

ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของเอทานอลและบิวทานอลกับกรดลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน  
ชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีติ 20 โดยมีกรแยกน้ำออกอย่างต่อเนื่อง



นางสาวนลินี อุดรพันธ์

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

ESTERIFICATION OF ETHANOL AND BUTANOL WITH LAURIC ACID USING AMBERLYST  
BD20 ION-EXCHANGE RESIN UNDER CONTINUOUS WATER REMOVAL

Miss Nalinee Udornpan



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

ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของเอทานอลและบิวทานอล  
กับกรดลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์  
ลิสต์ บีดี 20 โดยมีการแยกน้ำออกอย่างต่อเนื่อง

โดย

นางสาวนลินี อุดรพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง ปริษานนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.นริศรา ทองบุญชู)

นลินี อุดรพันธ์ : ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของเอทานอลและบิวทานอลกับกรดลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20 โดยมีการแยกน้ำออกอย่างต่อเนื่อง (ESTERIFICATION OF ETHANOL AND BUTANOL WITH LAURIC ACID USING AMBERLYST BD20 ION-EXCHANGE RESIN UNDER CONTINUOUS WATER REMOVAL) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีตี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และการแยกน้ำด้วยวิธีดูดซับ ทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยเพิ่มคอลัมน์ดูดซับด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และใช้ซีโอไลต์ 3เอ เป็นตัวดูดซับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้และไม่พบปฏิกิริยาข้างเคียง แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลได้ดีและการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์และอุณหภูมิทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับสามารถเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลงได้ถึงร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการแยกน้ำและได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดร้อยละ 96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570547321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ESTERIFICATION / ADSORPTION COLUMN / AMBERLYST BD20 / LAURIC ACID

NALINEE UDORN PAN: ESTERIFICATION OF ETHANOL AND BUTANOL WITH LAURIC ACID USING AMBERLYST BD20 ION-EXCHANGE RESIN UNDER CONTINUOUS WATER REMOVAL. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 88 pp.

Esterification reactions of lauric acid with ethanol and butanol using Amberlyst BD20 as a catalyst were investigated. Effects of molar ratio of lauric acid to alcohol, catalyst loading, temperature and water removal by adsorption were studied. Reaction system consists of a batch reactor couple to an adsorption column using zeolite 3A as an adsorbent. The results showed that the esterification reaction of lauric acid with ethanol and butanol were reversible reactions and side reaction was not found in experiments. Amberlyst BD20 ion-exchange resin was an effective catalyst for esterification of lauric acid with both ethanol and butanol, conversion of lauric acid increased with an increase in catalyst loading. The conversion of lauric acid and rate of reaction were increased with increasing of lauric acid to alcohols ratio as well as temperature. Water adsorption column can enhanced the conversion by up to 18% as compared to the system without water removal and the reactions can achieved maximum conversion of 96%.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ การอบรมสั่งสอนทั้งแนวคิดและทฤษฎี การปฏิบัติงานและพัฒนางานวิจัยตลอดจนความช่วยเหลือในทุกด้านจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง ปรีชานนท์ และอาจารย์ ดร.นริศรา ทองบุญชู ที่กรุณาเข้าร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อผิดพลาดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมเคมีที่สนับสนุนทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการโอลิโอเคมีคอลส์ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย ที่ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และเข้าใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification).....	4
2.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	7
2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.4 การแยกน้ำ.....	15
บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการวิจัย.....	19
3.1 การทดลอง.....	19
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 การวิเคราะห์ผล.....	21
3.4 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.5 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อน.....	27

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	28
4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอล .....	29
4.2 ความสามารถในการเร่งปฏิกริยาของแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20.....	33
4.2.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้เรซิน นแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	33
4.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาต่อการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริก กับเอทานอล .....	37
4.2.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาต่อการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริก กับบิวทานอล .....	40
4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดปฏิกริยา.....	42
4.3.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล.....	42
4.3.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล.....	44
4.4 ผลของอุณหภูมิ.....	46
4.4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล.....	46
4.4.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล.....	50
4.5 ผลของการแยกน้ำ.....	53
4.5.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล.....	53
4.5.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล.....	56
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย .....	63
รายการอ้างอิง .....	64
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	74

ภาคผนวก ค..... 78

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 88



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะในการทดลอง.....	20
ตารางที่ 3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	21
ตารางที่ 3.3 แสดงสภาวะของคอลัมน์ .....	21
ตารางที่ 3.4 แสดง Retention time ของสารจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของกรดลอรริก.....	22
ตารางที่ 3.5 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบในสารตั้งต้น .....	22
ตารางที่ 3.6 ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมัน.....	23
ตารางที่ 3.7 แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับ เอทานอล.....	24
ตารางที่ 3.8 แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับ บิวทานอล.....	25
ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบตัวอย่างจากปฏิกิริยาระหว่างกรดลอรริกกับ เอทานอล.....	29
ตารางที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบตัวอย่างจากปฏิกิริยาระหว่างกรดลอรริกกับ บิวทานอล.....	30
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อย ละ 8 โดยน้ำหนัก.....	33
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง- ปฏิกิริยาร้อยละ 0-12 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริก ต่อเอทานอล 1:4 .....	37
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง- ปฏิกิริยาร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 110°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริก ต่อบิวทานอล 1:4 .....	40

ตารางที่ 4.6	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมล ของกรดลอรริกต่อเอทานอล 1:4-1:8 อุณหภูมิ 82°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก.....	42
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4-1:8 อุณหภูมิ 100 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักกรดลอรริก.....	44
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 70 และ 82°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอรริกต่อเอทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 12 %wt .....	46
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอรริกกับเอทานอล .....	48
ตารางที่ 4.10	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก.....	50
ตารางที่ 4.11	แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับบิวทานอล .....	52
ตารางที่ 4.12	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระบบเมื่อมีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอรริกต่อเอทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก .....	53
ตารางที่ 4.13	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอรริกกับเอทานอลแบบไม่มีการแยกน้ำและมีการแยกน้ำ.....	54
ตารางที่ 4.14	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระบบเมื่อมีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก.....	56
ตารางที่ 4.15	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอรริกกับบิวทานอลโดยมีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100°C .....	57
ตารางที่ 4.16	แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักกรดลอรริก .....	58

ตารางที่ 4.17	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของ กรดลอริกกับบิวทานอลโดยมีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 110°C.....	59
ตารางที่ 4.18	แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส.....	60



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน .....	4
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยา.....	19
รูปที่ 3.2 โคจรมาโทแกรมของกรดลอริกกับบิวทานอล .....	22
รูปที่ 3.3 โคจรมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล .....	24
รูปที่ 3.4 โคจรมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล .....	25
รูปที่ 4.1 แสดงโคจรมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับ เอทานอล .....	29
รูปที่ 4.2 แสดงโคจรมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับ บิวทานอล .....	30
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ (อัตราส่วนโดยโมลของ กรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) .....	31
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ (อัตราส่วนโดยโมลของ กรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) .....	31
รูปที่ 4.5 แสดงความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนโดย โมลของ กรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก.....	34
รูปที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริก กับเอทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0-12 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4 .....	38
รูปที่ 4.7 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริก กับบิวทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก (อุณหภูมิ 110°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4).....	41
รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่ อัตราส่วนโดยโมลของ กรดลอริกต่อเอทานอลตั้งแต่ 1:1-1:8 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่ง ปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก.....	43

- รูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของ กรดลอรริกต่อบิวทานอลตั้งแต่ 1:1-1:8 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก..... 45
- รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 และ 82 องศาเซลเซียส..... 47
- รูปที่ 4.11 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก (อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อเอทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) ..... 48
- รูปที่ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อเอทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก..... 51
- รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ..... 52
- รูปที่ 4.14 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก..... 52
- รูปที่ 4.15 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับเอทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ..... 54
- รูปที่ 4.16 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับบิวทานอล (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก)..... 57
- รูปที่ 4.17 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับบิวทานอล อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก..... 59
- รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาไม่มีและมีการแยกน้ำ..... 60
- รูปที่ 4.19 แสดงผลของการแยกน้ำต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก (อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก)..... 60



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แฟตตี้ แอซิด แอลคิล เอสเทอร์ (Fatty acid alkyl ester) เป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ แฟตตี้ แอซิด แอลคิล เอสเทอร์เป็นสารมัธยันตร์ที่สำคัญในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น สารประกอบเอไมด์ สารประกอบซิลิโพน และแฟตตี้แอลกอฮอล์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวทำละลาย สารเติมแต่งในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มการกระจายตัวหรือเพิ่มความอ่อนตัว และมีการใช้งานในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เครื่องสำอางและยางอีกด้วย [1] ผลิตภัณฑ์แอลคิลเอสเทอร์จากกรดไขมันสายโซ่ยาว (คาร์บอนอะตอม 10 ถึง 20 อะตอม) และแอลกอฮอล์สายโซ่สั้น (คาร์บอนอะตอม 2 ถึง 8 อะตอม) มีการใช้งานมากขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง สารซักล้างและสารหล่อลื่น เป็นต้น [2] ตัวอย่างเช่น

- ใช้เป็นสารเติมแต่งกลิ่นหรือรส เช่น เอทิลลอเรต (Ethyl laurate) บิวทิลลอเรต (Butyl laurate) และเอทิลปาล์มมิเตต (Ethyl palmitate) เป็นต้น
- ใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมยา เช่น เอทิลลอเรต เป็นต้น
- ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น บิวทิลปาล์มมิเตต (Butyl palmitate) และเอทิลปาล์มมิเตต เป็นต้น
- ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพลาสติก เช่น บิวทิลปาล์มมิเตต เอทิลสเตียเรต (Ethyl stearate) และ บิวทิลลอเรต เป็นต้น
- ใช้เป็นสารกันน้ำในเครื่องสำอาง เช่น บิวทิลโอเลเอต (Butyl oleate) เป็นต้น

โดยทั่วไปสารประกอบแอลคิลเอสเทอร์สามารถผลิตได้จาก 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Tranesterification) โดยใช้ไขมันพืชเป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันผสมที่มีอยู่ในน้ำมันพืชชนิดนั้นๆ และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) โดยใช้กรดไขมันเป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเฉพาะเจาะจงมากกว่า

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาที่ใช้สารประกอบกรดคาร์บอกซิลิกและสารประกอบแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแอลคิลเอสเทอร์และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำและเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic esterification reaction) จึงต้องทำที่อุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้เกิด

การแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนของแอลกอฮอล์และเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่การใช้สภาวะการดำเนินงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงจะต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ทนแรงดันและต้องใช้พลังงานสูง ดังนั้นจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ในสภาวะการดำเนินงานที่ต่ำลง

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ที่ใช้ทั่วไป คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด เช่น กรดซัลฟิวริก เป็นต้น ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีและให้ร้อยละผลได้ที่สูง แต่มีข้อเสีย คือ มีฤทธิ์กัดกร่อน ต้องมีกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์และไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ จึงมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์แทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ซึ่งไม่กัดกร่อน แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกด้วย

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นมีหลายชนิด ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ชนิดที่มีความเป็นกรดนิยมนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resin) ซีโอไลต์ (Zeolite) และตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดที่มีความเป็นกรดสูง (Solid superacids) เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันและมีข้อดีข้อเสียในแต่ละปฏิกิริยาแตกต่างกันอีกด้วย เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันได้ดีเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำโดยจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้สภาวะการดำเนินงานหนึ่งๆ ปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลซึ่งความเข้มข้นของสารในระบบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงทำให้มีสารตั้งต้นเหลืออยู่ในระบบและได้ผลิตภัณฑ์น้อย การเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาเป็นวิธีที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการรบกวนระบบเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ตามหลักของเลอชาเตอลิเย (Le Chatelier's principle) เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดในเฟสของเหลว ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อการเลื่อนของสมดุลของปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร [3] การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเพื่อเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้สารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งมากเกินไป โดยจะนิยมใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายแต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้สารตั้งต้นปริมาณมากทำให้ต้นทุนสูง ต้องการเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เพื่อผลิตครั้งละมากๆ และต้องมีหน่วยแยกสารเพื่อนำเอาแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ ส่วนอีกวิธีหนึ่งในการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารคือ การแยกผลิตภัณฑ์ออกขณะเกิดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่สามารถแยกออกได้ง่ายคือ น้ำ การแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาจะช่วยผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และช่วยลดปริมาณสารตั้งต้นที่ต้อง

ใช้มากเกินไปเพื่อผลึกปฏิกิริยาไปข้างหน้า แต่มีข้อเสียคือจะต้องเพิ่มระบบในการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริก (Lauric acid) โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องด้วยคอลัมน์ดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแอลคิลเอสเทอร์ ได้แก่ ชนิดของแอลกอฮอล์ อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และการแยกน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบที่มีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำ
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น และชนิดของแอลกอฮอล์ต่อผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกภายใต้ระบบการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่อการเกิดปฏิกิริยา
  - 2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:8
  - 2.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
    - ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล : 70 และ 82 องศาเซลเซียส
    - ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล : 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส
  - 2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก
3. ศึกษาผลของการแยกน้ำโดยใช้คอลัมน์ดูดซับต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอล

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถบอกผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบแยกน้ำออกอย่างต่อเนื่องด้วยคอลัมน์ดูดซับ
2. สามารถบอกความสามารถในการนำระบบการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาด้วยคอลัมน์ดูดซับไปใช้กับการผลิตแพตตี้ แอสิด แอลคิลเอสเทอร์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

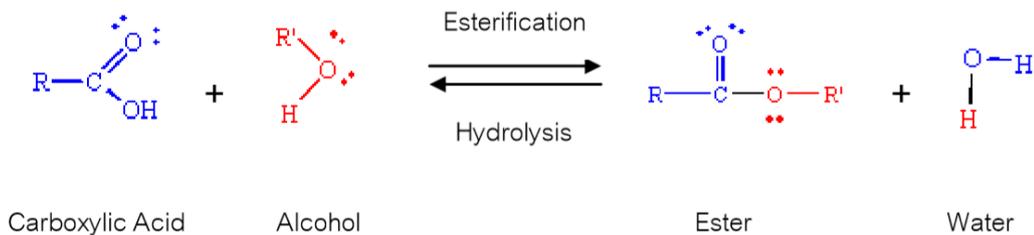
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่ง-ปฏิกิริยาแต่ละชนิด ผลของตัวแปรต่างๆต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแพตตีแอซิดแอลคิลเอสเทอร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยา

#### 2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification)

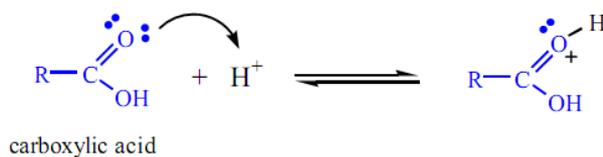
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบกรดคาร์บอกซิลิกกับสารประกอบแอลกอฮอล์ เกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ซึ่งปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส สมการเคมีแสดงดังรูปที่ 2.1



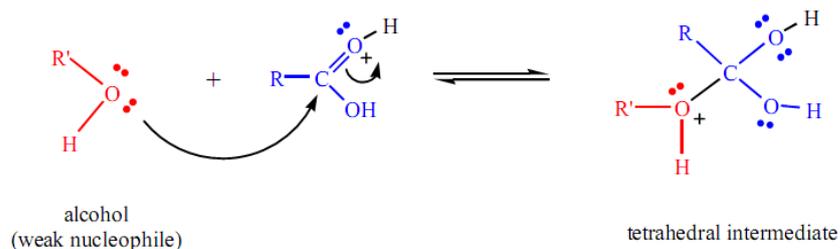
รูปที่ 2.1 แสดงสมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

#### 2.1.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน [4] ดังนี้

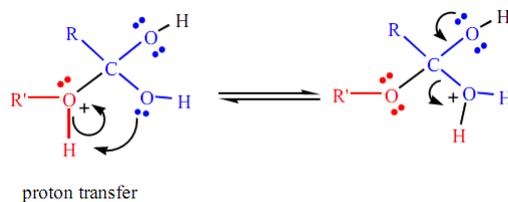
**ขั้นตอนที่ 1** กรดคาร์บอกซิลิกได้รับโปรตอนที่หมู่คาร์บอนิล (Protonation)



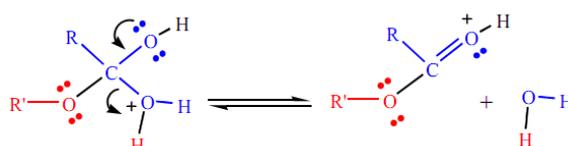
**ขั้นตอนที่ 2** แอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยาที่หมู่คาร์บอนิล เกิดเป็นสารมัธยันต์



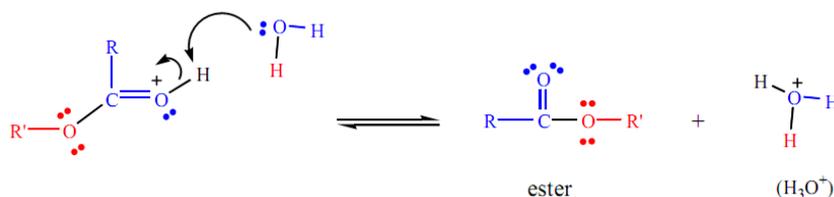
ขั้นตอนที่ 3 เกิดการเปลี่ยนถ่ายโปรตอน (Proton transfer)



ขั้นตอนที่ 4 การเกิดน้ำ (Water leaves)



ขั้นตอนที่ 5 ปล่อยโปรตอนออกจากโมเลกุล (Deprotonation) เกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์



### 2.1.2 ปฏิกิริยาผันกลับได้

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในสภาวะหนึ่งๆ ปฏิกิริยาจึงไม่เกิดอย่างสมบูรณ์แต่จะเข้าสู่สมดุล ที่สภาวะสมดุลอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารต่างๆที่สภาวะสมดุลเรียกว่า ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constants) ในทางทฤษฎีปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเมื่อดุลสมการเคมีแล้ว สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลได้จากสมการ (2.1)

$$K = \frac{[\text{ester}][\text{water}]}{[\text{carboxylic acid}][\text{alcohol}]} \quad (2.1)$$

ถ้าค่าคงที่สมดุลมีค่ามากแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลมีค่ามาก และในทำนองเดียวกันถ้าค่าคงที่สมดุลมีค่าน้อยแสดงว่าปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาไปข้างหน้า ค่าคงที่สมดุลจะขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน แต่ความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลแต่ละการทดลองอาจจะไม่เท่ากัน [5] ตัวแปรที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาในเฟสของเหลว คือ

1. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.2)



อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า} \quad -r_A = k_1 C_A^a C_B^b \quad (2.3)$$

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ} \quad r_A = k_{-1} C_C^c C_D^d \quad (2.4)$$

เมื่อ  $C_A$  คือ ความเข้มข้นของกรดไขมัน

$C_B$  คือ ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์

$C_C$  คือ ความเข้มข้นของแอลคิลเอสเทอร์

$C_D$  คือ ความเข้มข้นของน้ำ

$k_1$  คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า (Forward reaction rate constant)

$k_{-1}$  คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reverse reaction rate constant)

a คือ อันดับปฏิกิริยาของกรดไขมัน

b คือ อันดับปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์

c คือ อันดับปฏิกิริยาของแอลคิลเอสเทอร์

d คือ อันดับปฏิกิริยาของน้ำ

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสาร จากสมการที่ (2.2) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะทำให้อัตราการเกิดไปข้างหน้ามีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลจะเพิ่มขึ้นหรือมีสารตั้งต้นเหลือน้อยลง เช่นเดียวกับกับสมการที่ (2.3) เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับลดลง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สภาวะสมดุลจะลดลงหรือมีผลิตภัณฑ์เหลือมากขึ้น

2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีผลต่อค่าคงที่ปฏิกิริยา (reaction rate constant) ที่สภาวะสมดุลอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$k_1 C_A^a C_B^b = k_{-1} C_C^c C_D^d \quad (2.4)$$

$$\frac{k_1}{k_{-1}} = \frac{C_C^c C_D^d}{C_A^a C_B^b} \quad (2.5)$$

สมมุติให้เป็นปฏิกิริยามูลฐาน ฝั่งซ้ายของสมการ (2.5) จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่สมดุล ดังนั้นจะได้ว่า

$$K = \frac{k_1}{k_{-1}} \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลกับอุณหภูมิได้ จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงสมการที่ (2.7)

