

การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์กังวณ  
สำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน



นายธีรพงศ์ เอี่ยมกุลวรพงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scale-up of Stirred-Tank Reactor for Synthesis of Para-Toluenesulfonyl Cyclodextrin

Mr. Teerapong Aiemkunworapong



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนสำหรับการ สังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเด็คซ์ตริน
โดย	นายธีรพงศ์ เอี่ยมกุลวรพงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. อรุษา รัชต์ตานนท์ชัย)

ธีรพงศ์ เอี่ยมกุลวรรพงษ์ : การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน (Scale-up of Stirred-Tank Reactor for Synthesis of Para-Toluenesulfonyl Cyclodextrin) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ, 105 หน้า.

พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน เป็นสารตั้งต้นใช้เชื่อมต่อกับพอลิเมอร์ ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาโดยใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินและพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ทำปฏิกิริยาในระบบสารไม่เป็นเนื้อเดียว ในงานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินในถังปฏิกรณ์ 0.5 ลิตรที่มีสมมติฐานของการไม่มีผลของการกวนผสมเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการเกิดปฏิกิริยา โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่ได้จากการตกตะกอนเกือบทั้งหมดมีค่าการแทนที่ ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการตกตะกอนจะมีแคโมโนพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเท่านั้นที่ตกตะกอนลงมา นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสูงสุด อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนโดยโมลของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1 ต่อ 5 ผลของจำนวนการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้

การขยายขนาดสำหรับปฏิกิริยาข้างต้นจะทำในถังปฏิกรณ์มาตรฐานที่ 2 และ 15 ลิตร ใบพัดแบบพิกเชลตชนิด 4 เบลด โดยศึกษาผลของความเร็วยรอบและตำแหน่งของใบกวนในถังปฏิกรณ์ 2 ลิตรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าที่ความเร็วยรอบที่มากกว่า 500 รอบต่อนาที และตำแหน่งระหว่างใบกวนกับกันถึงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังที่ 1 ต่อ 3 จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเท่ากับผลที่ได้ในถังปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร ที่เวลาเดียวกัน สำหรับถังปฏิกรณ์ 15 ลิตร ให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ 2 ลิตรและ 0.5 ลิตร ที่ความเร็วยรอบต่ำสุดที่ 220 รอบต่อนาที สรุปได้ว่าอัตราการละลายของอนุภาคพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเทคนิคที่ใช้ในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ในการผลิตพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นการทำให้การฟุ้งกระจายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เท่ากันเป็นตัวกำหนด

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5570239021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

TEERAPONG AIEMKUNWORAPONG: Scale-up of Stirred-Tank Reactor for Synthesis of Para-Toluenesulfonyl Cyclodextrin. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, CO-ADVISOR: DR. KAJORNSAK FAUNGNAWAKIJ, 105 pp.

Para-Toluenesulfonyl Cyclodextrin (TsCD) is the reactant to graft with the long chain polymer. It is synthesized by the reaction of Beta cyclodextrin ( $\beta$ CD) and Para-Toluenesulfonyl chloride (TsCl) in the heterogeneous system. In this study, the reaction of TsCD was first studied in the 0.5 L reactor for understanding the reaction with the assumption of no mixing effect. The effect of temperature, NaOH concentration as well as the number of adding amount of TsCl on the product yields and degree of tolylation were investigated. The degree of tolylation of the solid products were less than 1 because mono-toluenesulfonyl cyclodextrin can only precipitated during the product recovery step. The reaction condition at 15 °C and the ratio of beta cyclodextrin and sodium hydroxide mole ratio at 1:5 showed the highest solid products yield. No effect of the adding amount of TsCl was observed.

The reaction was scaled up to standard tank reactor of 2 L and 15 L with 4 pitched blade impeller. In 2 L reactor, the effect of impeller speed and position of the impeller on the product yield were studied. The minimum impeller speed at 500 rpm with impeller clearance to diameter tank ratio (C/T) at 1:3 were found to give the same product yield at the same reaction time as in 0.5 L reactor. In 15 L, the yield of the products was found to be the same as in 0.5 and 2 L at the same time when the impeller speed was higher than 220 rpm. The results indicated that the scale up of the stirred tank reactor to produce TsCD from  $\beta$ -CD and TsCl was controlled by the solubility rate of TsCl. Therefore, the scale up method is the same solid suspension in the reactor.

Department: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ด้วยดีจึงจำเป็นต้องขอขอบคุณผู้มีพระคุณทั้งหลายที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในแนวทางการแก้ปัญหาและกำลังใจตลอดจนความคิดเห็นต่างๆ จากบุคคลดังต่อไปนี้

ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำตลอดการศึกษาช่วยแนะแนวทางการแก้ปัญหา ขอขอบคุณ ดร.ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย และขอขอบคุณ อ. ดร. เจ็ดศักดิ์ ไชยคุณา รศ. ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ และ ดร.อุรษา รัชต์ตานนท์ชัย ในการเป็นประธานกรรมการ,กรรมการภายในและกรรมการนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้เสียสละเวลาสำหรับการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ อีกทั้งให้ข้อยังเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ใช้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดร. สุวัชชัย จรัสโสภณ ดร.วราวุธ สะโจอมแสง ดร.สุวิมล สุรัสโม นางสาวศรีัญญา พันปี และนายจักรวาล ยศถาวรกุล ห้องวิจัยระบบนำส่งอนุภาคนาโน ตึกนวัตกรรม 2 ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณสมาชิกศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค (CEPT)และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีส่วนช่วยให้คำปรึกษาขั้นตอนปฏิบัติงานต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ และพี่ชาย นพ.ศุภชัย เอี่ยมกุลวรพงษ์ คอยสนับสนุนเรื่องทุนการศึกษาและคอยให้คำปรึกษามาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงใจที่สำคัญที่สุด ทำให้สามารถผ่านปัญหาและอุปสรรคการทำวิจัยไปได้ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุกด้าน

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 โซโคลเด็กซ์ตริน .....	7
2.1.1 เบต้าโซโคลเด็กซ์ตริน.....	7
2.2 พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์.....	8
2.3 การศึกษาปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตริน .....	9
2.4 การขยายขนาดและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ .....	12
2.4.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และใบกวนแบบมาตรฐาน (Standard mixing tank) ....	12
2.4.2 การเลือกชนิดใบกวน .....	13
2.5 การหาค่าล้นรอบการปั่นกวนด้วยการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบสมมาตรและสมการ ความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ .....	14
2.6 สมการความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์.....	16
2.7 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และใบกวนสำหรับ สภาวะสารแขวนลอย .....	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแข็งและของเหลวในสภาวะสารแขวนลอย.....	24
2.9 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์และผลกระทบจากปัจจัยการ ขยายขนาด .....	25

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 สารเคมี.....	35
3.2 อุปกรณ์.....	36
3.3 วิธีการทดลอง.....	46
3.3.1 การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	46
3.3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร.....	51
3.3.2 การศึกษาตัวแปรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร.....	51
3.3.3 การศึกษาตัวแปรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	54
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	54
4.1.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	54
4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อที่มีต่อการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	56
4.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	59
4.1.4 ผลของการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	61
4.1.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	62
4.1.6 สรุปกระบวนการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	65
4.2 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน ขนาด 2 ลิตร.....	67
4.2.1 การศึกษาปัจจัยความเร็วรอบที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	67



4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนของตำแหน่งของใบกวนที่มีผลต่อกำลังเคราะห์พาราโทลูอิน ซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน.....	69
4.2.3 สรุปการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร.....	71
4.3 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน ขนาด 15 ลิตร.....	73
4.3.1 ความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์.....	73
4.3.2 สรุปการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	80
5.1 สรุปผลวิจัย .....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	105



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน (p-Toluenesulfonyl-cyclodextrin) เป็นสารตั้งต้นสำหรับทำปฏิกิริยาการเชื่อมต่อกับพอลิเมอร์ ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการทำอนุพันธ์ของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ( $\beta$ CD) และพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ (TsCl) เป็นสารตั้งต้น [1, 2] เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นไซโคลเด็กซ์ตริน ประกอบด้วยโมเลกุล กลูโคไพราโนสเชื่อมต่อกันเป็นวง จำนวน 7 โมเลกุล มีโครงสร้างเป็นโพรงช่องว่าง และหมู่ไฮดรอกซิลสำหรับทำปฏิกิริยากับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ซึ่งเป็นสารที่ว่องไวปฏิกิริยา โดยพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถนำมาเชื่อมพันธะพอลิเมอร์เพื่อไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ [3] งานด้านสิ่งทอ [4] งานด้านบำบัดน้ำเสีย [5] เป็นต้น

การเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน สามารถเกิดขึ้นได้โดยเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เข้าดิ้งโปรตรอน ( $\text{H}^+$ ) บนหมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) ของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ทำให้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีประจุเป็นลบ ( $\beta\text{CD}^-$ ) แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ซึ่งมีหมู่ทอลซิลเลตที่เป็นประจุบวกรับอิเล็กตรอนจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีประจุเป็นลบ ทำให้อะตอมคลอไรด์สลายพันธะออกจากหมู่ทอลซิลเลต โดยการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นเกิดในวัฏภาคของเหลว ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินซึ่งอยู่ในวัฏภาคของเหลว จากการศึกษาวิจัยเบื้องต้น พบว่าสภาวะการสังเคราะห์อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ( $\beta\text{CD}:\text{TsCl}$  mole ratio) จะอยู่ในช่วง 1:1 ถึง 1:6 อัตราส่วนจำนวนโมลของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ถึง 1 ต่อ 40 ลักษณะการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ใน

ระบบการทำปฏิกิริยา มี 2 แบบ คือ การเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์แบบเติมครั้งเดียว และการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์แบบเติม 2 ครั้ง [1, 6]

ในงานวิจัยนี้ได้้นำปฏิกิริยาข้างต้นมาขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนในการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งปัจจุบันยังไม่มี การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนด้วยปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินเพราะการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ทำได้ยากกว่าการผลิตในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก จึงต้องทำการศึกษาการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์

ขั้นตอนเริ่มต้นของการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนโดยเริ่มจากหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่ศึกษา เช่น อุณหภูมิ ปริมาณสาร และการเติมสาร โดยศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กหรือขนาดเดียวกับห้องปฏิบัติการเพราะเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กมีการกวนผสมที่สมบูรณ์ไม่มีข้อจำกัดของการถ่ายเทมวล เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมนำสภาวะได้มาไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้น [7]

ปัจจุบันการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตริน ยังไม่มีการสังเคราะห์ในระดับขยายขนาด เพราะการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ทำได้ยากกว่าการผลิตในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก เนื่องจากการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์มีปัจจัยมารบกวน และการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินเป็นการกวนผสมในระบบสารวิวิธพันธุ์ของแข็งกระจายตัวในของเหลว เกิดการกวนผสมที่ไม่สมบูรณ์เมื่อมีการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เกิดขึ้น จึงต้องศึกษาตัวแปรการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ โดยสรุปดังนี้

1. ผลกระทบการกวนผสมจากระบบเป็นของแข็งกระจายตัวในของเหลว จากการศึกษา งานวิจัย การสังเคราะห์อลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า ตัวแปรความเร็วรอบส่งผลกระทบการกวนผสม ทำให้ความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบทำให้อัตราการเกิดของพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะให้อัตราการเกิดของพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์มากขึ้น [8]
2. การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในวัฏภาคของเหลว จะขึ้นกับความเร็วรอบการปั่นกวน ความหนืดของของเหลว ขนาดของใบกวน ชนิดของใบกวน [9-11]

3. การขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะมีผลต่อการกวนผสม การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ต้องเริ่มจากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กหรือขนาดเดียวกับห้องปฏิบัติการเพราะเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กมีการกวนผสมที่สมบูรณ์ การหาสภาวะที่เหมาะสมและตัวแปรของปฏิกิริยาจึงต้องเริ่มศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก และนำสภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่
4. การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์โดยทั่วไปจะมีเทคนิคศึกษาผลของตัวแปรความสัมพันธ์ให้ตัวใดตัวหนึ่งคงที่ เช่น ความเร็วปลายใบกวนคงที่ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สที่ และกำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรคงที่ ซึ่งแต่ละตัวแปรจะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือร้อยละผลได้ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาดเล็กและขนาดใหญ่ [7, 12, 13]
5. ขนาดของสัดส่วนของขนาดเรขาคณิตของเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ เช่น อัตราส่วนระหว่างความสูงของของเหลวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (H/T) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (D/T) อัตราส่วนระยะห่างระหว่างความสูงจากกันเครื่องปฏิกรณ์ถึงระดับตำแหน่งใบกวนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (C/T) ความกว้างของแผ่นบัฟเฟิลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (B/T) มีผลต่อการกวนผสมดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดสัดส่วนของถังให้พอเหมาะสม [14]
6. ชนิดของใบกวนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเคลื่อนของสารในระบบที่เนื่องจากใบกวนแต่ละชนิดจะให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของสารที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงเมื่อมีการปั่นกวนเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องเลือกชนิดใบกวนให้เหมาะสมกับการใช้งาน [14]

จากปัจจัยที่กล่าวมาการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จะไปส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเจน ที่ทำให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เบี่ยงเบนจากการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ศึกษาตัวแปรสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเจนในระดับห้องปฏิบัติการ และ ศึกษาตัวแปรการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยของการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องและเพื่อเข้าใจกระบวนการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน

1.2.2 ศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร ให้มีร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลที่เหมือนกับห้องปฏิบัติการ

1.2.3 ศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร ให้มีร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลที่เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน จะศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร ปั่นกวนด้วยตัวปั่นกวนชนิดแม่เหล็ก โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ เป็น 1 ต่อ 1 ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาอาศัยการละลายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ทำให้จะใส่สัดส่วนของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ มากเท่าใดก็ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

1.3.1.1 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล ที่อุณหภูมิ 5-40 องศาเซลเซียส

1.3.1.2 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล ที่อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 ถึง 1:15

1.3.1.3 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลต่อการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ 2 แบบ คือแบบเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ครั้งเดียว และแบบเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ 2 ครั้ง

1.3.1.4 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินต่อเวลา

1.3.2 การศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

1.3.2.1 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเดกซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล ที่ความเร็วรอบ 200 300 500 700 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอาศัยสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อที่ 1.3.1 โดยศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร แบบมาตรฐาน ใช้ใบกวนแบบพิช เบลด

1.3.2.2 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเดกซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของใบกวน ระยะระหว่างใบกวนกับกัน เครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (C/T) ที่ 1/3 1/4 1/6 โดยใช้ใบกวนแบบพิช เบลด

1.3.3 การศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

1.3.3.1 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเดกซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวน ที่ทำให้ตัวเลขเรย์โนลมีค่าเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

1.3.3.2 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเดกซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวน ที่ทำให้ความเร็วปลายใบกวนเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

1.3.3.3 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเดกซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวน ที่ทำให้กำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

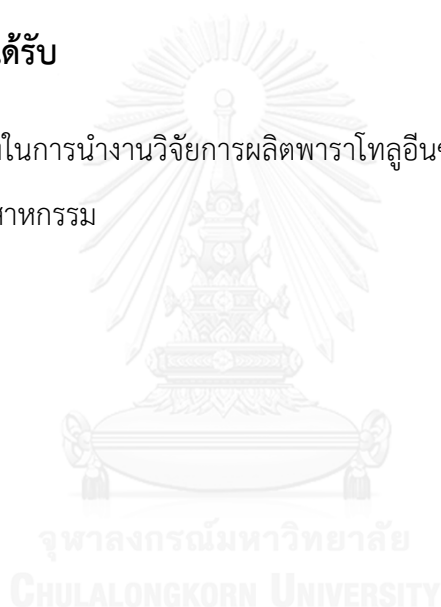
1.3.3.4 ศึกษาร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวน ที่ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

การศึกษาจะศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 15 ลิตร แบบมาตรฐาน โดยใช้ใบกวนแบบพิช เบลด

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยา จะทำการร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลในเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินต่อเวลา

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการนำงานวิจัยการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินมาใช้ผลิตในระดับอุตสาหกรรม

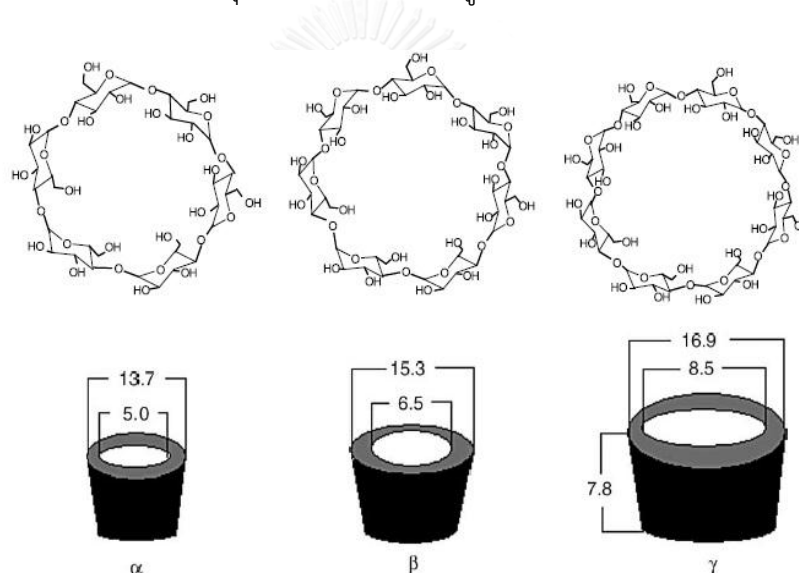


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไซโคลเด็กซ์ทริน

ไซโคลเด็กซ์ทรินมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของ กลูโคไพรรานอส ที่เชื่อมต่อกันเป็น โพรงช่องว่าง ไซโคลเด็กซ์ทริน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ แอลฟาไซโคลเด็กซ์ทริน เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน และแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน โดยมีโมเลกุลของ กลูโคไพรรานอสเชื่อมต่อกันเป็นโพรงช่องว่าง จำนวน 6 7 และ 8 โมเลกุลตามลำดับ [15] ดังรูปที่ 2. 1



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างและขนาดของไซโคลเด็กซ์ทริน [16]

##### 2.1.1 เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน

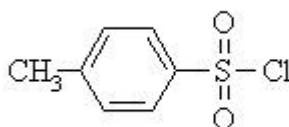
เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นไซโคลเด็กซ์ทรินที่มีโมเลกุลของ กลูโคไพรรานอส จำนวน 7 โมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นโพรงช่องว่าง มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 21 หมู่ สมบัติทางกายภาพของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน เป็นอนุภาคของแข็ง มวลโมเลกุล 1,135 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว 300 องศาเซลเซียส ค่าการละลายน้ำ 18 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [15] เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน สามารถละลายในเบสได้ดีกว่าในสภาวะที่เป็นกลาง [17] สมบัติทางเคมีของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ด้านในโพรงมีลักษณะไฮโดรโฟบิก ทำให้โมเลกุลสารไม่มีขั้วไปจับอยู่ตรงกลาง ส่วนด้านนอกจะเป็นลักษณะไฮโดรฟิลิกจะข



อบสารมีขีด ขนาดโพรงช่องว่างของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินมีขนาดเหมาะสมสำหรับกักเก็บสาร เบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินมีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถสร้างพันธะกับพอลิเมอร์ ซึ่งมีตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาที่สามารถนำไปเชื่อมพันธะกับพอลิเมอร์ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งบนคาร์บอนอะตอม ที่ 2 3 และ 6 โดยหมู่ไฮดรอกซิลบนตำแหน่งคาร์บอนอะตอมที่ 6 เรียกว่า หมู่ปฐมภูมิ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาสูงสุด และหมู่ไฮดรอกซิลบนตำแหน่งคาร์บอนอะตอมที่ 2 และ 3 เรียกว่า ทติภูมิ การนำเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินมาต่อกับพอลิเมอร์จึงจำเป็นต้องผ่านการทำปฏิกิริยาอนุพันธ์กับสารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาก่อนที่จะนำมาต่อกับพอลิเมอร์ เนื่องจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารที่เฉื่อยในการเชื่อมพันธะกับพอลิเมอร์ [15]

## 2.2 พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

สารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอนุพันธ์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเฮไลด์ สมบัติทางกายภาพของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เป็นอนุภาคของแข็ง มีค่าการละลายน้ำ 51.18 มิลลิกรัมต่อลิตร จุดหลอมเหลว 71 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.33 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [18] มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกต่อกับหมู่เมทิลและหมู่คลอโรซัลฟูเนตดังรูปที่ 2. 2 สมบัติทางเคมีของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ มีความเป็นกรด มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์จึงถูกนิยมนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาอนุพันธ์ เพราะพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เป็นกูดลิฟวิ่งกรุป (Good living group) [16]

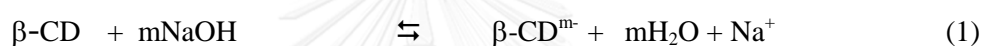


รูปที่ 2. 2 โครงสร้างของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ [www.sigmaaldrich.com]

## 2.3 การศึกษาปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

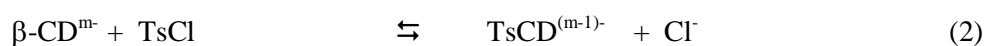
การเตรียมอนุพันธ์เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินหรือการเตรียมพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินประกอบด้วย 5 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โครงสร้างของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีโมเลกุลกลูโคไพราโนส 7 โมเลกุล ซึ่งโมเลกุลกลูโคไพราโนสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตำแหน่งปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกิริยากับได้มากที่สุดคือหมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนอะตอมที่ 6 เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินถูกดิงโปรตอนดังสมการที่ (1) โดยทั่วไปเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถดิงโปรตอนได้ 7 โปรตอนบนตำแหน่งปฏิกิริยา [Gaidamauskas E. et al.2008]

