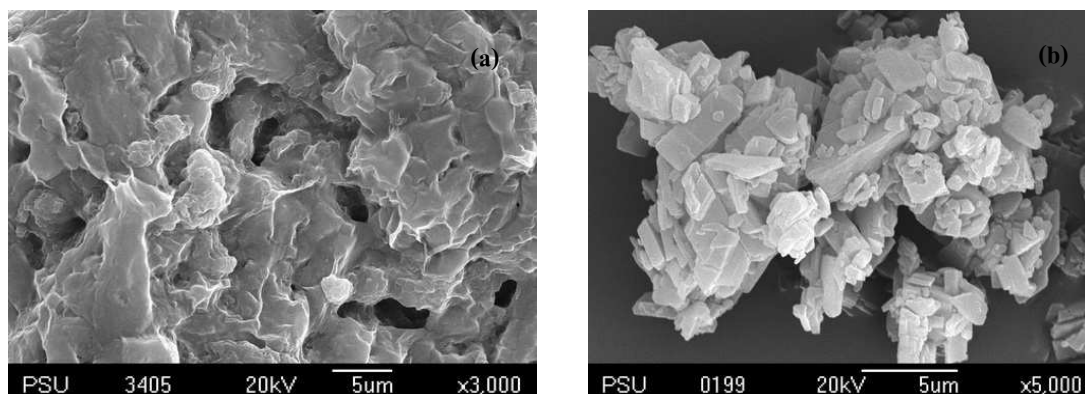
3 มิลลิลิตร โดยอัตราส่วนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าต่อ ไบโอดีเซลบริสุทธิ์เป็น 1:1 และแนวโน้มการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนลดลงเมื่อทำการเติมไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 6 มิลลิลิตร และ 1.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3-51



ภาพที่ 3-51 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 1.5 มิลลิลิตร (c) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 3 มิลลิลิตร (d) สารประกอบเชิงซ้อนของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ 6 มิลลิลิตร

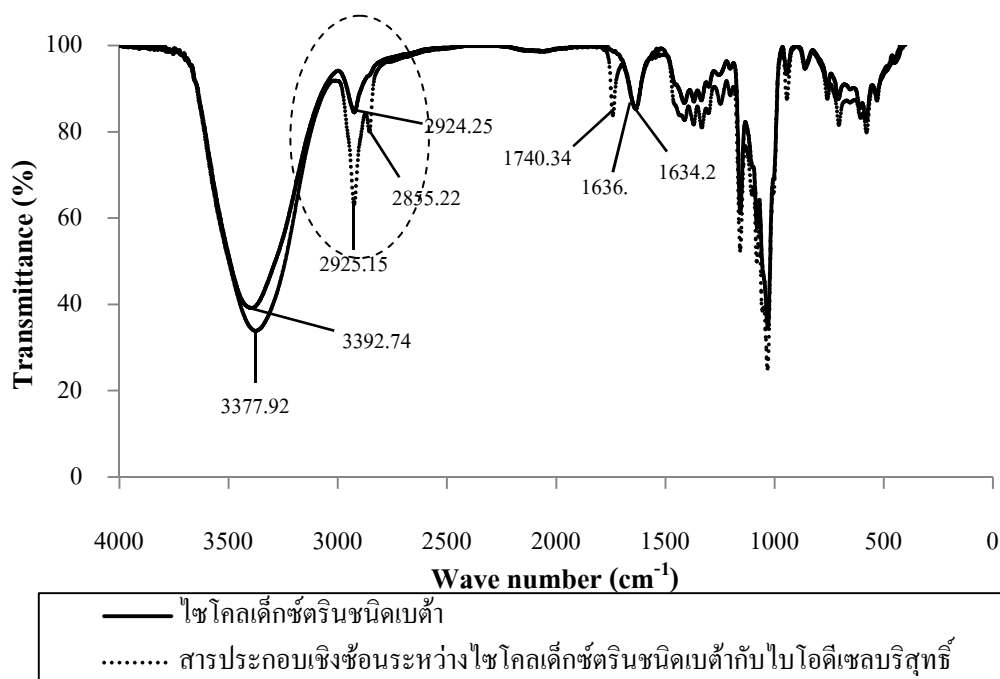
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์มาทำการศึกษาดัวยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ พบว่าผลึกที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยผลึกของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่ซ้อนทับกัน มีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคล-

เด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับ ไบโอดีเซลบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ที่มีรูปร่างแน่นอน ซ้อนทับกัน ดังแสดงในภาพที่ 3-52



ภาพที่ 3-52 ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษารูปร่างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$   $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3377.92\text{ cm}^{-1}$   $2925.15\text{ cm}^{-1}$   $2855.22\text{ cm}^{-1}$   $1740.34\text{ cm}^{-1}$  และ  $1636.10\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-53 สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไบโอดีเซลกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน



ภาพที่ 3-53 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบเจือจางที่อัตราส่วน 1 : 1 โดยศึกษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มาศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ สารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และสารประกอบเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบจากความสูงของสเปกตรัมในตำแหน่งที่แสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน นอกจากสเปกตรัมที่แสดงถึงตำแหน่งที่มีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลแล้ว การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้เกิดสเปกตรัมในตำแหน่งอื่นที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลดิบที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นกลีเซอรอลดิบที่ได้จากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ทำให้มีสิ่งปนเปื้อนอื่นที่อาจรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไชโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าตกค้างอยู่ในกลีเซอรอลดิบ เช่น กรดไขมันอิสระ ไบโอดีเซล และน้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เป็นต้น เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปถ่ายภาพผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า

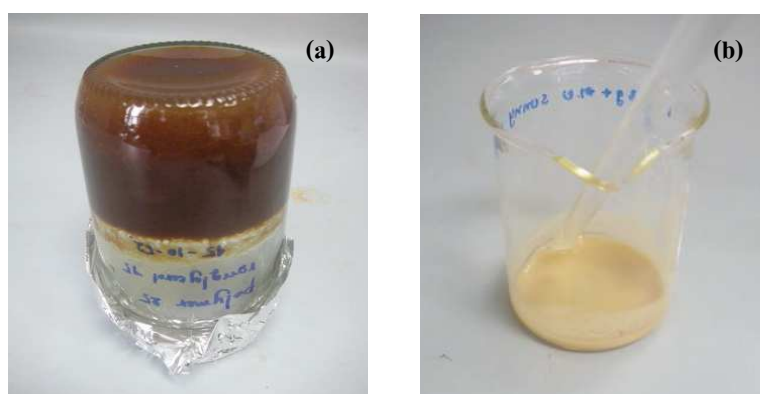
ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบเจือจางที่อัตราส่วน 1 : 1 มีลักษณะของผลึกแตกต่างจากผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์อย่างชัดเจน เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนไปศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สสารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า เกิดสเปคตรัมที่แสดงถึงการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ และเกิดสเปคตรัมอื่นร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบ จึงได้มีการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนอย่างหนึ่งในกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากผลการศึกษาพบว่า ไบโอดีเซลสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ ดังนั้นในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซลจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของกลีเซอรอลดิบในเบื้องต้น เพื่อลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ และเพื่อให้ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบเพียงอย่างเดียว

#### 4.3. ประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (pretreatment)

จากผลการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบ ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มีความแตกต่างจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ผู้ดำเนินการวิจัยจึงได้ดำเนินการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของกลีเซอรอลดิบในเบื้องต้น (pretreatment) เพื่อลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนและทำให้กลีเซอรอลดิบมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

การแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากกลีเซอรอลดิบ ทำการศึกษาโดยการเติมสารผสมระหว่างโพลิเอมีนกับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า เมื่อทำการคนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้ววางไว้ให้ตกตะกอน เกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลเข้มเช่นเดียวกับสีของกลีเซอรอลดิบแขวนลอยอยู่ด้านบน และมีส่วนของน้ำใสอยู่ข้างล่าง เนื่องจากสารผสมระหว่างโพลิเอมีนกับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอนและช่วยในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ (Choo, *et al.*, 2005; Bogoeva-Gaceva, *et al.*, 2008; Yue, *et al.*, 2008; Blachier, *et al.*, 2009;