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.7)$$

ความสัมพันธ์ในสมการ (2.7) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy :  $E_a$ ) ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับจะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นค่า  $k_1$  และ  $k_{-1}$  จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ต่างกันซึ่งนอกจากจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้ต่างกันแล้วยังทำให้ค่าคงที่สมดุลมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอีกด้วย สำหรับปฏิกิริยาคายความร้อนค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาย้อนกลับจะมีค่ามากกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า ดังนั้นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาคายความร้อนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดูดความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินอกจากจะทำให้ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารเปลี่ยนไปแล้วยังทำให้ค่าคงที่สมดุลเปลี่ยนไปด้วย [5]

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองแต่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

## 2.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พรศิริ เพิ่มทรัพย์ [6] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่ง-ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเมทานอล การทดลองทำที่อุณหภูมิ 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเมทานอลตั้งแต่ 1:1 ถึง 1:10 และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 800 ถึง 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความดันตั้งแต่ 800 ไปจนถึง 1,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นและดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเมทานอลตั้งแต่ 1:5 ขึ้นไป จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตติยา กำแพงเดชพล [7] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริก และกรดสเตียริกกับเอทานอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเอทานอล 1:1 ถึง 1:10 และความดัน 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเอทานอลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเอทานอลมากกว่า 1:2.5 พบว่าไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงซึ่งจะต้องใช้พลังงานมากและเครื่องปฏิกรณ์ต้องทนความดันสูงได้ ส่งผลให้มีต้นทุนและค่าดำเนินการที่สูง ดังนั้นจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ในสภาวะการดำเนินงานที่ต่ำลง

## 2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการศึกษาเพื่อให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันสามารถเกิดได้ในสภาวะการดำเนินงานที่ต่ำกว่าการทำปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์

### 2.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ชนิดกรด

Sirinart Chongkhong และคณะ [8] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 70 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลตั้งแต่ 1:0.4 ถึง 1:12 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 5.502 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:5.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.834 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์คิดเป็นร้อยละ 98

งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ชนิดกรด คือ กรดซัลฟิวริกมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันได้ดี แต่มีข้อเสียคือ แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์บางชนิดที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง และก่อให้เกิดของเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดซึ่งจะต้องมีระบบในการบำบัดและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

### 2.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ชนิดกรด

Kriska C.E. และ Modra D. [9] ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารประกอบพทาเลตสำหรับเครื่องสำอางโดยเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (Para-toluenesulfonic acid) และทินคลอไรด์ ( $SnCl_2$ ) กับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Amberlyst-15) สารตั้งต้นคือพทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) กับบิวทานอล ทดลองที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์ต่อบิวทานอล 1:1 ถึง 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.3 โดยโมลสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ และร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ผลการทดลองพบว่ากรดพาราโทลูอินซัลโฟนิกและแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์กับบิวทานอลได้ดีที่สุด โดยสภาวะการทดลองที่เหมาะสมเมื่อใช้กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์ต่อบิวทานอล 1:2.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.3 โดยโมล ของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ให้ผลได้ร้อยละ 96.1 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้แอมเบอร์ลิสต์-15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์ต่อบิวทานอล 1:2.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของกรดพทาสิกแอนไฮไดรด์ ให้ผลได้ร้อยละ 98.4

Brahmkhatri V. และ Patel A. [10] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลโดยใช้ 12 ทังสเดนฟอสฟอริกบนตัวรองรับเอ็มซีเอ็ม-41 ( $H_3PW_{12}O_{40}$  supported on MCM-41) การทดลองทำที่อุณหภูมิ 70 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:1 ถึง 1:3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 75 ถึง 225 มิลลิกรัม ผลการทดลองพบว่าได้ร้อยละผลได้ของบิวทิลลอเรต (Butyl laurate) สูงสุดร้อยละ 95 และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ 4 ครั้ง

Thijs A. Peter และคณะ [11] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับบิวทานอลโดยเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ 3 ชนิด คือ 1.) เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 15 (Amberlyst 15) และสโมเพค 101 (Smopex-101) 2.) ซีโอไลต์ชนิดกรด (Acid zeolite) ได้แก่ เอช-แซตเอสเอ็ม-5 (H-ZSM-5) เอช-เอ็มโออาร์ (H-MOR) เอช-บีอีทีเอ (H-BETA) และเอช-ยูเอสวาย (H-USY) 3.) ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดที่มีความเป็นกรดสูง (Solid superacid) ได้แก่ ซัลเฟตเซอร์โคเนีย (Sulphated zirconia) และไนโอเบียมแอซิด (Niobium acid) การทดลองทำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อบิวทานอลเท่ากับ 1:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเทียบกับปริมาณกรด (Acid content) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดโดยกำหนดให้ทุกการทดลองมีปริมาณกรดในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ผลการทดลอง

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักตัวเร่ง-ปฏิกิริยาสูงที่สุด โดยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดสามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Smopex-101 > Amberlyst15 > sulphated  $ZrO_2$  > H-USY-20 > H-BETA-12.5 > H-MOR-45 >  $Nb_2O_5$  > H-ZSM-5-12.5 และพบว่าซีโอไลต์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ต่ำที่สุด เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดรูพรุนที่เล็กมากทำให้จำกัดการแพร่ของสารเข้าไปยังบริเวณที่มีความเป็นกรด (Acid site) ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

Ganapati D. Yadav และ M. S. M. Mujeebur Rahuman [12] ศึกษาการสังเคราะห์พทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate ester) โดยใช้พทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) ทำปฏิกิริยากับเมทานอลและเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ 1.) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดดินเหนียว (Clay) ที่ผ่านการเติมกรดได้แก่ เค-10 (K-10) และฟิลโทรล-24 (Filtrol-24) 2.) เรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์-15 แอมเบอร์ลิสต์-36 ดีโลแซน (Deloxane) และอินเดียน-130 (Indion-130) การทดลองทำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของพทาสิกแอนไฮไดรด์ต่อเมทานอลเท่ากับ 1:25 และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 2.0213 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดดินเหนียว โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion capacity) มากจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี สามารถเรียงลำดับความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Amberlyst-36 > Amberlyst-15 > Indion-130 > Deloxane > Filtrol24 > K-10

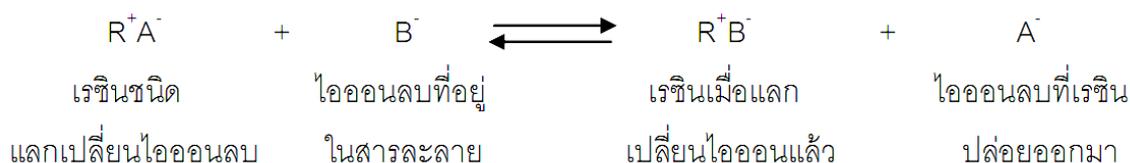
งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้ดี และสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของสารประกอบกรดคาร์บอกซิลิกกับสารประกอบแอลกอฮอล์ได้หลายชนิด จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมัน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายและมีการเติมหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เข้าไปจับกับโครงข่ายของพอลิเมอร์ โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งตามชนิดของไอออนได้ 2 ชนิด คือ [13]

1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) เป็นเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก เช่น  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  เป็นต้น เรซินชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวกที่อยู่ในสารละลายสามารถแสดงปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังนี้



2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin) เป็นเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ เช่น  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  เป็นต้น เรซินชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบที่อยู่ในสารละลายสามารถแสดงปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังนี้



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนยังสามารถแบ่งได้ตามหมู่ฟังก์ชันได้ 4 ชนิด ดังนี้

1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ (Strongly acidic cation exchange resins) คือ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดแก่ เช่น ซัลโฟนิก ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) ฟอสโฟนิก ( $-\text{H}_2\text{PO}_4$ ) ติดกับพอลิเมอร์ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะหลุดออกจากเฟสของแข็งและเข้าไปในเฟสของเหลว ในขณะที่ไอออนบวกที่อยู่ในเฟสของเหลวจะเข้ามาเกาะอยู่กับเฟสของแข็ง เรซินชนิดนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงนิยมใช้ลดความกระด้างของน้ำและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด เช่น Amberlyst 15 Amberlyst BD20 Duolite C-26 Lewatit K2629 และ Dowex DR-2030 เป็นต้น

2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบกรดอ่อน (Weakly acidic cation exchange resins) คือ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดอ่อน เช่น คาร์บอกซิล ( $-\text{COOH}$ ) ติดอยู่กับพอลิเมอร์ ใช้ในการลดความเป็นเบสในสารละลาย เรซินชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนเพราะความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำกว่าเรซินไอออนบวกแบบกรดแก่ เช่น Amberlite IRC-50 Amberlite IRP-64 และ Dowex CCR-3 เป็นต้น

3. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสแก่ (Strongly basic anion exchange resins) คือ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสแก่ เช่น ควอเตอร์นารี แอมโมเนียม ( $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{OH}^-$ ) ใช้ในการแยกไอออนลบในสารละลาย เช่น Amberlyst A26 Amberlite 4200 และ Dowex MSA-1 เป็นต้น

4. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสอ่อน (Weakly basic anion exchange resins) คือ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสอ่อน เช่น เอมีน ( $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ ) มักใช้หลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเพื่อแยกคลอไรด์ ซัลเฟต และไอออนลบอื่นๆ เช่น Dowex WGR-2 Amberlite IRA-67 และ Doulite A-7 เป็นต้น

## งานวิจัยที่ศึกษาการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน

Alime และคณะ [2] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันของกรดอะซิติกกับไอโซบิวทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โดเวค 50 ดับเบิลยู<sub>2</sub> (Dowex 50 Wx<sub>2</sub>) และแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 (Amberlite IR-120) การทดลองทำที่อุณหภูมิ 65 ถึง 75 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อไอโซบิวทานอลเท่ากับ 1:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 15 กรัมต่อลิตร (ร้อยละ 1.25 และ 3.75 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก) ผลการทดลองพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งสองชนิดมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันของกรดอะซิติกกับไอโซบิวทานอล โดยโดเวค 50 ดับเบิลยู<sub>2</sub> มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้สูงกว่าแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 เพราะโดเวค 50 ดับเบิลยู<sub>2</sub> มีปริมาณไอออนแลกเปลี่ยนทั้งหมด (Total ion exchange capacity) พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์-120 การเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นเพิ่มขึ้น

M.M. Rahman Talukder และคณะ [14] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์ม (Plam fatty acid distillate : PFAD) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์เพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตไบโอดีเซลแทนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ที่ใช้ในการศึกษา คือ โนวอไซม์-435 (Novozym-435) ซึ่งเป็นเอนไซม์ไลเปส บี (Lipase B) และแอมเบอร์ลิสต์-15 การทดลองทำที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 15 ถึง 30 โดยน้ำหนักของกรดไขมัน ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันของกรดไขมันปาล์มกับเมทานอลได้ดี และให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 96 และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่า 15 ครั้ง โดยที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไม่เปลี่ยนแปลง การเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

Amelia Q. Yaakob และ Subhash Bhatia [15] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันของกรดปาล์มเมติกกับเมทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) คือ แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 70 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มเมติกต่อเมทานอล 1:4 ถึง 1:10 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0 ถึง 10 กรัมต่อลิตร (ร้อยละ 0 ถึง 2 โดยน้ำหนักของกรดไขมัน) ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มเมติกต่อเมทานอลและการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มเมติก

กับเมทานอลได้ดี แม้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ชนิดกรด เช่น กรดซัลฟิวริกจะมีราคาถูกกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แต่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และสามารถแยกออกได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน

Yuwang Jiang และคณะ [16] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเนตไอออนบวก (Sulfonated cation exchange resin) การทดลองทำที่อุณหภูมิ 40 ถึง 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกกับเอทานอล 1:1 ถึง 1:15 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 5 ถึง 30 กรัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเนตไอออนบวกซึ่งเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่่นั้นสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอลเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:9 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 93

Park Ji-Yeon Kim Deog-Keun และ Lee Jin-Suk [17] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระโดยเปรียบเทียบผลของน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อ ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ แอมเบอร์ลิสต์-15 และแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 สารตั้งต้นเป็นน้ำมันถั่วเหลืองผสมกับกรดโอเลอิกที่ 3 ความเข้มข้น คือ ร้อยละ 2.5 50 และ 99.8 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยากับเมทานอลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1:6 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีในสารตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง และเมื่อนำมาใช้ซ้ำพบว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไม่ลดลง เนื่องจากแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุนจึงไม่เกิดการดูดซับของน้ำบนบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนจึงทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไม่ลดลงเหมือนกรณีของแอมเบอร์ลิสต์ 15

ชิตธวัช วิทยากุล [13] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก คือ แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:1 ถึง 1:12 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 80 กรัม (ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักกรดไขมัน) ผลการทดลองพบว่าแอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มได้ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างน้อย 4 ครั้ง การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลตั้งแต่ 1:9 ขึ้นไป จะไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ โดยแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ที่ผลิตมาเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลเหมาะสำหรับการใช้กับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระผสมอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง 100 แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันได้ดี สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส และมีอายุการใช้งานนาน [18] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษางานวิจัยที่ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

1. อุณหภูมิ : ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา คือ 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยขอบเขตของอุณหภูมิที่ศึกษาขึ้นกับอุณหภูมิสูงสุดที่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถใช้งานได้ และจุดเดือดของสารเนื่องจากการทดลองที่ความดันบรรยากาศ โดยงานวิจัยนี้ใช้แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 120 องศาเซลเซียส

2. อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ : ช่วงที่มีการศึกษา คือ 1:1 ถึง 1:15 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและค่าร้อยละผลได้ที่สมดุลเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากกว่า 1:9 จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ตั้งแต่ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8

3. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา : ช่วงที่มีการศึกษา คือ ร้อยละ 1.25 ถึง 20 โดยน้ำหนักของกรดไขมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 2 4 8 10 และ 12 โดยน้ำหนักของกรดไขมัน

## 2.4 การแยกน้ำ

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้สภาวะหนึ่งๆ ระบบจะเข้าสู่สมดุล โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในระบบมีค่าคงที่จึงมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ในระบบเสมอ การเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการรบกวนระบบให้เข้าสู่สมดุลใหม่ตามหลักของเลอชาเตอริเย โดยการเปลี่ยนแปลงความดัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในระบบ

ในงานวิจัยนี้ปฏิกิริยาที่ศึกษาเกิดในเฟสของเหลว ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางปฏิกิริยาดูดความร้อน ส่วนการลดอุณหภูมิสมดุลจะเลื่อนไปทางปฏิกิริยาคายความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมียังมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเพื่อผลึกให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นและการลดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นนิยมใช้สารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งมากเกินไปให้สารตั้งต้นอีกตัวทำปฏิกิริยาหมด โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันนิยมใช้แอลกอฮอล์มากเกินไป ส่วนการลดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยการแยกผลิตภัณฑ์ออกขณะเกิดปฏิกิริยา การแยกน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของปฏิกิริยาเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

### งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับการแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

งานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถสรุปได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

#### 1. วิธีการดูดซับ (Adsorption)

Joao Felipe G. และคณะ [19] ศึกษาผลของการแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยวิธีการดูดซับในการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันมะพร้าว (ประกอบด้วยกรดไขมัน 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ทำปฏิกิริยากับเมทานอลและใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ คือ 1:3 และ 1:9 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แยกน้ำโดยใช้คอลัมน์ดูดซับต่อเข้าที่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และใช้ซีโอไลต์ 3เอ (Zeolite 3A) เป็นตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อระบบมีการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ และใช้อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการแยก

น้ำ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบการนำเอทานอลมาใช้แทนเมทานอล พบว่าเมื่อระบบมีการแยกน้ำการใช้แอลกอฮอล์ 2 ชนิดนี้ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ค่าใกล้เคียงกัน

Izabelly L. Lucena และคณะ [20] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอลภายใต้สภาวะที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ใช้คอลัมน์ดูดซับในการแยกน้ำและใช้ซีโอไลต์ 3เอ เป็นตัวดูดซับ ในการทดลองนี้ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อุณหภูมิ 90 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอล คือ 1:3 และ 1:9 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 และร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าเมื่อระบบมีการแยกน้ำร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 90.9 ถึง ร้อยละ 99.9 หลังจากเกิดปฏิกิริยาไป 60 นาที ระบบการแยกน้ำด้วยวิธีดูดซับสามารถเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาไปทางที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น โดยสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:3 เมื่อมีการแยกน้ำทำให้ใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอลน้อยกว่าอัตราส่วนที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไป

### 2. การซึมผ่านเมมเบรน (Pervaporation)

Ajit P. Rathod และคณะ [21] ศึกษาการเพิ่มผลได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดแลคติกกับไอโซโพรพานอล โดยการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาด้วยการซึมผ่านเมมเบรนของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกปั๊มผ่านเมมเบรนเพื่อแยกน้ำแล้วเวียนกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การทดลองเปรียบเทียบระหว่างการทำปฏิกิริยาแบบมีการแยกน้ำด้วยเมมเบรนและแบบไม่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นเท่ากับ 1:1 ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้วัสดุผสมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (Polyvinyl alcohol-polyether sulfone) เป็นเมมเบรน ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำด้วยเมมเบรนได้ค่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 86 ส่วนปฏิกิริยาที่ไม่มีการแยกน้ำพบว่าได้ค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 51 แสดงให้เห็นว่าการแยกน้ำช่วยเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

### 3. การแยกสารพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยา (Reactive stripping)

A.E.W. Beers และคณะ [22] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดเฮกซะโนอิก (Hexanoic acid) กับออกทานอล (Octanol) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโครงสร้างที่เคลือบด้วยซีโอไลต์ บีอีเอ (Zeolite BEA) และวัสดุผสมของเนฟฟิออนกับซิลิกา (Nafion/Silica composite) โดยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งทำปฏิกิริยาโดยของเหลวไหลลงมาทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และมีแก๊สไนโตรเจนไหลสวนทางจาก

ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อแยกน้ำที่กลายเป็นไอออกไปทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ การทดลองทำที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นเท่ากับ 1:1 ผลการทดลองพบว่าเมื่อทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการแยกน้ำจะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 100 ขณะที่การทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ไม่มีการแยกน้ำได้ค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 40 แสดงให้เห็นว่าการแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาสามารถเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์

การแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 วิธี สามารถเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น แต่วิธีการแยกน้ำโดยการดูดซับเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและไม่ต้องเปลี่ยนแปลงเครื่องปฏิกรณ์เดิมมากนัก เพียงแค่เพิ่มคอลัมน์ดูดซับเข้าไปที่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อแยกน้ำ นอกจากนี้วิธีการดูดซับยังเป็นวิธีที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอลในกระบวนการทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ในอุตสาหกรรม โดยตัวดูดซับที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ คือ ซีโอไลต์ 3เอ เพราะมีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับขนาดโมเลกุลของน้ำ

E. Lalik และคณะ [23] ศึกษาการดูดซับน้ำและเอทานอลในซีโอไลต์ 3เอ และ 5เอ โดยใช้เครื่องไมโครสคาล เอฟเอ็มซี (Microscal FMC) โดยน้ำและเอทานอลจะถูกแก๊สฮีเลียมพาไหลผ่านคอลัมน์ที่มีตัวดูดซับอยู่ การทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 95 ถึง 108 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเอทานอลถูกดูดซับในซีโอไลต์ 3เอ น้อยมากเมื่อเทียบกับในซีโอไลต์ 5เอ ความสามารถในการดูดซับน้ำของซีโอไลต์ 3เอ ที่อุณหภูมิห้องใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิสูง ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำของซีโอไลต์ 5เอ ที่อุณหภูมิห้องดีกว่าที่อุณหภูมิสูง และซีโอไลต์ 3เอ สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าซีโอไลต์ 5เอ

งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ 3เอ มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแยกน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในเฟสแก๊ส โดยการใช้คอลัมน์ดูดซับซึ่งเป็นการดูดซับที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการแยกน้ำโดยวิธีการดูดซับและใช้ซีโอไลต์ 3เอ เป็นตัวดูดซับ

ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีการแยกน้ำโดยใช้คอลัมน์ดูดซับจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

1. อุณหภูมิ : ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา คือ 90 ถึง 110 องศาเซลเซียส เมื่อระบบมีการแยกน้ำจะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากกว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำในทุกอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิมากกว่าจุดเดือดของน้ำจะทำให้การแยกน้ำออกเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมียังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและสามารถเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้การแยกน้ำในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลจะศึกษาอุณหภูมิที่จุดเดือดและสูงกว่าจุดเดือด

ของน้ำ คือ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ส่วนปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล ทดลองที่จุดเดือดของของผสมที่ความดันบรรยากาศ คือ 82 องศาเซลเซียส

2. อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ : ช่วงที่มีการศึกษา คือ 1:3 ถึง 1:9 จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นในระบบที่มีการแยกน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ที่ 1:4 โดยระบบมีการแยกน้ำ

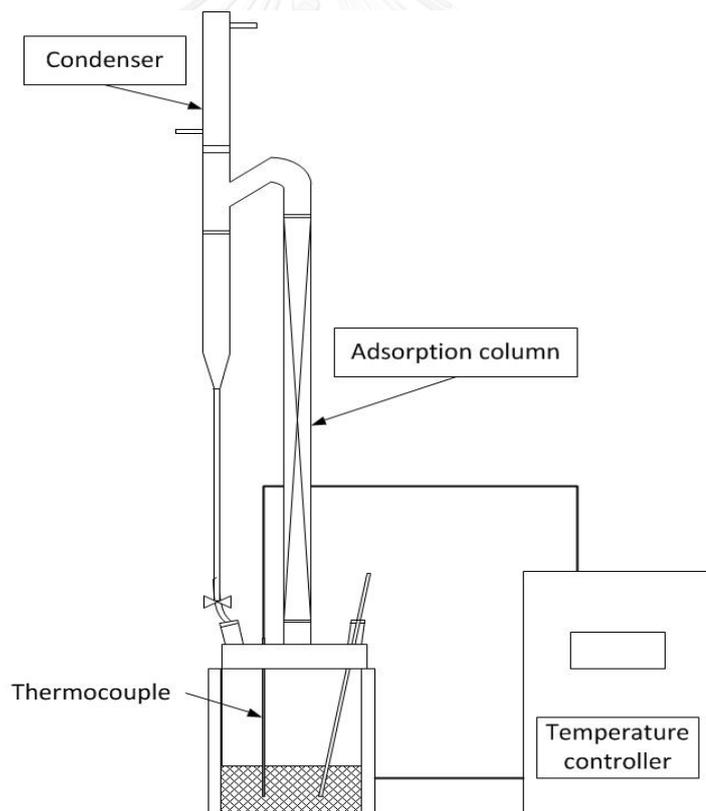
3. ชนิดของแอลกอฮอล์ ในงานวิจัยข้างต้นมีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้เมทานอลและเอทานอล ในระบบที่มีการแยกน้ำแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดให้ผลไม่แตกต่างกัน เพราะอุณหภูมิที่ศึกษาสูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิด แอลกอฮอล์อาจทำหน้าที่เป็นตัวพาน้ำเข้าไปยังคอลัมน์ดูดซับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบชนิดของแอลกอฮอล์ที่มีจุดเดือดต่ำและสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ คือ เอทานอล และบิวทานอล

แอลกอฮอล์	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
เอทานอล	78
บิวทานอล	117

### บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการวิจัย

#### 3.1 การทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีความจุขนาด 1 ลิตร โดยปริมาตรในการทดลอง คือ 400 มิลลิลิตร บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกร้าภายในเครื่องปฏิกรณ์ ใช้แท่งแม่เหล็กในการปั่นกววน วัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และมีชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ในการควบคุมอุณหภูมิ ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อด้วยคอลัมน์ดูดซับ และมีคอนเดนเซอร์ควบแน่นไอที่ผ่านคอลัมน์ดูดซับกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ในการทดลองที่มีการแยกน้ำในคอลัมน์จะใส่ซีโอไลต์ 3เอ ส่วนการทดลองที่ไม่มีการแยกน้ำจะใส่ลูกแก้ว (Glass bead) ในคอลัมน์



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยา

### การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้

1. แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 ถูกล้างด้วยแอลกอฮอล์ที่จะใช้ในการทดลองเพื่อล้างสิ่งสกปรกและน้ำออก จนแอลกอฮอล์ที่ล้างมีลักษณะใสและค่า pH คงที่
2. แช่แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 ที่ล้างแล้วไว้ในแอลกอฮอล์ก่อนใช้ทดลอง

### การเตรียมตัวดูดซับก่อนใช้

ซีโอไลต์ 3เอ ใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกน้ำ มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0-5.0 มิลลิเมตร ปริมาณ 200 กรัม ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับก่อนการใช้งานมีดังนี้

1. อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 120 องศาเซลเซียส
4. แล้วเก็บไว้ในขวดดูดความชื้น

### ขั้นตอนการทดลอง

1. บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลงในตะกร้าอะลูมิเนียม แล้วนำไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
2. บรรจุซีโอไลต์ 3เอ (ในการทดลองที่มีการแยกน้ำ) หรือลูกแก้ว (ในการทดลองที่ไม่มีการแยกน้ำ) ลงในคอลัมน์ดูดซับ
3. ใส่กรดลอริกลงในเครื่องปฏิกรณ์
4. ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
5. ใส่แอลกอฮอล์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วเริ่มจับเวลา
6. เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 ถึง 600 นาที ตัวอย่างละ 2 มิลลิลิตร
7. วิเคราะห์สารตัวอย่าง

### ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะในการทดลอง

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	
สารตั้งต้น	: กรดลอริก เอทานอลและบิวทานอล
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล	: 70 และ 82
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล	: 80 100 และ 110
อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์	: 1:1 1:2 1:4 และ 1:8
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดลอริก)	: 0 2 4 8 10 และ 12

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ที่ได้มาจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสาร	ผู้ผลิต/ผู้ขาย	เกรด/ความบริสุทธิ์
Lauric Acid	White Group Public Co.,Ltd	98%
Ethanol	Lab Scan	99.9%
Butanol	S.R. lab	99.9%
Iso-propanol	S.R. lab	industrial
Heptane	Qrec	analytical reagent
Methyl Decanoate	Aldrich	analytical reagent
Amberlyst BD20	Dow chemical	industrial
Zeolite 3A	Nicho	industrial

### 3.3 การวิเคราะห์ผล

#### 3.3.1 การวิเคราะห์สารตั้งต้น (กรดลอริก)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น 3800 คอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบคาปิลารีรุ่น Innowax m20 ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นแบบเฟรมไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector, FID) โดยสถานะคอลัมน์ในการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแสดงในตารางที่ 3.3 เนื่องจากกรดลอริกเป็นของแข็งจึงผสมในบิวทานอลก่อนนำไปวิเคราะห์ในอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.2

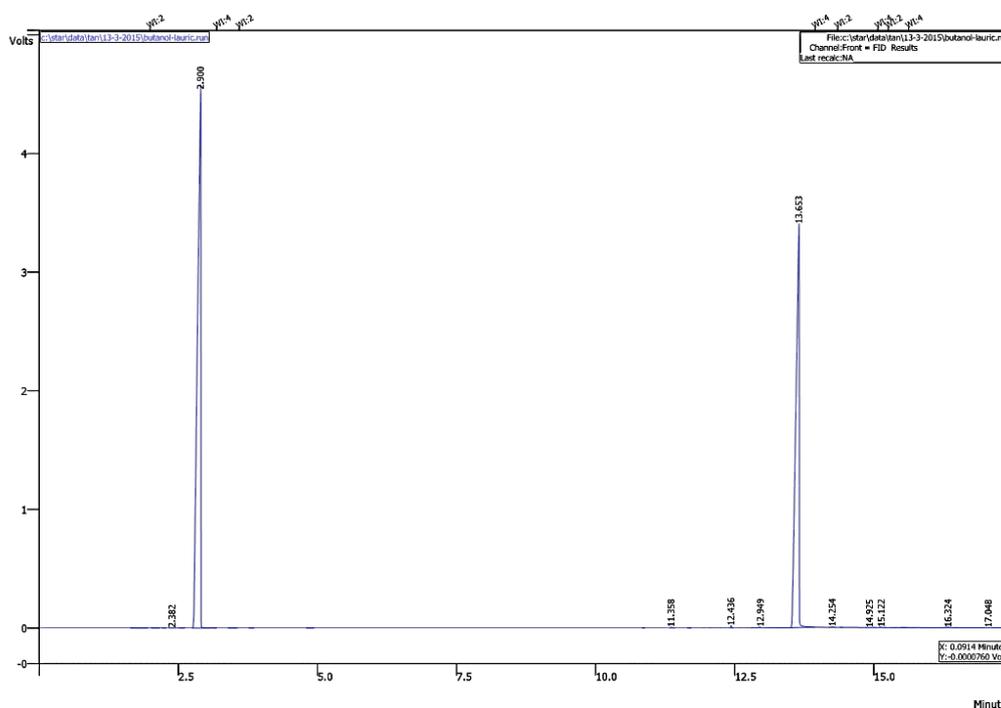
ตารางที่ 3.3 แสดงสถานะของคอลัมน์

สถานะของคอลัมน์	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	80
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิเริ่มต้น (นาที)	5
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 230 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	20
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	230
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	5
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	250
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดลอริกแสดงในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.2 พบว่าพื้นที่พีคของกรดลอริกกับบิวทานอลคิดเป็นร้อยละ 99.7 ของพื้นที่ทั้งหมด และพบสารอื่นเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.4 แสดง Retention time ของสารจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดลอริก

ตำแหน่งของสาร	Retention time (นาที)	พื้นที่พีค/พื้นที่ทั้งหมด
บิวทานอล	2.81	57.1%
กรดลอริก	13.55	42.6%
สารอื่น	-	0.3%



รูปที่ 3.2 โครมาโทแกรมของกรดลอริกกับบิวทานอล

ตารางที่ 3.5 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบในสารตั้งต้น

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
กรดลอริก C12:0	99.8
อื่นๆ	0.2

กรดลอริกที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 200.3 กรัม/โมล และมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง

### 3.3.2 วิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมัน

ตัวอย่างที่เก็บ ณ เวลาต่างๆ จะนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันด้วยวิธีการไทเทรตตามวิธีการมาตรฐาน Ca 5a-40 โดยการไทเทรตเริ่มต้นจากการคาดการณ์ปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่าง ปริมาณสารเคมีที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แสดงในตารางที่ 3.6 ใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนร้อยละ 1 โดยมวล ในไอโซโพรพานอลเป็นอินดิเคเตอร์

#### วิธีการไทเทรต

1. เตรียมสารตัวอย่างให้มีปริมาณตามที่แสดงในตารางที่ 3.6 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมไอโซโพรพานอลในปริมาณที่แสดงในตารางลงในตัวอย่าง
3. ไทเทรตตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยในการหยดสารแต่ละหยดจะต้องเขย่าและสังเกตว่าสีชมพูของฟีนอล์ฟทาลีน ยังคงอยู่หลังจากหยุดไปแล้ว 30 วินาที

**ตารางที่ 3.6** ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมัน

กรดไขมันอิสระ (%)	สารตัวอย่าง (g)	ไอโซโพรพานอล (ml)	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
≤ 0.2	56.4 ± 0.2	50	0.1 N
0.2 - 1.0	28.2 ± 0.2	50	0.1 N
1.0 - 30.0	7.05 ± 0.05	75	0.25 N
30.0 - 50.0	7.05 ± 0.05	100	0.25 or 0.1 N
50.0 - 100	3.525 ± 0.001	100	0.1 N

### 3.3.3 วิเคราะห์แอลคิลเอสเทอร์

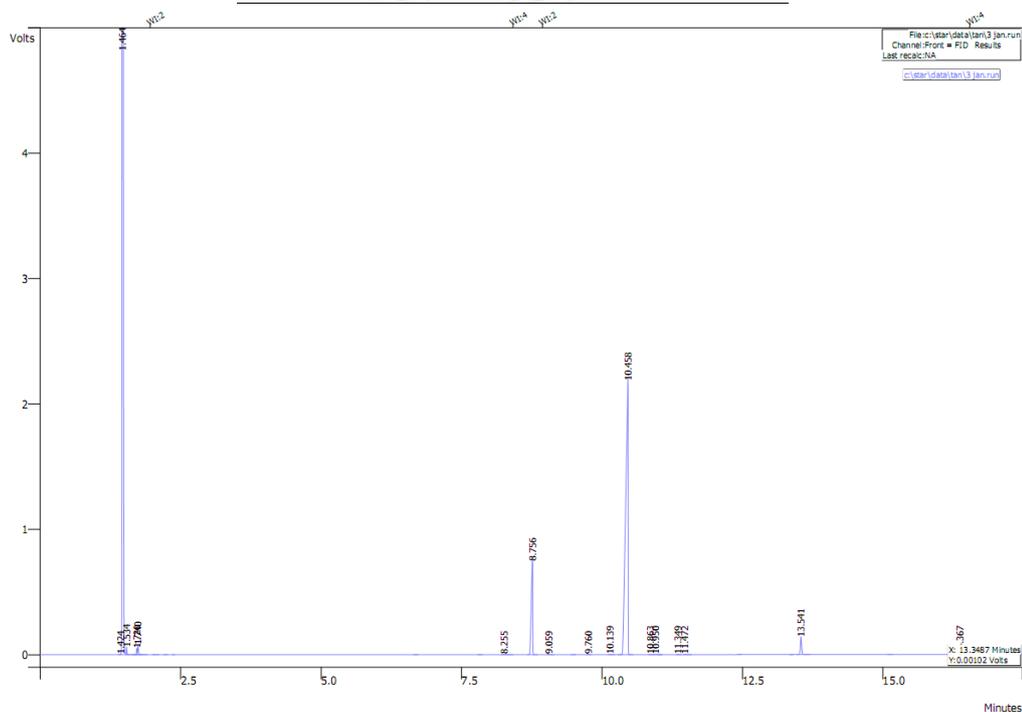
ตัวอย่างสุดท้ายของแต่ละการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณแอลคิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเพื่อข้อมูลในการทำสมดุลมวลสารและตรวจสอบความสอดคล้องของปริมาณของแอลคิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นกับปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่จากการไทเทรต ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น 3800 คอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบคาปิลารีรุ่น Innowax m20 ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นแบบเฟรมไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector, FID) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแสดงในตารางที่ 3.3

วิเคราะห์ตัวอย่างสุดท้ายของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลซึ่งทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนักกรดลอริก และปฏิกิริยามีการแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับ ผลการ

วิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างมีเอทิลลอเรตร้อยละ 96.8 โดยน้ำหนัก และมีกรดลอริกร้อยละ 3.3 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดลอริกด้วยการไทเทรตพบว่าปริมาณกรดลอริกเหลืออยู่ในตัวอย่างร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 3.7** แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล

Retention time (นาที)	ตำแหน่งของสาร
1.47	เฮพแทน
1.74	เอทานอล
8.75	เมทิลเดกคาโนเอต
10.44	เอทิลลอเรต
13.55	กรดลอริก

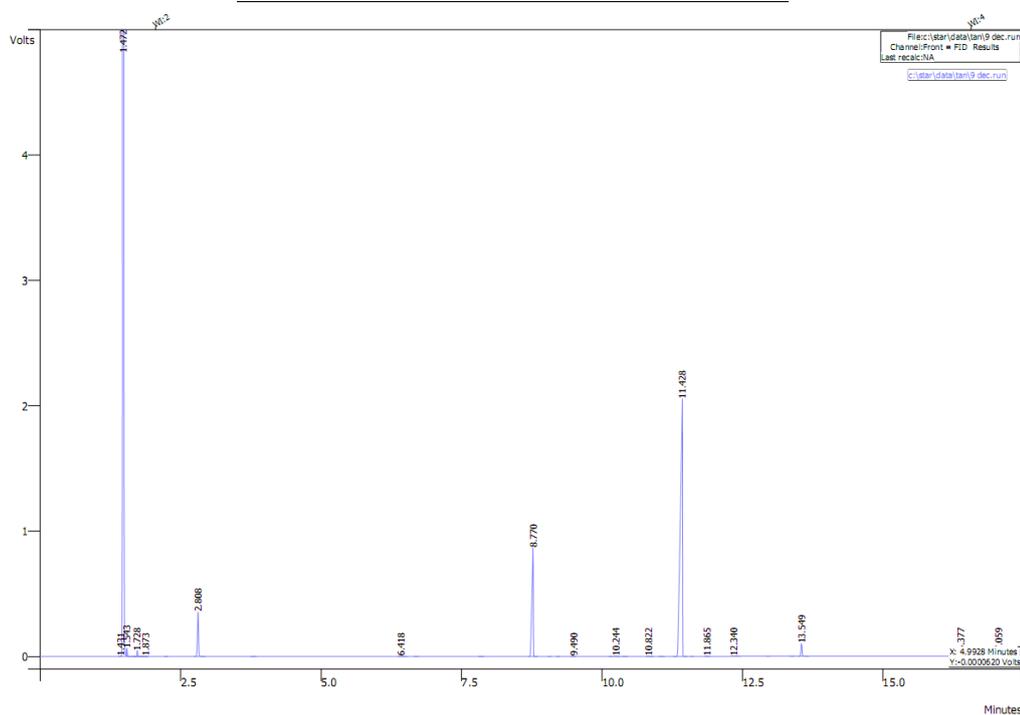


**รูปที่ 3.3** โครมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล

ตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลซึ่งทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักกรดลอริก ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.4 พบว่าในตัวอย่างมีเอทิลลอเรตร้อยละ 97.2 โดยน้ำหนัก และมีกรดลอริกร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดลอริกด้วยการไทเทรตพบว่าปริมาณกรดลอริกเหลืออยู่ในตัวอย่างร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

ตารางที่ 3.8 แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

Retention time (นาที)	ตำแหน่งของสาร
1.47	เฮพเทน
2.81	บิวทานอล
8.75	เมทิลเดกคาโนเอต
11.42	บิวทิลลอเรต
13.55	กรดลอริก



รูปที่ 3.4 โครมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

### 3.3.4 วิเคราะห์ปริมาณน้ำ

ตัวอย่างสุดท้ายของการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเฟสของเหลว เพื่อเป็นข้อมูลในการทำสมดุลมวลสารและคำนวณหาปริมาณน้ำในตัวดูดซับ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตแบบคาร์ล-ฟิชเชอร์ (Karl-Fischer Titration) ตามมาตรฐาน ASTM E203-01

### 3.4 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

#### 3.4.1 การคำนวณค่าความเข้มข้นของกรดไขมันในสารตัวอย่าง

$$\text{ค่าความเข้มข้นของกรดไขมัน} = \frac{C_{NaOH} \times V_{NaOH} \times m_{\text{sample}}}{V_{\text{sample}} \times m_{\text{titrated sample}}} \quad (3.1)$$

โดย  $C_{NaOH}$  = ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)

$V_{NaOH}$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

$V_{\text{sample}}$  = ปริมาตรของสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$m_{\text{sample}}$  = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

$m_{\text{titrated sample}}$  = น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ไทเทรต (กรัม)

#### 3.4.2 การคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน

$$\text{ร้อยละของกรดไขมัน} = \frac{C_{NaOH} \times V_{NaOH} \times m_{\text{titrated sample}}}{MW \times 10} \quad (3.2)$$

โดย  $C_{NaOH}$  = ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)

$V_{NaOH}$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

$m_{\text{titrated sample}}$  = น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ไทเทรต (กรัม)

$MW$  = น้ำหนักโมเลกุลของกรดลอริก (กรัม/โมล)

#### 3.4.3 การคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน} = \frac{(C_{\text{initial}} - C_{\text{sample}})}{C_{\text{initial}}} \times 100 \quad (3.3)$$

โดย  $C_{\text{initial}}$  = ค่าความเข้มข้นของกรดไขมันเริ่มต้น

$C_{\text{sample}}$  = ค่าความเข้มข้นของกรดไขมันในสารตัวอย่าง

#### 3.4.4 การคำนวณผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

##### ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Response factor)

เนื่องจากตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) ตอบสนองต่อสารแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องหาแฟกเตอร์ตอบสนองของสารแต่ละชนิดเพื่อใช้ในการปรับค่าในการคำนวณ