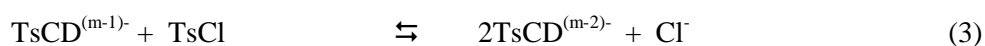


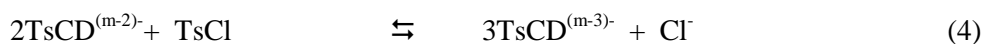
โดยทั่วไป  $1 < m \leq 7$

ขั้นตอนที่ 2 การแทนที่ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ละลายและเข้าทำปฏิกิริยากับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ถูกดิงโปรตอน ทำให้คลอไรด์อะตอมหลุดออกจากหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลแสดงดังสมการ (2) เกิดผลิตภัณฑ์เป็น โมโน พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน



ขั้นตอนที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของ พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน โมโน พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เกิดเป็น ไดพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินและไตร พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน แสดงดังสมการ (3) และ (4) โดยที่เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุด 3 ตำแหน่ง บนหมู่ไฮดรอกซิลปฏิกิริยา เนื่องการเกิดการกีดกันทางโครงสร้างของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล [www.chemgapedia.de][ Abdul K.et al. 1998]





ขั้นตอนที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของกรดพาราโทลูอินซัลโฟนิค พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังสมการ (5) การเกิดกรดพาราโทลูอินซัลโฟนิคจะขึ้นกับอุณหภูมิในระบบ [www. chemgapedia.de]



ขั้นตอนที่ 5 การแยกผลิตภัณฑ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือการตกตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก ผลิตภัณฑ์ โมโน พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคเลเด็กซ์ตรินซึ่งอยู่ในวัฏภาคของเหลวถูกตกตะกอนด้วยการเติมโปรตอนจากกรดไฮโดรคลอริกแสดงดังสมการ (6) และการเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อไปกำจัดไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบแสดงดังสมการ (7)



จากการศึกษาสภาวะการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคเลเด็กซ์ตรินจากงานวิจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2. 1 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคเลเด็กซ์ตริน ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ อัตราส่วนจำนวนโมลของเบต้าโซโคเลเด็กซ์ตรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ อัตราส่วนจำนวนโมลของเบต้าโซโคเลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

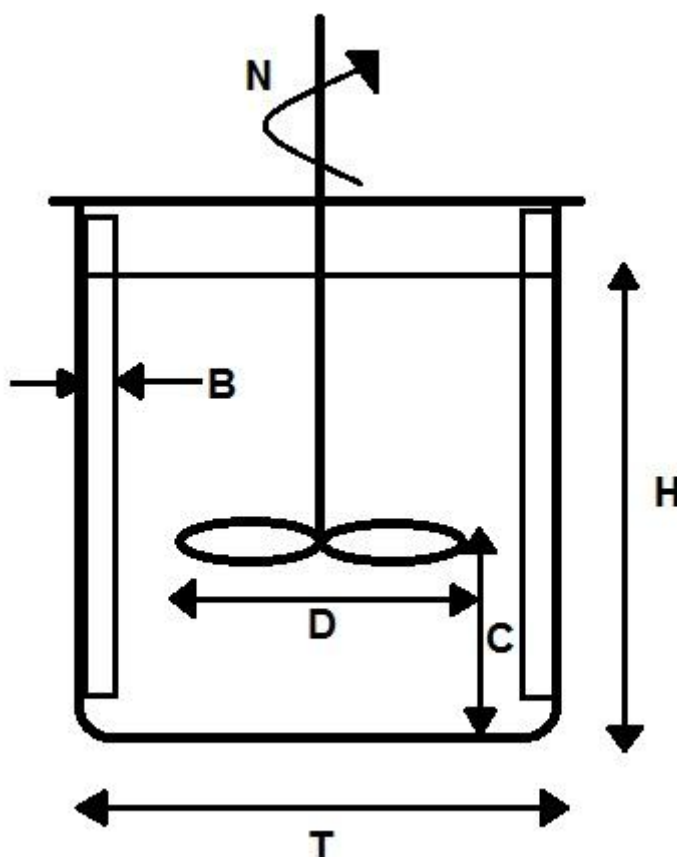
ตารางที่ 2.1 สภาวะการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโพลีเอทิลีนไดออกไซด์

	Brady B.et aL.(2004) [2]	Jiu-jin Z.et aL.(2009) [22]	Gonil P.et aL.(2010) [1]	Tan T.et aL.(2011) [23]	Tripodo G.et (2013) [7]	Zhang G.et aL.(2013) [25]
อุณหภูมิ (°C)	0-5	25	0-5	25	25	0-5
อัตราส่วนจำนวนโมล BCD:TsCl	1:6	1:1.2	1:6	1:4.6	1:1.5	1:4
เวลา (ชั่วโมง)	5	2	5	2	1	4
ชนิดของสารละลาย	NaOH	NaOH, CHULAKONGKORN UNIVERSITY	NaOH	NaOH/H <sub>2</sub> O	NaOH	NaOH
อัตราส่วนจำนวนโมล BCD:NaOH	1:14	1:3	1:40	1:13	1:10	1:15
ลักษณะการเติม TsCl	เติม 2 ครั้ง	หยดเติม	เติม 2 ครั้ง	เติม 1 ครั้ง	เติม 2 ครั้ง	เติม 1 ครั้ง
ชนิดของ TsCD	Mono TsCD	Mono TsCD	Mono TsCD	Mono TsCD	Mono TsCD	Mono TsCD
ร้อยละผลได้	25%	10.88%	22%	30%	35%	24.3%

## 2.4 การขยายขนาดและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

### 2.4.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และไบกวนแบบมาตรฐาน (Standard mixing tank)

การกำหนดขนาดเครื่องปฏิกรณ์โดยการขยายขนาดตามสัดส่วนของถังโดยยึดตามรูปทรงสมมาตรของถัง ดังรูปที่ 2. 3



รูปที่ 2. 3 แสดงขนาดสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน [25]

ขนาดสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์และไบกวนที่เหมาะสมในรูปทรงแบบมาตรฐาน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความสูงของของเหลวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ เป็น 1 ต่อ 1 ( $H/T=1$ ) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางไบกวนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 ( $D/T=0.3-0.5$ ) อัตราส่วนระหว่างระดับต่ำความสูงจากก้นเครื่องปฏิกรณ์ถึงระดับตำแหน่งไบกวนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ เป็น 1 ต่อ 3 ( $C/T=1/3$ ) และ

อัตราส่วนระหว่างความกว้างของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ เป็น 1 ต่อ 12 ( $B/T=1/12$ ) [14, 25]

#### 2.4.2 การเลือกชนิดใบกวน

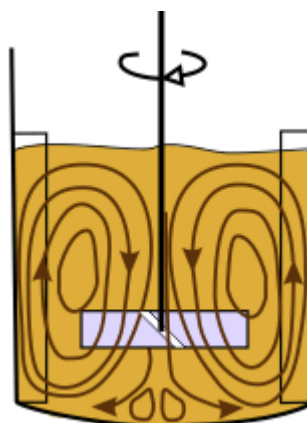
ใบกวนเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของการกวนผสม การเลือกชนิดของใบกวนควรเลือกให้ถูกต้องกับการใช้งาน เพราะใบกวนทำหน้าที่เปลี่ยนแรงเชิงกลจากมอเตอร์ส่งไปสู่เหลวทำให้ของเหลวเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งใบกวนแต่ละชนิดจะให้แรงในการเคลื่อนที่ได้ในทิศทางที่แตกต่างกัน

ใบกวนแบบ พิช เบลด มีการไหลในทิศแกนรัศมี ( $r$ ) ทิศแกนหมุน ( $\theta$ ) และทิศแกนตั้ง ( $z$ ) ใบกวนชนิดนี้ทำให้เกิดการไหลในทิศแกนตั้งมากที่สุดเมื่อมีการปั่นกวน สำหรับของเหลวและอนุภาคของแข็งผสมอยู่ในระบบใบกวนชนิดนี้จะช่วยกระจายตัว โดยใบเบลตจะทำมุมเฉียง 45 องศากับแนวตั้ง ดังรูปที่ 2. 4 จำนวนของใบกวนแบบ พิช เบลดมีจำนวนเบลต 4 เบลต [25]



รูปที่ 2. 4 ใบกวนแบบ พิช เบลตชนิด 4 เบลต [26]

การไหลจากการปั่นของใบกวนพิช เบลต เนื่องจากใบกวน พิช เบลต มีใบที่เฉียงทำมุม 45 องศา ทำให้มีการไหลในทิศแกนตั้งมากที่สุดแสดงรูปที่ 2. 5 [14]



รูปที่ 2.5 แสดงทิศการไหลของการปั่นใบกวนแบบพิช เบลต [www.thermopedia.com]

## 2.5 การหาค่ากำลังรอบการปั่นกวนด้วยการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบสมมาตรและสมการความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์

การคำนวณหาอัตราส่วนการขยายขนาด สามารถคำนวณจากฝั่งการหาอัตราส่วนการขยายขนาดกำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรดังรูปที่ 2.6 โดยกำหนดให้ค่าคงที่ค่าหนึ่งในการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากันดังนี้

2.6.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน (Equal Heat Transfer per unit volume-Laminar) การใช้งาน ของไหลปั่นกวนอยู่ในสภาวะการไหลแบบราบเรียบ

2.6.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน (Equal Heat Transfer per unit volume-Turbulent) การใช้งาน ความเร็วควรอยู่ในช่วงของมอเตอร์ที่สามารถออกแบบได้ ของไหลปั่นกวนอยู่ในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน

2.6.3 เวลาของการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal Blend Time- Turbulent) การใช้งาน สารในระบบเป็นเนื้อเดียว

2.6.4 ค่าตัวเลขฟรูดของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน (Equal  $N_{Fr}$ ) สำหรับ การใช้งาน พิจารณาพลังงานจลน์ต่อพลังงานศักย์ ณ ตำแหน่งใดๆในของไหลในถัง

2.6.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal Heat Transfer Coefficient- Turbulent )

2.6.6 เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองน้ำและหยดน้ำเท่ากันของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal bubble and drop diameter- Turbulent)

2.6.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะราบเรียบ (Equal Heat Transfer Coefficient- Laminar )

2.6.8 เวลาของการปั่นกววนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะราบเรียบ (Equal Blend Time- Laminar)

2.6.9 สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลสารของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal mass and heat Transfer Coefficient- Turbulent)

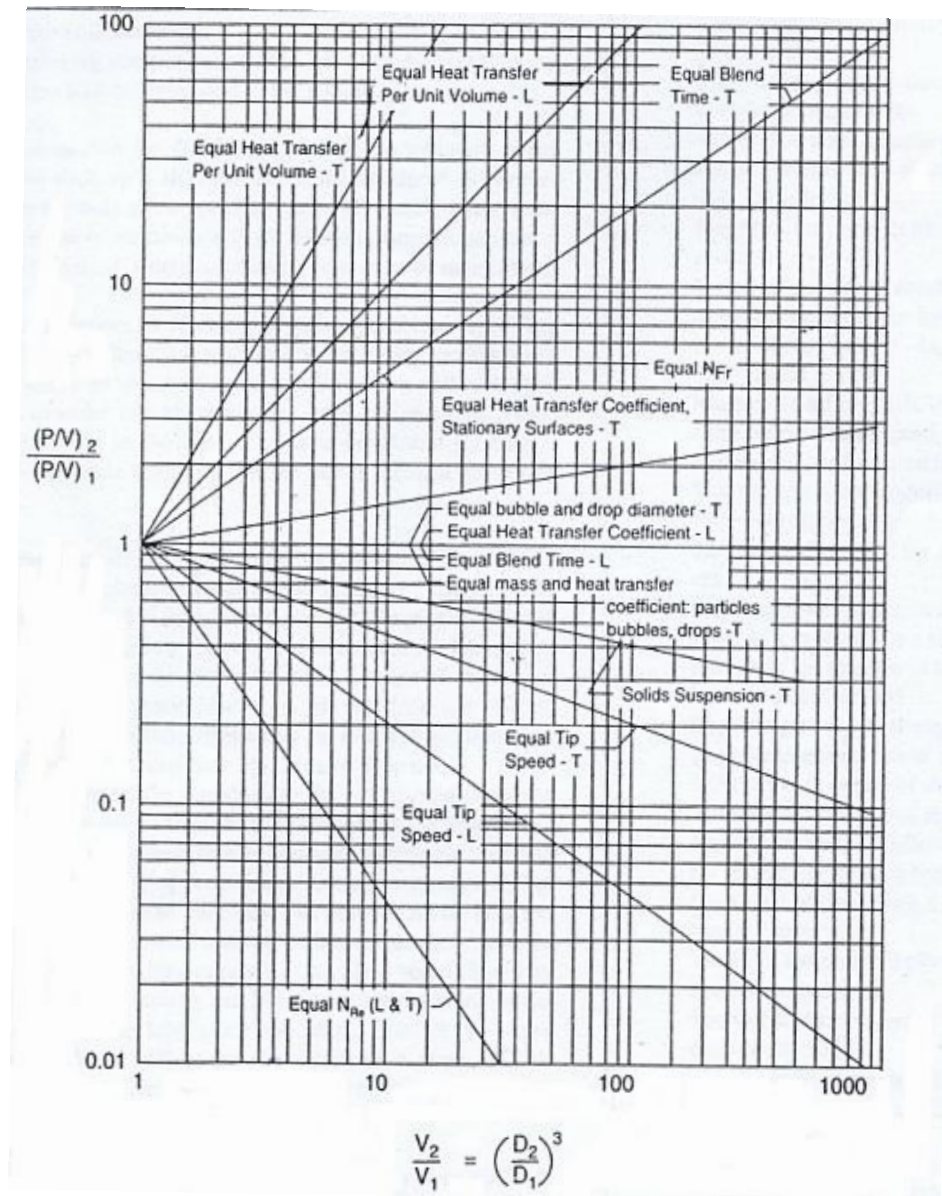
2.6.10 อัตราการกระจายตัวอนุภาคของของแข็งของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal Solid Suspension- Turbulent)

2.6.11 ความเร็วในการหมุนปลายใบกวนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะปั่นป่วน (Equal Tip Speed – Turbulent) ของไหลปั่นกววนอยู่ในสภาวะราบเรียบ

2.6.12 ความเร็วในการหมุนปลายใบกวนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะราบเรียบ (Equal Tip Speed- Laminar )

2.6.13 ค่าตัวเลขเรย์โนลของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน ในสภาวะราบเรียบและปั่นป่วน (Equal  $N_{Re}$ - Laminar and Turbulent)





รูปที่ 2. 6 ผังแสดงการหาอัตราส่วนการขยายขนาดกำลังการปั่นกววนต่อปริมาตร [14]

## 2.6 สมการความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์

การคำนวณหาอัตราส่วนการขยายขนาด โดยพิจารณาแบบมาตรฐานเครื่องปฏิกรณ์ ( $D=H$ ) ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1

$$V_1 = \left(\frac{\pi D_1^2}{4}\right) H_1 = \left(\frac{\pi D_1^3}{4}\right)$$

ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2

$$V_2 = \left(\frac{\pi D_2^2}{4}\right) H_2 = \left(\frac{\pi D_2^3}{4}\right)$$

นำปริมาตรของถังที่ 2 หารด้วย ปริมาตรของถังที่ 1

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi D_2^3/4}{\pi D_1^3/4} = \frac{D_2^3}{D_1^3}$$

จัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วน R หรือ สเกลอัพเรโซ (scale up ratio)

$$R = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1/3} = \frac{D_2}{D_1}$$

หรือ

$$D_2 = R D_1$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปความเร็วการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2

$$N_2 = N_1 \left(\frac{1}{R}\right)^n = N_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n$$

จัดรูปดังสมการที่ (9)

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n \quad (9)$$

ตารางที่ 2.2 ตัวแปร n คือ ค่าเอ็มพีริคัลและการพิจารณาระบบทางทฤษฎีในเครื่องปฏิกรณ์

ระบบในเครื่องปฏิกรณ์	ค่าเอ็มพีริคัลและค่าเชิงทฤษฎี (n)
Equal Re	2
Equal Fr	1/2
Equal power per volume , Equal mass transfer rate	2/3
Equal suspension of solid	3/4

การศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ในรูปการใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลเป็นตัวกำหนดการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร การให้ค่าตัวเลขเรย์โนลของการปั่นกววนในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร เท่ากัน จากสมการแสดงการเท่ากันของค่าตัวเลขเรย์โนล โดย  $Re_1$  คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $Re_2$  คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร การขยายขนาดจะกำหนดให้ค่าตัวเลขเรย์โนลของการปั่นกววนของเครื่องปฏิกรณ์ 2 ขนาดเท่ากัน

$$Re_1 = Re_2$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลเขียนให้อยู่ในรูปความหนืด ความหนาแน่น ความเร็วรอบ และเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน โดยที่  $\rho_1$  คือความหนาแน่นของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $\rho_2$  คือความหนาแน่นของเหลวใน

เครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร  $\mu_1$  คือความหนาแน่นของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $\mu_2$  คือความหนาแน่นของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร  $N_1$  คือความเร็วรอบในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $N_2$  คือความเร็วรอบในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร  $D_1$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $D_2$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร

$$\frac{\rho_1 N_1 D_1^2}{\mu_1} = \frac{\rho_2 N_2 D_2^2}{\mu_2}$$

สำหรับระบบสารเป็นเนื้อเดียว กำหนดให้ความหนืดและความหนาแน่นของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 15 ลิตร มีค่าเท่ากัน

$$\mu_1 = \mu_2$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

จัดรูปสมการใหม่แสดงดังสมการ (10)

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (10)$$

ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร ที่ทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร มีค่าเท่ากัน จะขึ้นกับสัดส่วนของใบกวนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร ยกกำลัง 2

การศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบการใช้ความเร็วปลายใบกวนคงที่ สำหรับระบบสารเนื้อเดียวกัน การใช้ความสัมพันธ์ความเร็วปลายใบกวนโดยพิจารณาที่ขนาดของใบกวน เมื่อขนาดของใบกวนเปลี่ยนทำให้ความเร็วรอบที่ใช้เปลี่ยนแปลงไปด้วย การกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 15 ลิตร เท่ากัน โดยความเร็วปลายใบกวนมีทิศอยู่ในแกน  $\theta$  ตั้งฉากกับทิศรัศมี  $r$

$$v_1 = v_2$$

โดยที่  $v_1$  คือความเร็วปลายใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $v_2$  คือความเร็วปลายใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร

$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2$$

$\omega_1$  คือ ความเร็วเชิงมุมของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $\omega_2$  คือ ความเร็วเชิงมุมของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร  $R_1$  คือ รัศมีของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $R_2$  คือ รัศมีของใบกวนในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตรจัดรูปสมการใหม่ได้สมการ (11)

$$2\pi N_1 R_1 = 2\pi N_2 R_2$$

$$\pi N_1 D_1 = \pi N_2 D_2$$

$$N_2 = N_1 \frac{D_1}{D_2} \quad (11)$$

การศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ในรูปการใช้อัตราการถ่ายเทมวลสารคงที่ โดยที่  $M_1$  คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $M_2$  คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร

$$M_1 = M_2$$

$$(k_s a)_1 \Delta C_1 = (k_s a)_2 \Delta C_2$$

$(k_s a)_1$  คือ ค่าคงที่การถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $(k_s a)_2$  คือ ค่าคงที่การถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร  $\Delta C_1$  คือ ผลต่างความเข้มข้นของสารระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร  $\Delta C_2$  คือ ผลต่างความเข้มข้นของสารระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร กำหนดให้ผลต่างความเข้มข้นของสารระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 15 ลิตร เท่ากัน

$$\Delta C_1 = \Delta C_2$$

$$(k_s a)_1 = (k_s a)_2$$

ค่าคงที่การถ่ายเทมวลสารสามารถเขียนให้อยู่ในรูปกำลังการปั่นกววนต่อปริมาตร

$$k_s a = 0.0015 \left(\frac{P}{V}\right)^{0.6} V_s^{0.6}$$

กำหนดให้ค่า  $V_{s1}$  ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร  $V_{s2}$  ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตรมีค่าเท่ากัน

$$V_{s1} = V_{s2}$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) กำลังการปั่นกววน

$$P = N_p \rho N^3 D^5$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐานกำหนดให้  $D=H$  สมการคำนวณปริมาตร แทนใส่สมการค่าคงที่การถ่ายเทมวลสาร จัดรูปได้สมการ (12)

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} = \frac{\pi D^3}{4}$$

$$N_1^3 D_1^2 = N_2^3 D_2^2$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

การศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ในรูปการฟุ้งกระจายของของแข็งเท่ากัน จากสมการ Zwietering ความเร็วที่ทำให้ของแข็งเริ่มแขวนลอย

$$N_{js} = \frac{s * v^{0.1} d_p^{0.2} \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_L}\right)^{0.45} X^{0.13}}{D^{0.75}}$$

$d_p$  คือขนาดอนุภาคของของแข็ง  $\rho_L$  คือความหนาแน่นของของเหลว  $\rho$  คือความหนาแน่นของของแข็ง  $S$  คือค่าคงที่ของ Zwietering  $x$  คือ น้ำหนักของแข็งต่อน้ำหนักของเหลว  $v$  สัมประสิทธิ์ของความหนืดและกำหนดให้ขนาดอนุภาคของของแข็งของเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร มีขนาดอนุภาคเท่ากัน

$$d_{p1} = d_{p2}$$

กำหนดให้พารามิเตอร์ของสมการ Zwietering ได้แก่  $\rho_L \rho s x$  มีค่าคงที่จัดรูปสมการจะได้สมการ (13)

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{0.75} \quad (13)$$

การศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ในรูปค่าตัวเลขพหุคูณเท่ากัน อัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงโน้มถ่วงในแต่ละตำแหน่งใดๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดวอร์เท็กซ์ (Vortex) เป็นตัวกำหนดการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร แสดงดังสมการ (14)

$$\begin{aligned} Fr_1 &= Fr_2 \\ \frac{D_1 N_1^2}{g} &= \frac{D_2 N_2^2}{g} \\ N_2 &= N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (14)$$