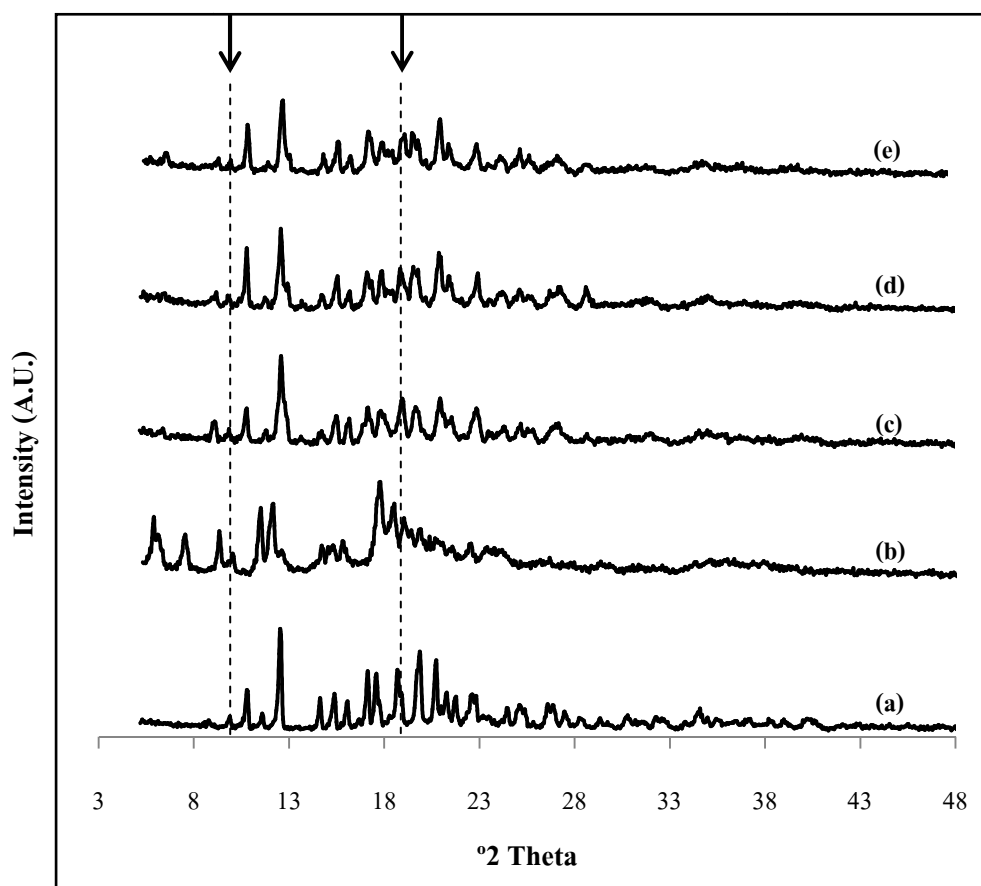
Chen, *et al.*, 2009; Riera-Torres, *et al.*, 2009; Wang, *et al.*, 2009) เมื่อนำน้ำส่วนใสที่ได้ไป ทำการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า พบว่า สารประกอบเชิงซ้อน เกิดเป็นผลึกสีน้ำตาลอ่อนทันทีหลังจากการผสมกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนเข้ากับ ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า โดยให้ผลึกที่ได้มีสีอ่อนกว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทริน ชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ ดังแสดงในภาพที่ 3-54



ภาพที่ 3-54 การกำจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้น (pretreatment) ของกลีเซอรอลดิบโดยการเติมสารผสม ระหว่างโพลีเอมีนกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (a) ตะกอนที่ได้จากการกำจัดสิ่งปนเปื้อนเบื้องต้นออกจากกลีเซอรอลดิบ (b) ผลึกสีน้ำตาลอ่อนที่ได้จากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน

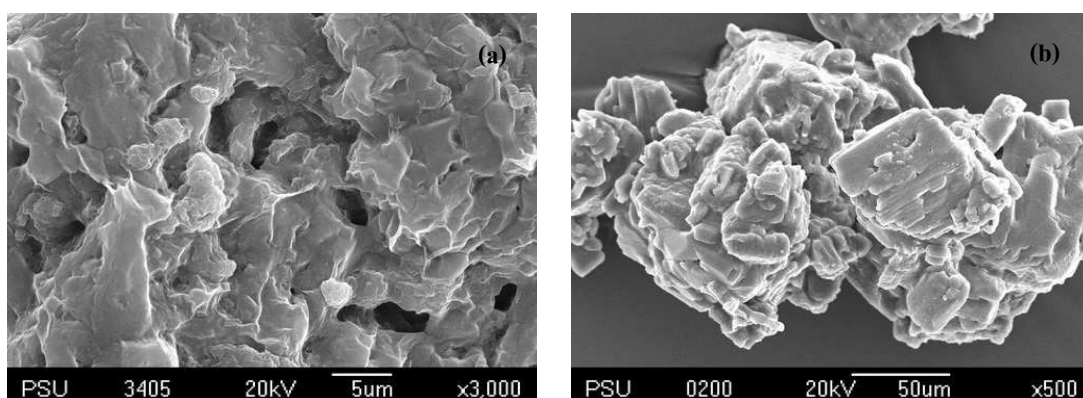
เมื่อนำผลึกน้ำตาลอ่อนมาทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน ทำให้เกิดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งประมาณ  $11^\circ$  (Moyano, *et al.*, 1997 and Taweepreda, 2005) และ ประมาณ  $18.7^\circ$  (Ficarra, *et al.*, 2000, Farcas, *et al.*, 2006, Shen, *et al.*, 2005 and Kane, *et al.*, 2009) ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวเป็นสเปกตรัมที่ปรากฏเฉพาะในสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า และไม่ปรากฏในไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ จากการเปรียบเทียบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน พบว่า สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และการเกิด

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนเกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกัน ส่วนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบเกิดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 3-55 แสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนและกลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินและให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ channel ที่มีลักษณะไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3-55 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (a) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (c) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 1 มิลลิลิตร (d) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 2 มิลลิลิตร (e) สารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน 3 มิลลิลิตร

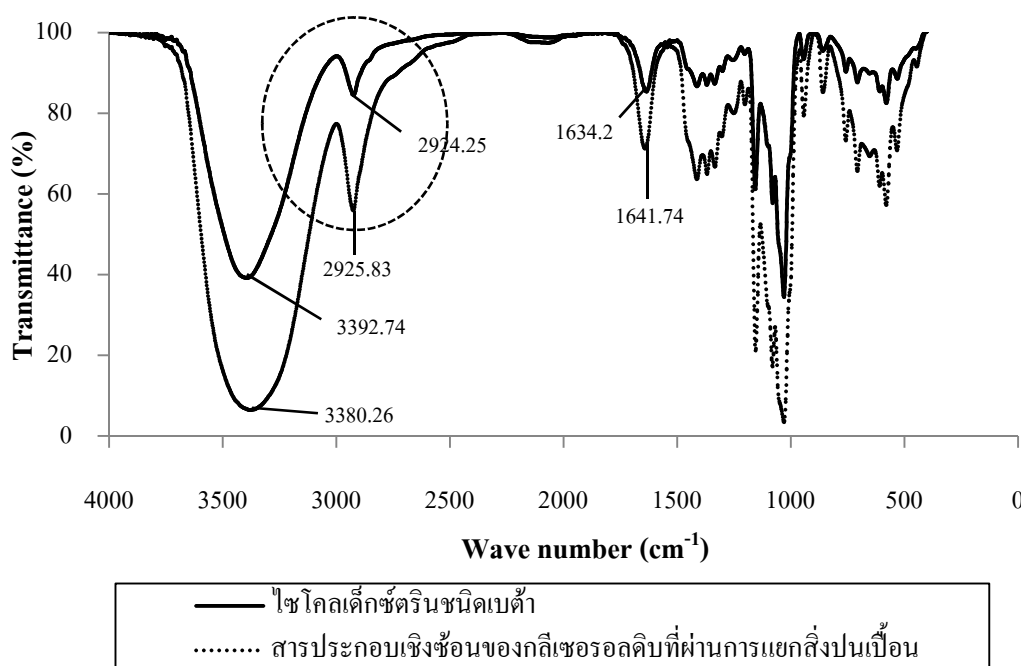
เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านกระบวนการแยกสิ่งปนเปื้อน มาทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนมีลักษณะของผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเช่นเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Sourbaji, *et al.*, 1999; Ficarra, *et al.*, 2000; Nalluri, *et al.*, 2003; Reddy, *et al.*, 2004; Bilensoy, *et al.*, 2006; Farcas, *et al.*, 2006) ดังแสดงในภาพที่ 3-56