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของแอลคิลเอสเทอร์} = \frac{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักของแอลคิลเอสเทอร์}}{\text{พื้นที่ของแอลคิลเอสเทอร์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}} \quad (3.4)$$

### การคำนวณปริมาณเอทิลเอสเตอร์

$$\text{ปริมาณของเอทิลเอสเตอร์ (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลเอสเตอร์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.5)$$

$$\text{ปริมาณของบิวทิลเอสเตอร์ (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของบิวทิลเอสเตอร์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.6)$$

เนื่องจากตัวอย่างต้องระเหยน้ำออกก่อนการวิเคราะห์ทำให้ในแต่ละตัวอย่างอาจมีแอลกอฮอล์เหลือในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในกรณีของตัวอย่างจากปฏิกิริยาที่ใช้บิวทานอลเป็นสารตั้งต้นซึ่งบิวทานอลมีจุดเดือดสูงกว่าน้ำจึงทำให้แยกออกได้ไม่หมด ดังนั้นในการคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์จึงไม่คือน้ำหนักของแอลกอฮอล์ที่เหลืออยู่ในตัวอย่าง ดังสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเตอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเอทิลเอสเตอร์}}{\text{น้ำหนักของกรดลอริก} + \text{น้ำหนักของเอทิลเอสเตอร์}} \times 100 \quad (3.7)$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของบิวทิลเอสเตอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของบิวทิลเอสเตอร์}}{\text{น้ำหนักของกรดลอริก} + \text{น้ำหนักของบิวทิลเอสเตอร์}} \times 100 \quad (3.8)$$

### 3.5 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อน

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยแยกเป็น 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาโดยการทดลองซ้ำที่สภาวะการทดลองเดียวกัน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยดังสมการ (3.9) ค่าคลาดเคลื่อนแสดงเป็นช่วงความคลาดเคลื่อนโดยพลอตแท่งบอกความคลาดเคลื่อน (error bar) ในผลการทดลอง

$$\text{ค่าเฉลี่ย } (\bar{x}) = \frac{\sum x}{n} \quad (3.9)$$

ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์หาโดยการวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันซ้ำ 3 ครั้ง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตคิดเป็นร้อยละ 2.47

## บทที่ 4

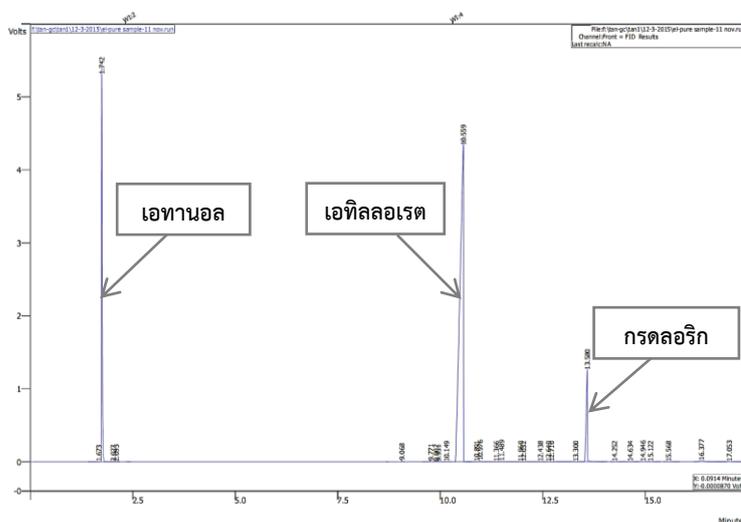
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ และอุณหภูมิ และศึกษาผลของการแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับ ผลการทดลองจะนำเสนอและอภิปรายตามหัวข้อดังนี้

- 4.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอล
- 4.2 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20
  - 4.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
  - 4.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล
  - 4.2.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล
- 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดปฏิกิริยา
  - 4.3.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล
  - 4.3.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล
- 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา
  - 4.4.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล
  - 4.4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล
- 4.5 ผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยา
  - 4.5.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล
  - 4.5.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

#### 4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอล

ในงานวิจัยนี้ใช้กรดลอริกความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 เอทานอลและบิวทานอลซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงเป็นสารตั้งต้น การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและใช้แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ตัวอย่างจากการทดลองถูกวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างจากปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล (ทดลองที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) แสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



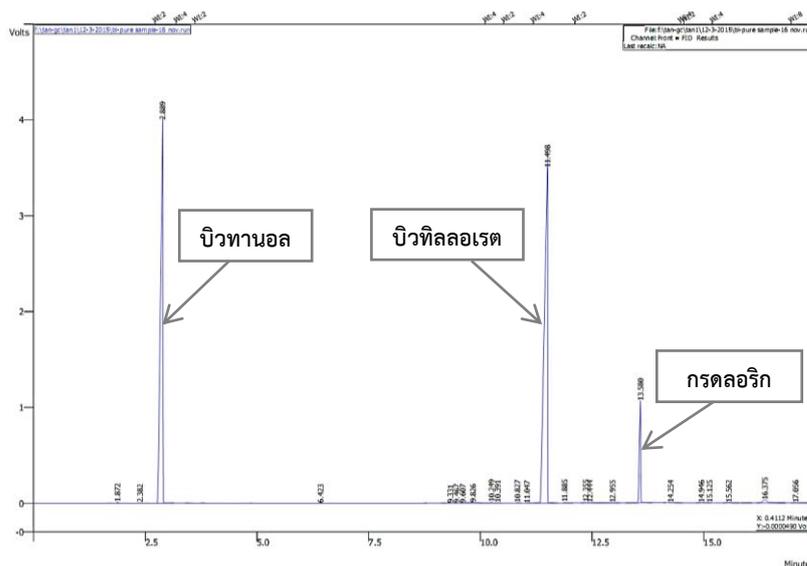
รูปที่ 4.1 แสดงโครมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบตัวอย่างจากปฏิกริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล

สาร	พื้นที่พีค/พื้นที่ทั้งหมด
เอทานอล	18.3%
เอทิลลอเรต	72.9%
กรดลอริก	7.4%
อื่นๆ	1.4%

ผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างประกอบด้วยกรดลอริกและเอทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกริยา และผลิตภัณฑ์คือเอทิลลอเรต โดยมีพื้นที่พีครวมคิดเป็นร้อยละ 98.6 ของพื้นที่ทั้งหมด และพบสารอื่นๆ เพียงร้อยละ 1.4 ของพื้นที่ทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างจากปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล (ทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) แสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2



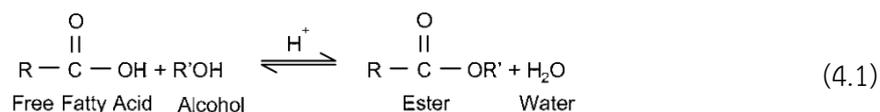
รูปที่ 4.2 แสดงโครมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

ตารางที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบตัวอย่างจากปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับบิวทานอล

สาร	พื้นที่พีค/พื้นที่ทั้งหมด
บิวทานอล	41.5%
บิวทิลลอเรต	50.9%
กรดลอริก	6.1%
อื่นๆ	1.5%

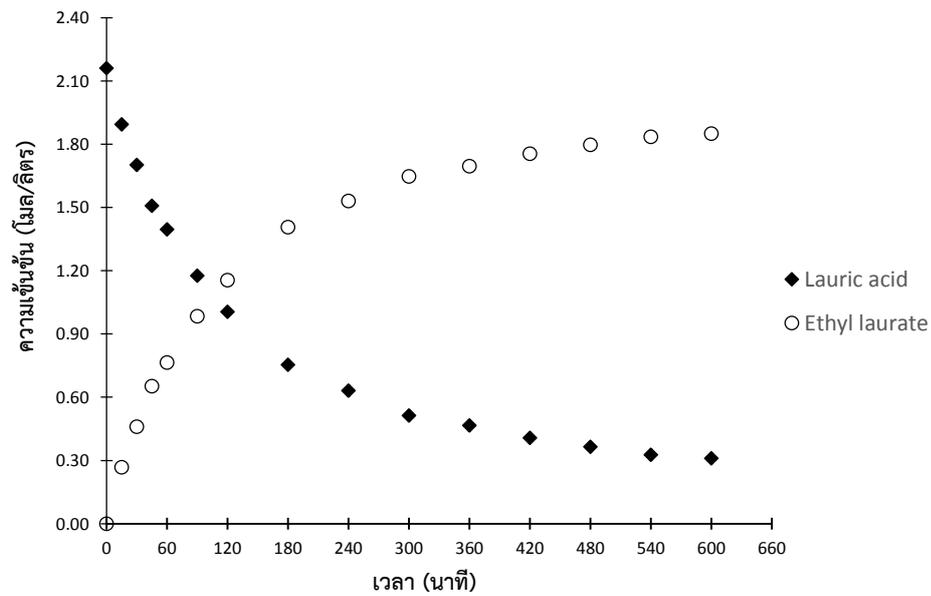
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลพบว่าในตัวอย่างประกอบด้วย กรดลอริก และบิวทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา และสารผลิตภัณฑ์คือ บิวทิลลอเรต โดยมีพื้นที่พีครวมคิดเป็นร้อยละ 98.5 ของพื้นที่ทั้งหมด และพบสารอื่นๆ เพียงร้อยละ 1.5 ของพื้นที่ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นน้อย

Park Ji-Yeon Kim Deog-Keun และ Lee Jin-Suk [17] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเมทานอลได้แสดงสมการในรูปทั่วไปของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ไว้ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยา และได้สรุปว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้

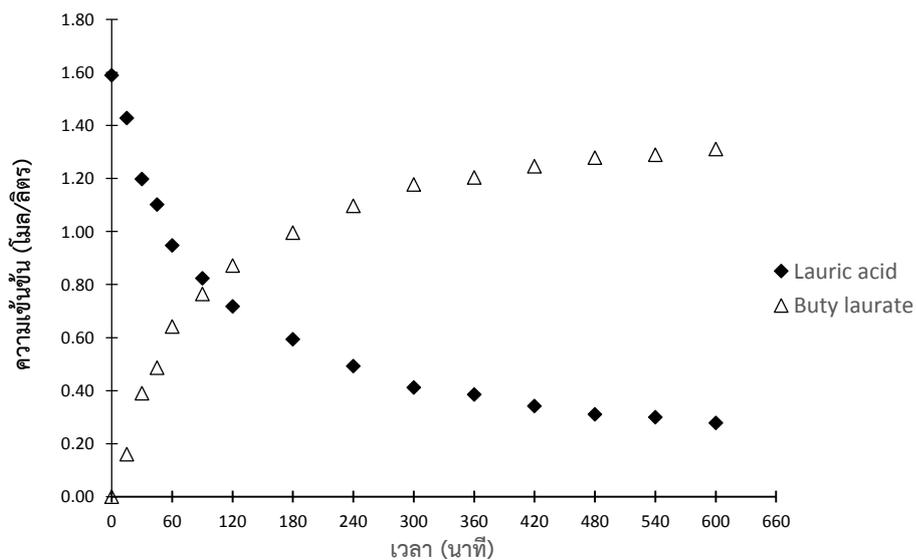


Yuwang Jiang และคณะ [16] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเนตไอออนบวกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สรุปไว้เช่นเดียวกันว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอลเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้และไม่พบปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ (อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ (อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก)



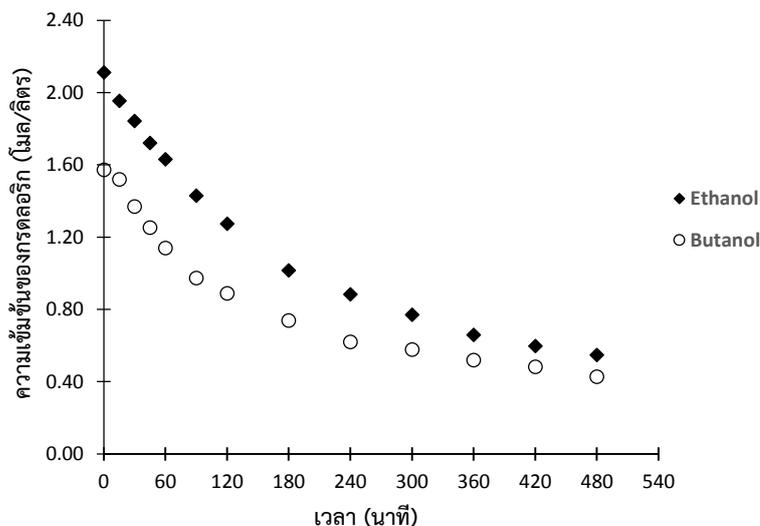
## 4.2 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20

### 4.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของชนิดแอลกอฮอล์ต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทดลองที่สภาวะเดียวกัน คือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 ซึ่งใช้จำนวนโมลเริ่มต้นของกรดลอริกเท่ากันทั้งสองการทดลอง (0.67 โมล) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของกรดลอริก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	
	เอทานอล	บิวทานอล
0	0.0	0.0
15	7.4	3.4
30	12.7	12.9
45	18.5	20.4
60	22.8	27.6
90	32.3	38.1
120	39.7	43.5
180	51.9	53.1
240	58.2	60.5
300	63.5	63.3
360	68.8	67.0
420	71.7	69.4
480	74.1	72.8



**รูปที่ 4.5** แสดงความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ของทั้งสองปฏิกิริยามีแนวโน้มเดียวกันคือ ความเข้มข้นของกรดลอริกจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 นาทีแรก แล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่ค่อยๆ ลดลง สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของกฎอัตรา (Rate law) คือ ในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาความเข้มข้นของกรดลอริกสูงทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความเข้มข้นของกรดลอริกจะลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาจะเกิดโดยโมลของสารตั้งต้นดังนั้นในการทดลองจึงใช้โมลเริ่มต้นของสารตั้งต้นเท่ากัน แต่น้ำหนักโมลกุลของเอทานอลและบิวทานอลมีค่าแตกต่างกันทำให้ปริมาตรในการทดลองของทั้งสองปฏิกิริยาต่างกันทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของทั้งสองปฏิกิริยาไม่เท่ากัน จึงพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ของทั้งสองปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าความยาวของสายโซ่แอลกอฮอล์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยเมื่อใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Hoang D. Hanh และคณะ [24] ศึกษาผลของชนิดแอลกอฮอล์ต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดโอเลอิกโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบแอลกอฮอล์ 5 ชนิดคือ เอทานอล นอร์มอลโพรพานอล นอร์มอลบิวทานอล ไอโซโพรพานอล และไอโซบิวทานอล การทดลองทำที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อแอลกอฮอล์ 1:3 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าแอลกอฮอล์โซ่ตรงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าแอลกอฮอล์โซ่กิ่ง โดยได้อธิบายว่าเกิดจากโครงสร้างโมเลกุลของแอลกอฮอล์โซ่กิ่งที่กีดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยาก ค่าร้อยละผลได้ที่เวลา 5 ชั่วโมง ของปฏิกิริยาที่ใช้เอทานอล นอร์มอลโพรพานอล

นอร์มอลบิวทานอล ไอโซโพรพานอล และไอโซบิวทานอล เท่ากับร้อยละ 94 92 88 79 และ 42 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยของคุณ Hoang D. Hanh และคณะ จะเห็นว่าโครงสร้างของ แอลกอฮอล์โซ่กิ่งจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าความยาวของสายโซ่แอลกอฮอล์ ดังจะเห็นได้จาก ร้อยละผลได้ของปฏิกิริยาที่ใช้แอลกอฮอล์โซ่ตรงมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้แอลกอฮอล์โซ่ตรง คือ เอทานอล และนอร์มอลบิวทานอล พบว่าทั้งสองปฏิกิริยามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน

J. Lilja และคณะ [25] ได้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 2 ชนิด คือ สโมเพค-101 และแอมเบอร์ลิสต์ 15 เปรียบเทียบผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดอะซิติกกับเมทานอลเป็นสารตั้งต้น ทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:1 พบว่าปฏิกิริยาที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกและแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน แต่ปฏิกิริยาที่ใช้สโมเพค-101 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสโมเพค-101 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดไมโคร ในขณะที่แอมเบอร์ลิสต์ 15 มีรูพรุนขนาดมาโคร ทำให้ปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวลภายในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา และได้สรุปว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์มีความแตกต่างจากแบบเอกพันธ์คือ กรดคาร์บอกซิลิกจะเข้าไปดูดซับที่บริเวณที่มีความเป็นกรด (acid site) บนตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนแล้วทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ที่อยู่ในเฟสของเหลว ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำสามารถดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้แรงกว่าการดูดซับของกรด

Park Ji-Yeon และคณะ [17] ศึกษาปฏิกิริยาของกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ แอมเบอร์ลิสต์ 15 และแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 ทดลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเมทานอล 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาที่ใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปฏิกิริยาที่ใช้แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 เนื่องจากแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า โดยจากผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีพื้นที่ผิวประมาณ 40 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า 0.1 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุน เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ 5 ครั้ง พบว่าแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลงอย่างมีนัยสำคัญในขณะที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20

ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำสามารถดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทำให้บริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง โดยเฉพาะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุน

เมื่อพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้เรซินชนิดกรดแก่ในการเร่งปฏิกิริยาที่เสนอโดย J. Lijsa และคณะ เปรียบเทียบกับการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกับการทดลองในงานวิจัยนี้ คือในการทดลองจะใส่กรดลอรริกและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ก่อนแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้เท่ากับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแล้วจึงใส่แอลกอฮอล์ ดังนั้นกรดลอรริกจึงมีโอกาที่จะดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากกว่าแอลกอฮอล์ และเนื่องจากแอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นปฏิกิริยาส่วนใหญ่จึงเกิดที่พื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ขนาดโมเลกุลของแอลกอฮอล์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าชนิดของแอลกอฮอล์คือ เอทานอล และนอร์มอลบิวทานอลไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



#### 4.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

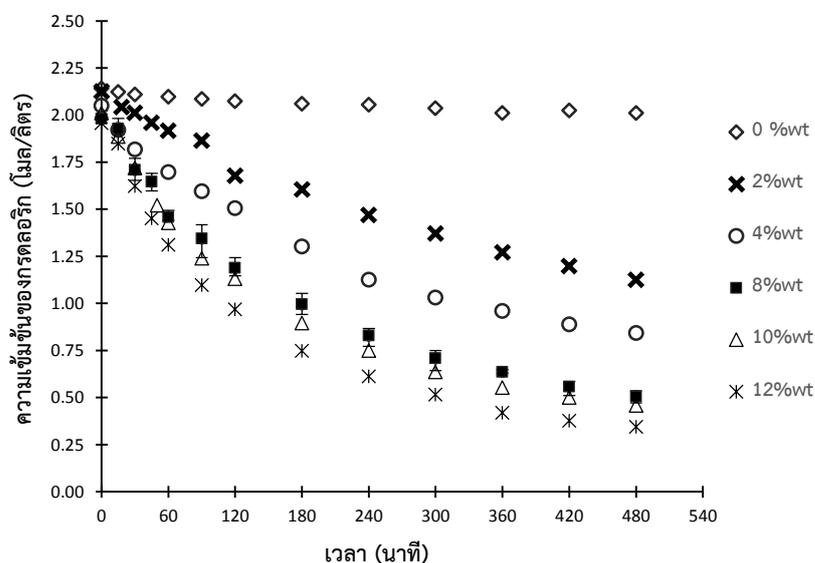
การทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ทดลองโดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0-12 โดยน้ำหนักของกรดลอริก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 82 องศาเซลเซียส (จุดเดือดของสาร) และอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0-12 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง					
	0 %wt	2 %wt	4 %wt	8 %wt	10 %wt	12 %wt
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.9	3.9	6.3	2.6	6.2	5.5
30	1.4	5.4	11.3	13.7	14.5	17.0
45	-	7.8	-	16.8	24.4	25.8
60	2.0	9.8	17.2	26.3	29.0	33.0
90	2.6	12.3	22.2	32.1	38.3	44.0
120	3.2	21.1	26.6	40.0	43.8	50.5
180	3.7	24.5	36.5	49.7	55.4	61.8
240	4.0	30.9	45.1	58.2	62.7	68.7
300	4.9	35.5	49.8	64.2	68.4	73.6
360	6.1	40.2	53.2	67.9	72.5	78.6
420	5.5	43.6	56.7	71.8	75.1	80.8
480	6.1	47.1	58.9	74.5	77.2	82.4