จากตารางที่ 2. 2 แสดงสรุปค่ากำลังของความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ โดยค่าอัตราส่วนยกกำลังจะยึดตามเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

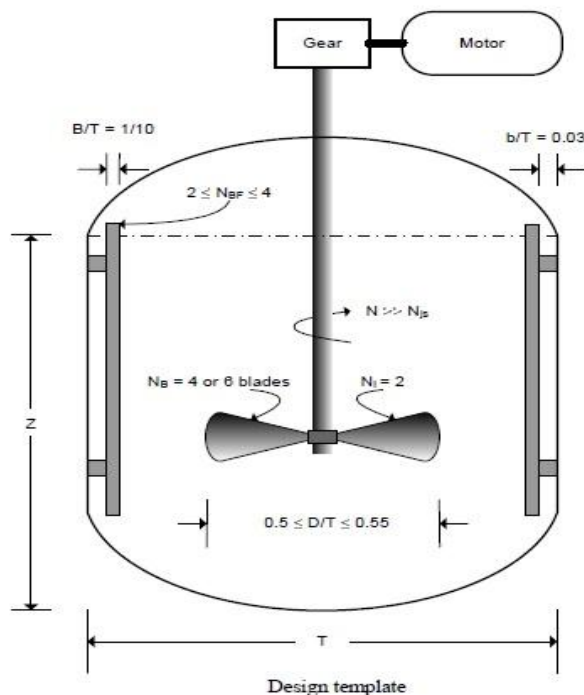
## 2.7 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และใบกวนสำหรับ สภาวะสารแขวนลอย

Jimmy Lea et al (2007) ได้ศึกษาการจำลองการไหลของสารแขวนลอยสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ การศึกษาตัวแปรปัจจัยที่มีผลการผสมในสภาวะสารแขวนลอยโดยใช้เทคโนโลยีการจำลองการไหล โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความกว้างของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (B/T) อัตราส่วนระหว่างช่องว่างของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (b/T) จำนวนบัพเฟิล ( $N_{BF}$ ) ความเร็วรอบของการปั่นกวน (N) จำนวนเบรตของใบกวน ( $N_B$ ) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (D/T) และจำนวนของใบกวน ( $N_i$ ) ประเภทของใบกวนเป็นชนิดแบบพิชเบรต ชนิดแบบ 4 ใบ และ 6 ใบ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสรุปได้ ดังรูปที่ 2. 7 อัตราส่วนระหว่างความกว้างของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (B/T) เป็น 1 ต่อ 10 อัตราส่วนระหว่างช่องว่างของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (b/T) เป็น 3 ต่อ 100 จำนวนบัพเฟิล ( $N_{BF}$ ) ที่ควรมี 2 ถึง 4 อัน ความเร็วรอบของการปั่นกวน (N) ควรมีค่าเกินความเร็วที่ทำให้ของแข็งเริ่มแขวนลอย ( $N_{js}$ ) จำนวนเบรตของใบกวน ( $N_B$ ) มีจำนวนอยู่ที่ 4 ถึง 6 เบรต อัตราส่วน



ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนของบัพเฟิลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (D/T) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.55 จำนวนของใบกวน ( $N_i$ ) เป็น 2 [9]

#### V. SUMMARY OF OPTIMUM OPERATING RANGE



รูปที่ 2. 7 การจำลองขนาดสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ [9]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

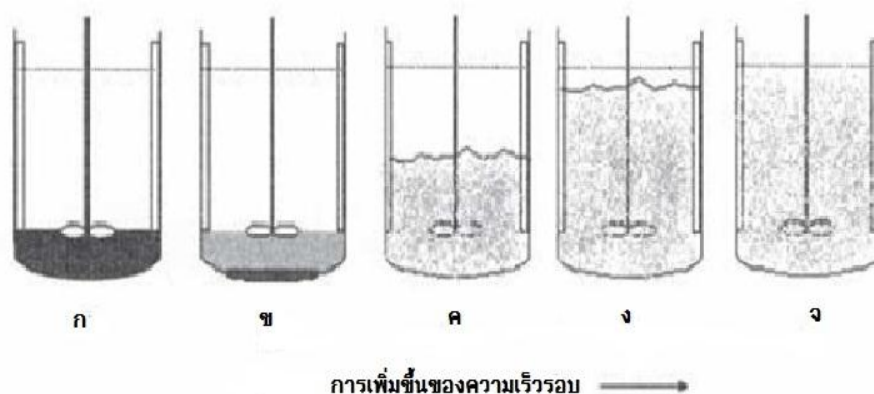
### 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแข็งและของเหลวในสถานะสารแขวนลอย

Wang (2010) [9] Kraume (1992) [10] และ Bujlaski (1999) [11] ได้สรุปให้คำจำกัดความของระดับการแขวนลอยเมื่อเพิ่มความเร็วใบกวนซึ่งสรุปได้ดังนี้ อธิบายตามรูปที่ 2. 8

- ก) เมื่อความเร็วปั่นกวน (stirrer speed) ต่ำ ของแข็งทั้งหมดนอนบนก้นของเครื่องปฏิกรณ์
- ข) การเพิ่มขึ้นความเร็วปั่นกวน ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ไปตามการไหลของของเหลวแบบหมุนวน และของแข็งแขวนลอยบนของเหลวมากขึ้น
- ค) การเพิ่มขึ้นความเร็วปั่นกวนมากขึ้น ของแข็งจะถูกยกตัวจากก้นเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อใส่กำลังมากพอที่ให้ของแข็งจากที่นอนบนก้นถึงเป็นเวลา 1-2 วินาที ของแข็งบนก้นเครื่องปฏิกรณ์

สามารถแขวนลอยได้ทั้งหมดของแข็งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสอดคล้องกับความเร็วปลายใน กวนซึ่งเป็นความเร็วเรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วที่ทำให้ของแข็งทั้งหมดเริ่มแขวนลอย (Just- suspended speed,  $N_{js}$ ) ที่สภาวะนี้ การแบ่งชั้นการไหลเป็น 2 ชั้น ชั้นที่มีของแข็ง และของเหลวแขวนลอยที่อยู่โซนด้านล่าง และชั้นที่มีของเหลวใสที่อยู่โซนด้านบน

- ง) การเพิ่มความเร็วปั่นกวนมากขึ้นจนความเร็วมีค่ามากกว่าความเร็วที่ทำให้ของแข็งทั้งหมด เริ่มแขวนลอย ชั้นที่มีของแข็งและของเหลวแขวนลอยที่อยู่โซนด้านล่างจะมีระดับสูงขึ้น
- จ) แสดงการแขวนลอยในระบบของแข็งและของเหลว การแขวนลอยจะเต็มโซนทั้งหมดเครื่อง ปฏิกรณ์

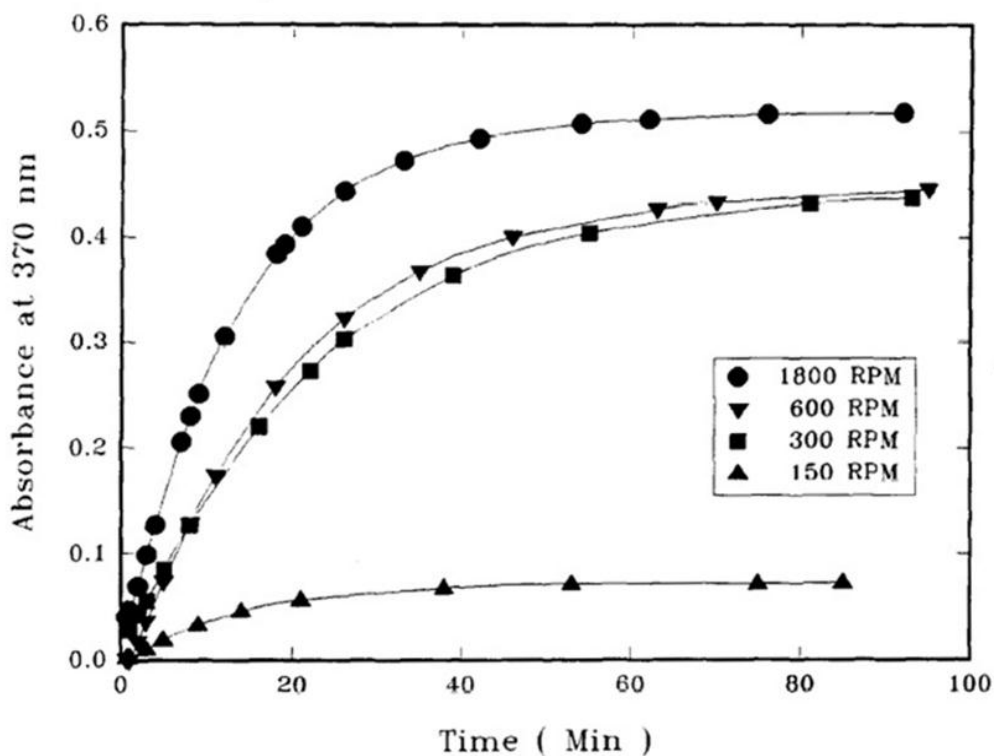


รูปที่ 2. 8 สภาวะการแขวนลอยของของแข็งที่ระดับต่างๆโดยการเพิ่มความเร็วปั่นกวน Kraume (1992)

## 2.9 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์และผลกระทบจาก ปัจจัยการขยายขนาด

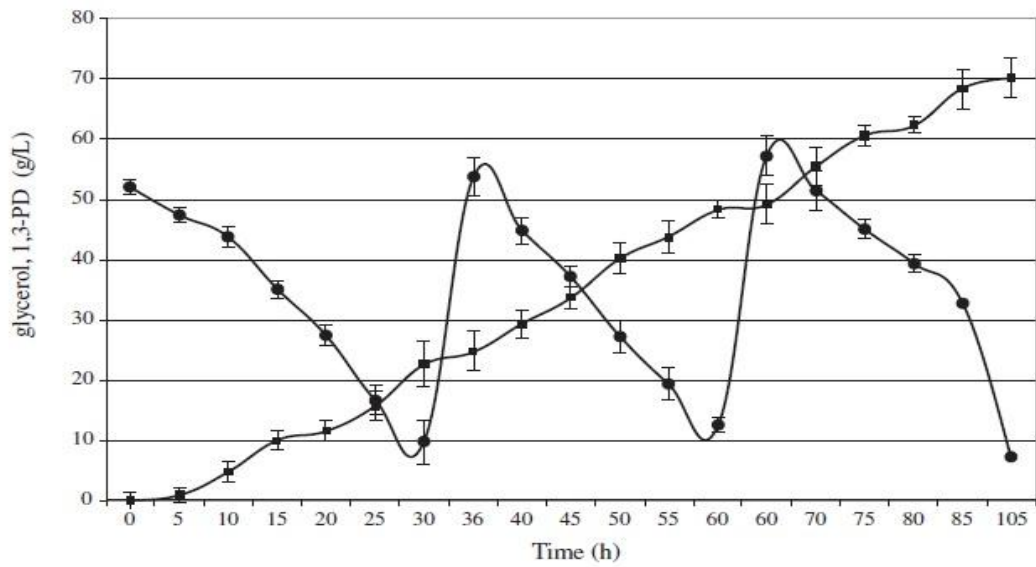
Shen Y. (1998) ได้ศึกษาการสังเคราะห์พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ซึ่งเป็นระบบของแข็งแขวนลอยในของเหลว ปฏิกริยาเกิดขึ้นบนผิวของอลูมิเนียม พบว่าระบบที่เป็นของแข็งแขวนลอยในของเหลว การกวนผสมมีผลต่ออัตราการเกิดพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 2. 9 โดยที่ความเข้มข้นของพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์จะถูกวัดอยู่ในรูปค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร การเพิ่มความเร็วรอบทำให้การกวนผสมของของแข็งแขวนลอยในของเหลวอัตราการเกิดพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์สูงขึ้นเป็นผลมาจากการถ่ายเทมวลระหว่างของแข็งและของเหลว ที่ความเร็วรอบระหว่าง 150

ถึง 300 การถ่ายเทมวลระหว่างของแข็งและของเหลวเริ่มมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ การใช้ความเร็วรอบสูงจะช่วยให้อัตราการเกิดพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์เร็วขึ้น [8]



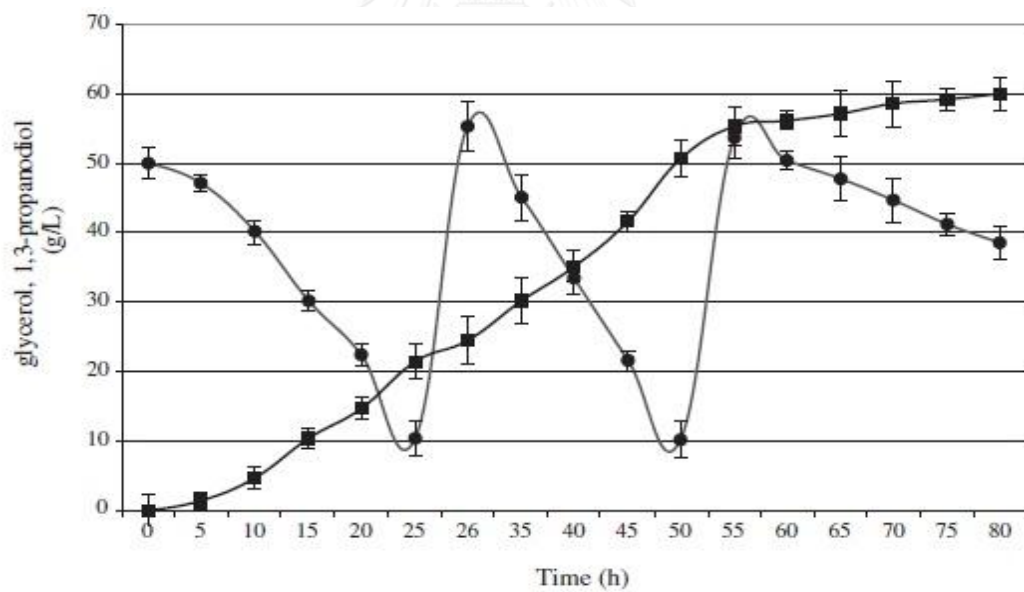
รูปที่ 2. 9 แสดงผลกระทบการกวนผสมสำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ [8]

Szymanowska D. (2014) ได้ศึกษาผลกระทบการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิต 1,3 โพรพานีไดออลในระบบแอนาโรบิกจากกลีเซอรอล เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษามีขนาด 6.6 ลิตร 42 ลิตร และ 150 ลิตร ตัวแปรในการขยายขนาดโดยกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนคงที่ (Impeller tip speed constant) พบว่าอัตราการเกิด 1,3 โพรพานีไดออลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 6.6 ลิตร และขนาดขนาด 150 ลิตร มีอัตราการเกิดไม่เท่ากัน โดยการเกิด 1,3 โพรพานีไดออลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 6.6 ลิตร มีค่าการผันแปรสูงกว่า เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 150 ลิตร ดังรูปที่ 2. 10 และ รูปที่ 2. 11 [27] การกวนผสมของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 150 ลิตรมีความสมบูรณ์น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 6.6 ลิตร



รูปที่ 2.10 แสดงอัตราการเกิด 1,3 โพรพานไดออลในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 6.6 ลิตร

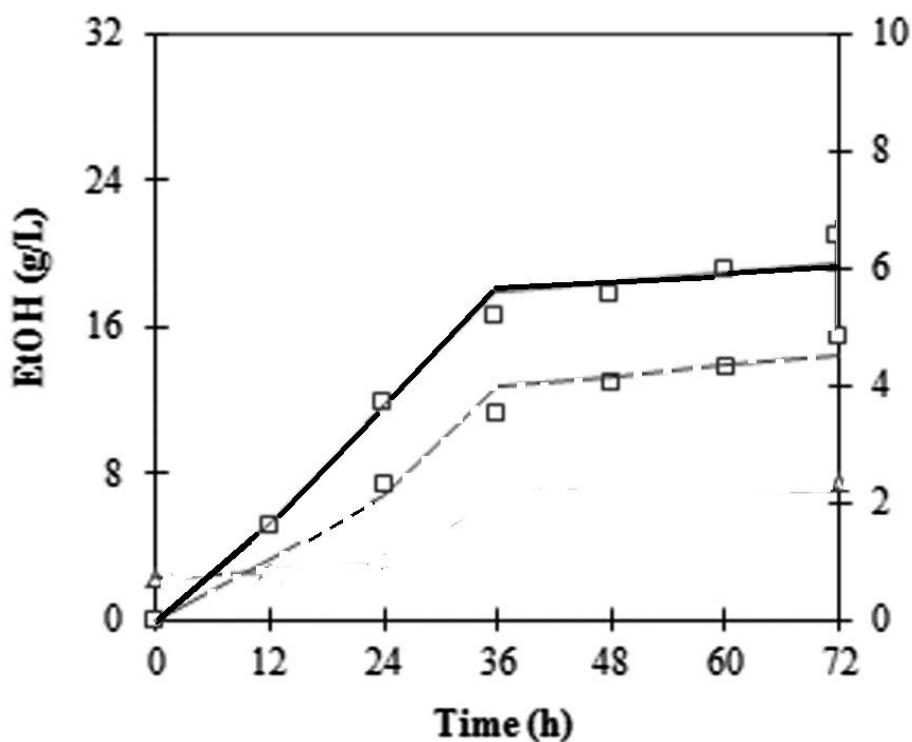
; ● กลีเซอรอล ■ 1,3 โพรเพนไดออล



รูปที่ 2.11 แสดงอัตราการเกิด 1,3 โพรพานไดออลในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 150 ลิตร [27]

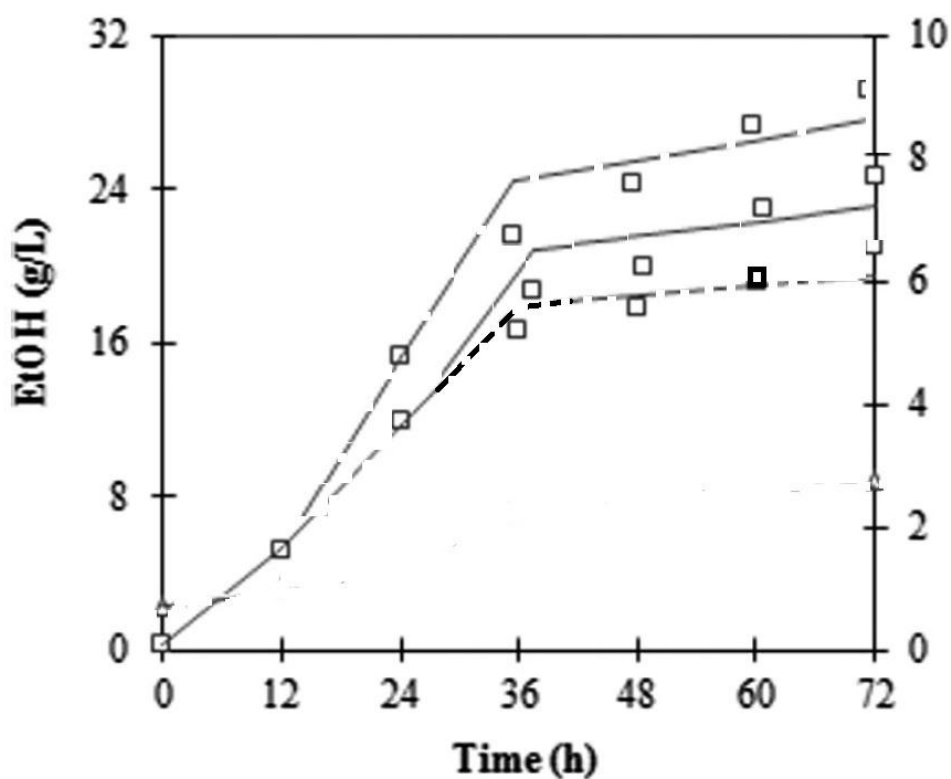
; ● กลีเซอรอล ■ 1,3 โพรเพนไดออล

Imamoglu E. (2013) ได้ศึกษาผลกระทบการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอเอทานอลเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษามีขนาด 100 มิลลิลิตร 2 ลิตร 5 ลิตร และ 10 ลิตร ตัวแปรในการขยายขนาดโดยกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนคงที่ (Impeller tip speed constant) และ ค่าเรย์โนลด์คงที่ พบว่าอัตราการผลิตไบโอเอทานอลของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร และ 2 L โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์คงที่ อัตราการผลิตไบโอเอทานอล มีอัตราที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2. 12 จากนั้นได้กำหนดความเร็วปลายใบกวนคงที่ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร 5 ลิตร และ 10 ลิตร อัตราการผลิตไบโอเอทานอล ทำให้มีอัตราการผลิตไบโอเอทานอลที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 2. 13 [13]



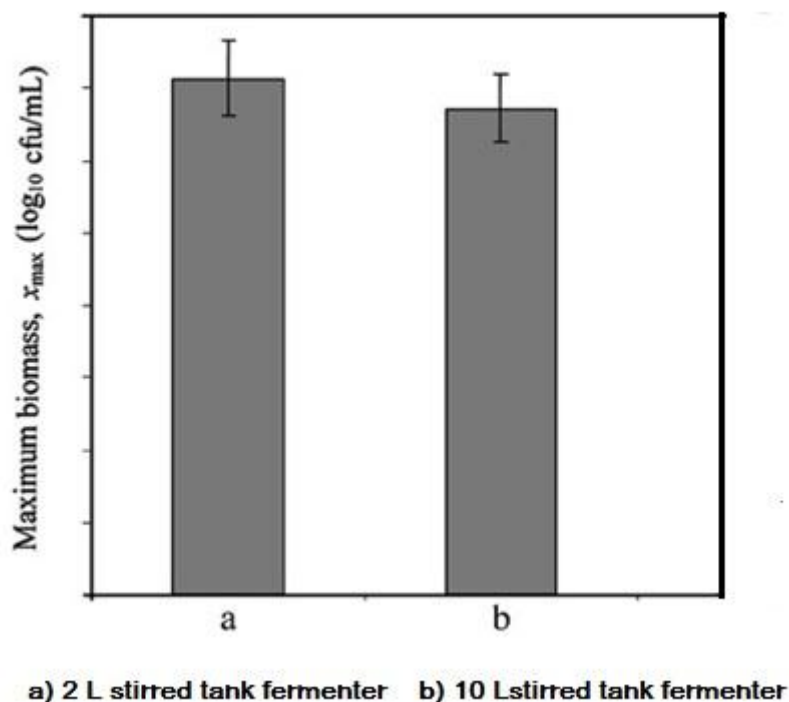
รูปที่ 2. 12 แสดงอัตราการผลิตไบโอเอทานอลของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร และ 2 ลิตร