ภาพที่ 3-56 ภาพถ่ายผลึกสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน (a) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (b) ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน

เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปทำการศึกษองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าบริสุทธิ์ให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $3392.74\text{ cm}^{-1}$ ,  $2924.25\text{ cm}^{-1}$  และ  $1634.28\text{ cm}^{-1}$  สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $3380.26\text{ cm}^{-1}$ ,  $2925.83\text{ cm}^{-1}$  และ  $1641.74\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพที่ 3-57 สเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน โดยแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทริน และเห็นแนวโน้มให้เกิดการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเช่นเดียวกับการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Lamcharfi, *et al.*,

1995; Dollo, *et al.*, 1996; Hedges, 1998; Fernandes, *et al.*, 2002; Lee, *et al.*, 2002; Perdomo-López, *et al.*, 2002; Ndlebe, *et al.*, 2004; Rodriguez-Tenreiro, *et al.*, 2004; Bongiorno, *et al.*, 2005; Charumane, 2005; Bratu, *et al.*, 2009; Kane, *et al.*, 2009) แต่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนเกิดขึ้นน้อยกว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยสังเกตได้จากลักษณะสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3-57 สเปกตรัมของการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มาศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนให้สเปกตรัมของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ตำแหน่งเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ แต่มีขนาดและความสูงของสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณ



ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ไปถ่ายภาพผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนของกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนมีลักษณะของผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเช่นเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เมื่อนำผลึกของสารประกอบเชิงซ้อนไปศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) พบว่า สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนมีการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสเปกตรัมของไซโคลเด็กซ์ทรินบริสุทธิ์ แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินกับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน โดยการเชื่อมต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไซโคลเด็กซ์ทรินกับโมเลกุลของกลีเซอรอล ทำให้ได้สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม แต่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนเกิดได้น้อยกว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยสังเกตได้จากลักษณะสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดและสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แตกต่างกัน

จากผลการดำเนินการทดลอง พบว่า การนำไซโคลเด็กซ์ทรินมาประยุกต์ใช้กับการนำกลับกลีเซอรอลบริสุทธิ์จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นแนวทางที่จะช่วยให้ผู้ดำเนินการสามารถลดต้นทุนในการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ เนื่องจากเมื่อไซโคลเด็กซ์ทรินรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลแล้ว สามารถดำเนินการแยกไซโคลเด็กซ์ทรินออกจากสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการได้ โดยไซโคลเด็กซ์ทรินที่แยกได้จากสารประกอบเชิงซ้อนจะมีความบริสุทธิ์และมีประสิทธิภาพในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเพิ่มขึ้น (Nakamura, *et al.*, 1995)

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซล เป็นการนำกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาศึกษาแนวทางการทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทริน เป็นการนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม ทดแทนการนำกลีเซอรอลดิบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่ถูกวิธีจะก่อให้เกิดอะโครลีน (Acrolein) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถระเหยได้ดี เป็นอันตรายต่อร่างกาย (ปิยนานู อินทนกุล, 2547) และก่อให้เกิดสารมลพิษที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (เฉลิม เรื่องวิริยะชัย, 2551) รวมทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

#### สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซลด้วยไซโคลเด็กซ์ตริน มีผลการศึกษาดังนี้

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า พบว่า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้ามีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดต่างๆ กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ด้วยวิธี evaporation method และตรวจสอบการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า การรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดขึ้นได้ดีที่สุดในไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแอลฟา รองลงมาคือ ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอะเซทิลเบต้า ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดแกมมา และไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากความสูงของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ตำแหน่งที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินแต่ละชนิด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) เมื่อพบว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ได้ จึงได้มีการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าเพียงชนิดเดียว เนื่องจากไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าเป็นไซโคลเด็กซ์ตรินที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง และมีราคาถูกลงกว่าไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดอื่น โดยการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าด้วยวิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่แตกต่างกัน พบว่า การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิค dry mixing method เป็นวิธีการที่สามารถทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกลีเซอรอลบริสุทธิ์กับไซโคลเด็กซ์ตรินได้ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี evaporation method และ co-precipitation method ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจาก

ความสูงของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ตำแหน่งที่บ่งชี้ถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

ผลการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือในสารละลายไซที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี co-precipitation method โดยการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าและปริมาณกลีเซอรอลที่ต่างกัน พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือลดลงได้ดีเมื่อเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยมีปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือเท่ากับร้อยละ 13.60 สอดคล้องกับผลการศึกษากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอล ซึ่งพบว่า การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเกิดได้ดีเมื่อทำการเติมปริมาณไซโคลเด็กซ์ทรินและปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 10

เมื่อไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ จึงได้มีการศึกษาการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เพื่อให้สามารถแยกไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าออกจากสารประกอบเชิงซ้อน และสามารถนำไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากลับมาใช้งานได้ วิธีขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีที่สุดคือ การเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี co-precipitation method และการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร ด้วยวิธี evaporation method โดยการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ คือ การขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 0.0085 โมลต่อลิตร เนื่องจากใช้สารละลายในการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนน้อยกว่า แต่มีความสามารถในการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใกล้เคียงกับการขัดขวางการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนด้วยการเติมสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.034 โมลต่อลิตร

ผลการศึกษารวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบ พบว่า สามารถเกิดได้เช่นเดียวกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยให้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ในตำแหน่งที่ต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากกลีเซอรอลดิบที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นกลีเซอรอลดิบที่ได้จากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ทำให้มีสิ่งปนเปื้อนอื่นที่สามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าตกค้างอยู่ในกลีเซอรอลดิบ เช่น กรดไขมันอิสระ ไบโอดีเซล แอลกอฮอล์ และน้ำมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ จำเป็นต้องทำการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของกลีเซอรอลดิบในเบื้องต้น เพื่อลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่อาจ

เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าได้ และเพื่อให้ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบเพียงอย่างเดียว จึงได้มีการนำกลีเซอรอลดิบไปแยกสิ่งปนเปื้อนด้วยสารผสมระหว่างโพลีเอมีนกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลดิบที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อนให้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งเดียวสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้ากับกลีเซอรอลบริสุทธิ์

ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำกลีเซอรอลจากกลีเซอรอลดิบของการผลิตไบโอดีเซล เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่กลีเซอรอลดิบ และลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยกลีเซอรอลดิบซึ่งยากต่อการบำบัดออกสู่สิ่งแวดล้อม หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการจำเป็นต้องมีการศึกษาในระดับโรงงานต้นแบบ (pilot scale) เพื่อศึกษาความเหมาะสมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการดำเนินการต่อไป

#### ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาในส่วนของการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) เป็นการศึกษาเพื่อทำให้ทราบว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นหรือไม่ ซึ่งควรทำการศึกษาในเชิงปริมาณโดยวิธีการอื่นด้วย เพื่อให้สามารถทราบถึงปริมาณที่เปลี่ยนแปลงและสามารถนำมาเปรียบเทียบในเชิงปริมาณได้ เช่น เทคนิค stepwise titration เป็นต้น

2. ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้าสามารถรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ด้วยการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนด้วยวิธี dry mixing method เช่นเดียวกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการดึงกลับไบโอดีเซลที่ปนเปื้อนอยู่ในกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3. เทคนิคที่ใช้ในการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในการศึกษานี้เหมาะสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการและในการทดลองขนาดเล็กเท่านั้น หากจะนำไปประยุกต์ใช้กับสถานประกอบการจำเป็นต้องมีการศึกษาในระดับโรงงานต้นแบบ (pilot scale) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการดำเนินการ

## เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล.  
กรุงเทพมหานคร: แพลน พรินติ้ง.

จิระพงษ์ รักประสูติ. 2548. ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.  
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ชาคริต ทองอุไร, สัญชัย กลิ่นพิบูล, ชิต ลีมวรพันธ์ และเสถียร วาณิชวิริยะ. 2545. รายงานการวิจัย  
เพื่อการแปรรูปน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลสำหรับ  
เครื่องจักรกลการเกษตร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประเทืองสุข มณีล้ำ. 2551. การทำบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.  
การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปิยนฎ อินทนกุล. 2547. การทำก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพให้บริสุทธิ์.  
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปิโตรเลียม สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. 2548. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD. **Lab today**  
4(28): 33-37.

พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. 2548. FTIR เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด. **Lab today** 4(29):  
33-39.

พิมพ์พรรณ มายเออร์. 2551. การแปรรูปก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้เป็น  
ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า. **Engineering today** 6(70): 81-85.

- วัฒนา ปิ่นเสมอ, นพวรรณ ชัญญพานิช และสัมพันธ์ สร้อยกล่อม, 2549. การเพิ่มมูลค่ากลีเซอริน จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ.
- วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2546. คุณสมบัติและประโยชน์ของกลีเซอรอล. วารสารอาหาร 33(2): 87-89.
- ศิริพร จงผาดิวฒิ. 2551. กลีเซอรอลผลิตภัณฑ์พลอยได้จากไบโอดีเซล. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี 35(198) 70-76.
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2553. ก้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Electron microscope. (ออนไลน์) (31 มีนาคม 2553) เข้าถึงได้ที่ : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-5.html>.
- สุธาร์ภย์ บุญโชติ. 2547. การทำกลีเซอรอลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืช ให้บริสุทธิ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2523. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีการหาปริมาณกลีเซอรอล (มอก.336-2523). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภา 8 หน้า.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2538. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กลีเซอรินดิบ (มอก.336-2538). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภา, 8 หน้า.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2538. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กลีเซอรินบริสุทธิ์ (มอก.337-2538). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภา, 9 หน้า.

- Ashby, R. D., Solaiman, D. K. Y. and Foglia, T. A. 2004. Bacterial poly (hydroxyalkanoate) polymer production from the biodiesel co-product stream. **Journal of polymers and the environment** 12(3): 105-112.
- Bastos, M., Afonso, M., Cacote, M. H. M. and Ramos, M. J. 1997. Interactions in the model system  $\alpha$ -cyclodextrin – glycerol experimental and theoretical study. **Journal of chemical society., faraday transactions articles** 93(11): 2061-2067.
- Bilensoy, E., Rouf, M. A., Vural, I., Sen, M. and Hincal, A. A. 2006. Mucoadhesive, Thermosensitive, prolonged-release vaginal gel for clotrimazole :  $\beta$ -cyclodextrin complex. **AAPS PharmSciTech** 7(2): Article 38.
- Blachier, C. Michot, L., Bihannic, I., Barrès, O., Jacquet, A. and Mosquet M. 2009. Adsorption of polyamine on clay minerals. **Journal of colloid and interface science** 336: 599-606.
- Bleesley, T. E. 1989. Separation and purification of cyclodextrins. United State Patent 4808232 (Online) (March 25, 2009) Available from: <http://www.Freepatentsonline.com/4808232.html>.
- Bogoeva-Gaceva, G., Buzarovska, A. and Dimzoski, B. 2008. Discoloration of synthetic dyeing wastewater using polyaluminium chloride. **G. U. Journal of science** 21(4): 123-128.
- Bongiorno, D., Ceraulo, L., Ferrugia, M., Filizzola, F., Ruggirello, A. and Liveri, V. T. 2005. Inclusion complexes of cyclomaltooligosaccharides (cyclodextrins) with melatonin in solid phase. **Arkivoc** 14: 118-130.

- Brandão, T. A. S., Malheos, A., Magro, J. D., Filho, V. C. and Yones, R. A. 2003. Characterization of sesquiterpene poly godial-beta cyclodextrin inclusion complex. **Journal of inclusion phenomena and macrocyclic chemistry** 46: 77-81.
- Bratu, I., Muresan-Pop, M., Kacso, I. and Fărcaș, S. I. 2009. Spectroscopic investigation of the interaction between  $\beta$ -cyclodextrin and ascorbic acid. **Journal of physics: conference series** 182: 4 pages.
- Charumanee, S. 2005. "Characterization and molecular modeling of drug-cyclodextrin complexes" Ph.D. Thesis, Chiang mai university, Thailand.
- Chemical book, 2008. Acetyl-beta-cyclodextrin basic information. (Online) (October 24, 2009) Available from: [http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8-389479\\_EN .htm#MSDSA](http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8-389479_EN.htm#MSDSA).
- Chen, T., Gao, B. and Yue, Q. 2009. Effect of dosing method and pH on color removal performance and floc aggregation of polyferric chloride-polyamine dual-coagulant in synthetic dyeing wastewater treatment. 2009. **Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects** doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.12.008.
- Choo, K., Choi, S. and Hwang, E. 2005. Effect of coagulant types on textile wastewater reclamation in a combined coagulation/ultrafiltration system. **Desalination** 202: 262-270.
- Da Silva, G. P., Mack, M. and Contiero, J. 2009. Glycerol : A promising and abundant carbon source for industrial microbiology. **Biotechnology Advance** 27: 30-39.



- Dasari, M. A., Kiatsimkul, P. Sutterlin, W. R. and Suppes, G. J. 2005. Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol. **Applied Catalysis A** 281: 225-231.
- Del valle, E. M. M. 2004. Cyclodextrins and their uses : a review. **Process biochemistry** 39: 1033-1046.
- Dollo, G., Le Corre, P., Chevanne, F. and Le Verge, R. 1996. Inclusion complex of amide-type local anaesthetics with  $\beta$ -cyclodextrin and its derivatives. I. physicochemical characterization. **International journal of pharmaceutics** 131: 219-228.
- Farcas, A., Jarroux, N., Farcas A. M., Harabagiu V. and Guegan, P. 2006. Synthesis and characterization of Furosemide complex in  $\beta$ -cyclodextrin. **Journal of Nano-materials and Biostructures** 1(2): 55-60.
- Felter, H. W. and Lloyd, J. U. 2000. Glycerinum (U.S.P.) glycerin. King's American dispensatory. (Online) (January 18, 2010) Available from: <http://www.henriettesherbal.com>.
- Fernandes, C. M., Vieira, M. T. and Veiga, F. J. B. 2002. Physicochemical characterization and in vitro dissolution behavior of nicardipine-cyclodextrins inclusion compounds. **European journal of pharmaceutical science** 15: 79-88.
- Ficarra, R., Ficarra, P., Di Bella, M. R., Raneri, D. Tommasini, S. Calabrò, M. L., Gamberini, M. C. and Rustichelli, C. 2000. Study of  $\beta$ -blocker/  $\beta$ -cyclodextrins inclusion complex by NMR, DSC, X-ray and SEM investigation. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis** 23: 33-40.
- Giordano, F., Novak, C. and Moyano, J. R. 2001. Thermal analysis of cyclodextrins and their inclusion compounds. **Thermochemica Acta** 380: 123-151.

- González-pajuelo, M., Meynial-Salles, I., Mendes, F., Andrade, J. C., Vasconcelos, I. and Soucaille, P. 2005. Metabolic engineering of *Clostridium acetobutylicum* for the industrial production of 1,3-propanediol from glycerol. **Metabolic engineering** 7: 329-336.
- He, L., Huang, J., Chen, Y., Xu, X. and Liu, L. 2005. Inclusion interaction of highly densely PEO grafted polymer brush and  $\alpha$ -cyclodextrin. **Macromolecules** 38(9): 3845-3851 doi: 10.1021/ma0475333.
- Hedges, A. R. 1998. Industrial application of cyclodextrins. **Chemical reviews** 98(5): 2035-2044.
- Imandi, S. B., Bandaru, V. V. R., Somalanka, S. R. and Garapati, H. R. 2007. Optimization of medium constituents for the production of citric acid from byproduct glycerol using Doehlert experimental design. **Enzyme and microbial technology** 40: 1367-1372.
- Ito, T., Nakashimada, Y., Senba, K., Matsui, T. and Nishio, N. 2005. Hydrogen and ethanol production from glycerol-containing wastes discharged after biodiesel manufacturing process. **Journal of bioscience and bioengineering** 100(3): 260-265.
- Jangermann, E. 1991. **Glycerine : A key Cosmetic Ingredient**. New York: Mercel dekker, inc.
- Jara, P., Barrientos, L., Herrera, B. and Sobrados, I. 2008. Inclusion compounds of  $\alpha$ -cyclodextrin with alkylthiols. **Journal of the Chilean chemical society** 53(2): 1474-1476.
- Jouni, Z. E., Zmora, J., Snyder, M., Montfort, W. R., Weichsel, A. and Wells, M. A. 2000.  $\alpha$ -Cyclodextrin extracts diacylglycerol from insect high density lipoproteins. **Journal of lipid research** 41: 933-939.