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการทดลองนี้ (อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4) ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลเกิดได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในกรณีที่ใช้อะมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6 เป็นร้อยละ 47 การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 2 4 และ 8 โดยน้ำหนัก

เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีบริเวณที่มีความเป็นกรด (acid site) เพิ่มขึ้น [28] สารตั้งต้นจึงดูดซับบนบริเวณที่มีความเป็นกรดได้มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ว้อยละ 0-12 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกกับเวลาในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 8 เป็นร้อยละ 10 และ 12 โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง สังเกตได้จากความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเหมือนการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนัก สามารถอธิบายได้ว่าที่ปริมาณตัวเร่งร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีบริเวณที่มีความเป็นกรดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย

กฤษยาพร ทินกร [26] ศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0-2.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 พบว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เองภายใต้สภาวะการทดลองนี้ แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้ามากเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

Yuwang Jiang และคณะ [16] ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเนต ไอออนบวกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 5-30 กรัม อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:9 ได้สรุปว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและเวลาในการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยาลดลง เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีบริเวณที่มีความเป็นกรดในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 20 กรัมขึ้นไป จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากมีบริเวณที่มีความเป็นกรดเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 20 กรัม จึงไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยพบว่ามีความสอดคล้องกัน คือ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มบริเวณที่มีความเป็นกรดในการเกิดปฏิกิริยา จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก พบว่ามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย

การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ จะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนักของกรดลอริกเพื่อให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด

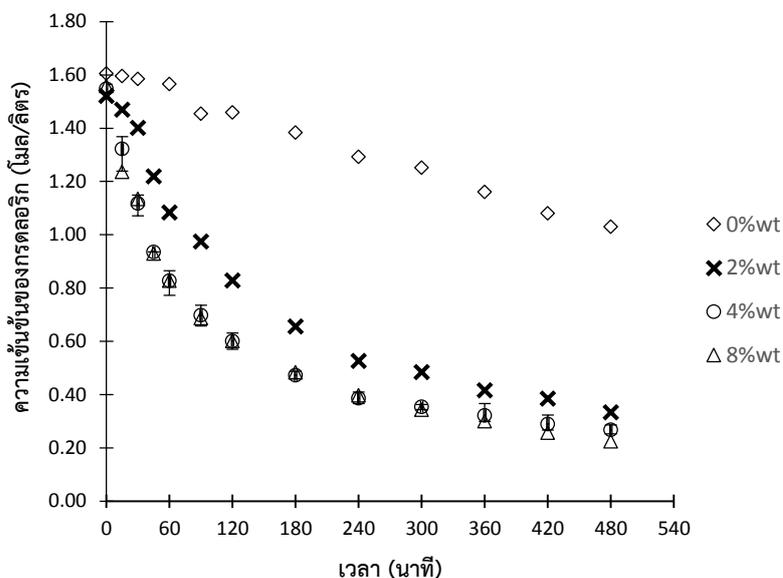
#### 4.2.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

การศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 – 8 โดยน้ำหนักของกรดลอริก อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอลเท่ากับ 1:4 ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง-ปฏิกิริยาร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 110°C อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4

เวลา (นาที)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง			
	0 %wt	2 %wt	4 %wt	8 %wt
0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.6	3.4	14.6	20.7
30	1.3	7.9	27.8	27.2
45	-	19.9	39.6	40.3
60	2.5	28.8	46.5	46.9
90	9.4	36.0	54.9	55.9
120	9.1	45.5	61.1	61.4
180	13.8	56.8	69.4	69.0
240	19.5	65.4	75.0	74.5
300	22.0	68.2	77.1	77.9
360	27.7	72.6	79.2	80.7
420	32.7	74.7	81.3	83.4
480	35.8	78.1	82.6	85.5

ในกรณีที่ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่ง-ปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 2 เป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มบริเวณที่มีความเป็นกรด ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เพราะมีบริเวณที่มีความเป็นกรดเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา



**รูปที่ 4.7** แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับ บิวทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก (อุณหภูมิ 110°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4)

ผลการทดลองกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสอดคล้องกับงานวิจัยของ พรศิริ เพิ่มทรัพย์ [6] ซึ่งศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเมทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลอง ทำที่อุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเมทานอล 1:1 สรุปว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา สามารถเกิดขึ้นได้เองเพราะกรดไขมันสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยาสูง [7] แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้าซึ่งได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 21 แต่เมื่อ เพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดีและได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น

ผลของการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสอดคล้องกับผลการทดลองของปฏิกิริยาเอสเทอร์- รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล คือ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากทำปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองต่างกันทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมของทั้ง สองปฏิกิริยาไม่สอดคล้องกัน โดยปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เอง บางส่วนจึงใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า แอมเบอร์ลิสต์ ปีติ 20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลได้ดี และการเพิ่ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 4 จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ จะใช้ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของกรดลอริก เพื่อไม่ให้มีผลจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดปฏิกิริยา

#### 4.3.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

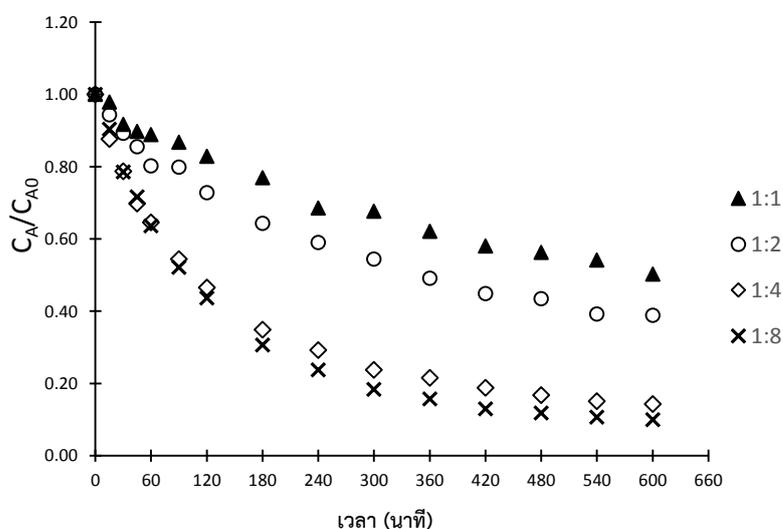
การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทดลอง โดยการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล การทดลองทำที่อัตราส่วนโดยโมลตั้งแต่ 1:1 (อัตราส่วนตามหลักมวลสารสัมพันธ์) 1:2 1:4 และ 1:8 อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4-1:8 อุณหภูมิ 82°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง			
	1:1	1:2	1:4	1:8
0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	2.1	5.7	12.4	9.6
30	8.2	10.8	21.3	21.5
45	10.2	14.5	30.2	28.4
60	11.1	19.8	35.4	36.4
90	13.2	20.1	45.5	47.9
120	17.1	27.2	53.5	56.3
180	23.1	35.7	65.1	69.3
240	31.4	41.0	70.8	76.2
300	32.3	45.6	76.2	81.6
360	37.9	50.9	78.5	84.3
420	41.9	55.1	81.2	87.0
480	43.7	56.5	83.2	88.1
540	45.8	60.8	84.9	89.3
600	49.7	61.1	85.6	90.0

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:1 ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าและมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 50 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลเป็น 1:2 1:4 และ 1:8 พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 61 86 และ 90 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลทำให้กรดลอริกเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นหรือปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดได้มากขึ้นทำให้ได้ร้อยละ

การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาย้อนกลับยังสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกันดังนั้นปฏิกิริยาจึงยังคงเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดลอริกกับเวลาในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 และ 1:8 มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของเอทานอลอีก เพราะในระบบมีความเข้มข้นของเอทานอลมากจนเสมือนว่าความเข้มข้นของเอทานอลไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป



รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลตั้งแต่ 1:1-1:8 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชิตธวัช วิทยากุล [13] ซึ่งศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มกับเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองทำที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอล 1:1-1:12 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม ได้สรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลให้มากเกินไปจะช่วยผลึกสมดุลของปฏิกิริยาไปข้างหน้าทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลมากกว่า 1:9 พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันปาล์มไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจน เนื่องจากเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลตั้งแต่ 1:9 ขึ้นไป ความเข้มข้นของเมทานอลในระบบจะมีค่ามากจนเสมือนว่าความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากกว่า 1:4 จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลที่ 1:4 ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ

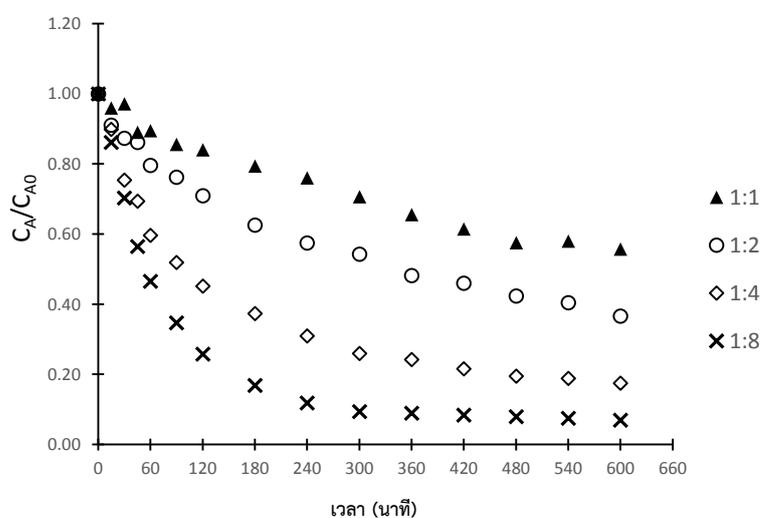
#### 4.3.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอลตั้งแต่ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4-1:8 อุณหภูมิ 100 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักกรดลอริก

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง			
	1:1	1:2	1:4	1:8
0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	4.1	8.9	10.1	13.9
30	2.9	12.7	24.6	29.7
45	11.0	13.9	30.6	43.6
60	10.5	20.4	40.4	53.5
90	14.5	23.8	48.1	65.3
120	16.0	29.1	54.9	74.3
180	20.6	37.4	62.6	83.2
240	23.9	42.6	69.0	88.1
300	29.4	45.7	74.1	90.6
360	34.5	51.9	75.8	91.1
420	38.6	54.1	78.5	91.6
480	42.5	57.6	80.5	92.1
540	42.0	59.6	81.1	92.6
600	44.3	63.4	82.5	93.1

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับเอทานอล โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลเท่ากับ 1:8 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุดคือ ร้อยละ 93 ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลตามปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา คือ 1:1 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 44 เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลทำให้กรดลอรริกเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอรริกจึงเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยาย้อนกลับยังสามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเข้าสู่สมดุลโดยสมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวา



รูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลตั้งแต่ 1:1-1:8 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดลอรริกกับเวลาในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากความเข้มข้นของกรดลอรริกที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลและพบว่าปฏิกิริยามีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นอีกด้วย จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและปฏิกิริยามีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นอีกด้วย โดยอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลที่ 1:8 จะได้ค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดและใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยที่สุด

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิ

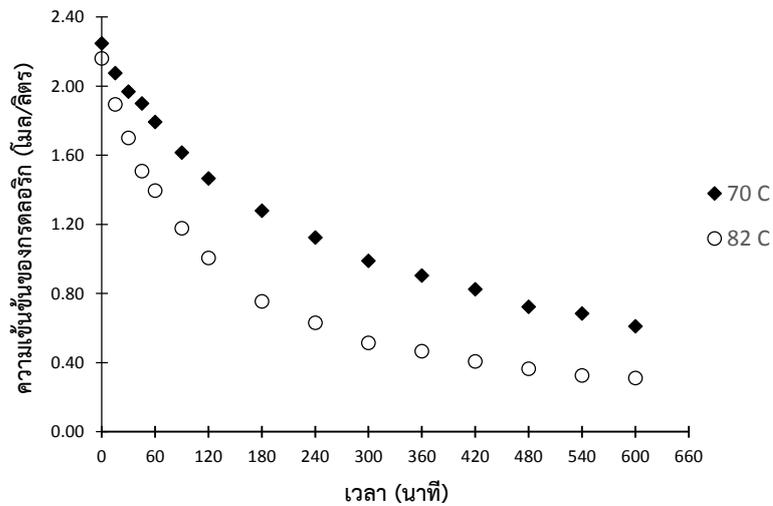
##### 4.4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลทดลองที่อุณหภูมิ 70 และ 82 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นอุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าจุดเดือดของของผสม อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนักของกรดลอริก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.8** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 70 และ 82°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา 12 %wt

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	
	70 องศาเซลเซียส	82 องศาเซลเซียส
0	0.0	0.0
15	7.6	12.4
30	12.4	21.3
45	15.5	30.2
60	20.2	35.4
90	28.1	45.5
120	34.8	53.5
180	43.1	65.1
240	50.0	70.8
300	56.0	76.2
360	59.8	78.5
420	63.3	81.2
480	67.9	83.2
540	69.5	84.9
600	72.9	85.6

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกริยาเกิดได้ดีขึ้นซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ของการทดลองทั้งสองอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.10 มีความแตกต่างอย่างชัดเจน และได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเมื่ออุณหภูมิในการทดลองเท่ากับ 70 และ 82 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 73 และ 86 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 และ 82 องศาเซลเซียส

งานวิจัยของชิตธวัช [13] ได้ศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงช่วง 0-250 นาทีแรก ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดน้อยในช่วงแรก ของปฏิกิริยาและเมื่อใช้ปริมาณเมทานอลมากเกิดพอ ได้สรุปว่าปฏิกิริยาจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ (Irreversible 1<sup>st</sup> Order Reaction)

ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก (Initial rate) คือตั้งแต่ 0-120 นาที เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับภายใต้สมมุติฐานดังนี้

- ช่วงแรกของปฏิกิริยามีความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากและปฏิกิริยายังเกิดน้อยจึงถือว่าปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้น้อยมาก ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะปฏิกิริยาไปข้างหน้า [27]

- ในการทดลองนี้ใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป ดังนั้นความเข้มข้นของแอลกอฮอล์เมื่อเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมด

สมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาในรูปทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (2.2) ได้ดังนี้

$$-r_A = k_1 C_A^a C_B^b - k_{-1} C_C^c C_D^d \quad (4.4)$$

จากสมมุติฐานข้างต้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ จะได้ว่าปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ( Irreversible 1<sup>st</sup> order reaction)

$$-r_A = k_1' C_A^a C_B^b \quad (4.5)$$

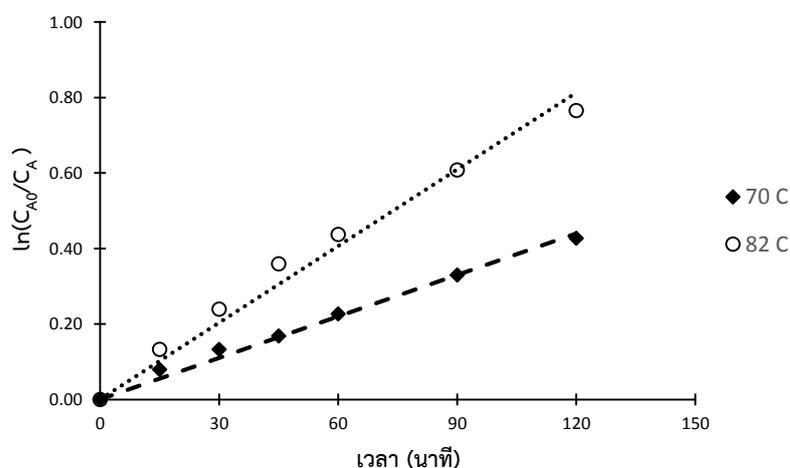
$$-r_A = k_1'' C_A^a = k_1'' C_A \quad (4.6)$$

$$\text{เมื่อ } -r_A = -\frac{dC_A}{dt} \text{ จะได้ว่า } -\frac{dC_A}{dt} = k_1'' C_A \quad (4.7)$$

อินทิเกรตสมการที่ (4.6) จะได้

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = k_1'' t \quad (4.8)$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.8) สามารถพลอตกราฟระหว่าง  $\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)$  กับเวลาเพื่อหาค่าคงที่ปฏิกิริยา ผลการทดลองสามารถพลอตกราฟโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.8) ได้ดังรูปที่ 4.11 และค่าคงที่ปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.11 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก (อัตราส่วนโดยโมลของกรด ลอริก ต่อเอทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา ( $k_1''$ ; $\text{min}^{-1}$ )
70	0.0037
82	0.0068

เมื่อพิจารณาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 70 เป็น 82 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงที่ของปฏิกิริยาซึ่งแสดงในตารางที่ 4.9 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เป็นไปตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ [27] ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้น

การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทั้งปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสัดส่วนที่

แตกต่างกันขึ้นกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา โดยทั่วไปค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับจะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) จึงขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับปฏิกิริยาคูดความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลเพิ่มขึ้นนั่นคือสมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวาซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น [5] จากผลการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกับลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาคูดความร้อนคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amelia Qarina Yaakob และ Subhash Bhatia [15] ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มเมติกกับเมทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มเมติกต่อเมทานอล 1:4 การทดลองทำที่อุณหภูมิ 70 ถึง 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมิผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 82 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทำได้ภายใต้การทดลองที่ความดันบรรยากาศ จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

#### 4.4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

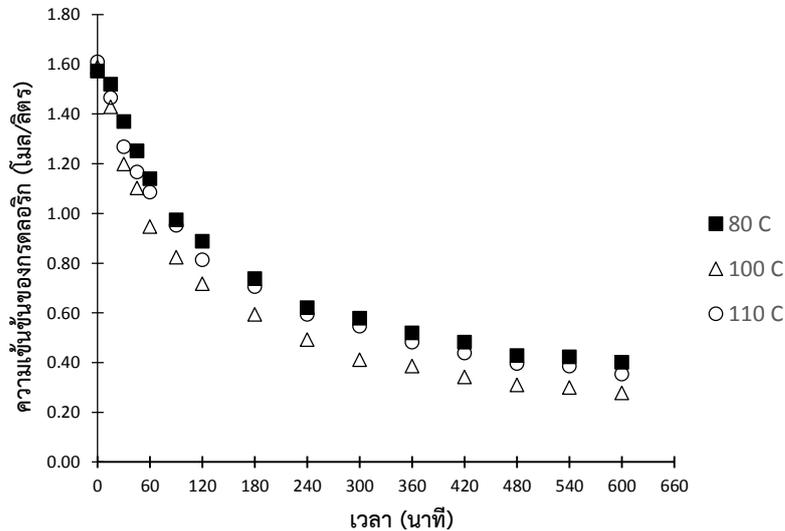
การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของกรดลอริก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ในตารางที่ 4.10 และในรูปที่ 4.12 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.10** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง		
	80 องศาเซลเซียส	100 องศาเซลเซียส	110 องศาเซลเซียส
0	0.0	0.0	0.0
15	3.4	10.1	9.0
30	12.9	24.6	21.3
45	20.4	30.6	27.6
60	27.6	40.4	32.6
90	38.1	48.1	40.9
120	43.5	54.9	49.5
180	53.1	62.6	56.1
240	60.5	69.0	63.1
300	63.3	74.1	66.1
360	67.0	75.8	70.1
420	69.4	78.5	72.8
480	72.8	80.5	75.4
540	73.1	81.1	76.1
600	74.5	82.5	78.1

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 80 เป็น 100 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 110 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกกับเวลาในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย และจะพบว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลงซึ่งจะเห็นได้จากความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ มี

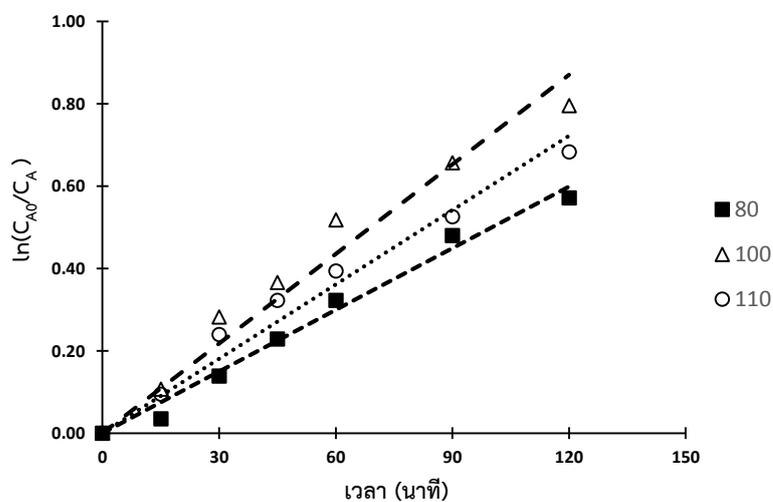
ค่าใกล้เคียงกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 110 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

พิจารณาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกดังแสดงในรูปที่ 4.13 และค่าคงที่สมดุลแสดงใน

ตารางที่ 4.11 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 80 เป็น 100 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 110 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงและค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

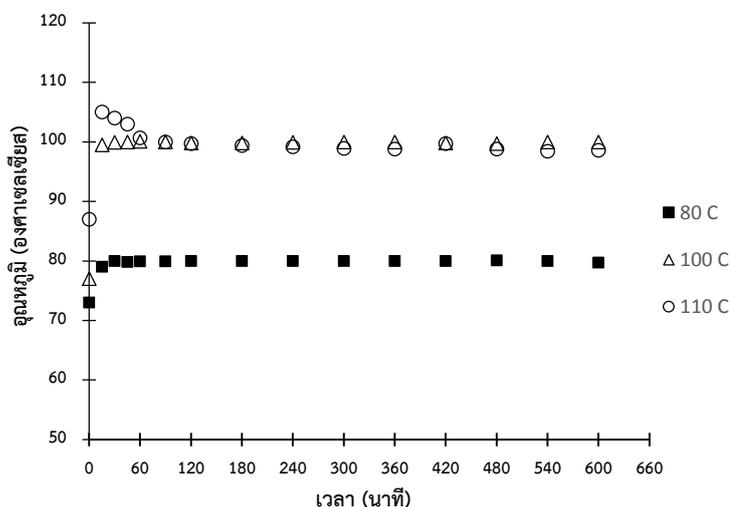


รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา ( $k_1$ ; $\text{min}^{-1}$ )
80	0.0050
100	0.0073
110	0.0060

ผลการทดลองสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆขณะเกิดปฏิกิริยาซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14 การทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงจาก 110 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 98 องศาเซลเซียส โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 นาทีแรก มีความสอดคล้องกับความเข้มข้นของกรดลอริกที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 นาทีแรก เนื่องจากในช่วง 120 นาทีแรก เมื่อน้ำในระบบเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง เพราะน้ำสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จึงทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับการกลายเป็นไอของน้ำทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อน้ำเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สมดุล ผลของการลดลงของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 4.14 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 80 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมิผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลน้อย การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 110 องศาเซลเซียส พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง

และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง สำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

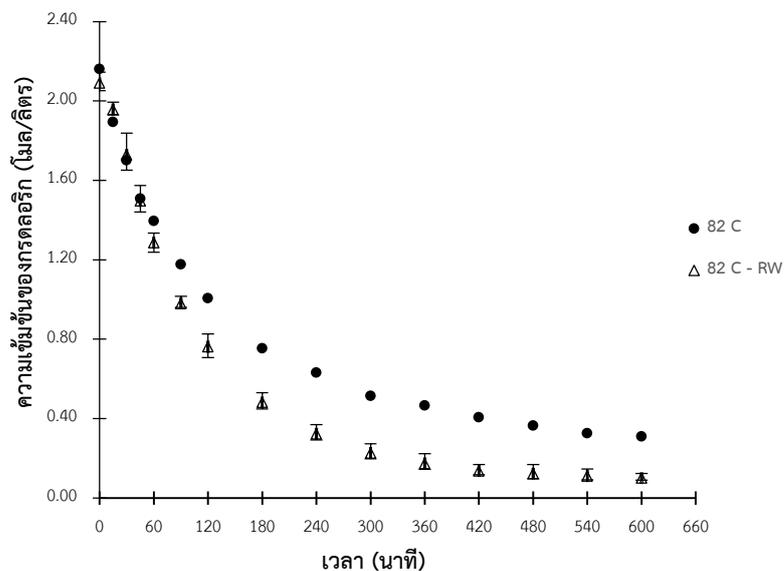
#### 4.5 ผลของการแยกน้ำ

##### 4.5.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอล

การศึกษาผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดซับในการแยกน้ำและใช้ซีโอไลต์ 3เอ เป็นตัวดูดซับ การแยกน้ำจะเกิดขึ้นในเฟสแก๊สโดยน้ำที่กลายเป็นไอจะถูกแยกด้วยตัวดูดซับในคอลัมน์ซึ่งจะถูกให้ความร้อนเพื่อไม่ให้เกิดการควบแน่นในคอลัมน์ การทดลองทำที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระบบเมื่อมีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 82°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	
	82 องศาเซลเซียส	82 องศาเซลเซียส แยกน้ำออก (RW)
0	0.0	0.0
15	12.4	6.3
30	21.3	17.3
45	30.2	28.4
60	35.4	38.5
90	45.5	53.1
120	53.5	63.6
180	65.1	77.0
240	70.8	84.6
300	76.2	89.2
360	78.5	91.7
420	81.2	93.5
480	83.2	94.2
540	84.9	94.7
600	85.6	95.2



รูปที่ 4.15 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับเอทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

ผลการทดลองพบว่าระบบที่มีการแยกน้ำมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการแยกน้ำประมาณร้อยละ 10 จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าในช่วง 60 นาทีแรก ทั้งปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำมีค่าความเข้มข้นของกรดลอรริกที่ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าในช่วง 60 นาทีแรก ผลลัพธ์ยังเกิดน้อยทำให้ไม่เห็นความแตกต่างเมื่อปฏิกิริยามีการแยกน้ำ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดำกว่าจุดเดือดของน้ำทำให้การแยกน้ำเกิดขึ้นได้ช้า แต่เมื่อปล่อยให้เกิดปฏิกิริยานานกว่า 60 นาที จะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดลอรริกที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องการแยกน้ำออกขณะเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้น้อยลง ดังนั้นจึงมีกรดลอรริกน้อยลง และมีผลิตภัณฑ์เหลือในระบบเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างสุดท้ายของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอรริกกับเอทานอลแบบไม่มีการแยกน้ำและมีการแยกน้ำ

อุณหภูมิ	ปริมาณน้ำในตัวอย่าง (%wt)
82°C	2.88
82°C - แยกน้ำ	0.94

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าการใช้คอลัมน์ดูดซับสามารถแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากการแยกน้ำในคอลัมน์ดูดซับเป็นการแยกน้ำในสถานะแก๊สและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 82 องศาเซลเซียส สูงกว่าจุดเดือดของเอทานอลแต่ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำทำให้การแยกน้ำเกิดได้ช้า และจะเห็นว่าคอลัมน์ดูดซับไม่สามารถแยกน้ำออกได้หมดทำให้ปฏิกิริยาไม่เกิดอย่างสมบูรณ์แต่จะเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยสมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวาซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Izabelly L. Lucena และคณะ [28] ซึ่งศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการแยกน้ำโดยใช้วิธีดูดซับ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ พบว่าปริมาณน้ำที่เกิดมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละผลได้สุดท้ายของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำจะมีค่าร้อยละผลได้มากกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีการแยกน้ำภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ แสดงให้เห็นว่าการเดือดของเมทานอลทำให้น้ำสามารถกลายเป็นไอได้บางส่วนเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับจึงทำให้มีน้ำบางส่วนถูกแยกออกจากปฏิกิริยา สมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวาทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้เพิ่มขึ้น และพบว่าปฏิกิริยาจะไม่เกิดอย่างสมบูรณ์แต่จะเข้าสู่สมดุลใหม่โดยได้ค่าร้อยละผลได้มากกว่าร้อยละ 90

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการแยกน้ำมีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำจะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 85 เป็นร้อยละ 95 เมื่อปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำ การแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดได้ช้าและไม่สามารถแยกน้ำออกได้หมด เพราะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำจึงทำให้น้ำกลายเป็นไอได้ช้า โดยเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยาซึ่งผลิตภัณฑ์ยังเกิดน้อยและอัตราการระเหยของน้ำต่ำจึงทำให้ไม่เห็นผลของการแยกน้ำอย่างชัดเจน

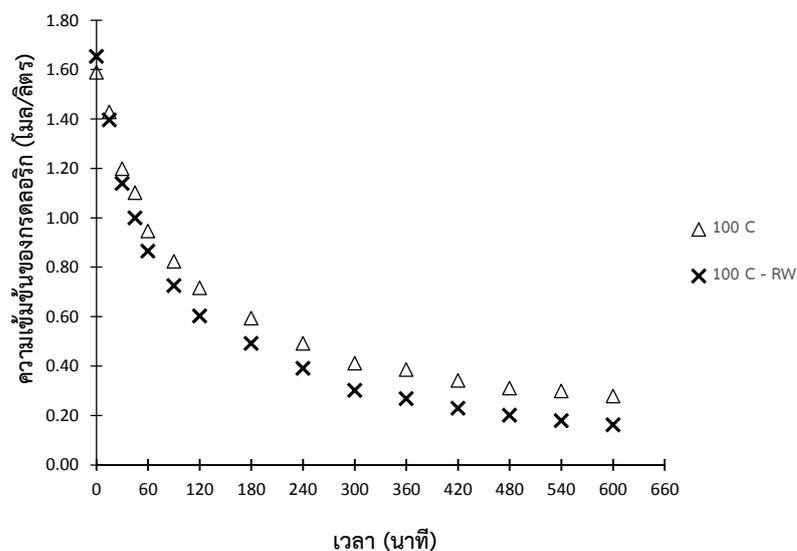
#### 4.5.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอล

การศึกษาผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกกับบิวทานอลทดลองที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำและสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ คือ อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอลเท่ากับ 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองในกรณีที่อุณหภูมิในการทำปฏิกริยาเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16

**ตารางที่ 4.14** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระบบเมื่อมีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100°C อัตราส่วนโดยโมลกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง	
	100 องศาเซลเซียส	100 องศาเซลเซียส แยกน้ำออก (RW)
0	0.0	0.0
15	10.1	15.5
30	24.6	31.1
45	30.6	39.5
60	40.4	47.6
90	48.1	56.1
120	54.9	63.5
180	62.6	70.3
240	69.0	76.4
300	74.1	81.8
360	75.8	83.8
420	78.5	86.1
480	80.5	87.8
540	81.1	89.2
600	82.5	90.2

ผลการทดลองพบว่าปฏิกริยาที่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับปฏิกริยาที่ไม่มีการแยกน้ำ และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดลอริกกับเวลาในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าค่าความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆของปฏิกริยาที่ไม่มีการแยกน้ำและมีการแยกน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการแยกน้ำที่สภาวะการทดลองนี้เกิดขึ้นน้อยจึงทำให้ผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอร์ริกกับบิวทานอล (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอร์ริกกับบิวทานอลโดยมีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100°C

อุณหภูมิ	ปริมาณน้ำในตัวอย่าง (%wt)
100°C	3.72
100°C - แยกน้ำ	2.13

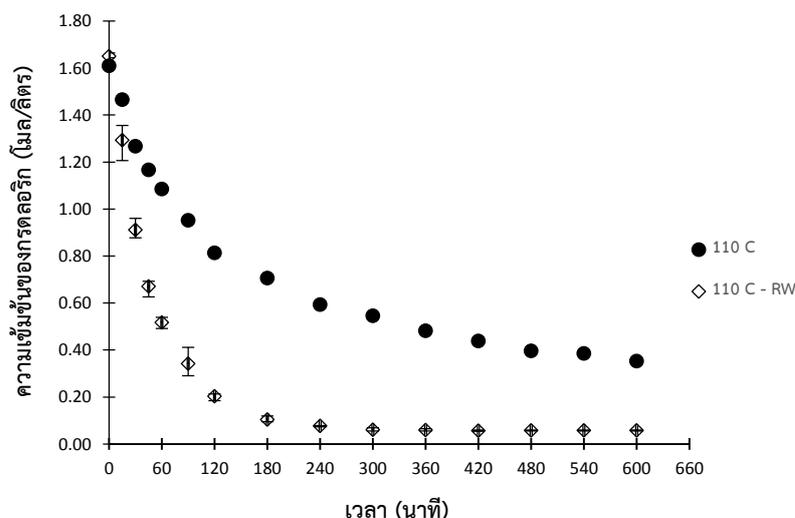
เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าปริมาณน้ำในตัวอย่างจากการทดลองที่มีการแยกน้ำลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีการแยกน้ำซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอร์ริกที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการแยกน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาของกรดลอร์ริกกับบิวทานอลด้วยคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเกิดได้ไม่ดีเนื่องจากในระบบมีเพียงน้ำที่สามารถกลายเป็นไอได้เพียงสารเดียวซึ่งเมื่อพิจารณาเทียบกับปฏิกิริยาของกรดลอร์ริกกับเอทานอลในระบบที่มีการแยกน้ำจะพบว่าทั้งเอทานอลและน้ำสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส การแยกน้ำเกิดได้ดีกว่าระบบที่มีน้ำสามารถกลายเป็นไอได้แค่สารเดียว

การทดลองกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ คือ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงเป็นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกและความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

**ตารางที่ 4.16** แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนักกรดลอริก

เวลา (นาท)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง	
	110 องศาเซลเซียส	110 องศาเซลเซียส แยกน้ำออก (RW)
0	0.0	0.0
15	9.0	17.5
30	21.3	41.6
45	27.6	57.8
60	32.6	67.2
90	40.9	80.1
120	49.5	87.0
180	56.1	92.8
240	63.1	95.2
300	66.1	95.8
360	70.1	96.1
420	72.8	96.4
480	75.4	96.7
540	76.1	96.5
600	78.1	96.4

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำโดยระบบมีการแยกน้ำพบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีการแยกน้ำ จากความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของกรดลอริกกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดลอริกที่เวลาต่างๆ ของปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากการแยกน้ำที่สภาวะนี้เกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นปฏิกิริยาย้อนกลับจึงเกิดได้น้อยทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น และพบว่าในกรณีที่ปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลได้เร็ว คือ ตั้งแต่ 240 นาทีแรก



รูปที่ 4.17 แสดงผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดคลอริกกับบิวทานอล อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

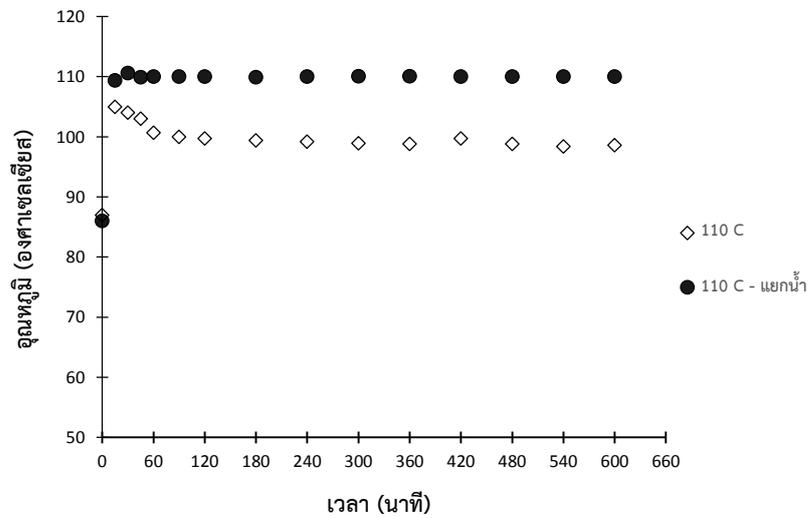
ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าการแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เกิดได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และพบว่าไม่สามารถแยกน้ำออกได้หมดโดยปริมาณน้ำที่เหลือสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดคลอริกกับเอทานอลแบบแยกน้ำ ดังนั้นปฏิกิริยาจึงไม่เกิดอย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกัน แต่จะเข้าสู่สมดุลใหม่โดยได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดคลอริกกับบิวทานอลโดยมีการแยกน้ำและไม่มีการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 110°C

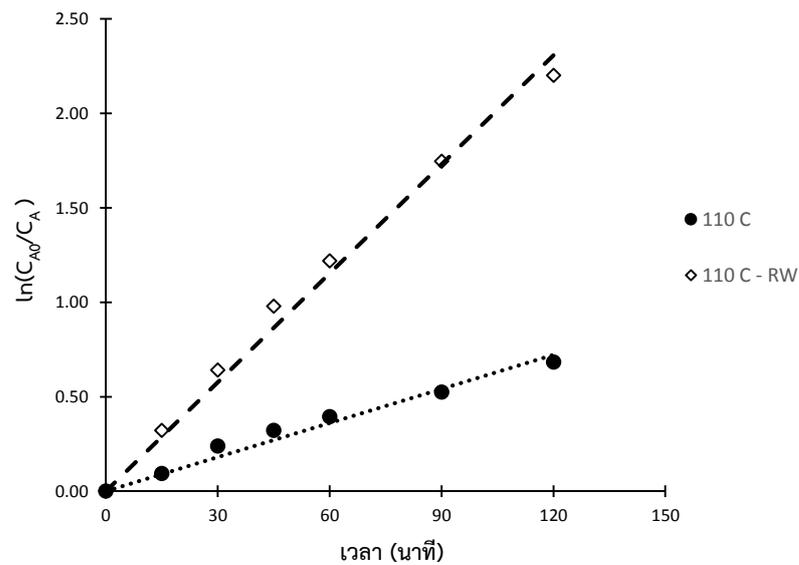
อุณหภูมิ	ปริมาณน้ำในตัวอย่าง (%wt)
110°C	3.29
110°C - แยกน้ำ	0.88

นอกจากนี้ยังพบว่า การทดลองที่มีการแยกน้ำสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 110 องศาเซลเซียสได้ ในขณะที่การทดลองที่ไม่มีการแยกน้ำอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปโดยอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ แสดงใน รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำไม่สูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของน้ำตลอดเวลาในการทำปฏิกิริยา

พิจารณาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าและการแยกน้ำเกิดได้ดีจึงทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อย ค่าคงที่ของปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำ



รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดคลอริกต่อบิวทานอล 1:4 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาไม่มีและมีการแยกน้ำ



รูปที่ 4.19 แสดงผลของการแยกน้ำต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก (อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดคลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา ( $k_1$ ; $\text{min}^{-1}$ )
110	0.0060
110-แยกน้ำ	0.0192

งานวิจัยของ Izabelly L. Lucena และคณะ [28] ได้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการแยกน้ำโดยใช้วิธีดูดซับ การทดลองทำที่อุณหภูมิ 90 100 และ 110 องศาเซลเซียส (สูงกว่าจุดเดือดของน้ำ) อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเมทานอล 1:3-1:9 ได้สรุปว่าอุณหภูมิมีผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (100 และ 110 องศาเซลเซียส) พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 96.5 ถึง 99.7 ในระบบที่มีการแยกน้ำ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากกว่า 100 องศาเซลเซียสพบว่าไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ (90 องศาเซลเซียส) จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทำให้ร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นเพราะค่าคงที่สมดุลเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองไม่สอดคล้องงานวิจัยของ Izabelly L. Lucena และคณะ เนื่องจากในงานวิจัยใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการเกิด ปฏิกิริยา คือ 100 และ 110 องศาเซลเซียสซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของเมทานอล ดังนั้นน้ำและเมทานอลสามารถกลายเป็นไอได้ทั้งคู่จึงทำให้ผลการทดลองของทั้งสองอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน แต่จากผลการทดลองของปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลที่ 100 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าจุดเดือดของบิวทานอล) จะมีเพียงน้ำที่สามารถกลายเป็นไอได้ทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำยากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการแยกน้ำทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มขึ้น เพราะการแยกน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้น้อยลงดังนั้นจึงเหลือผลิตภัณฑ์ในระบบมากขึ้น การแยกน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เกิดได้น้อยทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อย ส่วนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าการแยกน้ำเกิดได้ดี ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือ จากร้อยละ 83 ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำเป็นร้อยละ 96 เมื่อระบบมีการแยกน้ำ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการแยกน้ำเนื่องจากไม่สูญเสียความร้อนไปกับการกลายเป็นไอของน้ำในระบบตลอดเวลา

นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำการใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:8 จะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 93 ในขณะที่ระบบที่มีการแยกน้ำสามารถใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 ก็ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 96 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบมีการแยกน้ำสามารถใช้ปริมาณบิวทานอลลดลงได้อีกด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

1. ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลเป็นปฏิกริยาผันกลับได้ และมีปฏิกริยาข้างเคียงเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับปฏิกริยาหลัก

2. แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 มีความสามารถในการเร่งปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดลอริกกับเอทานอลและบิวทานอลได้ดี การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาทำให้ปฏิกริยาเกิดได้เร็วขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่เหมาะสมของปฏิกริยาของแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันเพราะสภาวะในการทดลองต่างกัน ดังนี้

2.1 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับเอทานอล (อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส) การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกริยามากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาน้อย

2.2 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล (อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส) การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกริยามากกว่าร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยา

3. การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาของแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดในแนวโน้มเดียวกัน คือ ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มขึ้น

3.1 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับเอทานอล (อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส) การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยา ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 87

3.2 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:8 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงสุด คือ ร้อยละ 93

5. การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงที่ปฏิกริยามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

5.1 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับเอทานอล อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดปฏิกริยา คือ 82 องศาเซลเซียสหรือที่จุดเดือดของของผสมซึ่งจะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและอัตราการเกิดปฏิกริยาสูงสุด

5.2 ปฏิกริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลเมื่อทำปฏิกริยาได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีอัตราการเกิดปฏิกริยาและค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกสูงที่สุด

6. การแยกน้ำขณะเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการกลายเป็นไอของน้ำทำให้มีผลต่อการแยกน้ำโดยใช้คอลัมน์ดูดซับด้วย และพบว่าไม่สามารถแยกน้ำออกได้หมดดังนั้นปฏิกิริยาจึงไม่เกิดอย่างสมบูรณ์ แต่จะเข้าสู่สมดุลใหม่โดยสมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวา

6.1 ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล การแยกน้ำด้วยคอลัมน์ดูดซับที่จุดเดือดของของผสม (82 องศาเซลเซียส) เกิดได้ช้า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87 เป็นร้อยละ 95 เมื่อปฏิกิริยามีการแยกน้ำ

6.2 ปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล การแยกน้ำเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 83 เป็นร้อยละ 96 เมื่อปฏิกิริยามีการแยกน้ำและพบว่าใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่มีการแยกน้ำยังสามารถใช้ปริมาณบิวทานอลลดลงได้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

1. ในการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการแยกน้ำ ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ เนื่องจากเครื่องให้ความร้อน (Heating element) ให้ความร้อนได้ไม่เพียงพอ จึงทำให้ไม่สามารถอธิบายผลจากการแยกน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ได้อย่างชัดเจนจึงควรใช้เครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้เพื่อให้เห็นผลของตัวแปรอย่างชัดเจน

2. ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของการแยกน้ำที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อแอลกอฮอล์ 1:4 เท่านั้น จึงไม่สามารถอธิบายผลของอัตราส่วนโดยโมลในระบบที่มีการแยกน้ำได้ เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลมีการเกิดปฏิกิริยาด้วยเช่นกันซึ่งจะทำให้ไม่สามารถอธิบายผลของการแยกน้ำได้อย่างชัดเจน

## รายการอ้างอิง

- [1] Chemat, F., M. Poux, and S. A. Galema, *Esterification of stearic acid by isomeric forms of butanol in a microwave oven under homogeneous and heterogeneous reaction conditions*. Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2, 1997(11): p. 2371-2374.
- [2] Izci, A. and F. Bodur, *Liquid-phase esterification of acetic acid with isobutanol catalyzed by ion-exchange resins*. Reactive and Functional Polymers, 2007. **67**(12): p. 1458-1464.
- [3] Nevers, N.d., *Physical and Chemical Equilibrium for Chemical Engineers*, ed. 2. 2012, New Jersey: John Wiley and Sons.
- [4] Bassan, I.A.L., et al., *Esterification of fatty acids with alcohols over niobium phosphate*. Fuel Processing Technology, 2013. **106**(0): p. 619-624.
- [5] McMurry, J.E. and R.C. Fay, *Chemistry*. 6 ed. 2012, New Jersey: Prentice Hall PTR.
- [6] พรศิริ เพิ่มทรัพย์, จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดลอริก, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] ตติยา กำแพงเดช, จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกและสเตียริกกับเอทานอล, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] Chongkhong, S., et al., *Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate*. Biomass and Bioenergy, 2007. **31**(8): p. 563-568.
- [9] Kriska, C.E. and D. Modra, *The efficacy of some catalysts used in synthesis of phthalates for cosmetic purpose*. Annals of West University of Timisoara, 2012. **21**(2): p. 47-56.
- [10] Brahmkhatri, V. and A. Patel, *Esterification of lauric acid with butanol-1 over H3PW12O40 supported on MCM-41*. Fuel, 2012. **102**: p. 72-77.
- [11] Peters, T.A., et al., *Comparison of commercial solid acid catalysts for the esterification of acetic acid with butanol*. Applied Catalysis A: General, 2006. **297**(2): p. 182-188.

- [12] Yadav, G. and M.S.M.M. Rahuman, *Activities of clays and ion exchange resins in the synthesis of phthalate esters*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2004. **6**(2): p. 114-119.
- [13] ชิตธวัช วิทยาภูล, จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี. 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] Talukder, M.M.R., et al., *Comparison of Novozym 435 and Amberlyst 15 as Heterogeneous Catalyst for Production of Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate*. Energy & Fuels, 2009. **23**(1): p. 1-4.
- [15] Yaakob., A.Q. and S. Bhatia., *Esterification of plamitic acid with methanol in the presence of macroporous ion exchange resin as catalyst*. IJUM Engineering Journal, 2004. **5**(2): p. 35-51.
- [16] Jiang, Y., et al., *Esterification of oleic acid with ethanol catalyzed by sulfonated cation exchange resin: Experimental and kinetic studies*. Energy Conversion and Management, 2013. **76**(0): p. 980-985.
- [17] Park, J.-Y., D.-K. Kim, and J.-S. Lee, *Esterification of free fatty acids using water-tolerable Amberlyst as a heterogeneous catalyst*. Bioresource Technology, 2010. **101**(1, Supplement): p. S62-S65.
- [18] company, D.c. *Amberlyst BD20*. 1995-2013 [cited 2014; Available from: [http://www.dowwaterandprocess.com/en/products/a/amberlyst\\_bd20](http://www.dowwaterandprocess.com/en/products/a/amberlyst_bd20)].
- [19] Oliveira, J.F.G., et al., *Biodiesel production from waste coconut oil by esterification with ethanol: The effect of water removal by adsorption*. Renewable Energy, 2010. **35**(11): p. 2581-2584.
- [20] Lucena, I.L., et al., *Oleic acid esterification with ethanol under continuous water removal conditions*. Fuel, 2011. **90**(2): p. 902-904.
- [21] Rathod, A.P., K.L. Wasewar, and S.S. Sonawane, *Intensification of Esterification Reaction of Lactic Acid with Iso-propanol using Pervaporation Reactor*. Procedia Engineering, 2013. **51**(0): p. 456-460.
- [22] Beers, A.E.W., et al., *Esterification in a structured catalytic reactor with counter-current water removal*. Catalysis Today, 2001. **66**(2-4): p. 175-181.

- [23] Lalik, E., et al., *Microcalorimetric study of sorption of water and ethanol in zeolites 3A and 5A*. *Catalysis Today*, 2006. **114**(2-3): p. 242-247.
- [24] Hanh, H.D., et al., *Biodiesel production by esterification of oleic acid with short-chain alcohols under ultrasonic irradiation condition*. *Renewable Energy*, 2009. **34**(3): p. 780-783.
- [25] J. Lilja, et al., *Esterification of different acids over heterogeneous and homogeneous catalysts and correlation with the Taft equation*. *Journal of Molecular Catalysis A : Chemical*, 2002. **182-183**: p. 555-563.
- [26] กฤษยาพร ทินกร, ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้โซเดียมฟอสเฟสที่เคลือบฝังบนตัวรองรับอะลูมินา, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] Leib, T.M. and C.J. Pereira, *Perry's Chemical Engineers Handbook in Section 7 Reaction Kinetics*. 2008, McGraw-Hill.
- [28] Lucena, I.L., G.F. Silva, and F.A.N. Fernandes, *Biodiesel Production by Esterification of Oleic Acid with Methanol Using a Water Adsorption Apparatus*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008. **47**(18): p. 6885-6889.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ตัวอย่าง

#### ก-1 การวิเคราะห์ปริมาณกรดลอริกในตัวอย่าง

กรดลอริกในตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตตามมาตรฐาน AOC Ca 5a-40

##### วิธีการไทเทรต

1. เตรียมสารตัวอย่างให้มีปริมาณตามที่แสดงในตาราง ก-1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมไอโซโพรพานอลในปริมาณที่แสดงในตารางลงในตัวอย่าง
3. ไทเทรตตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยในการหยดสารแต่ละหยดจะต้องเขย่าและสังเกตว่าสีชมพูของฟีนอล์ฟทาลีน ยังคงอยู่หลังจากหยดไปแล้ว 30 วินาที

ตาราง ก-1 ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมัน

กรดไขมันอิสระ (%)	สารตัวอย่าง (g)	แอลกอฮอล์ (ml)	ความเข้มข้นของสารละลายเบส
to 0.2	$56.4 \pm 0.2$	50	0.1 N
0.2 to 1.0	$28.2 \pm 0.2$	50	0.1 N
1.0 to 30.0	$7.05 \pm 0.05$	75	0.25 N
30.0 to 50.0	$7.05 \pm 0.05$	100	0.25 or 0.1 N
50.0 to 100	$3.525 \pm 0.001$	100	0.1 N

##### วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน} = \frac{C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times m_{\text{sample}}}{\text{MW} \times 10}$$

#### ก-2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

##### ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างไประเหยน้ำออกซึ่งจะมีแอลกอฮอล์ระเหยออกไปด้วย
2. ผสมตัวทำละลาย (เฮกเซน) และสารมาตรฐาน (เมทิลเดกคาโนเอต) ในสัดส่วนที่ 20:1 โดยน้ำหนัก
3. ผสมตัวอย่างกับสารละลายในข้อ 2. ในอัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก

นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น 3800 คอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบคาปิลารีรุ่น Innowax m20 ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นแบบเฟรมไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector, FID) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแสดงในตาราง ก-2

ตาราง ก-2 แสดงสภาวะของคอลัมน์

สภาวะของคอลัมน์	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	80
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิเริ่มต้น (นาที)	5
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 230 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	20
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	230
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	5
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	250
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250

#### การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองมีนิยามดังนี้

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของแอลคิลเอสเทอร์} = \frac{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักของแอลคิลเอสเทอร์}}{\text{พื้นที่ของแอลคิลเอสเทอร์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}$$

การหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของแอลกอฮอล์และกรดลอริกก็ใช้นิยามเดียวกัน โดยค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารต่างๆ แสดงในตาราง ก-3

ตาราง ก-3 แสดงค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง

สาร	แฟกเตอร์ตอบสนอง
กรดลอริก	0.99
เอทานอล	1.82
บิวทานอล	1.16
เอทิลลอเรต	1.09
บิวทิลลอเรต	1.13

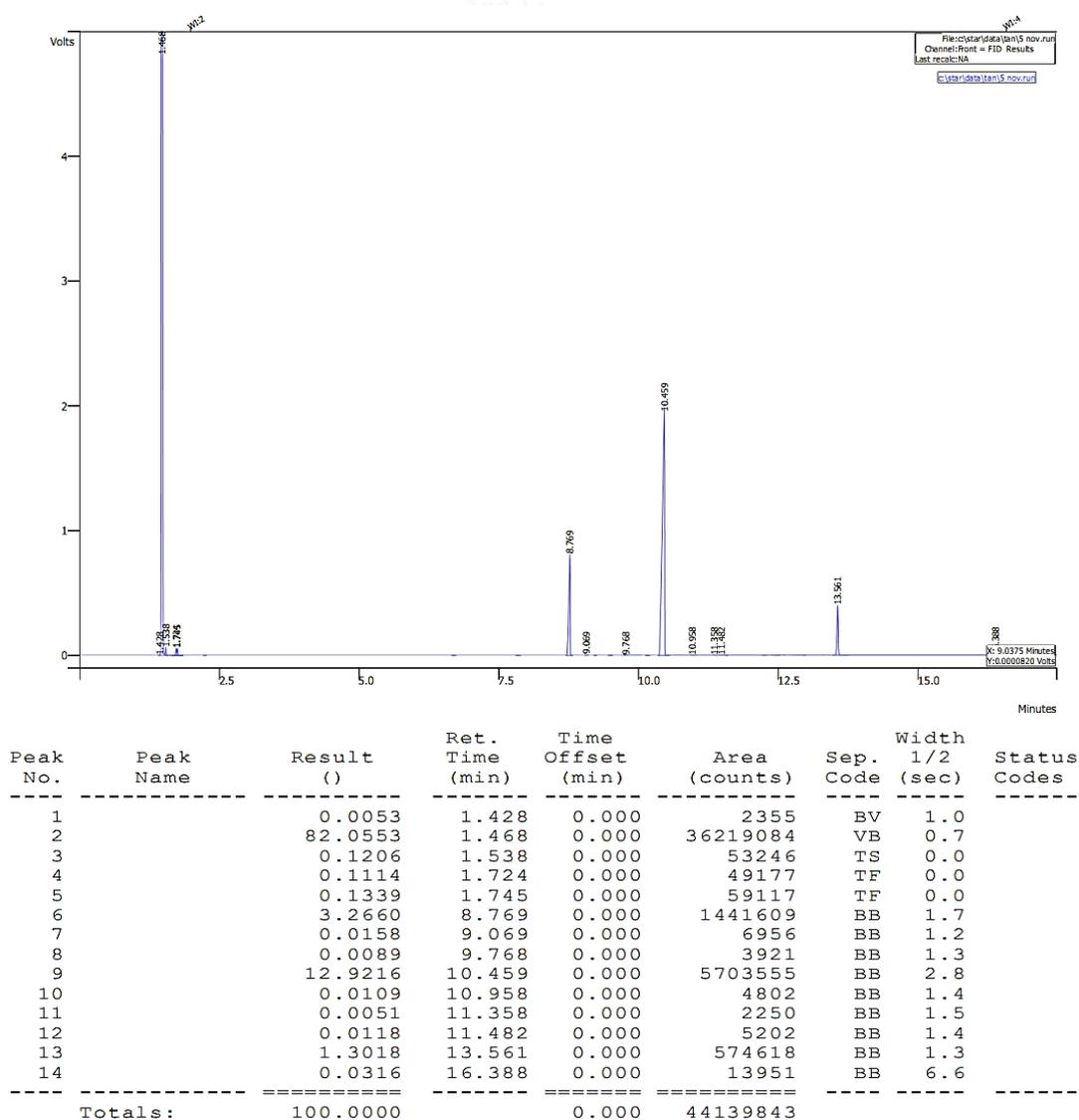
### การคำนวณปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์และบิวทิลแอลกอฮอล์

$$\text{ปริมาณของเอทิลแอลกอฮอล์ (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลแอลกอฮอล์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนอง}}$$

$$\text{ปริมาณของบิวทิลแอลกอฮอล์ (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของบิวทิลแอลกอฮอล์} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนอง}}$$

#### ก-2.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดคลอริกกับเอทานอลที่บางสภาวะ

ตัวอย่างจากการทดลองที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดคลอริกต่อเอทานอล 1:8 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการระเหยน้ำแล้ว 0.1135 กรัม โครมาโทแกรมแสดงในรูป ก-1 และตาราง ก-4



รูป ก-1 แสดงโครมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดคลอริกกับเอทานอล

ตาราง ก-4 แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล

Retention time (นาที)	ตำแหน่งของสาร
1.47	เฮพเทน
1.75	เอทานอล
8.77	เมทิลเดคคาโนเอต
10.46	เอทิลลอเรต
13.56	กรดลอริก

#### ตัวอย่างการคำนวณเอทิลลอเรต

น้ำหนักของเมทิลเดคคาโนเอต 0.0281 กรัม มีพื้นที่พีค เท่ากับ 1,441,609

พื้นที่พีคของเอทิลลอเรต เท่ากับ 5,708,757

$$\text{ปริมาณของเอทิลลอเรต} = \frac{5,703,555 \times 0.0281}{1,441,609 \times 1.09} = 0.1014 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ในตัวอย่าง 0.1135 กรัม มีปริมาณเอทิลเอสเทอร์คิดเป็นร้อยละ 89.4

เนื่องจากตัวอย่างต้องระเหยน้ำออกก่อนการวิเคราะห์ทำให้ในแต่ละตัวอย่างอาจมีแอลกอฮอล์เหลือในปริมาณที่แตกต่างกันโดยเฉพาะในกรณีของตัวอย่างจากปฏิกิริยาที่ใช้บิวทานอลเป็นสารตั้งต้นซึ่งบิวทานอลมีจุดเดือดสูงกว่าน้ำจึงทำให้แยกออกได้ไม่หมด ดังนั้นในการคำนวณผลได้ของผลิตภัณฑ์จึงจะไม่คือน้ำหนักของแอลกอฮอล์ที่เหลืออยู่ในตัวอย่าง ดังสมการ

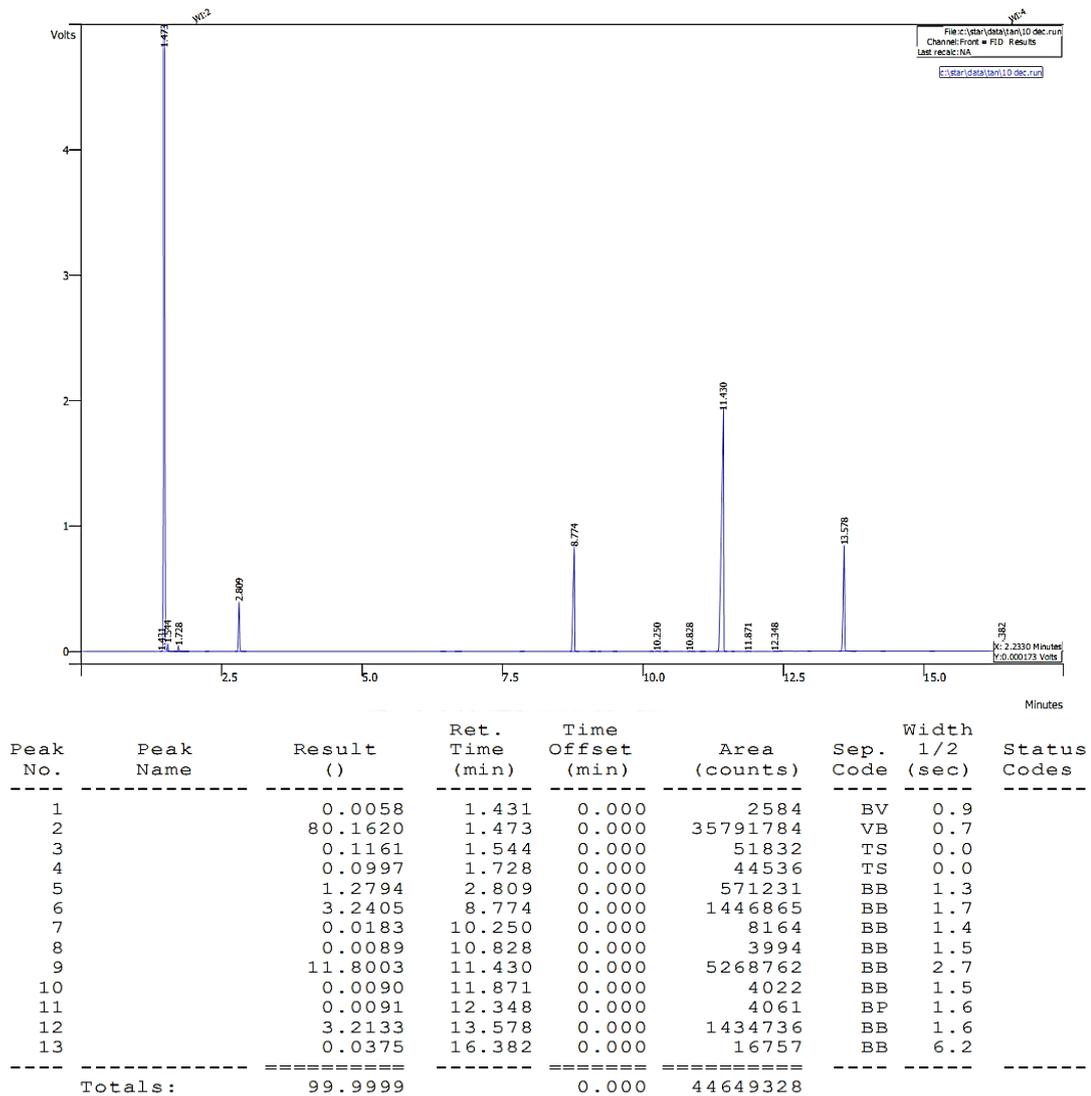
$$\text{ร้อยละผลได้ของเอทิลลอเรต} = \frac{\text{น้ำหนักของเอทิลลอเรต}}{\text{น้ำหนักของกรดลอริก} + \text{น้ำหนักของเอทิลลอเรต}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของบิวทิลลอเรต} = \frac{\text{น้ำหนักของบิวทิลลอเรต}}{\text{น้ำหนักของกรดลอริก} + \text{น้ำหนักของบิวทิลลอเรต}} \times 100$$