; - - - 100 มิลลิลิตร — 2 ลิตร [13]



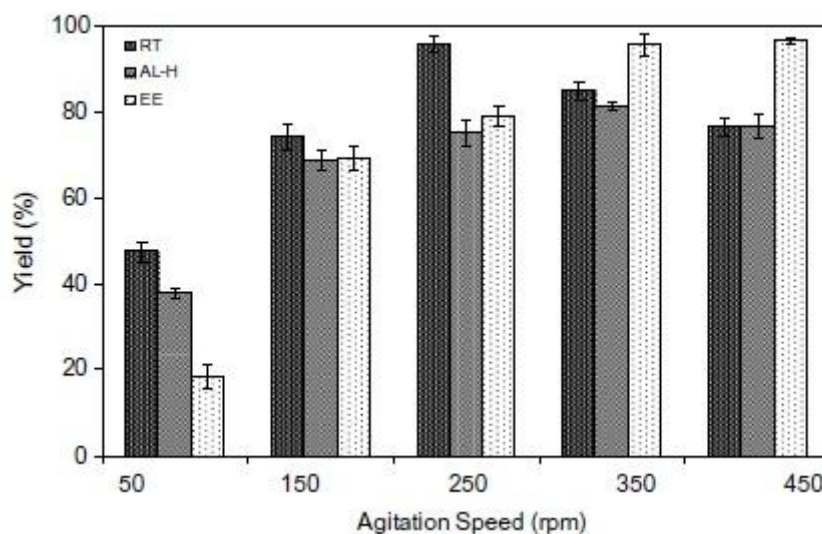
รูปที่ 2. 13 แสดงอัตราการผลิตไบโอเอทานอลของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร 5 ลิตร และ 10 ลิตร [13] ; - - - 2 ลิตร — 5 ลิตร - · - 10 ลิตร

Stephenie W. (2007) ได้ศึกษาผลกระทบจากการกวนผสมของการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตชีวมวลเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษามีขนาด 2 ลิตร และ 10 ลิตร โดยในการศึกษาได้หาความเร็วปลายใบกวน (Impeller tip speed constant) ที่เหมาะสมและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร พบว่าความเร็วปลายใบกวนที่ 0.56 เมตรต่อวินาที ได้ร้อยละผลได้ของชีวมวลมากที่สุด จากนั้นทำการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์โดยให้ตัวแปรในการขยายขนาดโดยกำหนดให้ความเร็วปลายใบกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 10 ลิตร คงที่ พบว่า การเกิดชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 10 ลิตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงดังรูปที่ 2. 14 [7]



รูปที่ 2. 14 แสดงการเกิดของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 10 ลิตร [7]

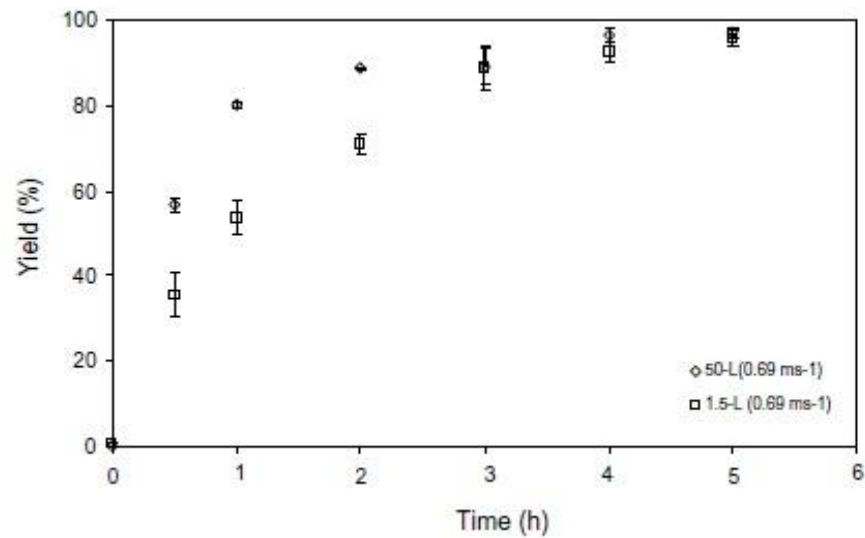
Keng P.S. (2007) ได้ศึกษาการขยายขนาดกระบวนการสังเคราะห์พาล์มเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไลเปสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ โดยนำสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร มาใช้ในส่วนการขยายขนาด โดยศึกษาปัจจัยความเร็วรอบการปั่นกววนและชนิดใบกววน กับ ร้อยละผลได้พาล์มเอสเทอร์ โดยใช้ใบกววน 3 ชนิด ได้แก่ ใบกววนแบบรัชตัน (Rushton turbine:RT) ใบกววนแบบเอ แอล ไฮโดรฟอยล์ (AL-hydrofoil:AL-H) และใบกววนแบบหูช้างชนิด 2 เบริด (2 bladed elephant ear:EE) ปริมาตร 1.5 ลิตร พบว่าความเร็วรอบการปั่นกววนมีผลต่อร้อยละผลได้ดังรูปที่ 2. 15 พบว่า การใช้ใบกววนแบบรัชตัน ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของพาล์มเอสเทอร์มากที่สุด จึงนำความเร็วรอบนี้มาใช้ในการขยายขนาด โดยที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบต่อนาที คำนวณหาความเร็วปลายใบกววน 0.069 เมตรต่อวินาที และใช้ค่าความเร็วปลายใบกววนทำการขยายขนาดในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ 75 ลิตร โดยกำหนดให้ความเร็วปลายใบกววนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 75 ลิตร มีค่าคงที่ และศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพาล์มเอสเทอร์ [12]



รูปที่ 2. 15 กราฟแสดงปัจจัยการเปลี่ยนความเร็วรอบการปั่นกวนและชนิดใบกวนกับร้อยละผลได้ปาล์ม เวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง [12]

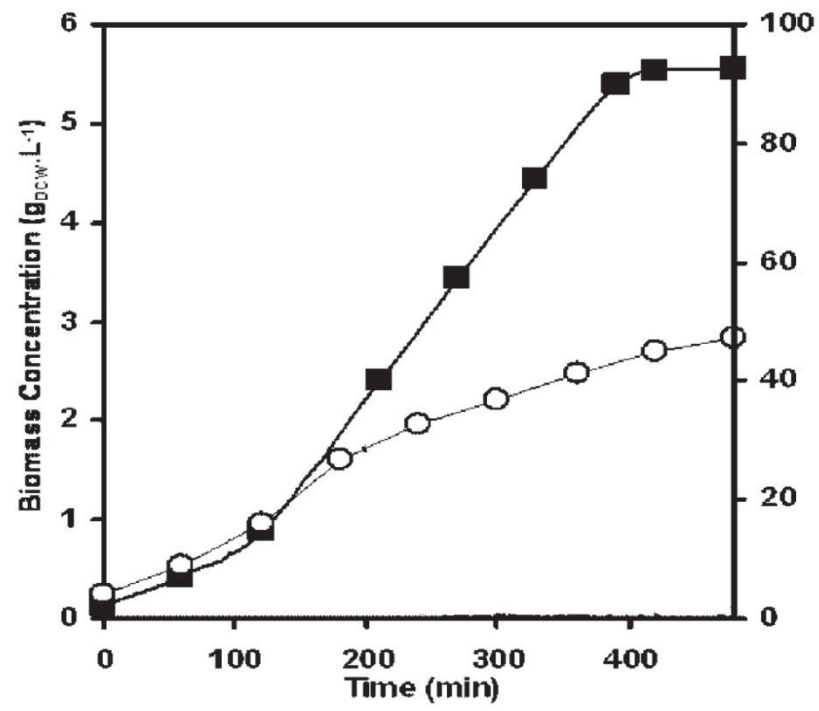
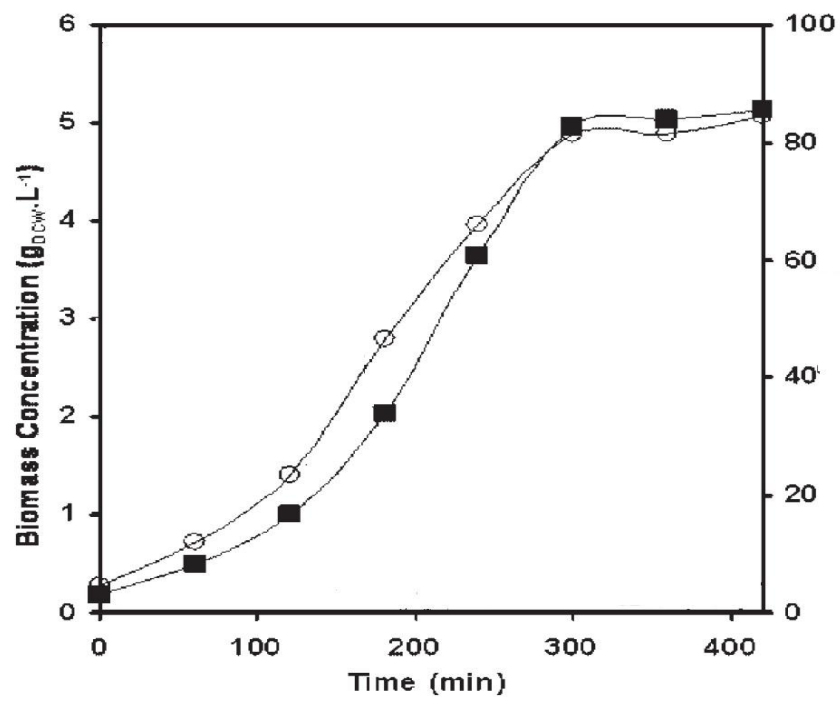
จากการศึกษาปัจจัยของเวลาทำปฏิกิริยา กับ ร้อยละผลได้ที่ขนาดการกระบวนกรสังเคราะห์ปาล์มเอสเทอร์ 1.5 ลิตร และ 50 ลิตร พบว่าเวลาทำปฏิกิริยาส่งผลกับ ร้อยละผลได้ปาล์มเอสเทอร์ โดยความเร็วปลายใบกวนคงที่ (Impeller tip speed constant) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ร้อยละผลได้ของปาล์มเอสเทอร์ของการสังเคราะห์ที่ 50 ลิตร มีร้อยละผลได้ปาล์มเอสเทอร์มากที่สุด คือ 88.8 ดังรูปที่ 2. 16 แสดงความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปาล์มเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1.5 ลิตร และ 50 ลิตร การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์โดยการกำหนดให้ความเร็วปลายปั่นกวนคงที่ ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปาล์มเอสเทอร์แตกต่างกัน สรุปได้ว่าการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 75 ลิตร มีร้อยละผลได้ปาล์มเอสเทอร์ใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ 1.5 ลิตร

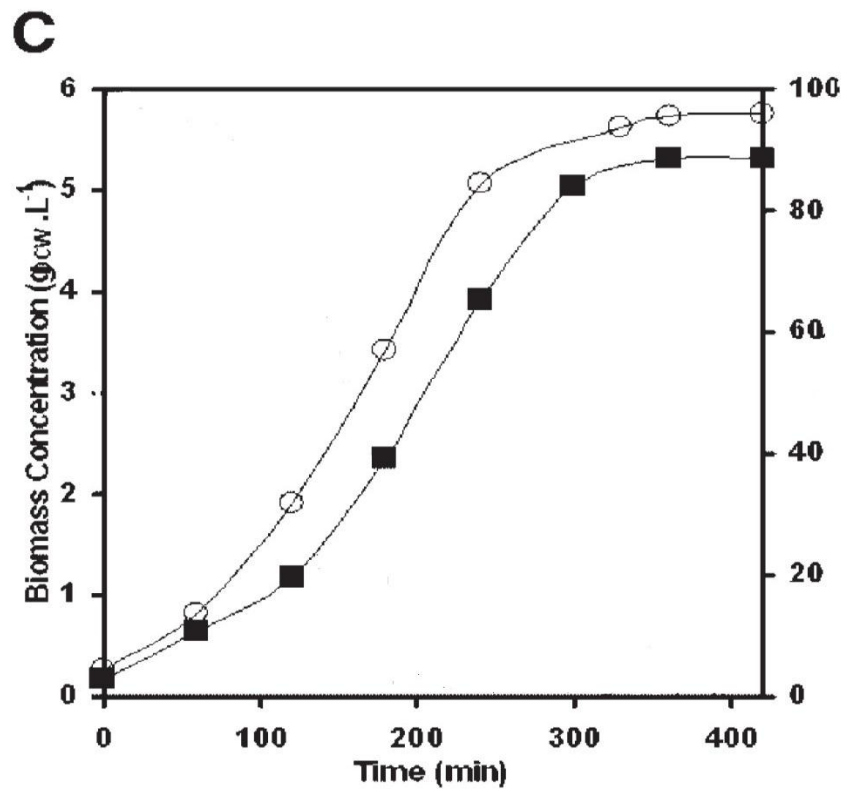




รูปที่ 2. 16 กราฟแสดงปัจจัยเวลาทำปฏิกิริยากับร้อยละผลได้ปาล์มเอสเทอร์ [12]

Gill N.K. (2008) ได้ศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการหมักเพื่อผลิตชีวมวล ผลกระทบกับการกวนผสมในเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษามีขนาด 0.1 ลิตรและ 2 ลิตร ตัวแปรในการขยายขนาดโดยกำหนดให้อัตราส่วนกำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.1 ลิตรและ 2 ลิตร คงที่ ( $P/V$  constant) และศึกษาผลของอัตราส่วนกำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรที่ค่า 657 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 2. 17 A) 1,487 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 2. 17 B) และ 2,960 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 2. 17 C) พบว่าอัตราส่วนกำลังการปั่นกวนต่อปริมาตรที่ 1,487 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร มีความเหมาะสมทำให้อัตราการผลิตของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 2. 17 [28]

**A****B**



รูปที่ 2. 17 แสดงผลกระทบบการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 0.1 ลิตร และ 2 ลิตร

; ■ 0.1 ลิตร ○ 2 ลิตร [28]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

##### 3.1.1 เบต้า-ไซโคเด็กซ์ตริน ( $\beta$ -cyclodextrin)

ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ เบต้า-ไซโคเด็กซ์ตรินเกรดสำหรับยา (Pharma Grade) บริษัท แวกเกอร์ เคมีคอลส์ จำกัดเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ซึ่งจัดอยู่กลุ่มของไซโคเด็กซ์ตริน (แอลฟา เบต้า และแกมมา ไซโคลเด็กซ์ตริน) ลักษณะทางกายภาพ เป็นของแข็งผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่น 400-700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการละลายน้ำ 18.5 กรัมต่อลิตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 5-8 โครงสร้างทางโมเลกุล มีโมเลกุลกลูโคไพราโนสเชื่อมต่อกันเป็นโพรงช่องว่างจำนวน 7 โมเลกุล

##### 3.1.2 พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ (p- Toluenesulfonyl chloride)

ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ เกรด สำหรับห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ บริษัท ACROSOrganic จำกัด ประเทศเบลเยียม เป็นสารตั้งต้นสำหรับการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ลักษณะทางกายภาพ เป็นผลึกของแข็งสีขาว มีกลิ่นและไม่ละลายน้ำ มีฤทธิ์กัดกร่อน โครงสร้างทางโมเลกุลประกอบด้วย วงอะโรมาติกต่อกับหมู่เมทิลและหมู่คลอโรซัลฟูเนต เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฮาโลเจน มีคุณสมบัติเป็นหมู่กูดลีฟวิ่งกรุ๊ป

3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ บริษัท คาโร เออบร้า จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกาเกรด สำหรับห้องปฏิบัติการ

3.1.4 ไดมethylsulfoxide-d<sub>6</sub>-ดีซิก DMSO-d<sub>6</sub> บริษัท แคมบริด ไอโซโทป แลบบอราทอรี อิง ประเทศสหรัฐอเมริกา เกรด สำหรับวิเคราะห์

3.1.5 กรดไฮโดรคลอริก HCl ความเข้มข้น 37 ร้อยละโดยปริมาตร บริษัท คาโร เออบร้า จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

## 3.2 อุปกรณ์

### 3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร



รูปที่ 3. 1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร

### 3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 3. 2 เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

### 3.2.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

#### รายละเอียดเครื่อง

ขนาด 15 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 23 เซนติเมตร ความสูง 37 เซนติเมตร ใบกวน พิชเบลตชนิด 4 เบลตเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน 160 มิลลิเมตร ตัวถังทำจาก สแตนเลส เกรด 316 ตัวถังเป็นแบบผนัง 3 ชั้น มีโฟมกันบุการสูญเสียความร้อนภายใน สามารถควบคุมความเร็วรอบในการปั่นกวนในช่วง 100- 500 รอบต่อนาที หรือกว้างกว่าในช่วงที่ต้องการ สามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วง 1- 5 องศาเซลเซียส หรือกว้างกว่าในช่วงที่ต้องการ โดยใช้ระบบสารหล่อเย็น(Chiller)

#### 3.2.3 ชุดเครื่องระบบสารหล่อเย็น Chiller



รูปที่ 3. 4 ชุดเครื่องระบบสารหล่อเย็น Chiller

#### รายละเอียดเครื่อง

เครื่องสร้างระบบสารหล่อเย็น

การใช้งาน ป้อนสารหล่อเย็นให้กับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับดึงความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์ สารหล่อเย็นเป็นน้ำมันสามารถทำอุณหภูมิให้กับเครื่องปฏิกรณ์ได้ในช่วงอุณหภูมิ -5 ถึง 20 องศาเซลเซียส

### 3.2.4 ปัมสุญญากาศความดัน Vacuum-Pumpsystem รุ่น Vacuubrand PC 510



รูปที่ 3. 5 ปัมสุญญากาศความดัน Vacuum-Pumpsystem

#### รายละเอียดของเครื่อง

รุ่น Vacuubrand PC 510

การใช้งาน ปัมลดความดันสำหรับการกรองภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยใช้กรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

3.2.5 เครื่องปั่นกวนชนิดปั่นด้านบน (Overhead stirred) บริษัท ไอก้า จำกัด รุ่น ยูโรสตาร์ ดิติตอล ประเทศ เยอรมัน





รูปที่ 3. 6 เครื่องปั่นกวนชนิดปั่นด้านบน

รายละเอียดของเครื่อง

การใช้งาน เครื่องปั่นกวนสามารถทำความเร็วในช่วง 50 ถึง 1,200 รอบต่อนาที ปั่นกวนด้วยใบกวนสำหรับ เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

3.2.6 ใบกวนชนิดพิซ เบลด จำนวน 4 เบลด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร



รูปที่ 3. 7 ใบกวนชนิดพิซ เบลด จำนวน 4 เบลด สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

3.2.7 ใบกวนชนิดพิซ เบลด จำนวน 4 เบลด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร



รูปที่ 3. 8 ใบกวนชนิดพิซ เบลด จำนวน 4 เบลด สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร

3.2.8 เครื่องปั่นกวนสาร Magnetic stirrer regulator hotplate รุ่น Heidolph MR 3001 บริษัท ไอทีเอส (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.9 เครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวน (Circulate chiller) รุ่น Julabo F33 บริษัท ไอแลบ ฟูลอิต คอนโทรล จำกัด ประเทศ เยอรมัน



รูปที่ 3. 9 เครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวน

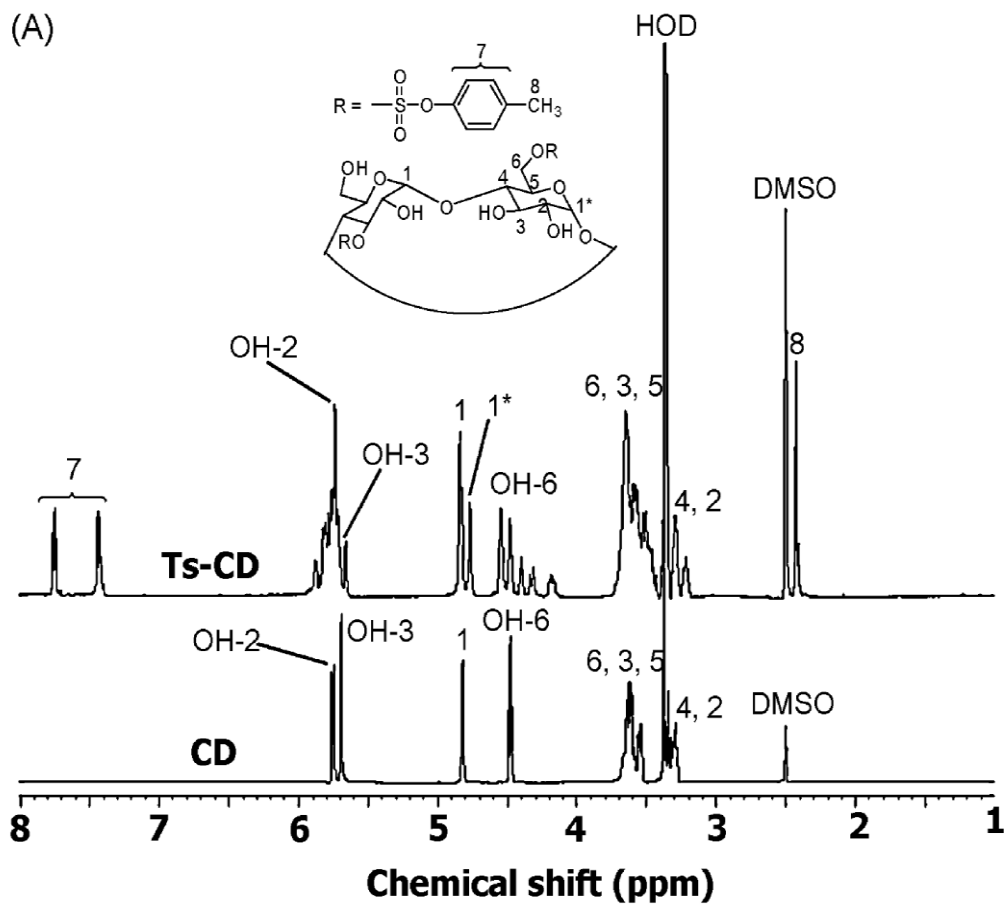
3.2.10 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 2 และ 4 ตำแหน่ง บริษัท Mettler-Toledo (ประเทศไทย) Ltd

3.2.11 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี (NMR) รุ่น ADVANCE AV 500 MHz บริษัท Bruker ประเทศสวีเดน

การใช้เทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุ ซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วงที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง “สปิน” ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสแต่ละชนิด เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก นิวเคลียสจะต้องมีค่า “สปิน” ไม่เป็นศูนย์ เช่น  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{19}\text{F}$  เป็นต้น  $^1\text{H}$  เป็นนิวเคลียสที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นธาตุที่พบมากในสารประกอบอินทรีย์ทั่วไป พื้นที่ใต้กราฟจะแสดงถึงจำนวนโปรตอนที่วัดได้



รูปที่ 3. 10 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี



รูปที่ 3. 11 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปีของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินและและเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน [1]

Ar คือ อินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ ที่ตำแหน่ง 7.4 ถึง 7.8 ppm  
แสดงจำนวนของโปรตอนของโมเลกุลของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์  
1 โมเลกุล พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์มี 4 โปรตอน

การคำนวณโมลของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

$$\frac{\text{โปรตอนที่วัดได้}}{\text{โปรตอนที่มีทั้งหมดใน 1 โมล TsCl}} = \frac{\text{Ar}}{4}$$

H<sub>1</sub>-H<sub>6</sub> คือ อินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ ที่ตำแหน่ง 3.2 ถึง 5.9 ppm  
 จำนวนโปรตอนของโมเลกุลกลูโคไพราโนส 1 โมเลกุล  
 1 โมเลกุลกลูโคไพราโนสมี 7 โปรตอน  
 1 โมเลกุลของเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินมี 7 โมเลกุลกลูโคไพราโนส

#### การคำนวณโมลของเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน

$$\frac{\text{โปรตอนที่วัดได้}}{\text{โปรตอนที่มีทั้งหมดใน 1 โมล } \beta\text{CD}} = \frac{H1 - H6}{7 \times 7}$$

การวิเคราะห์การแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลสมการที่ (14)

$$\text{Degree of tolylation (DT)} = \frac{\text{โมลของ TsCl}}{\text{โมลของ } \beta\text{CD}}$$

$$DT = \frac{\left(\frac{Ar}{4}\right)}{\left\{\left(\frac{H1 - H6}{7 \times 7}\right)\right\}} \quad (14)$$

จากโครงสร้างของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลประกอบด้วยโปรตอนในวงอะโรมาติกมีทั้งหมด 4 อะตอม การวิเคราะห์จาก NMR ทำให้ทราบจำนวนของโปรตอนในวงอะโรมาติกที่ Chemical shift 7.4-7.8 คือ Ar เมื่อนำมาคำนวณ โดยคิดเป็น 1 โมลของพาราโทลูอินซิลโฟนิล เป็น ค่า Ar/4

จากโครงสร้างของโมเลกุลกลูโคไพราโนสใน 1 โมเลกุล ประกอบด้วยโปรตอนบนอะตอมของคาร์บอน 7 อะตอม การวิเคราะห์จาก NMR ทำให้ทราบปริมาณของโปรตอนของโมเลกุลกลูโคไพราโนส ที่ Chemical shift 3.2-3.8 และเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินมีโมเลกุลกลูโคไพราโนส 7 โมเลกุล เมื่อนำมาคำนวณ โดยคิดเป็น 1 โมเลกุลของเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน ที่ Chemical shift 3.2-5.9 เป็นค่า H1-H6 โดย 1 โมลของเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน เป็น ((H1-H6)/7×7) โดยค่า DT เป็นค่าเฉลี่ยการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเดกซ์ทริน

ความหมายค่าการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล (DT)

ค่า DT เท่ากับ 0 แสดงว่า เบต้าไรโซโคลเด็กซ์ตรินไม่ทำปฏิกิริยากับพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์

ค่า DT เท่ากับ 1 แสดงว่าในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะมี พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ 1 โมเลกุลและเบต้าไรโซโคลเด็กซ์ตริน 1 โมเลกุล ผลิตภัณฑ์เข้าสู่การเป็น โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตริน

ค่า DT อยู่ในช่วง 0-1 แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีการผสมระหว่างเบต้าไรโซโคลเด็กซ์ตรินกับ โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตริน

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตริน

การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร 2 ลิตร และ 15 ลิตร มีขั้นตอนการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตรินมี 4 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.12 แสดงผังขั้นตอนการทดลองการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไรโซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ 3. 12 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน



**ตารางที่ 3- 1** แสดงปริมาณการเตรียมเบต้าไซโคเด็กซ์ตรินและสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ของ เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร 2 ลิตรและ 15 ลิตร

ชนิดสารเคมี	เครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 0.5 ลิตร	เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร	เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร
สารละลายไซเดียม ไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	250	1,500	7,500
เบต้าไซโคเด็กซ์ตริน (กรัม)	20	120	600
พาราโทลูอินซิลโฟนิล คลอไรด์ (กรัม)	3.36	20.16	100.8

### 3.3.1.1 การเตรียมการละลายเบต้าไซโคเด็กซ์ตรินในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์

ละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ จากนั้นเติมเบต้าไซโคเด็กซ์ตริน ลงในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนพร้อมกับตัวปั่นกวนชนิดแม่เหล็กประมาณ 10 นาที จนเบต้าไซโคเด็กซ์ตรินละลายในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แต่ละขนาดการเตรียมการละลายเบต้าไซโคเด็กซ์ตรินในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยแสดงดังตารางที่ 3- 1

### 3.3.1.2 การทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคเด็กซ์ตริน

เติมสารละลายเบต้าไซโคเด็กซ์ตรินลงในเครื่องปฏิกรณ์ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการทำปฏิกิริยา จากนั้นเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์โดยใช้ปริมาณสารแสดงดังตารางที่ 3 จากนั้นปั่นกวน จับเวลาการทำปฏิกิริยา เมื่อเวลาครบกำหนด นำสารละลายทั้งหมดทำการกรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ด้วยฟิวเตอร์ฟูลเนล เบอร์ 4 ขนาดรุกรอง 10-16 ไมโครเมตรดังรูปที่ 3. 13 โดยใช้ปั๊มสุญญากาศความดันในการกรอง



รูปที่ 3. 13 ฟิวเตอร์ฟูลเนล เบอร์ 4 ขนาดรุกรอง 10-16 ไมโครเมตร

### 3.3.1.3 การตกตะกอนโดยทำให้เป็นสภาวะกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก

นำของเหลวที่ได้จากการกรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ มาปรับความเป็นกรดเบสด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อปรับให้เป็นกลาง ตะกอนที่ได้เป็นพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ในการเติมกรดไฮโดรคลอริกควรเติมอย่างช้าๆเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาสะเทินระหว่างกรดกับเบส

### 3.3.1.4 การกรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินและการอบแห้ง

พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจะถูกกรองแยกออกจากของเหลวผ่านบุนเนอร์และล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างกรดที่ยังเหลืออยู่จากขั้นตอนการตกตะกอนด้วยกรด จากนั้นกรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจนแห้งสนิท นำพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินไปเข้าตู้อบ โดยอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.3.1.5 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลในเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน

เมื่อพาราโทลูอินซัลโฟนิลในเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่ผ่านจากการอบแห้ง นำมาบดให้ละเอียด จากนั้นชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณเป็นจำนวนโมลพาราโทลูอินซัลโฟนิลในเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ดังสมการ (15)

$$\text{ร้อยละผลได้ของ TsCD} = \frac{\text{จำนวนโมลของ TsCD} \times \text{DT}}{\text{จำนวนโมลของ } \beta\text{CD}} \times 100 \quad (15)$$

### 3.3.1.6 การวิเคราะห์การแทนที่ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลในเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน

ขั้นตอนการวิเคราะห์การแทนที่ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลในเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน

- ชั่งพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ปริมาณ 5 มิลลิกรัม ละลายด้วยไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO-d<sub>6</sub>) 0.5 มิลลิลิตร
- บรรจุสารละลาย ลงในหลอด NMR นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปีคำนวณเปอร์เซ็นต์การแทนที่ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน วิเคราะห์การแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลอาศัยสมการที่ (14)

### 3.3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคล เต็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปัจจัยของอุณหภูมิ ปัจจัยของอัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเต็กซ์ตรินกับไซเดียมไฮดรอกไซด์ ปัจจัยของการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 3- 2

**ตารางที่ 3- 2** แสดงตัวแปรที่ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอิน  
ตัวแปร

ปริมาตรสารตั้งต้น (Working volume)	250 มิลลิลิตร
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	5 10 15 25 30 40
อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเต็กซ์ ตรินกับไซเดียมไฮดรอกไซด์	1:1 1:3 1:5 1:10 1:15
การเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์	เติม 1 ครั้ง และ เติม 2 ครั้ง

### 3.3.2 การศึกษาตัวแปรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

การศึกษาตัวแปรในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ได้แก่ ความเร็วรอบ และ ตำแหน่งของใบ  
กวน โดยการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร มี  
ขั้นตอนเหมือนกับสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร  
โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อที่ 3.3.1 และตัวแปรที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 3- 3

### ตารางที่ 3- 3 แสดงตัวแปรที่ศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

ตัวแปร

ปริมาตรสารตั้งต้น (Working volume)	1,500 มิลลิลิตร
ความเร็วรอบการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	200 300 500 700 1,000 1,200

การเปลี่ยนตำแหน่งของใบกวน ระยะระหว่างใบ 1/3 1/4 1/6  
 กวนกับก้นถังเครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง  
 ใบกวน (C/T)

#### 3.3.3 การศึกษาตัวแปรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

การศึกษาตัวแปรการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร โดยจะนำความเร็วรอบที่และตำแหน่งของใบกวนที่เหมาะสมจากการศึกษาในข้อ 3.3.2 มาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตรโดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ ความเร็วปลายใบกวน กำลังการปั่นกวนต่อปริมาตร การกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง ศักยภาพร้อยละได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเต็กซ์ตรินต่อเวลา การศึกษาตัวแปรการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อที่ 3.3.1 โดยมีขั้นตอนเช่นเหมือนกับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเต็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร และ 2 ลิตร

**ตารางที่ 3- 4** แสดงตัวแปรที่ศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

ตัวแปร

---

ปริมาตรสารตั้งต้น (Working volume)	7,500 มิลลิลิตร
ความเร็วรอบการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	50 160 220 230 280

---



## บทที่ 4

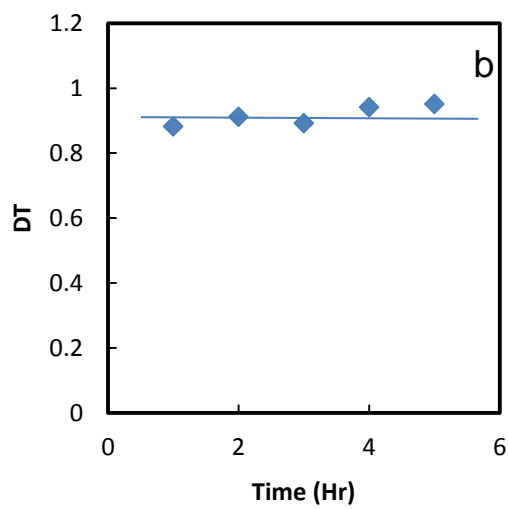
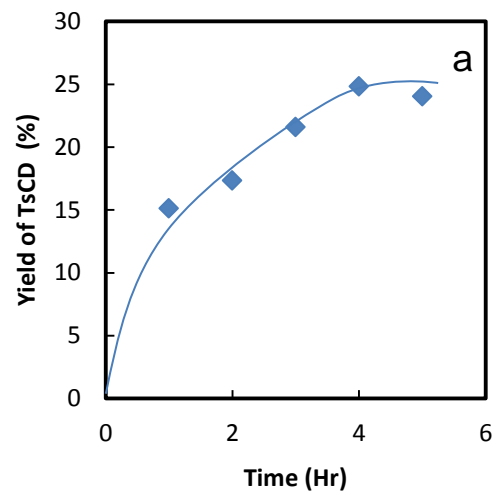
### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินโดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และจำนวนการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล โดยทำการทดลองที่เครื่องปฏิบัติการระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 0.5 ลิตร

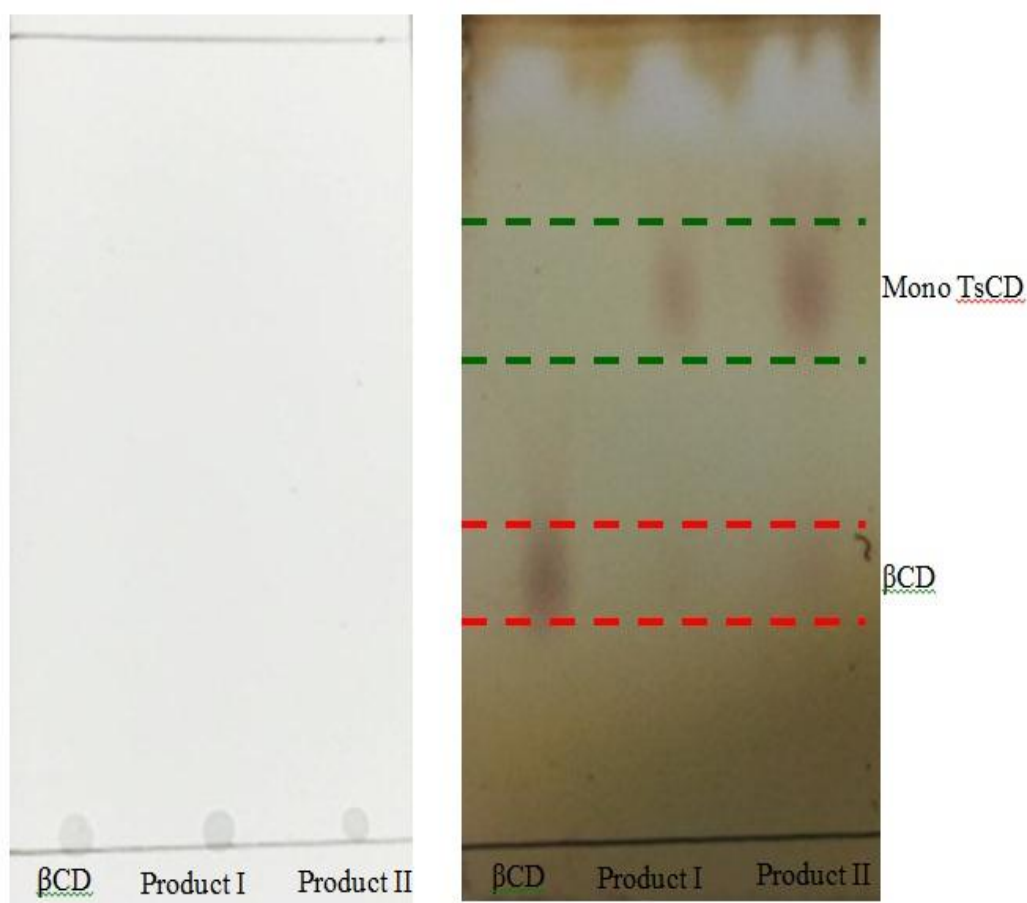
##### 4.1.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

ร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน (TsCD) ต่อเวลา และค่าการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลในผลิตภัณฑ์ แสดงในรูปที่ 4. 1a และ รูปที่ 4. 1b ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าร้อยละผลได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และมีอัตราเพิ่มขึ้นที่ลดลงตามเวลา โดยที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มีค่าประมาณร้อยละ 25 ที่เวลาผ่านไป 3-5 ชั่วโมง จะพบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้น พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ละลายและเกิดปฏิกิริยากับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดเป็น โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน แสดงดังสมการ (2) เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ละลายได้มากขึ้นและทำปฏิกิริยาต่อเนืองกับ โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน เป็น ได และ ไตร พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน แสดงดังสมการ (3) และ (4) ซึ่งไดและไตรพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจะไม่ตกตะกอนลงมา[beilstein J.2014] ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ด้วย thin layer chromatography (TLC) แสดงดังรูปที่ 4. 2 จะพบว่าผลิตภัณฑ์พบการกระจายตัวของเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและโมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน แต่จะไม่พบ ไดและไตรพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ 4. 1 ผลร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินต่อเวลา (a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลต่อเวลา (b) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4. 2 แสดงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยการวิเคราะห์ TLC

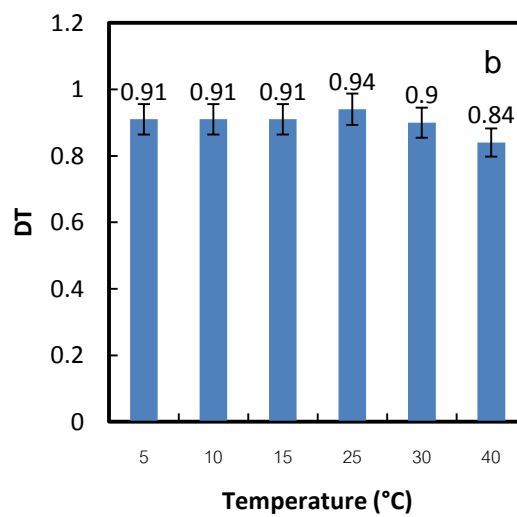
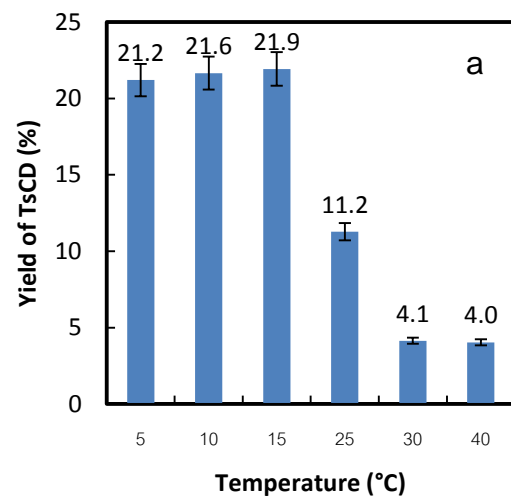
การเกิดปฏิกิริยาจะพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จะไม่ถึง 100 เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นไม่ตกตะกอนลงมาเมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มการเกิดเป็น โมโนพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นหลัก จากงานวิจัยในการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินในบทที่ 2 ไม่กล่าวถึงข้อมูลใดและไตรพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินในผลิตภัณฑ์ของแข็ง โดยผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการตกตะกอนด้วยกรดทั้งหมด ถือว่าเป็นโมโนพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

ผลของร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินต่ออุณหภูมิ และการแทนที่ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลต่ออุณหภูมิ ที่เวลา 5 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4. 3a และ รูปที่ 4. 3b ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ไม่มีความแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น จาก 5 องศาเซลเซียส เป็น 15 องศาเซลเซียส และร้อยละผลได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิระบบเพิ่มขึ้นตั้งแต่

25 องศาเซลเซียสขึ้นไป และค่าการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิระบบสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของระบบสูงขึ้นทำให้ พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ละลายเข้าสู่วัฏภาคของเหลวได้มากขึ้น และ การเกิดปฏิกิริยาในระบบเกิดได้เร็วขึ้น จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิระบบเพิ่มสูงจาก 5 ไป 15 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ยังคงที่เนื่องจากพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ละลายในระบบมากขึ้น และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดเป็น ไดและไตรพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินซึ่งไม่ตกตะกอนลงมา แสดงดังสมการ (3) และ (4) การทำปฏิกิริยาระหว่างพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์กับไฮดรอกไซด์ไอออนมีผลกระทบน้อย แสดงดังสมการ (5) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิระบบตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียสขึ้นไป การเกิดปฏิกิริยาระหว่างพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์กับไฮดรอกไซด์ไอออนเริ่มมีผลกระทบมากขึ้น ทำให้พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ถูกใช้มากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์จึงเกิดได้น้อยทำให้มีร้อยละผลได้ลดลง

การหลีกเลี่ยงการเกิด ไดและไตรพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินไม่ให้เกิดขึ้นปฏิกิริยาในระบบสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิในระบบ ทำให้โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดปฏิกิริยาต่อกับพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ได้ยากขึ้น จากการศึกษางานวิจัยในบทที่ 2 การศึกษาสภาวะการสังเคราะห์ของปฏิกิริยานี้เลือกทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้ากว่าอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