- Kane, R. Naik, S. Bumrela, S. and Kuchekar, B. 2009. Preparation, physicochemical characterization, dissolution and formulation studies of irbesartan cyclodextrin inclusion complexes : comparison between  $\beta$ -CD and HP- $\beta$ -CD. **Journal of pharmacy research** 2(8): 1359-1364.
- Khan, G. M., Wazir, F. and Zhu, J. 2001. Ibuprofen-  $\beta$ -cyclodextrin inclusion complexes : evaluation of different complexation methods. **The science** 1(4): 193-199.
- Koller, M., Bona, R., Braunegg, G., Hermann, C., Horvat, P., Kroutil, M., Martinz, J., Neto, J., Pereira, L. and Varila, P. 2005. Production of polyhydroxyalkanoates from agricultural waste and surplus materials. **Biomacromolecules** 6: 561-565.
- Lamcharfi, E., Kunesch, G., Meyer, C. and Robert, B. 1995. Investigation of cyclodextrin inclusion compounds using FT-IR and roman spectroscopy. **Spectrochimica acta part A** 51: 1861-1870.
- Lee, K., Choi, S., Ryu, E., Ryoo, J., Park, J., Kim, Y., and Hyun, M., 2002. Preparation and characterization of cyclodextrin polymer and its high performance liquid-chromatography stationary phase. **Analytical sciences** 18: 31-34.
- Li, X., Li, J. and Leong, K. W. 2003. Preparation and characterization of inclusion complexes of biodegradable amphiphilic poly(ethylene oxide)-poly[(R)-3-hydroxybutyrate]-poly(ethylene oxide) triblock copolymers with cyclodextrins. **Macromolecules** 36: 1209-1214.
- Lofsson, T. 1992. Cyclodextrin complexation. United State Patent 5472954 (Online) (January 5, 2009) Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5472954.html>.

- Moreira, R. and Bastos, M. 2000. The influence of glycerol on ligand binding equilibria between monoalcohols and  $\alpha$ -cyclodextrin. **Journal of chemical thermodynamics** 32: 1539-1550.
- Moyano, J. R., Arias-Blanco, M. J., Ginés, J. M. and Giordano, F. 1997. Solid-state characterization and dissolution characteristics of gliclazide- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complexes. **International journal of pharmaceutics** 148: 211-217.
- Nakamura, N., Yamamoto, M. and Sumiyoshi, H. 1995. Method for recovering cyclodextrin. United State Patent 5449771 (Online) (October 23, 2009) Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5449771.html>.
- Nakano, H., Kiso, T., Okamoto, K., Tomita, T., Manan, M. B. A. and Kitahata, S. 2003. Synthesis of glycerol by cyclodextrin glucanotransferases. **Journal of bioscience and bioengineering** 95(6): 583-588.
- Nalluri, B. N., Chowdary, K. P. R., Murthy, K. V. R., Hayman, A. R. and ecket, G. 2003. Physicochemical characterization and dissolution properties of nimesulide-cyclodextrin binary systems. **AAPS pharmscitech** 4(1): 12 pages.
- Ndlebe, V. J., Brown, M. E. and Glass, B. D., 2004. The thermal stability of triprolidine hydrochloride and its mixtures with cyclodextrin and glucose. **Journal of the thermal analysis and calorimetry** 77: 445-457.
- Noureddini, H., Dailey, W. R. and Hunt, B. A. 1998. Production of ethers of glycerol from crude glycerol – the by-product of biodiesel production. **Chemical and biomolecular engineering research and publications** 14 pages (Online) (January 14, 2010) Available from:[http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=chemeng\\_biomaterials](http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=chemeng_biomaterials).

- Papanikolaou, S., Muniglia, L., Chevalot, I., Aggelis, G. and Marc, I. 2002. *Yarrowia lipolytica* as a potential producer of citric acid from raw glycerol. **Journal of applied microbiology** 92: 737-744.
- Perdomo-López, I., Rodríguez-Pérez, A. I., Yzquierdo-Peiró, J. M., White, A., Estrada, E. G., Villa, T. G. and Torres-Labandeira, J. J. 2002. Effect of cyclodextrins on the solubility and antimycotic activity of sertaconazole : experimental and computational studies. **Journal of pharmaceutical science** 91(11): 2408-2415.
- Reddy, N. M. Rehana, T. Ramakrishna, S. Chowdary, K. P. R. and Diwan, P. V. 2004.  $\beta$ -cyclodextrin complexes of celecoxib : molecular-modeling, characterization, and dissolution studies. **AAPS pharmsci** 6(1): 1-9.
- Riera-torres, M., Gutiérrez-bouzán, C. and Crespi, M. 2009. Combination of coagulation-flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. **Desalination** doi : 10.1016/j.desal.2009.11.002.
- Rodríguez-Tenreiro, C., Álvarez-Lorenzo, C., Concheiro, A. and Torres-Labandiera, J. J. 2004. Characterization of cyclodextrin-carbopol interactions by DSC and FTIR. **Journal of thermal analysis and calorimetry** 77: 403-411.
- Rusa, C. C. and Tonelli, A. E. 2000. Separation of polymers by molecular weight through inclusion compound formation with urea and  $\alpha$ -cyclodextrin hosts. **Macromolecules** 33: 1813-1818.
- Shen, Y., Ying, W., Yang, S. and Wu, L. 2005. Determinations of the inclusion complex between gossypol and  $\beta$ -cyclodextrin. **Spectrochimica acta part A** 65: 169-172.

- Shieh, W. and Hedges, A. R. 1994. "Process for separating cyclodextrin from a complex". United State Patent 5371209 (Online) (November 23, 2008) Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5371209.html>.
- Shimada, K., Kawano, K., Ishii, J. and Nakamura, T. 1992. Structure of inclusion complexes of cyclodextrins with triglyceride at vegetable oil/water interface. **Journal of food science** 57(3): 655-656.
- Skelly, D. W. and Jackson, M. R. 1994. Evaporation method. United State Patent 5474809 (Online) (May 3, 2010) Available from: <http://www.freepatentsonline.com/5474809.html>.
- Song, L. X., Bai, L., Xu, X. M., He, J. and Pan, S. Z. 2008. Inclusion complexation, encapsulation interaction and inclusion number in cyclodextrin chemistry. **Coordination chemistry reviews** 253: 1276-1284
- Sourbaji, M., Pintye-Hódi, K., Novák, C. S., Szabó-Révész, P., Kása JR, P. and Erős, I. 1999. A study of sulfadimidine – $\beta$ -cyclodextrin mixtures. **Journal of inclusion phenomena and macrocyclic chemistry**. 37: 299-307.
- Suppes, G. J., Sutterlin, W. R. and Dasari, M. A. 2005. Method of producing lower alcohols from glycerol **International application published under the patent cooperation treaty (PCT)**. 49 pages.
- Szejtli, J. 1988. **Cyclodextrin technology**. Netherlands: Kluwer academic publishers 450 pages.
- Szejtli, J. 1998. Introduction and general overview of cyclodextrin chemistry. **Chemical reviews**. 98: 1743-1753.
- Szejtli, J. 2004. Past, present and future of cyclodextrin research. **Pure and applied chemistry**. 76(10): 1825-1845.

- Taweepreda, W. 2005. "Studies of inclusion complexes of polymer and cyclo-dextrins" Ph.D. Thesis, University of Bristol U.K.
- Toropainen, T., Heikkilä, T., Leppänen, J., Matilainen, L., Velaga, S., Jarho, P., Carlfos, J., Järvinen, T. and Järvinen, K. 2006. Crystal structure change of  $\gamma$ -cyclodextrin after the SEDS process in supercritical carbondioxide affect the dissolution rate of complexed budesonide. **Pharmaceutical research** 24(6): 1058-1066. doi : 10.1007/s11095-006-9227-7.
- Veiga, M. D. and Merino, M. 2002. Interactions of oxyphenbutazone with different cyclodextrins in aqueous medium and in the solid state. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis** 28: 973-982.
- Wang, Y., Gao, B., Yue, Q., Zhan, X., Si, X. and Li, C. 2009. Flocculation performance of epichlorohydrin-dimethylamine polyamine in treating dyeing wastewater. **Journal of environmental management** 91: 423-431.
- Xue, J., Jia, Z., Jiang, X., Wang, Y., Chen, L., Zhou, L., He, P., Zhu, X. and Yan, D. 2006. Kinetic separate of polymers with different terminals through inclusion complexation with cyclodextrin. **Macromolecules** 39(26): 8905-8907.
- Yue, Q. Y., Gao, B. Y., Wang, Y., Zhang, H., Sun, X., Wang, S. G. and Gu, R. R. 2008. Synthesis of polyamine flocculants and their potential use in treating dye wastewater. **Journal of hazardous materials** 152: 221-227.

**ภาคผนวก**



## ภาคผนวก ก.

## ผลการทดลอง

## อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการละลายของไซโคลเด็กซ์ตริน

ตารางที่ ก-1 การละลายของไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้าที่อุณหภูมิระหว่าง 30-80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ	ลำดับ	น้ำหนักก่อนเติม (กรัม)	น้ำหนักหลังเติม (กรัม)	ผลต่าง (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
30 °C	1	33.8838	33.9657	0.0819	0.0789
	2	34.0616	34.1421	0.0805	
	3	34.0164	34.0906	0.0742	
40 °C	1	34.0198	34.2040	0.1842	0.1802
	2	34.2425	34.4220	0.1795	
	3	33.8564	34.0334	0.1770	
50 °C	1	34.0439	34.3844	0.3405	0.3373
	2	33.8962	34.2379	0.3417	
	3	34.1568	34.4866	0.3298	
60 °C	1	34.0102	34.5360	0.5258	0.5238
	2	34.1926	34.6978	0.5052	
	3	34.0042	34.5447	0.5405	
70 °C	1	34.1911	34.9104	0.7193	0.7354
	2	33.9230	34.6788	0.7558	
	3	33.9968	34.7278	0.7310	
80 °C	1	34.0287	34.9433	0.9146	0.9323
	2	34.5357	35.4693	0.9336	
	3	34.532	35.4807	0.9487	

ภาคผนวก ข.

ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน

ปริมาณสารที่ได้จากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเด็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
<b>การเตรียมสารประกอบ</b>						
<b>เชิงซ้อน</b>						
Evaporation method ของ	3	1.5	30	-	3.1621	3.1426
ไซโคลเด็กซ์ตรินชนิดเบต้า					3.1471	
					3.1187	
	3	3	30	-	3.1171	3.1057
					3.1042	
					3.0958	

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Evaporation method ของ ไซโคลเต็กซ์ตรินชนิดเบต้า (ต่อ)	3	6	30	-	3.0826 3.0729 3.0500	3.0685
Evaporation method ของ ไซโคลเต็กซ์ตรินชนิด แอลฟา	3	1.5	30	-	3.1316 3.1527 3.1279	3.1374
	3	3	30	-	3.2287 3.2513 3.1872	3.2224
	3	6	30	-	3.1258 3.1169 3.1327	3.1251

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณสารประกอบ เชิงซ้อน (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Evaporation method ของ ไซโคลเต็กซ์ตริน ชนิด แกมมา	3	1.5	30	-	3.0902 3.0847 3.0981	3.0910
	3	3	30	-	3.1249 3.1461 3.1408	3.1373
	3	6	30	-	3.1813 3.1593 3.1721	3.1709
Evaporation method ของ ไซโคลเต็กซ์ตริน ชนิด อะเซทิลเบต้า	3	1.5	30	-	3.1358 3.1569 3.1427	3.1451

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณสารประกอบ เชิงซ้อน (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Evaporation method ของ ไซโคลเต็กซ์ตริน ชนิด อะเซทิลเบต้า (ต่อ)	3	3	30	-	3.1827 3.1718 3.1948	3.1831
	3	3	30	-	3.1198 3.1263 3.1172	3.1211
Co-precipitation method ของไซโคลเต็กซ์ตรินชนิด เบต้า	3	1.5	30	-	3.0913 3.1139 3.1097	3.1049
	3	3	30	-	3.0810 3.0792 3.0895	3.0832

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเด็กซ์ทริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณสารประกอบ เชิงซ้อน (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Co-precipitation method ของไซโคลเด็กซ์ทรินชนิด เบต้า (ต่อ)	3	6	30	-	3.0517 3.0641 3.0492	3.0550
Dry mixing method ของ ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ที่อุณหภูมิห้อง	4	5	-	-	4.1085 4.1057 4.0913	4.1018
Dry mixing method ของ ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ที่ 10 องศาเซลเซียส	4	5	-	-	4.1208 4.1436 4.1319	4.1321
Dry mixing method ของ ไซโคลเด็กซ์ทรินชนิดเบต้า ที่ 50 องศาเซลเซียส	4	5	-	-	4.1742 4.1593 4.1841	4.1725

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณสารประกอบ เชิงซ้อน (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Dry mixing method ของ ไซโคลเต็กซ์ตรินชนิดเบต้า ที่ 80 องศาเซลเซียส	4	5	-	-	4.1627 4.1593 4.1614	4.1611
<b>การขัดขวางการเกิดสาร ประกอบเชิงซ้อน</b>						
Evaporation method โดย การเติมโซเดียมคลอไรด์	3	3	30	1.5	3.0127 3.0092 3.0102	3.0107
	3	3	30	3	3.0254 3.0315 3.0209	3.0259
	3	3	30	6	3.0314 3.0407 3.0335	3.0352

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/ไซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Evaporation method โดย การเติมยูเรีย	3	3	30	1.5	3.0094	3.0085
					3.0071	
					3.0082	
	3	3	30	3	3.0162	3.0156
					3.0144	
					3.0161	
	3	3	30	6	3.0235	3.0245
					3.0314	
					3.0187	
Co-precipitation method โดยการเติมไซเดียมคลอ- ไรด์	3	3	30	1.5	3.0214	3.0224
					3.0208	
					3.0251	
	3	3	30	3	3.0151	3.0132
					3.0128	
					3.0116	



ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/ไซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Co-precipitation method โดยการเติมไซเดียมคลอ- ไรด์ (ต่อ)	3	3	30	6	3.0082	3.0084
					3.0079	
					3.0091	
Co-precipitation method โดยการเติมยูเรีย	3	3	30	1.5	3.0420	3.0408
					3.0368	
					3.0437	
					3.0247	3.0236
	3	3	30	3	3.0197	
					3.0263	
					3.0127	3.0127
	3	3	30	6	3.0118	
					3.0132	

ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ ห้อง	3	3	-	-	3.1325 3.1472 3.1439	3.1412
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส	3	3	-	-	3.1952 3.1876 3.2104	3.1977
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	3	3	-	-	3.2501 3.2147 3.2019	3.2222

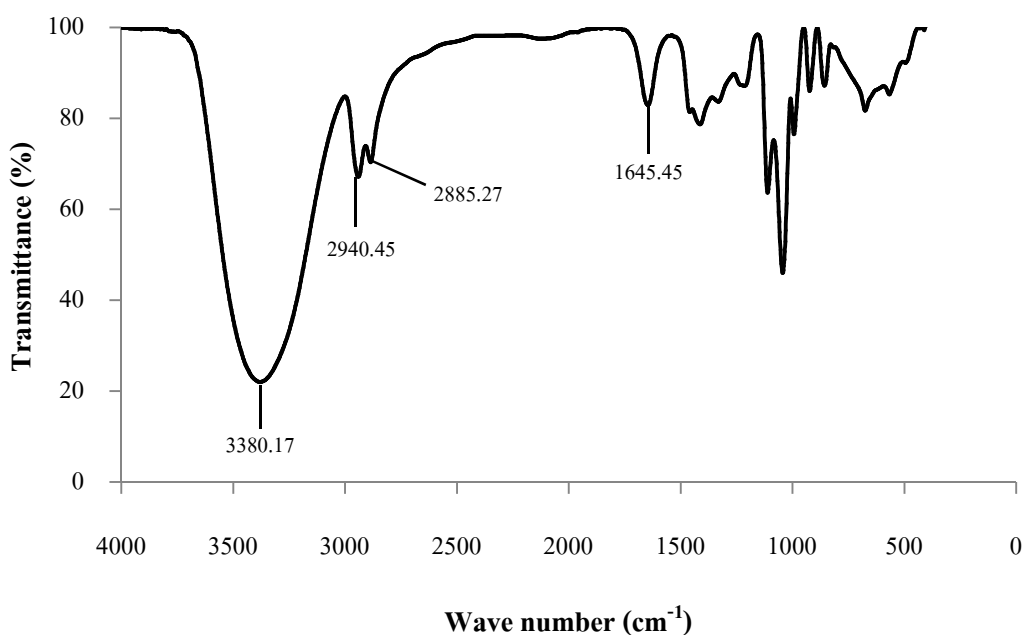
ตารางที่ ก-2 ปริมาณสารที่เกิดจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน (ต่อ)