ดังนั้น จากตัวอย่างจะได้ว่าร้อยละผลได้ของเอทิลลอเรต เท่ากับ ร้อยละ 98.9

#### ก-2.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลที่บางสภาวะ

ตัวอย่างจากการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านการระเหยน้ำแล้ว 0.1298 กรัม โครมาโทแกรมแสดงในรูป ก-2 และตาราง ก-5



รูป ก-2 แสดงโคมาโทแกรมของตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

ตาราง ก-5 แสดง Retention time ของสารในตัวอย่างจากปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

Retention time (นาที)	ตำแหน่งของสาร
1.47	เฮพเทน
2.81	บิวทานอล
8.77	เมทิลเดกคาโนเอต
11.43	บิวทิลลอเรต
13.58	กรดลอริก

### ตัวอย่างการคำนวณปริมาณบิวทิลลอรเรต

น้ำหนักของเมทิลเดกคาโนเอต 0.0282 กรัม มีพื้นที่ฟิค เท่ากับ 1,446,865

พื้นที่ฟิคของบิวทิลลอรเรต เท่ากับ 5,268,762

$$\text{ปริมาณของเอทิลลอรเรต} = \frac{5,268,762 \times 0.0282}{1,446,865 \times 1.13} = 0.0913 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ในตัวอย่าง 0.1135 กรัม มีปริมาณเอทิลเอสเทอร์คิดเป็นร้อยละ 70.4

ร้อยละผลได้ของบิวทิลลอรเรต เท่ากับ ร้อยละ 76.4

### ก-3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่าง

วิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยวิธีการไทเทรตแบบคาร์ล-ฟิชเชอร์ (Karl-Fischer Titration) ตามมาตรฐาน ASTM E203-01 ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง ก-4

ตาราง ก-4 แสดงปริมาณน้ำในตัวอย่างจากการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E203-01

สภาวะการทดลอง	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 12%wt	2.9249	2.7990	2.9224	2.8821
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 12%wt มีการแยกน้ำ	0.9124	0.9449	0.9674	0.9416
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt	3.7975	3.6445	3.7075	3.7165
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 100°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt มีการแยกน้ำ	2.0189	2.2159	2.1442	2.1264
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 110°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt	3.2782	3.2148	3.3711	3.2880
อัตราส่วนโดยลอรริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 110°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt มีการแยกน้ำ	0.9185	0.8648	0.8500	0.8778

## ภาคผนวก ข

### ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

#### ข- ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาได้โดยการทดลองซ้ำที่สภาวะการทดลองเดียวกัน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยและช่วงความคลาดเคลื่อนแสดงดังตาราง ข-1 ถึง ข-4

ตาราง ข-1 แสดงผลการทดลองและร้อยละความคลาดเคลื่อนของปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล ที่สภาวะ 82°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)				ความคลาดเคลื่อน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	Max.	Min.
0	1.974	2.038	1.980	1.997	2.038	1.974
15	1.841	1.851	1.928	1.873	1.928	1.841
30	1.660	1.777	1.709	1.715	1.777	1.660
45	1.553	1.607	1.646	1.602	1.646	1.553
60	1.458	1.511	1.459	1.476	1.511	1.458
90	1.170	1.298	1.344	1.271	1.344	1.170
120	1.256	1.160	1.188	1.201	1.256	1.160
180	0.883	0.931	0.995	0.936	0.995	0.883
240	0.734	0.809	0.828	0.790	0.828	0.734
360	0.617	0.724	0.709	0.683	0.724	0.617
420	0.617	0.617	0.636	0.623	0.636	0.617
480	0.489	0.564	0.557	0.537	0.564	0.489

ตาราง ข-1 แสดงผลการทดลองและร้อยละความคลาดเคลื่อนของปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับ  
บิวทานอล ที่สภาวะ 110°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4%wt

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)				ความคลาดเคลื่อน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	Max.	Min.
0	1.544	1.571	1.548	1.554	1.571	1.544
15	1.313	1.192	1.322	1.276	1.322	1.192
30	1.104	1.040	1.118	1.087	1.118	1.040
45	-	-	0.935	0.935	0.935	0.935
60	0.736	0.808	0.828	0.791	0.828	0.736
90	0.620	0.667	0.699	0.662	0.699	0.620
120	0.541	0.576	0.602	0.573	0.602	0.541
180	0.462	0.490	0.473	0.475	0.490	0.462
240	0.411	0.369	0.387	0.389	0.411	0.369
360	0.368	0.374	0.355	0.365	0.374	0.355
420	0.390	0.323	0.323	0.345	0.390	0.323
480	0.346	0.303	0.290	0.313	0.346	0.290

ตาราง ข-3 แสดงผลการทดลองและร้อยละความคลาดเคลื่อนของปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล ที่สภาวะ 82°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt และมีการแยกน้ำ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)				ความคลาดเคลื่อน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	Max.	Min.
0	2.145	2.074	2.052	2.090	2.145	2.052
15	1.994	1.931	1.948	1.957	1.994	1.931
30	1.837	1.698	1.651	1.729	1.837	1.651
45	1.575	1.475	1.440	1.497	1.575	1.440
60	1.335	1.287	1.238	1.286	1.335	1.238
90	1.016	0.960	0.963	0.980	1.016	0.960
120	0.827	0.752	0.708	0.762	0.827	0.708
180	0.531	0.465	0.448	0.481	0.531	0.448
240	0.369	0.307	0.292	0.323	0.369	0.292
360	0.274	0.208	0.198	0.227	0.274	0.198
420	0.223	0.153	0.144	0.173	0.223	0.144
480	0.168	0.124	0.116	0.136	0.168	0.116
540	0.168	0.104	0.097	0.123	0.168	0.097
600	0.145	0.094	0.092	0.110	0.145	0.092

ตาราง ข-4 แสดงผลการทดลองและร้อยละความคลาดเคลื่อนของปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับ  
บิวทานอล ที่สภาวะ 110°C อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt และมีการแยกน้ำ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)				ความคลาดเคลื่อน	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	Max.	Min.
0	1.664	1.643	1.643	1.650	1.664	1.643
15	1.206	1.317	1.356	1.293	1.356	1.206
30	0.877	0.896	0.960	0.911	0.960	0.877
45	0.626	0.693	0.693	0.671	0.693	0.626
60	0.491	0.520	0.540	0.517	0.540	0.491
90	0.290	0.411	0.327	0.343	0.411	0.290
120	0.184	0.213	0.213	0.203	0.213	0.184
180	0.095	0.099	0.119	0.104	0.119	0.095
240	0.073	0.079	0.079	0.077	0.079	0.073
360	0.058	0.059	0.069	0.062	0.069	0.058
420	0.056	0.060	0.064	0.060	0.064	0.056
480	0.057	0.054	0.059	0.057	0.059	0.054
540	0.056	0.059	0.058	0.058	0.059	0.056
600	0.055	0.058	0.059	0.057	0.059	0.055

#### ข-1 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ตัวอย่าง 2 วิธี คือ การไทเทรตหาความเข้มข้นกรดลอริก  
และการหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี หาความคลาดเคลื่อนโดยการ  
วิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันซ้ำ 3 ครั้ง ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง ข-5

ตาราง ข-5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตและวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

ครั้งที่	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร) (วิธีการไทเทรต)	ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเอทิลลอเรต (วิธีแก๊สโครมาโทกราฟี)
1	0.123	96.85
2	0.120	96.77
3	0.121	96.58
เฉลี่ย	0.121	96.73
ความคลาดเคลื่อน	2.47%	0.27%

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์ผลการทดลอง**

**ค-1 การทดลองผลของชนิดแอลกอฮอล์**

**ตาราง ค-1** สภาวะการทดลองผลของชนิดแอลกอฮอล์

สภาวะการทดลอง	สารตั้งต้น			
	กรดลอริก	เอทานอล	กรดลอริก	บิวทานอล
<b>อัตราส่วนโดยโมล</b>	1	4	1	4
- จำนวนโมล (โมล)	0.674	2.696	0.674	2.696
- น้ำหนัก (กรัม)	135	124	135	200
<b>อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)</b>	80		80	
<b>ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา</b>				
- ร้อยละโดยน้ำหนัก	8		8	
- น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	11		11	

**ตาราง ค-2** ผลการทดลองผลของชนิดแอลกอฮอล์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)		เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)	
	เอทานอล	บิวทานอล		เอทานอล	บิวทานอล
0	2.111	1.573	180	1.016	0.738
15	1.955	1.519	240	0.882	0.621
30	1.843	1.370	300	0.771	0.578
45	1.720	1.252	360	0.659	0.519
60	1.631	1.140	420	0.598	0.482
90	1.430	0.974	480	0.547	0.428
120	1.273	0.888			

ค-2 การทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล

ตาราง ค-3 สภาวะการทดลองผลของอัตราส่วนของกรดลอริกต่อเอทานอล

อัตราส่วน โดยโมล	กรดลอริก		เอทานอล		ตัวเร่งปฏิกิริยา	
	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(%wt)	(กรัม)
1:1	280	318	64	82	12	34
1:2	233	264	107	136	12	28
1:4	174	197	160	203	12	21
1:8	115	131	212	269	12	14
อุณหภูมิ	82 องศาเซลเซียส					

ตาราง ค-4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)				เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)			
	1:1	1:2	1:4	1:8		1:1	1:2	1:4	1:8
0	3.440	2.915	2.161	1.345	240	2.359	1.720	0.631	0.320
15	3.368	2.750	1.894	1.217	300	2.328	1.586	0.514	0.247
30	3.157	2.601	1.701	1.057	360	2.137	1.432	0.465	0.211
45	3.090	2.493	1.509	0.964	420	1.998	1.308	0.407	0.175
60	3.059	2.338	1.396	0.856	480	1.936	1.267	0.364	0.160
90	2.987	2.328	1.177	0.701	540	1.864	1.143	0.326	0.144
120	2.853	2.122	1.006	0.588	600	1.730	1.133	0.310	0.134
180	2.647	1.875	0.754	0.412					

ค-3 การทดลองผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล

ตาราง ค-5 สภาวะการทดลองผลของอัตราส่วนของกรดลอริกต่อเอทานอล

สภาวะการทดลอง	ตัวเร่งปฏิกิริยา					
	0%wt	2%wt	4%wt	8%wt	10%wt	12%wt
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0	3.5	7	14	17	21
กรดลอริกต่อเอทานอล 1:4						
- น้ำหนักกรดลอริก (กรัม)	174	174	174	174	174	174
- น้ำหนักเอทานอล (กรัม)	160	160	160	160	160	160
อุณหภูมิ	82 องศาเซลเซียส					

ตาราง ค-6 ผลการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)					
	0%wt	2%wt	4%wt	8%wt	10%wt	12%wt
0	2.141	2.126	2.050	2.038	2.011	1.957
15	2.122	2.042	1.922	1.851	1.886	1.849
30	2.110	2.011	1.818	1.777	1.719	1.623
45	-	1.959	-	1.607	1.521	1.451
60	2.098	1.917	1.697	1.511	1.428	1.312
90	2.085	1.865	1.596	1.298	1.240	1.097
120	2.073	1.678	1.505	1.160	1.131	0.968
180	2.061	1.605	1.303	0.931	0.896	0.747
240	2.055	1.469	1.126	0.809	0.750	0.613
300	2.036	1.370	1.030	0.724	0.636	0.516
360	2.011	1.271	0.960	0.617	0.552	0.419
420	2.024	1.198	0.889	0.564	0.500	0.376
480	2.011	1.125	0.843	0.532	0.458	0.344

ค-4 การทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล

ตาราง ค-7 สภาวะการทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับเอทานอล

อุณหภูมิ (°C)	กรดลอริก		เอทานอล		ตัวเร่งปฏิกิริยา	
	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(%wt)	(กรัม)
70	174	197	160	203	12	34
82	174	197	160	203	12	34

อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล เท่ากับ 1:4

ตาราง ค-8 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับเอทานอลและ  
วิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอรริก (โมล/ลิตร)		เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอรริก (โมล/ลิตร)	
	70°C	82°C		70°C	82°C
0	2.247	2.161	240	1.279	0.754
15	2.076	1.894	300	1.124	0.631
30	1.969	1.701	360	0.990	0.514
45	1.899	1.509	420	0.904	0.465
60	1.792	1.396	480	0.824	0.407
90	1.616	1.177	540	0.722	0.364
120	1.466	1.006	600	0.685	0.326
180	2.247	2.161			

ตาราง ค-9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับ  
เอทานอล)

อุณหภูมิ (°C)	สมการเส้นตรง	R <sup>2</sup>
70	$Y = 0.0037X$	0.9802
82	$Y = 0.0068X$	0.9900

**ค-5 การทดลองผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล**

ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอล 1:4 อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และปฏิกิริยามีการแยกน้ำออกด้วยคอลัมน์ดูดซับ

**ตาราง ค-10** ผลการทดลองผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล และวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)		เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)	
	82°C	82°C-แยกน้ำ		82°C	82°C-แยกน้ำ
0	2.161	2.074	240	0.631	0.307
15	1.894	1.931	300	0.514	0.208
30	1.701	1.698	360	0.465	0.153
45	1.509	1.475	420	0.407	0.124
60	1.396	1.287	480	0.364	0.104
90	1.177	0.960	540	0.326	0.094
120	1.006	0.752	600	0.310	0.089
180	0.754	0.465			

**ค-6 การทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล**

**ตาราง ค-11** สภาวะการทดลองผลของอัตราส่วนของกรดลอริกต่อบิวทานอล

อัตราส่วน โดยโมล	กรดลอริก		บิวทานอล		ตัวเร่งปฏิกิริยา	
	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(%wt)	(กรัม)
1:1	251	285	93	115	8	20
1:2	195	222	145	178	8	16
1:4	135	153	200	247	8	11
1:8	84	95	247	305	8	7
อุณหภูมิ	100 องศาเซลเซียส					

ตาราง ค-12 ผลการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอรริกต่อบิวทานอลและวิเคราะห์ผล  
การทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอรริก (โมล/ลิตร)				เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอรริก (โมล/ลิตร)			
	1:1	1:2	1:4	1:8		1:1	1:2	1:4	1:8
0	3.19	2.43	1.59	0.97	240	2.42	1.39	0.49	0.12
15	3.06	2.21	1.43	0.84	300	2.25	1.32	0.41	0.09
30	3.10	2.12	1.20	0.68	360	2.09	1.17	0.39	0.09
45	2.84	2.09	1.10	0.55	420	1.96	1.12	0.34	0.08
60	2.85	1.93	0.95	0.45	480	1.83	1.03	0.31	0.08
90	2.73	1.85	0.82	0.34	540	1.85	0.98	0.30	0.07
120	2.68	1.72	0.72	0.25	600	1.78	0.89	0.28	0.07
180	2.53	1.52	0.59	0.16					

ค-7 การทดลองผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอรริกกับเอทานอล

ตาราง ค-13 สภาวะการทดลองผลของอัตราส่วนของกรดลอรริกต่อบิวทานอล

สภาวะการทดลอง	ตัวเร่งปฏิกิริยา			
	0%wt	2%wt	4%wt	8%wt
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0	2.7	5.4	10.8
กรดลอรริกต่อบิวทานอล 1:4				
- น้ำหนักกรดลอรริก (กรัม)	135	135	135	135
- น้ำหนักบิวทานอล (กรัม)	200	200	200	200
อุณหภูมิ	110 องศาเซลเซียส			

ตาราง ค-14 ผลการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อเอทานอลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)			
	0%wt	2%wt	4%wt	8%wt
0	1.606	1.521	1.548	1.559
15	1.596	1.469	1.322	1.236
30	1.586	1.401	1.118	1.134
45	-	1.219	0.935	0.930
60	1.566	1.084	0.828	0.828
90	1.454	0.974	0.699	0.688
120	1.459	0.828	0.602	0.602
180	1.384	0.656	0.473	0.484
240	1.293	0.526	0.387	0.398
300	1.252	0.485	0.355	0.344
360	1.162	0.417	0.323	0.301
420	1.081	0.386	0.290	0.258
480	1.030	0.333	0.269	0.226

ค-8 การทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับบิวทานอล

ตาราง ค-15 สภาวะการทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอล

อุณหภูมิ (°C)	กรดลอริก		บิวทานอล		ตัวเร่งปฏิกิริยา	
	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(กรัม)	(มิลลิลิตร)	(%wt)	(กรัม)
80	135	153	200	247	8	11
100	135	153	200	247	8	11
110	135	153	200	247	8	11

อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล เท่ากับ 1:4

ตาราง ค-16 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับบิวทานอลและ  
วิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)			เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)		
	80°C	100°C	110°C		80°C	100°C	110°C
0	1.573	1.589	1.610	240	0.621	0.492	0.594
15	1.519	1.428	1.466	300	0.578	0.412	0.546
30	1.370	1.198	1.268	360	0.519	0.385	0.482
45	1.252	1.102	1.166	420	0.482	0.342	0.439
60	1.140	0.947	1.086	480	0.428	0.310	0.396
90	0.974	0.824	0.952	540	0.423	0.300	0.385
120	0.888	0.717	0.813	600	0.401	0.278	0.353
180	0.738	0.594	0.706				

ตาราง ค-17 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดลอริกกับ  
บิวทานอล)

อุณหภูมิ (°C)	สมการเส้นตรง	R <sup>2</sup>
80	$Y = 0.0050X$	0.9860
100	$Y = 0.0073X$	0.9636
110	$Y = 0.0060X$	0.9736

### ค-9 การทดลองผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับบิวทานอล

ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อบิวทานอล 1:4 อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และปฏิกิริยามีการแยกน้ำออกด้วยคอลัมน์ดูดซับ

ตาราง ค-18 ผลการทดลองผลของการแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล และวิเคราะห์ผลการทดลอง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดลอริก (โมล/ลิตร)			
	100°C	100°C-แยกน้ำ	110°C	110°C-แยกน้ำ
0	1.589	1.653	1.610	1.650
15	1.428	1.396	1.466	1.293
30	1.198	1.139	1.268	0.911
45	1.102	1.000	1.166	0.671
60	0.947	0.866	1.086	0.517
90	0.824	0.726	0.952	0.343
120	0.717	0.603	0.813	0.203
180	0.594	0.491	0.706	0.104
240	0.492	0.391	0.594	0.077
300	0.412	0.302	0.546	0.062
360	0.385	0.268	0.482	0.060
420	0.342	0.229	0.439	0.057
480	0.310	0.201	0.396	0.058
540	0.300	0.179	0.385	0.058
600	0.278	0.162	0.353	0.058

ตาราง ค-19 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (การแยกน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดลอริกกับเอทานอล)

อุณหภูมิ (°C)	สมการเส้นตรง	R <sup>2</sup>
100	Y = 0.0073X	0.9636
100-แยกน้ำ	Y = 0.0092X	0.9522
110	Y = 0.0060X	0.9736
110-แยกน้ำ	Y = 0.0179X	0.9924



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนลินี อุดรพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 มีภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดศรีสะเกษ มีพี่น้อง 2 คน เป็นลูกคนที่ 2 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษา