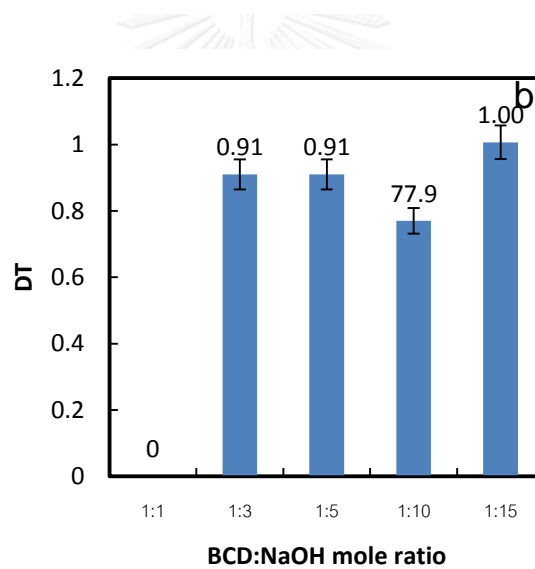
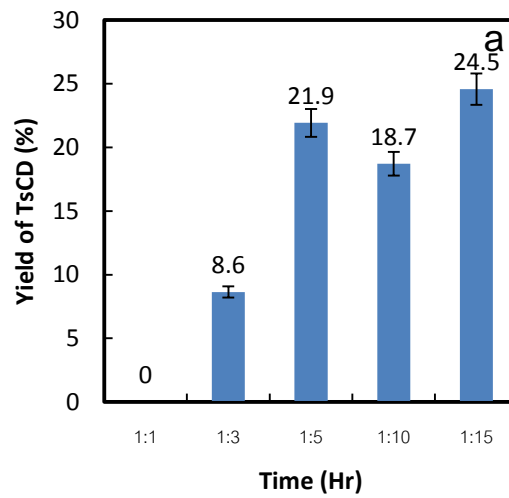


รูปที่ 4. 3 ผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเตกซ์ตริน(a)และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล(b) เวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง

#### 4.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการ

##### สังเคราะห์พาราโพลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

ผลของร้อยละผลได้ของพาราโพลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ต่ออัตราส่วนระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดรอกไซด์ และการแทนที่ของหมู่พาราโพลูอินซัลโฟนิลต่ออัตราส่วนระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4. 4a และ รูปที่ 4. 4b ตามลำดับที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:5 และอัตราส่วนตั้งแต่ 1:5 ขึ้นไปร้อยละผลได้มีค่าไม่แตกต่างกัน การแทนที่ของหมู่พาราโพลูอินซัลโฟนิลที่อัตราส่วน 1:1 มีค่า 0 พบว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินไม่เกิดปฏิกิริยากับพาราโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ การแทนที่ของหมู่พาราโพลูอินซัลโฟนิลที่อัตราส่วน 1:3 ถึง 1:15 มีค่าไม่แตกต่างกัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดรอกไซด์ทำให้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินถูกดึงโปรตอนได้มากขึ้น อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีร้อยละผลได้น้อยเนื่องจากเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินถูกดึงโปรตอนได้น้อยทำให้การเกิดปฏิกิริยากับพาราโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เกิดได้ยาก เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินสามารถทำปฏิกิริยาพอดกันจะสามารถดึงโปรตอนได้ 7 ตำแหน่ง จากผลการทดลองพบว่าเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินไม่จำเป็นต้องถูกดึงโปรตอนทั้ง 7 ตำแหน่ง จะพบว่าอัตราส่วน 1:5 มีร้อยละผลได้ที่เทียบเคียงที่อัตราส่วน 1:10 และ 1:15

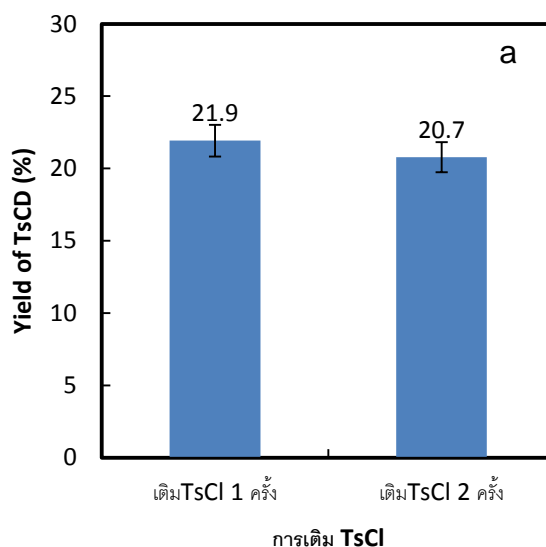


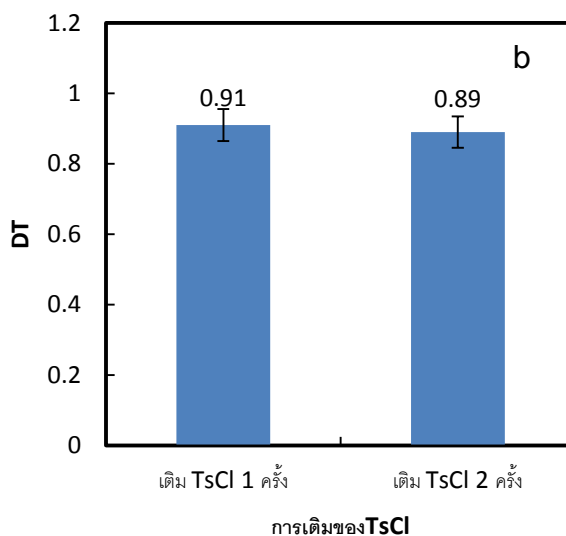
รูปที่ 4. 4 ผลของอัตราส่วนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล(b) อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง

#### 4.1.4 ผลของการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

การศึกษาการเติมสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาที่เป็นระบบสารเนื้อเดียวมีปฏิกิริยาต่อเนื่อง การเติมสารตั้งต้นจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องคาดว่า การเติมสารตั้งต้นน่าจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์

ผลของร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ต่อการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลต่อการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินคลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 4. 5a และ รูปที่ 4. 5b จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินถูกจำกัดที่ค่าการละลายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์





**รูปที่ 4.5** ผลของการเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล(b) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 ชั่วโมง

#### 4.1.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน

จากตารางที่ 4- 1 การเปรียบเทียบร้อยละผลได้จากงานวิจัย Gonil P.et al. [1] Tripodo G.et al.[6] Brady B.et al.[2] พบว่า ร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Tripodo G.et al. [6] เนื่องจากวิธีการสังเคราะห์ที่ต่างกัน โดยงานวิจัยของ Tripodo G.et al. [6] ใช้อัตราส่วนระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 1:10 และ ใช้การแยกผลิตภัณฑ์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินด้วยเรซินเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) การใช้เรซินเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนช่วยให้แยกผลิตภัณฑ์ออกมา เรซินมีประจุโปรตอนนำไปผสมกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวมีประจุเป็นลบ ทำให้พาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินถูกแยกออกมา แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสะเทิน การเติมกรดไฮโดรคลอริกคือการเติมโปรตอน ทำให้พาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินซึ่งมีประจุเป็นลบ กลายเป็นประจุเป็น

กลาง พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินตกตะกอน และจัดการไฮดรอกไซด์ไอออนจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือในระบบ

การแยกผลิตภัณฑ์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินด้วยการตกตะกอนด้วยกรด เป็นวิธีที่ง่ายกว่าการแยกผลิตภัณฑ์ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้มีกรดไฮโดรคลอริกเหลือจากทำปฏิกิริยาข้างต้น จึงจำเป็นต้องล้างตะกอนพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินด้วยน้ำกลั่นในระหว่างการกรองซึ่งเป็นของเสียของเสียของวิธีการตกตะกอนด้วยกรด

การเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินจากงานวิจัย Gonil P. et al. [1] Tripodo G. et al. [6] Brady B. et al. [2] และงานวิจัยนี้ได้แก่ ปริมาณเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน ปริมาณพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่างานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณสารน้อยที่สุดและพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกัน

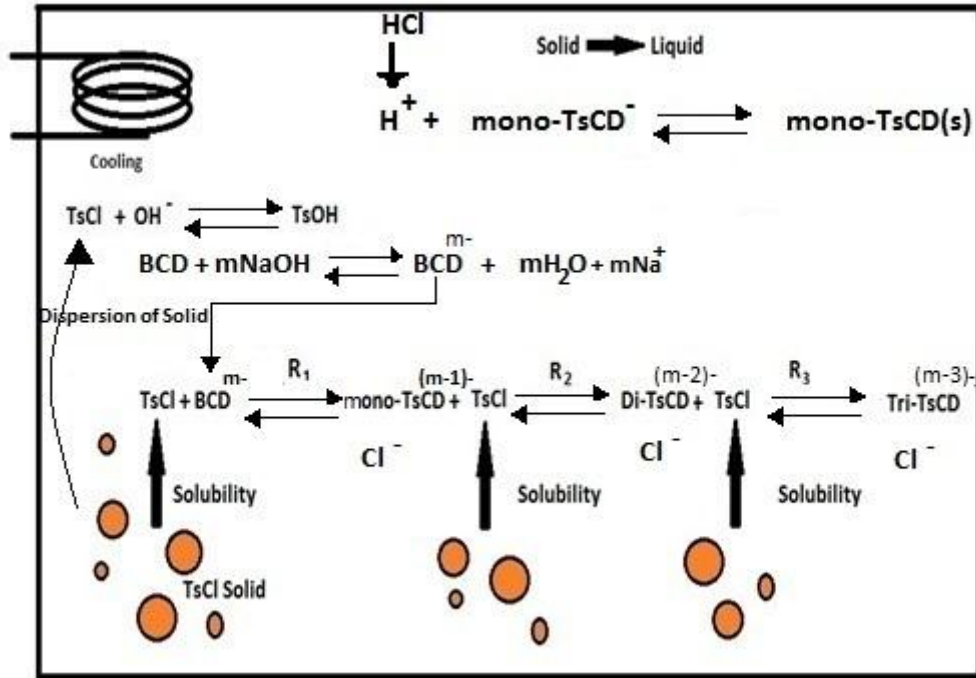




**ตารางที่ 4- 1** การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจากงานวิจัยต่าง ๆ กับผลการทดลอง

งานวิจัย	Tripodo G. et al. [6]	Gonil P. et al. [1]	Brady B. et al. [2]	งานวิจัยนี้
อุณหภูมิ	25	0-5	0-5	15
อัตราส่วนจำนวนโมลสารตั้งต้น BCD:TsCl	1:1.5	1:6	1:6	1:1
อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดอกไซด์	1:10	1:40	1:14	1:5
ร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน	35	22	24	24
การแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล	-	1.74	-	1.87

#### 4.1.6 สรุปกระบวนการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน



รูปที่ 4. 6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยารวมการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

จากรูปที่ 4. 6 แสดงภาพรวมการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน ในระบบการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบของแข็งละลายในของเหลวซึ่งของแข็งจะการกระจายตัวในของเหลว และมีการควบคุมอุณหภูมิในระบบให้คงที่ การดำเนินไปของปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยค่าการละลายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินถูกตั้งโปรตอนเป็นเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินมีประจุเป็นลบ พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เติมเข้าไปในระบบละลายและเข้าทำปฏิกิริยากับเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดเป็น โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน
2. โมโน พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจากพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เกิดเป็นไดและไตรพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน
3. พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นกรดพาราโทลูอินซิลโฟนิค
4. เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปผลิตภัณฑ์จะถูกแยกโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริก

## สรุปสถานะที่เหมาะสมการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

## การศึกษาส่วนที่ 1

อุณหภูมิตั้ง	15 องศา
เซลล์เยลลี่	
อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซโตเดียมไฮดรอกไซด์	1:5
การเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เป็นการเติมแบบ	1 ครั้ง

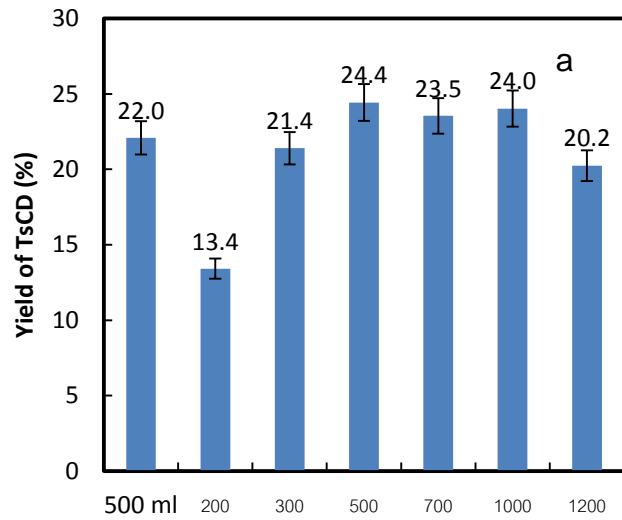


## 4.2 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน ขนาด 2 ลิตร

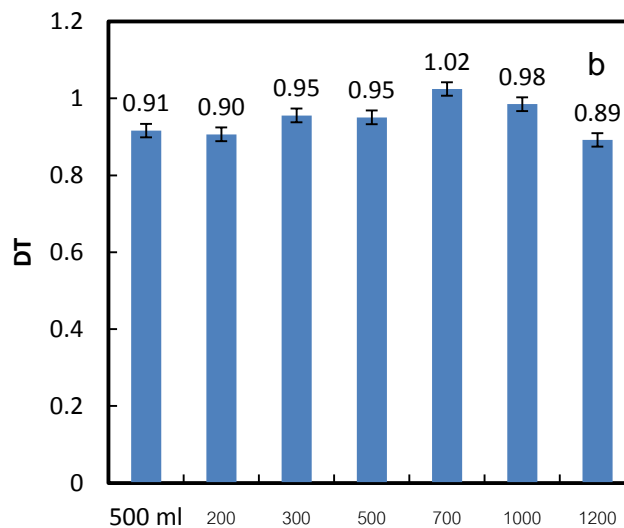
การศึกษาในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบจากความเร็วยรอบการปั่นกวนและตำแหน่งของใบกวนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในส่วนที่ 1 จากข้อ 4.1 อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับไซเตียมไฮดรอกไซด์ 1:5 และการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เป็นการเติมแบบ 1 ครั้ง นำมาใช้ในการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

### 4.2.1 การศึกษาปัจจัยความเร็วยรอบที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

ผลของร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินต่อความเร็วยรอบการปั่นกวนและค่าการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลในผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 4. 7a และ รูปที่ 4. 7b ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วยรอบการปั่นกวนทำให้ร้อยละผลได้แนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ ความเร็วยรอบ 500 รอบต่อนาที ขึ้นไป มีร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลเหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร แสดงให้เห็นว่า ความเร็วยรอบ 500 รอบต่อนาทีขึ้นไปไม่มีผลกระทบของการถ่ายเทมวลสาร สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร การเพิ่มความเร็วยรอบการปั่นกวนทำให้การกวนผสมเข้าใกล้กับเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการฟุ้งกระจายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ และการละลายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ การเพิ่มความเร็วยรอบจนผลของการถ่ายเทมวลสารไม่มีผลกระทบต่อระบบและปฏิกิริยา ทำให้ระบบทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร จึงทำให้มีร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลเหมือนกัน



Lab scale and Pilot scale 2L at other Impeller tip speed (rpm)

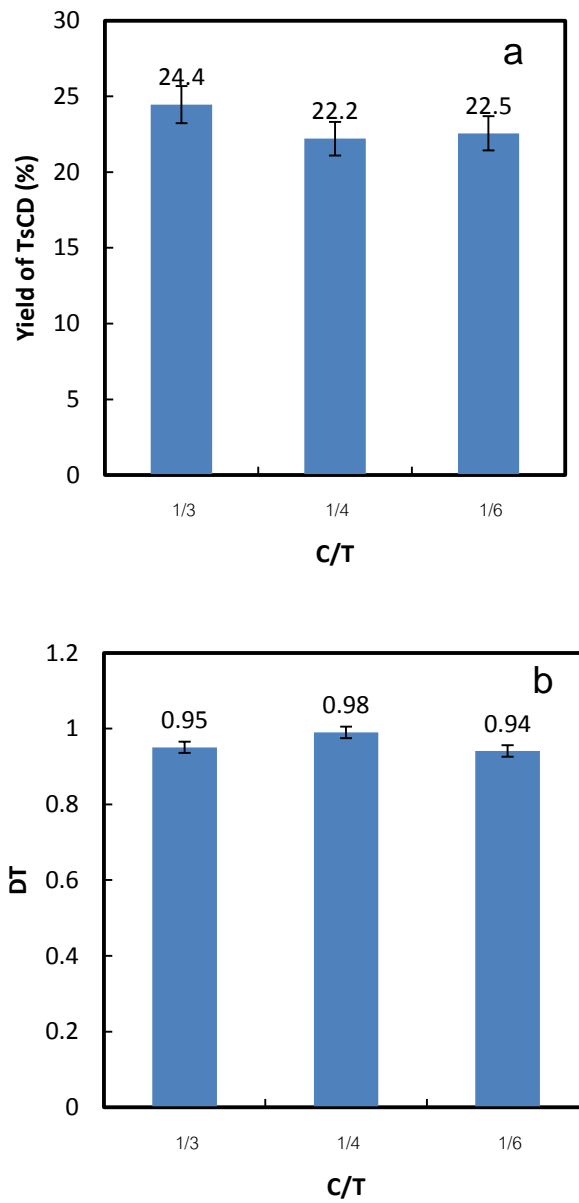


Lab scale and Pilot scale 2L at other Impeller tip speed (rpm)

รูปที่ 4.7 แสดงผลของความเร็รรอบกับร้อยละผลได้(a) และการแทนที่ของหมู่ฟาราโทลูอินซิลโฟนิล (b) ของเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร และ 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนของตำแหน่งของใบกวนที่มีผลต่อกำลังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

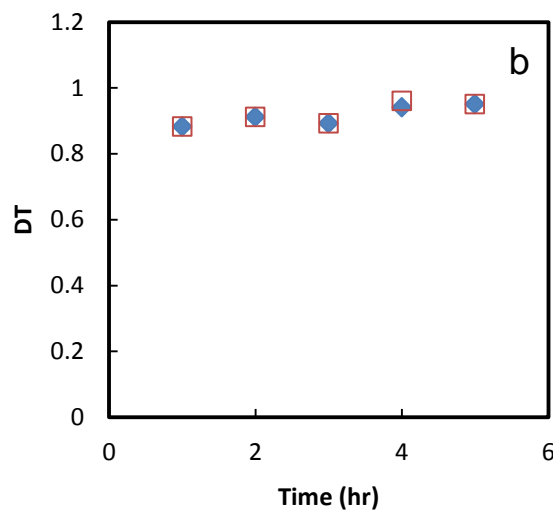
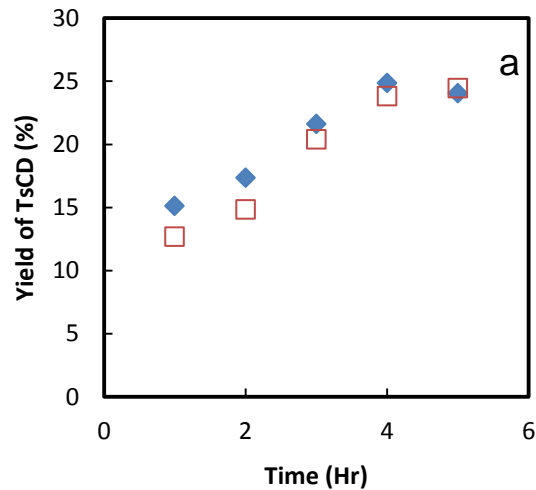
ผลของร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินมาต่อตำแหน่งของระยะระหว่างใบกวนกับกันเครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (C/T) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลแสดงดังรูปที่ 4. 8a และ รูปที่ 4. 8b จากผลการทดลองพบว่า การเลื่อนตำแหน่งของใบกวนเข้าใกล้กันถึงเครื่องปฏิกรณ์ทำให้มีร้อยละผลได้ลดลงและมีการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลไม่แตกต่างกัน การเลื่อนตำแหน่งของใบกวนลงมาทำให้การกวนผสมลดลงทำให้ร้อยละผลได้ลดลง การเลื่อนตำแหน่งของใบกวนเพื่อดูการฟุ้งกระจายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์จะพบว่า ที่สัดส่วน 1/3 พบว่าการฟุ้งกระจายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์เกิดการฟุ้งกระจายอย่างสมบูรณ์ไม่พบการนอนก้นถึงของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ เนื่องจากพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์มีอนุภาคขนาดเล็ก สัดส่วน 1/3 เกิดการกวนผสมที่ดีกว่าสัดส่วน 1/4 1/6



รูปที่ 4. 8 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของระยะระหว่างใบกวนกับกันเครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ต่อร้อยละผลได้(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล(b) ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที

#### 4.2.3 สรุปการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร

อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลของเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร และ 2 ลิตร แสดงดังรูปที่ 4. 9a และ รูปที่ 4. 9b จะพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลของเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร และ 2 ลิตร มีแนวโน้มเหมือนกัน



รูปที่ 4. 9 อัตราการเกิดปฏิกิริยา(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลต่อเวลา(b); ♦

เครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร □ เครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร



สรุปความเร็วรอบและตำแหน่งของใบกวนที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์

ขนาด 2 ลิตร

ความเร็วรอบ

500 รอบต่อนาที

ระยะระหว่างใบกวนกับก้นเครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ 1/3



### 4.3 การศึกษาการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน ขนาด 15 ลิตร

การศึกษาในส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาผลความเร็วรอบการปั่นกวนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในส่วนที่ 1 จากข้อ 4.1 อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:5 และการเติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เป็นการเติมแบบ 1 ครั้ง นำมาใช้ในการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนทรงมาตรฐานจากบทที่ 2 หัวข้อ 2.6 มาประยุกต์ใช้เพื่อหาความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

1. ความสัมพันธ์เครื่องปฏิกรณ์ค่าเรย์โนลเท่ากันแสดงลักษณะการไหลเหมือนกัน (อัตราส่วนระหว่าง แรงเฉื่อยกับแรงจากความหนืด) สมการ (10)