วิธีเตรียมสาร	ไซโคลเต็กซ์ตริน (กรัม)	กลีเซอรอล (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ยูเรีย/โซเดียมคลอไรด์ (กรัม)	ปริมาณผลึก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่ผ่านการ แยกสิ่งปนเปื้อนที่อุณหภูมิ ห้อง	3	3	-	-	3.0691 3.0713 3.0974	3.0793
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่ผ่านการ แยกสิ่งปนเปื้อนที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส	3	3	-	-	3.1047 3.0984 3.1068	3.1033
Dry mixing method ของ กลีเซอรอลดิบที่ผ่านการ แยกสิ่งปนเปื้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	3	3	-	-	3.1247 3.1196 3.1153	3.1199

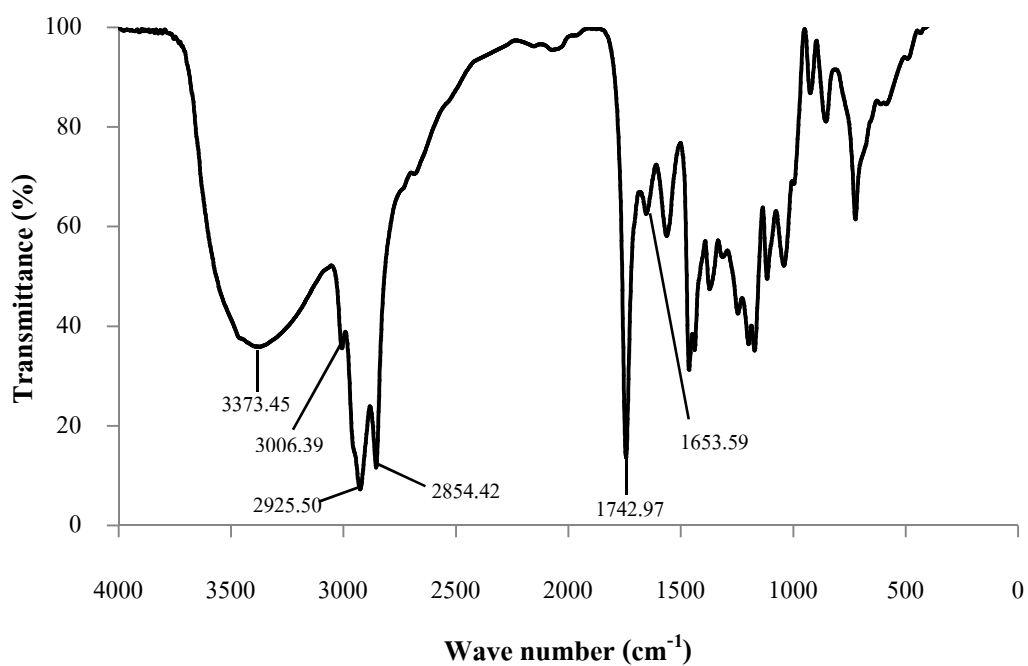
## ภาคผนวก ค.

## สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR)

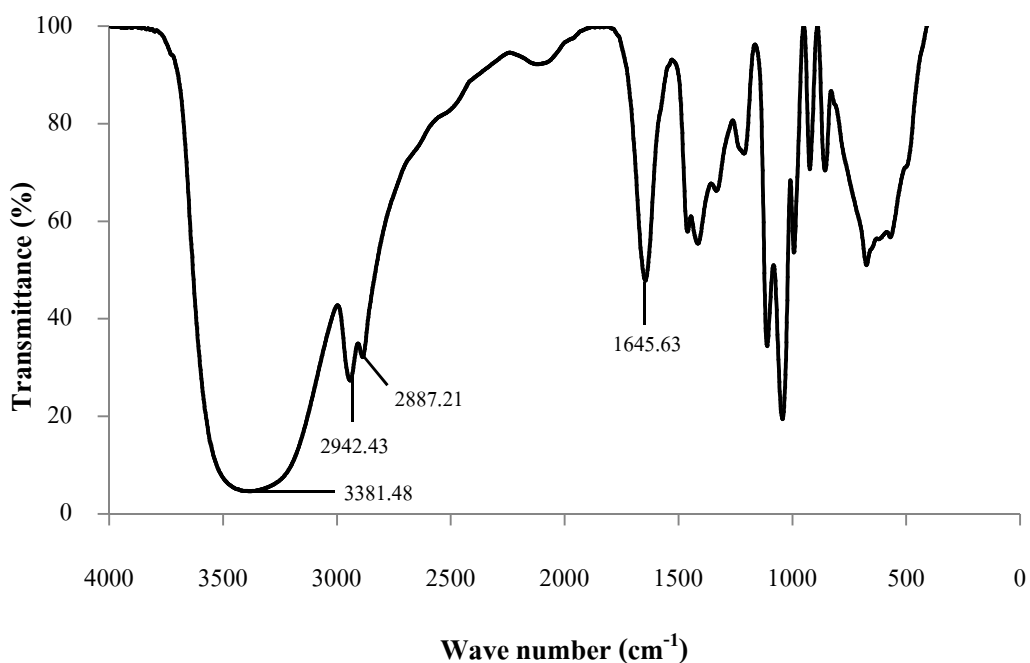
การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) สามารถศึกษาองค์ประกอบของสารได้ทั้งในรูปของเหลว และผลึกที่เป็นผง โดยให้สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งต่างๆ คือ สเปกตรัมที่เกิดในช่วงระหว่าง  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนหมู่ OH (OH groups) สเปกตรัมที่เกิดในช่วงระหว่าง  $2800-3000\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงหมู่  $-\text{CH}$  และ  $-\text{CH}_2$  ( $-\text{CH}$  and  $-\text{CH}_2$  groups) และสเปกตรัมที่เกิดในช่วงประมาณ  $1650\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมที่แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยรังสีอินฟราเรดในสารหลายชนิด ดังนี้



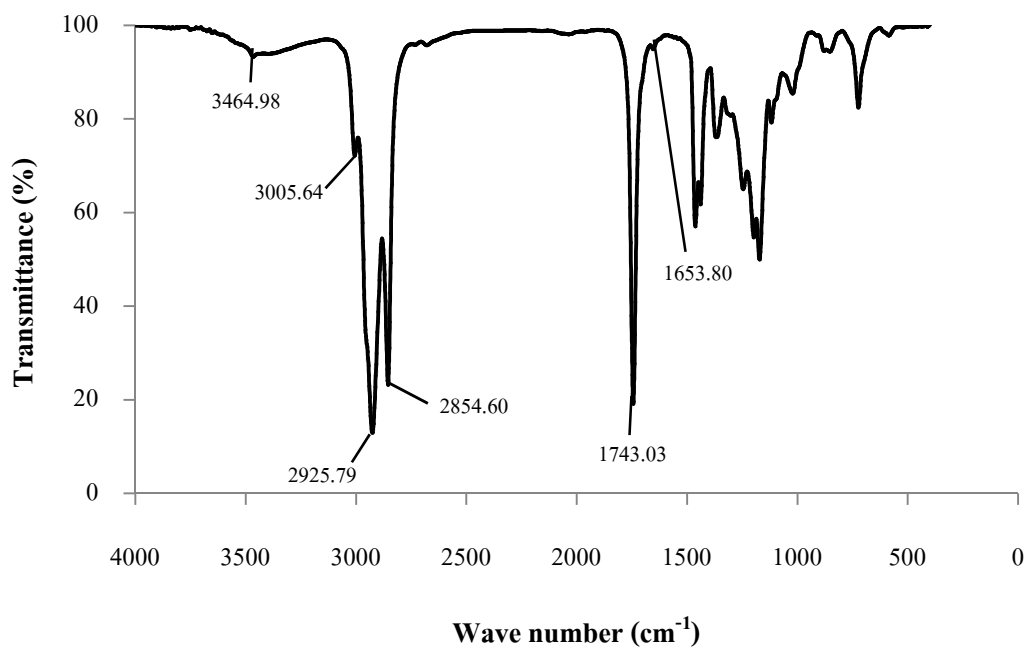
ภาพที่ ก-1 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกลีเซอรอลบริสุทธิ์



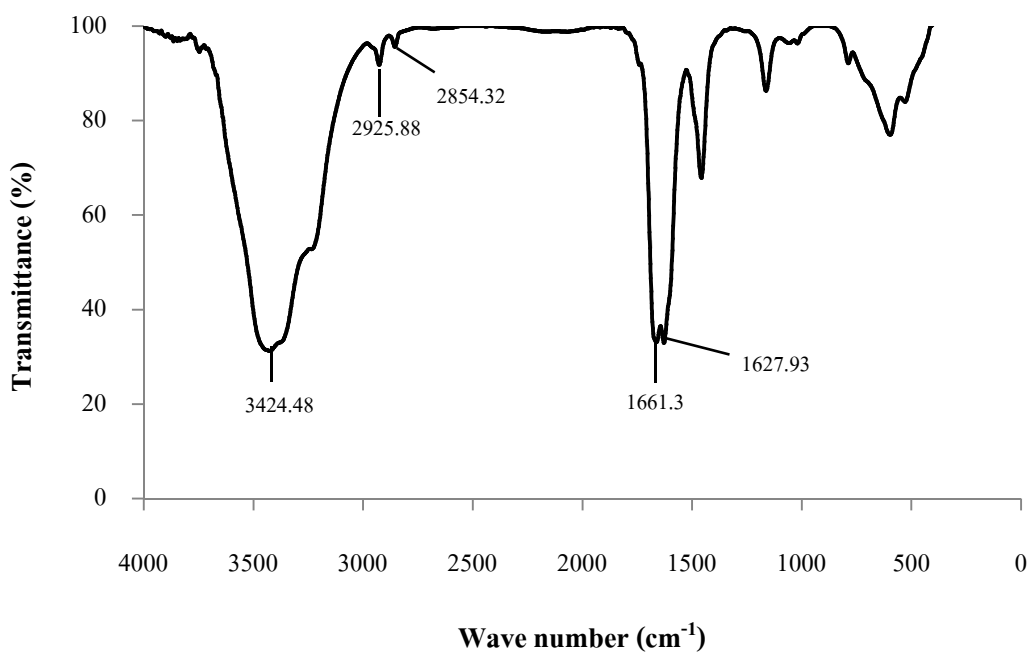
ภาพที่ ก-2 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกาลีเซอรอลดิวทิล



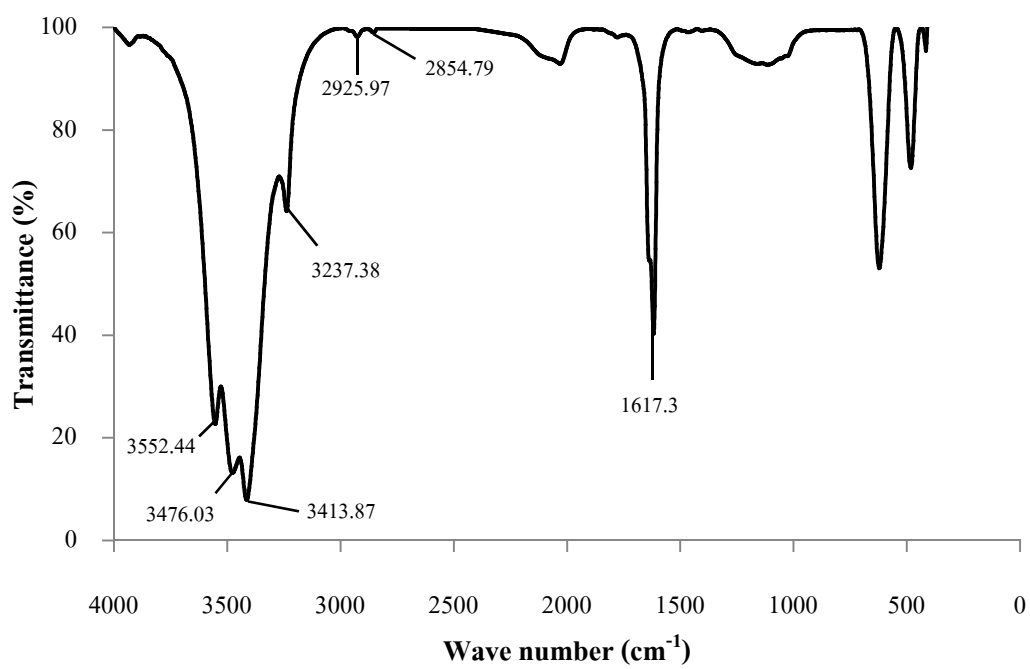
ภาพที่ ก-3 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของกาลีเซอรอลดิวทิลที่ผ่านการแยกสิ่งปนเปื้อน



ภาพที่ ก-4 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของไป ไอคิเซลบิสูทซ์



ภาพที่ ก-5 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของยูเรีย



ภาพที่ ก-6 สเปกตรัมการวิเคราะห์สารด้วยรังสีอินฟราเรด (FTIR) ของ โพลีเอทิลีนไกลคอล

## ภาคผนวก ง.

## การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลคงเหลือ

## วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณกลีเซอรอล ร้อยละของน้ำหนัก} = \frac{9.209 \times N(T_1 - T_2)}{W}$$

เมื่อ N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร  
 $T_1$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรตกับตัวอย่างเป็น มล.  
 $T_2$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรตกับแบลนก์เป็น มล.  
 W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เป็นกรัม

## สารเคมีที่ใช้

1. สารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต นำสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 60 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต โดยไม่ต้องใช้ความร้อน ถ่ายใส่ขวดสีน้ำตาลพร้อมจุกแก้วปิดสนิทแล้วเก็บในที่มืด ห้ามโดนแสงแดด
2. สารละลายอีเทนไดออกไซด์ผสมอีเทนไดออกไซด์ที่เป็นกลางและปราศจากกลีเซอรอล 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วน (โดยปริมาตร)
3. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปราศจากคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
5. สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 โมลต่อลิตร
6. โบรโมโทมอลบูลินดิเคเตอร์



### ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ใช้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.125 โมลต่อลิตร
  - ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5.05 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร  
ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร
  - โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent, A.R.) มีความเข้มข้นร้อยละ 99
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.05 โมลต่อลิตร
  - ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.02 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร  
ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร
  - โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent, A.R.) มีความเข้มข้นร้อยละ 99
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.01 โมลต่อลิตร
  - ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.404 กรัม เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร
  - โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent, A.R.) มีความเข้มข้นร้อยละ 99
4. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.1 โมลต่อลิตร
  - ปิเปตกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5.55 มิลลิลิตร เทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร
  - กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent, A.R.) มีความเข้มข้นร้อยละ 96

## ภาคผนวก จ.

## ราคาไซโคลเด็กซ์ตริน

ตารางที่ ก-3 ราคาไซโคลเด็กซ์ตริน

บริษัท	ไซโคลเด็กซ์ตริน			
	$\alpha$ -CD	$\beta$ -CD	$\gamma$ -CD	Acetyl- $\beta$ -CD
CTD,Inc*	2.5 USD/g	1.4 USD/g	3.85 USD/g	-
Cyclolab*	28 EUR/g	28 EUR/g	68 EUR/g	48 EUR/g
Jiangsu fengyuan biotechnologies Co.Ltd.*	90 USD/kg	6 USD/kg	150 USD/kg	-

\* หมายเหตุ ราคานี้ไม่รวมภาษีและค่าขนส่ง

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวจันทร์เพ็ญ อีสโร  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010920005

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขารณศาสตร)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2548

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

จันทร์เพ็ญ อีสโร, วิรัช ทวีปรีดา, ชาคริต ทองอุไร, ชันวดี เตชะภักทวรกุล สุขสาโรจน์ และชัยศรี สุขสาโรจน์, 2552. “การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกดีเซอรอดและไซโคลเด็กซ์ตรินโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. วันที่ 21-22 พฤษภาคม 2552.