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_1 = 2 \text{ L}, V_2 = 15 \text{ L}$$

$$N_1 = 500 \text{ rpm}, N_2 \approx 50 \text{ rpm}$$

2. ความสัมพันธ์ค่าความเร็วปลายใบกวนเท่ากัน แสดงการหมุนความเร็วปลายใบกวนในเครื่อง ปฏิกรณ์เหมือนกัน สมการ (11)

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_1 = 2 \text{ L}, V_2 = 15 \text{ L}$$

$$N_1 = 500 \text{ rpm}, N_2 \approx 160 \text{ rpm}$$

3. ความสัมพันธ์เครื่องปฏิกรณ์การฟุ้งกระจายของแข็งเท่ากัน สมการ (12)

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.75}$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_1 = 2 \text{ L}, V_2 = 15 \text{ L}$$

$$N_1 = 500 \text{ rpm}, N_2 \approx 220 \text{ rpm}$$

(13) 4. ความสัมพันธ์เครื่องปฏิกรณ์อัตราการผลิตถ่ายเทมวลสารหรือกำลังต่อปริมาตรเท่ากัน สมการ

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.67}$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_1 = 2 \text{ L}, V_2 = 15 \text{ L}$$

$$N_1 = 500 \text{ rpm}, N_2 \approx 230 \text{ rpm}$$

5. ความสัมพันธ์เครื่องปฏิกรณ์ค่าพรวดเท่ากันอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงโน้มถ่วงในแต่ละตำแหน่งใดๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดวอร์เท็กซ์ (Vortex) สมการ (14)

$$N_2 = N_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0.5}$$

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทรงมาตรฐาน

$$\frac{D_1}{D_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_1 = 2 \text{ L}, V_2 = 15 \text{ L}$$

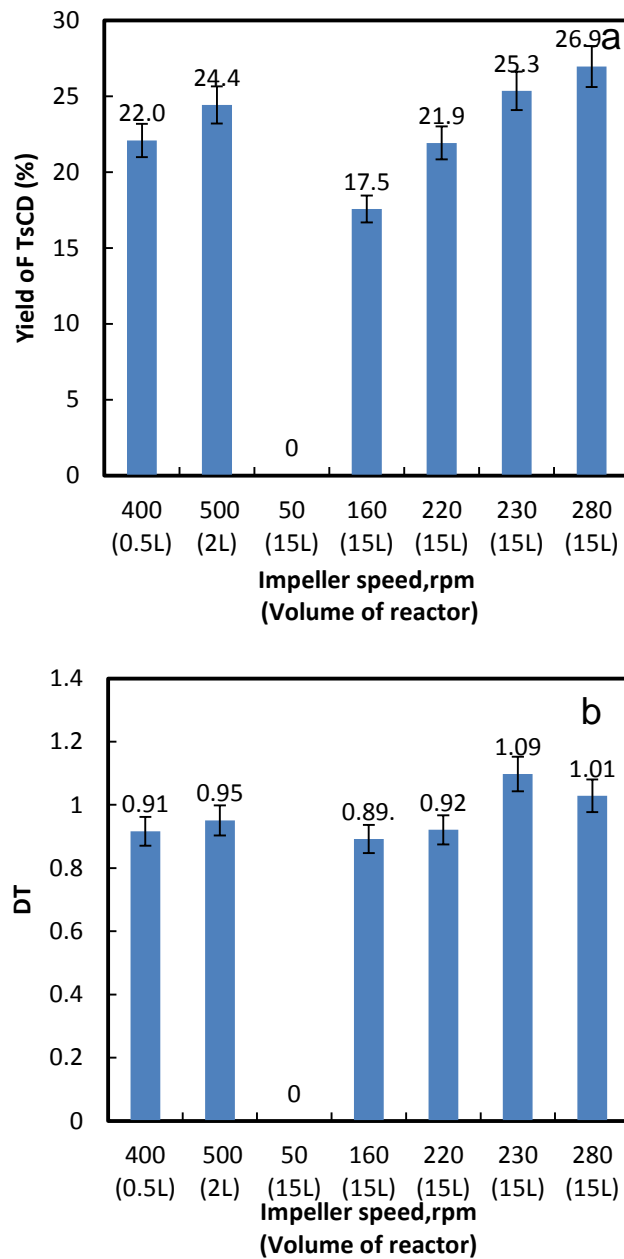
$$N_1 = 500 \text{ rpm}, N_2 \approx 280 \text{ rpm}$$

**ตารางที่ 4- 2** แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วยวระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 15 ลิตร

ความสัมพันธ์ของเครื่อง ปฏิกรณ์ 2 ลิตรและ 15 ลิตร	ความเร็วยวรอบของ เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร (รอบต่อนาที) $N_1$	ความเร็วยวรอบของ เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร (รอบต่อนาที) $N_2$	ค่าเอ็มพิริคอลและค่า เชิงทฤษฎี (n)
ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากัน	500	50	2
ความเร็วปลายใบกวน เท่ากัน	500	160	1
การฟุ้งกระจายของ ของแข็งเท่ากัน	500	220	3/4
กำลังการปั่นกวนต่อ ปริมาตรเท่ากันและการ ถ่ายเทมวลเท่ากัน	500	230	2/3
ค่าตัวเลขฟรูด	500	280	1/2

ผลของร้อยละผลได้ของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโดรเด็คซ์ตรินต่อความเร็วรอบการปั่นกวน และค่าการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลในผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 4. 10a และ รูปที่ 4. 10b จากการทดลองพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบการปั่นกวนทำให้ร้อยละผลได้แนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาทีขึ้นไป ทำให้มีร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร แสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาทีขึ้นไปไม่มีผลกระทบของการถ่ายเทมวลสาร ผลการเพิ่มความเร็วรอบทำให้การกวนผสมในเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร และ 2 ลิตร

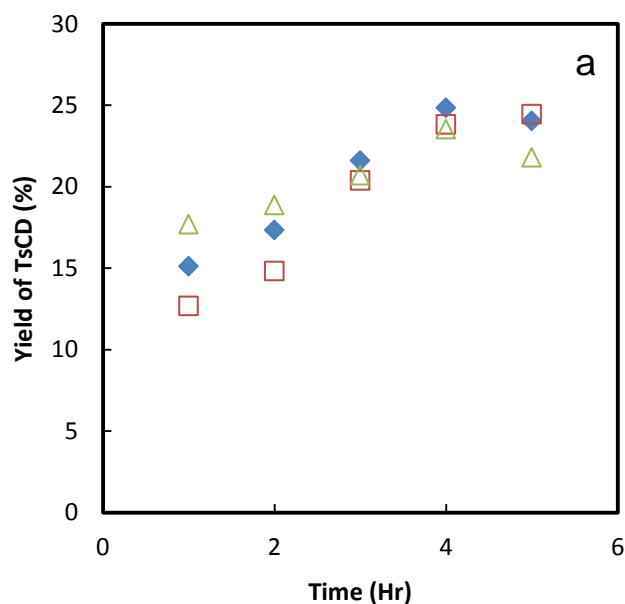


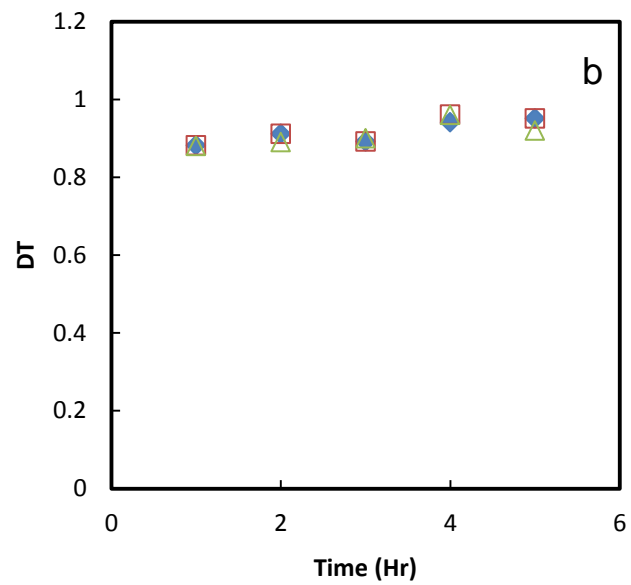


รูปที่ 4. 10 แสดงผลของความเร็วยกกับร้อยละผลได้(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิล(b) ของเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร 2 ลิตร และ 15 ลิตร ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

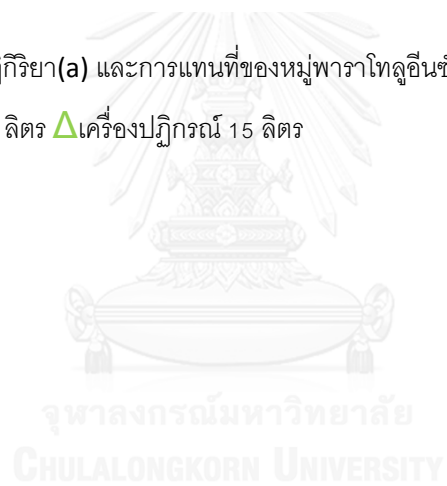
#### 4.3.2 สรุปการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร

อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลของเครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร 2 ลิตร (ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที) และ 15 ลิตร (220 รอบต่อนาที) แสดงดังรูปที่ 4. 11 a และรูปที่ 4. 11b ซึ่งจากผลที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการละลายของอนุภาคพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ใช้ในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ถึงกวนแบบมาตรฐานในการผลิตพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินเป็นการทำให้การฟุ้งกระจายของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์เท่ากันเป็นตัวกำหนด





รูปที่ 4. 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยา(a) และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิลต่อเวลา(b) ; ♦เครื่องปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร □เครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร ▲เครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

การสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินในระดับการขยายขนาด สิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือการศึกษาปฏิกิริยาสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มต้นจากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร เพื่อเพื่อเข้าใจกระบวนการเกิดปฏิกิริยาและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตริน เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำไปทดลองในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ 15 ลิตร โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนระหว่างเบต้าโซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ การเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ โดยจะวิเคราะห์ร้อยละผลได้พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินและการแทนที่ของของหมู่พาราโทลูอินซัลโฟนิล ส่วนในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร จะศึกษาตัวแปร ความเร็วรอบ การเปลี่ยนตำแหน่งของใบกวนชนิดแบบพิชเบรด 4 เบริด โดยความเร็วรอบที่เหมาะสม จะถูกนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร และ 15 ลิตร

5.1.1 การศึกษากระบวนการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินเพื่อเข้าใจการเกิดปฏิกิริยา จะพบว่าปฏิกิริยาการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องซึ่งผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยากับสารตั้งต้นเป็นไดและไตรพาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตริน และปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยการละลายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

5.1.2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร ผลจากการทดลองการสังเคราะห์พาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และช่วยให้พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์มีการละลายที่ดีขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 3 ชั่วโมง การใช้อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส การใช้อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าโซโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1 ต่อ 5 ข้อดีคือช่วยลดปริมาณการใช้สารที่มากเกินไปซึ่งเป็นผลดีต่อกระบวนการตกตะกอนพาราโทลูอินซัลโฟนิลโซโคลเด็กซ์ตรินด้วยกรด (neutralize) ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้กรดเข้มข้นในขั้นตอนนี้อีกทั้งยังช่วยในการลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดเบสทำให้ระบบมีการคายความร้อนน้อยลง การเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ในระบบสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียว การเติม 1 ครั้งและ 2 ครั้ง มีผลไม่แตกต่างกันเนื่องจากปฏิกิริยาถูกจำกัดที่ค่าการละลายของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ จึงเลือกใช้การเติมพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ 1 ครั้ง

5.1.3 การ

ขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร ศึกษาความเร็วรอบการปั่นกววนและการเปลี่ยนตำแหน่งของใบกววน เพื่อดูผลการรวมผสมและการกระจายตัวของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลเหมือนกับห้องปฏิบัติการ อยู่ที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบต่อนาทีขึ้นไป การเปลี่ยนตำแหน่งของระยะระหว่างใบกววนกับกันเครื่องปฏิกรณ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (C/T) ที่ 1/3 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทมวลสารไม่รบกวนระบบและพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์มีการฟุ้งกระจายไม่พบการนอนกันของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์

5.1.4 การขยายเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร โดยความเร็วรอบในการทดลองหาจากความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร และ เครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร ร้อยละผลได้และการแทนที่ของหมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลเหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ 2 ลิตร อยู่ที่ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ 15 ลิตร 220 ขึ้นไป

อยู่ที่ความสัมพันธ์การฟุ้งกระจายของของแข็งเท่ากัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินในการศึกษานี้ใช้สารเคมีเกรดห้องปฏิบัติการทำให้การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินมีต้นทุนการผลิตสูง ควรเลือกใช้สารเคมีที่มาจากแหล่งอื่นๆ ที่มีราคาถูกลงและนำมาทดสอบเพื่อให้ได้พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

รายการอ้างอิง



1. Gonil, P., et al., *Novel quaternized chitosan containing  $\beta$ -cyclodextrin moiety: Synthesis, characterization and antimicrobial activity*. Carbohydrate Polymers, 2011. **83**(2): p. 905-913.
2. Brady, B.L., N. O'Sullivan, T. Ahem, C. and Darcy, R. , *6-O-p toluenesulfonyl- $\beta$ - cyclodextrin*. Organic syntheseses. 2004. **10**: p. 686.
3. Prabakaran, M.a.J., R. , *Chitosan-graft- $\beta$  -cyclodextrin scaffolds with controlled drug release capability for tissue engineering applications*International journal of biological macromolecules 44, 2009: p. 320-325.
4. ลิ้มโสภารธรรม, ป., การเตรียม BETA-cyclodextrin เชื่อมกับผ้าฝ้ายสำหรับในงานด้านสิ่งทอ , in สาขาวิทยาการ และวิศวกรรมโพลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ2007, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
5. Mahlambi, M.M., *Polymerization of cyclodextrin-ionic liquid complexes for the removal of organic and inorganic contaminants from water*, 2009.
6. Tripodo, G., et al., *Efficient synthesis of pure monotosylated beta-cyclodextrin and its dimers*. Carbohydrate research, 2013. **381**: p. 59-63.
7. Stephenie, W., et al., *Influence of pH and impeller tip speed on the cultivation of Bifidobacterium pseudocatenulatum G4 in a milk-based medium*. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2007. **12**(5): p. 475-483.
8. Shen, Y.-H. and B.A. Dempsey, *Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment*. Environment International, 1998. **24**(8): p. 899-910.
9. Wang, J., *Suspension of high concentration slurry in agitated vessels*. 2010.
10. Kraume, M., *Mixing times in stirred suspensions*. Chemical engineering & technology, 1992. **15**(5): p. 313-318.
11. Bujalski, W., et al., *Suspension and liquid homogenization in high solids concentration stirred chemical reactors*. Chemical Engineering Research and Design, 1999. **77**(3): p. 241-247.
12. Keng, P.S., et al., *Scale-up synthesis of lipase-catalyzed palm esters in stirred-tank reactor*. Bioresource technology, 2008. **99**(14): p. 6097-6104.

13. Imamoglu, E. and F.V. Sukan, *Scale-up and kinetic modeling for bioethanol production*. *Bioresource technology*, 2013. **144**: p. 311-320.
14. Couper, J.R., *chemical process equipment selection and design*. 2010.
15. Szejtli, J., *Past, present and future of cyclodextrin research*. *Pure and Applied Chemistry*, 2004. **76**(10): p. 1825-1845.
16. Prabakaran, M. and J. Mano, *Chitosan derivatives bearing cyclodextrin cavities as novel adsorbent matrices*. *Carbohydrate Polymers*, 2006. **63**(2): p. 153-166.
17. Nicolescu, C., et al., *Phase solubility studies of the inclusion complexes of repaglinide with  $\beta$ -cyclodextrin and  $\beta$ -cyclodextrin derivatives*. *Farmacia*, 2010. **58**(5): p. 620-628.
18. 17, S., *4-Methylbenzenesulfonyl chloride*, 2003: Gyeongseo-dong, Seo-gu, Incheon.
19. *Organic Chemistry C341 for Spring 2010*. 2010.
20. Trotta, F., et al., *Recent advances in the synthesis of cyclodextrin derivatives under microwaves and power ultrasound*. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2007. **57**(1-4): p. 3-7.
21. 朱久进, *Preparation of a novel biodegradable  $\beta$ -cyclodextrin-containing polymer*. *重庆大学学报: 英文版*, 2009(4).
22. Tan, T., et al., *Synthesis of mono-6-tosyl- $\beta$ -cyclodextrin, a key intermediate for the functional cyclodextrin derivatives*. 2011.
23. Mansri, A., *Synthesis and pNP interactions of a new copolymer poly(4-vinylpyridine-G-(6-o-monotosyl-6-desoxy-bcyclodextrin))*. *Res Chem Intermed*, 2013.
24. Zhang, G., et al., *A palladium complex with functionalized  $\beta$ -cyclodextrin: a promising catalyst featuring recognition abilities for Suzuki-Miyaura coupling reactions in water*. *Green Chemistry*, 2013. **15**(8): p. 2081-2085.
25. Geankoplis, C., *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. 2003: Prentice Hall Press.
26. M., R.A.G., *Agitation and mixing*, 2003.

27. Bialas, D.S.-P.a.W. *Scale-up of anaerobic 1,3-propanediol production by Clostridium butyricum DSP1 from crude glycerol*. 2014.
28. Gill, N., et al., *Quantification of power consumption and oxygen transfer characteristics of a stirred miniature bioreactor for predictive fermentation scale - up*. *Biotechnology and bioengineering*, 2008. **100**(6): p. 1144-1155.





ภาคผนวก ก การคำนวณอัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

ตัวอย่าง การคำนวณจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

$$\text{น้ำหนักของเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน} = 20 \text{ กรัม}$$

$$\text{จำนวนโมลเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน} = \frac{20 \text{ กรัม}}{1135 \text{ กรัมต่อโมล}}$$

$$= 0.0176 \text{ โมล}$$

$$\text{น้ำหนักของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์} = 3.36 \text{ กรัม}$$

$$\text{จำนวนโมลของพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์} = \frac{3.36 \text{ กรัม}}{191 \text{ กรัมต่อโมล}}$$

$$= 0.0176 \text{ โมล}$$

ดังนั้น อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินกับพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์

$$= \frac{\text{จำนวนโมลเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน}}{\text{จำนวนโมลพาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์}}$$

$$= \frac{0.0176 \text{ โมล}}{0.0176 \text{ โมล}}$$

$$= \frac{1}{1}$$



**ตารางที่ ก-1** แสดงปริมาณเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินและพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละขนาด ที่อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินกับพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ 1:1

ขนาดเครื่องปฏิกรณ์	เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน (กรัม)	พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (กรัม)
0.5 ลิตร	20	3.36
2 ลิตร	120	20.16
15 ลิตร	600	100.8

**การคำนวณอัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์**

น้ำหนักของเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน = 20 กรัม

จำนวนโมลเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน =  $\frac{20 \text{ กรัม}}{1135 \text{ กรัมต่อโมล}}$

= 0.0176 โมล

น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 3.52 กรัม

จำนวนโมลโซเดียมไฮดรอกไซด์ =  $\frac{3.52 \text{ กรัม}}{40 \text{ กรัมต่อโมล}}$

= 0.088 โมล

ดังนั้น อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

=  $\frac{\text{จำนวนโมลเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน}}{\text{จำนวนโมลโซเดียมไฮดรอกไซด์}}$

=  $\frac{0.0176 \text{ โมล}}{0.088 \text{ โมล}}$

=  $\frac{1}{5}$

ตารางที่ ก-2 แสดงปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ของอัตราส่วนอัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

อัตราส่วน	เบต้าไฮโคลเด็กซ์ตริน (กรัม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)
1:1	20	0.7
1:5	20	3.52
1:10	20	7.08
1:15	20	10.5



**ภาคผนวก ข-1** การคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์

$$\text{สมการคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ } \text{Re} = \frac{\rho D^2 N}{\mu} = \frac{D^2 N}{\nu}$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด	2 ลิตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (D)	50 มิลลิเมตร
ความเร็วรอบ (N)	500 รอบต่อนาที
ความหนาแน่นของของเหลว ( $\rho$ )	1000 kg/m <sup>3</sup>
ความหนืด ( $\mu$ )	0.001 kg/m s
สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\nu$ )	10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>

$$\text{Re} = \frac{(50 \times 10^{-3} \text{m})^2 \left(\frac{500}{60} \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)}{10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}}$$

$$\text{Re} = 20,833.3$$

เครื่องปฏิกรณ์ขนาด	15 ลิตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (D)	160 มิลลิเมตร
ความเร็วรอบ (N)	220 รอบต่อนาที

$$Re = \frac{(50 \times 10^{-3} \text{m})^2 \left(\frac{220}{60} \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)}{10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}}$$

$$Re = 93866.6$$

ภาคผนวก ข-2 การคำนวณความเร็วรอบที่ทำให้ของแข็งเริ่มแขวนลอย  $N_{js}$

สมการ

$$N_{js} = \frac{s * v^{0.1} d_p^{0.2} \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_L}\right)^{0.45} X^{0.13}}{D^{0.85}}$$

เครื่องปฏิกรณ์	2	ลิตร
ค่าคงที่ของ Zwietering (s)	5	
แรงโน้มถ่วงของโลก (g)	9.81	$\text{m}^2/\text{s}$
ผลต่างความหนาแน่นของแข็งและของเหลว ( $\Delta\rho$ )	330	$\text{kg}/\text{m}^3$
ความหนาแน่นของเหลว	1000	$\text{kg}/\text{m}^3$
ขนาดอนุภาคของพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ( $d_p$ )	10	ไมโครเมตร
อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็งต่อของเหลว (X)	1.348	
สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $\nu$ )	$10^{-6}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (D)	50	มิลลิเมตร

$$N_{js} = \frac{5 \left( \frac{9.81 \times 330}{1000} \right)^{0.45} (10 \times 10^{-6})^{0.2} (1.348)^{0.13} (10^{-6})}{(50 \times 10^{-6})^{0.85}}$$

$$N_{js} = 9.92 \text{ rad/min}$$

**ภาคผนวก ค** การคำนวณร้อยละผลได้พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

สมการคำนวณร้อยละผลได้

$$\text{ร้อยละผลได้ของ TsCD} = \frac{\text{จำนวนโมลของ TsCD} \times DT}{\text{จำนวนโมลของ } \beta\text{CD}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

น้ำหนักของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตรินที่ซั่งได้ 5.5 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน} &= \frac{5.5 \text{ กรัม}}{1288 \text{ กรัมต่อโมล}} \\ &= 0.0042 \text{ โมล} \end{aligned}$$

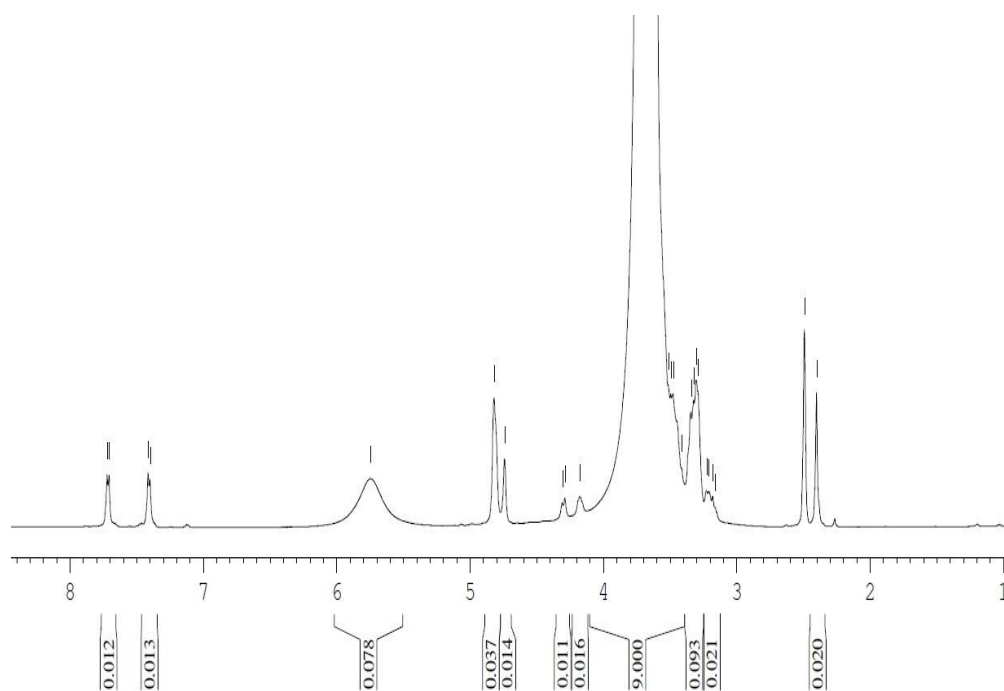
$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเบต้าไซโคลเต็กซ์ตรินเริ่มต้น} &= \frac{20.08 \text{ กรัม}}{1135 \text{ กรัมต่อโมล}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลเบต้าไซโคลเต็กซ์ตรินเริ่มต้น} &= 0.0177 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ร้อยละผลได้พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน} &= \frac{0.0042 \text{ โมล}}{0.0177 \text{ โมล}} \times 100 \\ &= 23.72 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบการวิเคราะห์การแทนที่หมู่พาราโทลูอินซิลโฟนิลจากการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

ตัวอย่างการวิเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลด้วย NMR แสดงดังรูปที่ ง- 1



รูปที่ ง- 1 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค NMR

สภาวะการสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน

อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเต็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:5

การเติมพาราโทลูอินซิลโคลไรด์ เติมแบบครั้งเดียว

ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

Ar 0.026

Ar/4=6.5\*10<sup>-3</sup>

H1-H6= 0.078

$$DT = \frac{\left(\frac{Ar}{4}\right)}{\left\{\left(\frac{H1 - H6}{2 * 7}\right)\right\}}$$

ดังนั้น การแทนที่ของหมู่พาราโทโลอินซัลโฟนิล 0.98



## ภาคผนวก จ

### รายละเอียดสารเคมีและอุปกรณ์

1. เบต้า-ไซโคเด็กซ์ตริน (  $\beta$ -CD ) บริษัท แวกเกอร์ เคมิคอล เอจี ประเทศเยอรมนี  
เกรด สำหรับยา
2. พาราโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ( TsCl ) บริษัท ACROsOrganic ประเทศเบลเยียม
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( NaOH ) เกรด เออาร์ บริษัท ซิกม่า แอลดิช ประเทศ  
สหรัฐอเมริกา
4. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 37 %โดยปริมาตร บริษัท ซิกม่า แอลดิช ประเทศ  
สหรัฐอเมริกา
5. กระจกชลิตมัส
6. DMSO-d<sub>6</sub> บริษัท ซิกม่า แอลดิช ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. ไมโครปิเปต ปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร
8. ปีกเกอร์ขนาด 0.5 ลิตร และ 1 ลิตร
9. ตัวปั่นกวนชนิดแม่เหล็ก
10. เครื่องปั่นกวน(Magnetic stirred) รุ่น Heidolph MR 3001 บริษัท ไอทีเอส  
(ประเทศไทย) จำกัด
11. เครื่องปั่นกวนชนิดปั่นด้านบน (Overhead stirred) บริษัท ITS (Thailand) Co.,  
Ltd ประเทศไทย
12. ใบกวนชนิดพิช เบลต จำนวน 4 เบลต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
13. เทอร์โมคัปเปิล แบบ เค สำหรับวัดอุณหภูมิของปฏิกิริยาภายในปีกเกอร์
14. เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร 2 ลิตร และ 10 ลิตร
15. เครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวน(Circulate chiller) รุ่น Julabo F33 บริษัท  
ไอแลบ  
ฟูลอิด คอนโทรล จำกัด
16. ปัมสุญญากาศและชุดกรองสุญญากาศ



17. บุนเนอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 185 มิลลิเมตร
18. กระดาษกรอง
19. ฟิวเตอร์ฟูลเนล เบอร์ 4 รุ่น Robu ปริมาตร 1,000 มิลลิเมตร
20. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 2 และ 4 ตำแหน่ง บริษัท Mettler-Toledo (Thailand) Ltd
21. นาฬิกาจับเวลา
22. ตู้อบ
23. ซ้อนตักสาร
24. กระดาษทิชชู แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์
25. ตลับเมตร
26. เวอร์เนีย
27. ปลี๊กเอนกประสงค์
28. มัลติมิเตอร์
29. เทคโฮมิเตอร์

#### รายละเอียดขั้นตอนการทดลอง

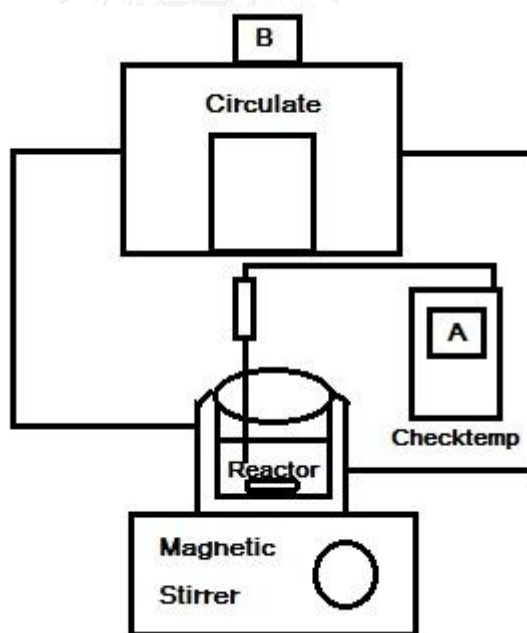
การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเต็กซ์ตริน ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร

#### การเตรียมสารละลายเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน

1. เตรียมสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน กับไซเตียมไฮดรอกไซด์ ที่ 1:1 1:3 1:5 1:10 และ 1:15 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. ชั่งเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน 20 กรัม (จำนวน 0.017 โมล)
3. เติมเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน ลงในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนจนเบต้าไซโคลเต็กซ์ตรินละลายในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ได้สารละลายใส นำสารละลายเบต้าไซโคลเต็กซ์ตริน ปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา

## การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคล เด็กซ์ตริน

1. การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน โดยควบคุมอุณหภูมิระบบน้ำเย็นไหลวนโดยเตรียมอุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ จ- 1 ต่อเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร เข้ากับเครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวนจากนั้นนำ เครื่องปฏิกรณ์ วางบนเครื่องปั่นกวน และใส่ตัวปั่นกวนชนิดแม่เหล็กลงในเครื่องปฏิกรณ์ ปรับความเร็วการปั่นกวนเป็น 300 รอบต่อนาที
2. ใส่สารละลายเบต้า-ไซโคลเด็กซ์ตรินลงในเครื่องปฏิกรณ์จากข้อ 3
3. ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวนที่ตำแหน่ง B โดยควบคุมให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ให้อุณหภูมิตามที่กำหนด โดยตรวจสอบอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลแสดงที่ตำแหน่ง A กำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์เป็น 5 10 15 25 30 และ 40 องศาเซลเซียส



**รูปที่ จ- 1** การเตรียมอุปกรณ์การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินแบบควบคุมอุณหภูมิระบบน้ำเย็นไหลวนเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.5 ลิตร

4. ชั่งพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ 3.36 กรัม

5. เติมพาราไทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ลงในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ปั่นกวนแล้วจับเวลาทำปฏิกิริยา
6. เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาครบกำหนด ทำการกรองพาราไทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาด้วยฟیلเตอร์ฟูเนลออกเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ คือพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน

#### การตกตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

1. นำทูลูซัลฟูนิล เบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน มาตกตะกอนด้วยกรด ไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. เตรียมบุนเนอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และใส่แผ่นกระดาษกรองลงบนบุนเนอร์ เทตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินลงบนบุนเนอร์ กรองตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน
3. เติมน้ำกลั่น ลงไปเพื่อล้างตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินจนตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินมีสภาวะเป็นกลาง โดยตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของตะกอนด้วยกระดาษลิตมัส
4. กรองตะกอนพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินจนตะกอนไม่มีน้ำเหลืออยู่
5. นำพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ชั่งน้ำหนักของพาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทริน

#### การสังเคราะห์พาราไทลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

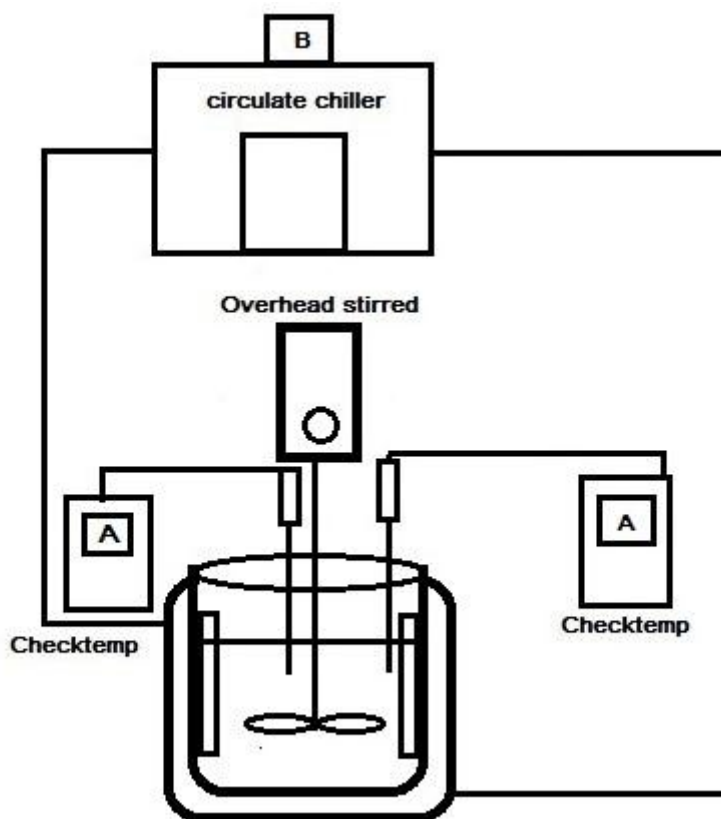
##### การเตรียมสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ต่อ 5 ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ชั่งเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน 120 กรัม (จำนวน 0.1 โมล )

3. เติมเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ลงในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ ปั่นกวนจนเบต้า-ไซโคลเด็กซ์ทรินละลายในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ได้สารละลายใส นำสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ปรับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการทำปฏิกิริยา

#### การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร

1. ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 2 ลิตร เข้ากับเครื่องทำน้ำหล่อเย็น แบบระบบไหลวนตั้งรูปที่ จ- 2 แล้วติดตั้งเครื่องปั่นกวนชนิดปั่นด้านบนใส่ใบกวนชนิดพิช เบลด โดยให้มีการปรับระยะห่างจากกันของถังถึงปลายใบกวน (C/T) ให้มีระยะอยู่ในระหว่าง 1 ใน 3 ถึง 1 ใน 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ เปิดสวิตช์เครื่องปั่นกวน ปรับความเร็วการปั่นกวนที่กำหนด
2. ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวนที่ตำแหน่ง B โดยควบคุมให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดแก้วให้มีอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส แสดงที่ตำแหน่ง A 2 จุด
3. ใส่สารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ทรินลงในชุดเครื่องแก้วปิกเกอร์



รูปที่ จ- 2 การติดตั้งอุปกรณ์การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินแบบควบคุม อุณหภูมิระบบน้ำเย็นไหลวนขนาด 2 ลิตร

4. ชั่งพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ 20.16 กรัม (จำนวน 0.1 โมล)
5. เติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์จากข้อ 3 ลงในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ปั่น กวนแล้วจับเวลาทำปฏิกิริยา
6. เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาครบกำหนด ทำการกรองพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ที่ไม่ทำ ปฏิกิริยาด้วยฟیلเตอร์ฟูลนออกเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ คือพาราโทลู อินซิลโฟนิล  
ไซโคลเด็กซ์ตริน

การตกตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินด้วยกรดไฮโดรคลอริก

1. นำพาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน มาตกตะกอนด้วยกรด ไฮโดรคลอริก ความ เข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 30 มิลลิลิตร

2. เตรียมบุนเนอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 185 มิลลิเมตร และใส่แผ่นกระดาษกรองลงบน บุนเนอร์ เทตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน กรองตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน
3. เติมน้ำกลั่น ลงไปเพื่อล้างตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน จนกระทั่งตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินมีสถานะเป็นกลาง โดยตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของตะกอนด้วยกระดาษลิตมัส
4. กรองตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินจนตะกอนไม่มีน้ำเหลืออยู่
5. นำตะกอนพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ชั่งน้ำหนักของพาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตริน

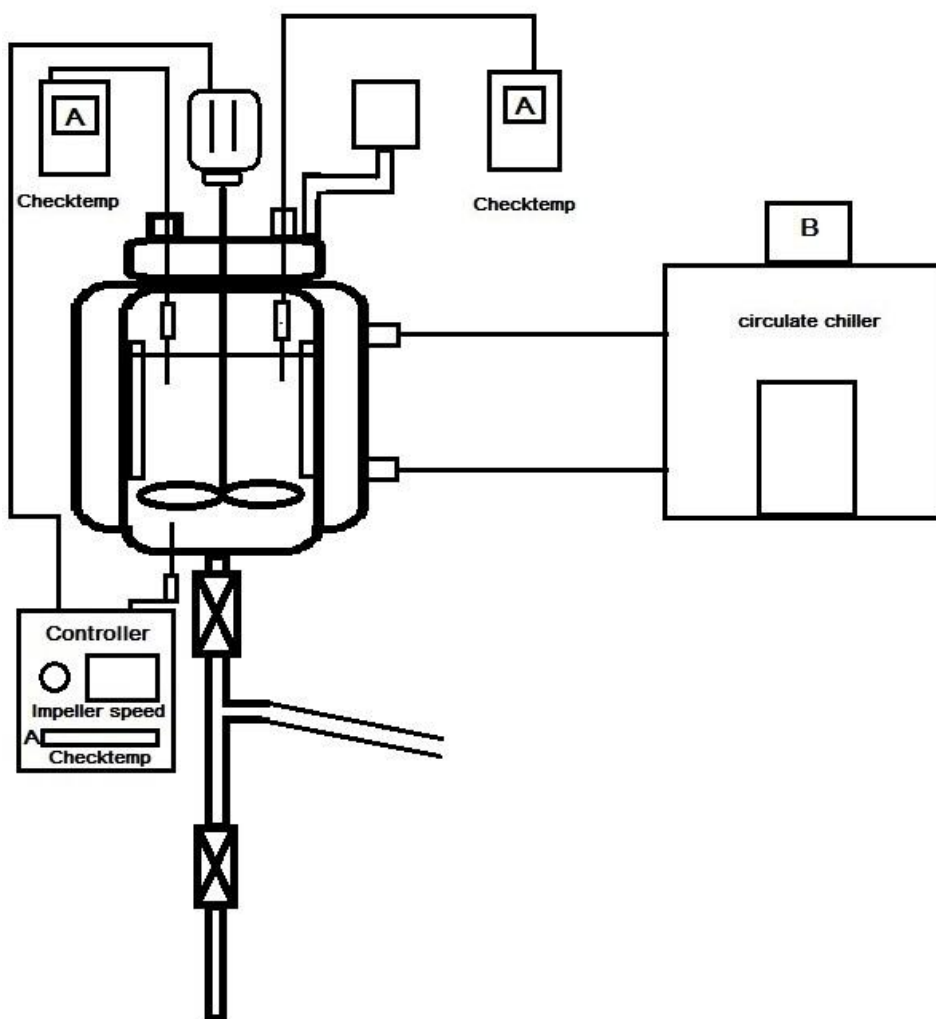
#### การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไฮโคลเด็กซ์ตรินในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

##### การเตรียมสารละลายเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตริน

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนจำนวนโมลระหว่างเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ต่อ 5 ต่อปริมาตร ปริมาตร 7.5 ลิตร
2. ชั่งเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตริน 600 กรัม ( จำนวน 0.53 โมล)
3. เติมเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตริน ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปั่นกวนจนเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตรินละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้สารละลายใส นำสารละลายเบต้าไฮโคลเด็กซ์ตริน ปรับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการทำปฏิกิริยา

#### การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร

1. ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 15 ลิตร เข้ากับเครื่องทำน้ำหล่อเย็น แบบระบบไหลวนดังรูปที่ จ- 3 แล้วติดตั้งเครื่องปั่นกวนชนิดปั่นด้านบนใส่ใบกวนชนิดพิช เบลด โดยให้มีระยะห่างจากกันถึงใบกวนประมาณ หนึ่งในสามของเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ เปิดสวิตซ์เครื่องปั่นกวน ปรับความเร็วการปั่นกวน



รูปที่ จ- 3 การติดตั้งอุปกรณ์การสังเคราะห์พาราโทลูอินซิลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ทรินแบบควบคุม อุณหภูมิระบบน้ำเย็นไหลวนขนาด 15 ลิตร

2. ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำหล่อเย็นแบบระบบไหลวนที่ตำแหน่ง B โดยควบคุมให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดแก้วให้มีอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส โดยวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล 3 จุด แสดงที่ตำแหน่ง A
3. ชั่งพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ 100.8 กรัม (จำนวน 0.53 โมล)
4. เติมพาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์จากข้อ 3 ลงในสารละลายเบต้าไซโคลเด็กซ์ทริน ปั่นกวนแล้วจับเวลาทำปฏิกิริยา
5. เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาครบกำหนด เปิดวาล์วทางด้านบน พาราโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ของแข็งที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะตกลงมาอยู่ด้านล่างชั้นของเหลว เปิดวาล์ว

ด้านล่างเพื่อถ่ายของพาราโกลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ออกมาบางส่วนเพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันในท่อ จากนั้นทำการปิดวาล์วด้านล่าง ผลติภัณฑ์ของเหลวที่อยู่ด้านบนจะออกมาตามท่อด้านขวาซึ่งยังมีอนุภาคของพาราโกลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ขนาดเล็กที่เหลืออยู่ ทำการกรองพาราโกลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาด้วยฟิลเตอร์ฟูลอกเพื่อหยุดปฏิกิริยา ผลติภัณฑ์ของเหลวที่ได้ คือพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน

#### **การตกตะกอนทูลูซัลฟูนิล เบต้าไซโคลเด็กซ์ตริน ด้วยกรดไฮโดรคลอริก**

1. นำพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน มาตกตะกอนด้วยกรด ไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 150 มิลลิลิตร
2. กรองตะกอนพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน
3. ล้างตะกอนพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจนตะกอนของพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินมีสถานะเป็นกลาง โดยตรวจสอบความเป็นกรด-เบสของตะกอนด้วยกระดาษลิตมัส
4. กรองตะกอนพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินจนตะกอนไม่มีน้ำเหลืออยู่
5. นำตะกอนพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตรินไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ชั่งน้ำหนักของพาราโกลูอินซัลโฟนิลไซโคลเด็กซ์ตริน



### สัญลักษณ์

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน;  $D_1$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนขนาดเล็ก;  $D_2$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนขนาดใหญ่

$N$  คือ ความเร็วรอบการปั่นกวน;  $N_1$  คือ ความเร็วรอบการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก;  $N_2$  คือ ความเร็วรอบการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่

$V$  คือ ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์;  $V_1$  คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก;  $V_2$  คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่

$N_p$  คือ ตัวเลขกำลังการปั่นกวน

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว

$P$  คือ กำลังการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์;  $P_1$  คือ กำลังการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก;  $P_2$  คือ กำลังการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่

$\mu$  คือ ความหนืด

$R$  คือ อัตราส่วนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ถึงเล็กและเครื่องปฏิกรณ์ถึงใหญ่

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรพงศ์ เอี่ยมกุลวรพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2531 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนระยองวิทยาคม จากนั้นศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณลาดกระบังในปี 2551 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



