

การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20)
โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

นางสาวลลิตา เมฆเสวีวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PRODUCTION OF ETHYL ACETATE USING ION EXCHANGE RESIN (AMBERLYST BD 20)
WITH CONTINUOUS WATER REMOVAL

Miss Lalida Mekseriwattana

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน
(แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำ
อย่างต่อเนื่อง

โดย

นางสาวลลิตา เมฆเสรีวัฒนา

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)

ลลิตา เมฆเสวีวัฒนา : การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง. (PRODUCTION OF ETHYL ACETATE USING ION EXCHANGE RESIN (AMBERLYST BD 20) WITH CONTINUOUS WATER REMOVAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา, 114 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 2 ลิตร ที่ความดัน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ ความเร็วรอบในการกวนระหว่าง 50-600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลระหว่าง 1:1-1:8 และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 60-90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลเพียงปฏิกิริยาเดียว และเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ค่าร้อยละ การเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกสูงกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ความเร็วรอบในการกวนมากกว่า 100 รอบต่อนาที และที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 จะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในช่วงแรกของปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำและระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องเป็น ปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำและระบบที่มีการแยกน้ำมีค่าเท่ากับ 44 และ 88.08 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2556.....

5370481321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ETHYL ACETATE / ESTERIFICATION REACTION / AMBERLYST BD 20

LALIDA MEKSERIWATTANA : PRODUCTION OF ETHYL ACETATE USING ION EXCHANGE RESIN (AMBERLYST BD 20) WITH CONTINUOUS WATER REMOVAL. ADVISOR : JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 114 pp.

In this study, production of ethyl acetate using ion exchange resin (Amberlyst BD 20) with continuous water removal was investigated. The experiments were conducted in a 2 liters batch reactor at pressure of 100 psi. The effects of stirring speed of 50-600 rpm, the amount of catalyst of 5-10 %weight of acetic acid, the molar ratio of acetic acid to ethanol of 1:1-1:8 and reaction temperature of 60-90 degree Celsius were studied. The experimental results show that ethyl acetate is produced by single reaction of esterification reaction of acetic acid with ethanol. The reaction is reversible reaction. Moreover, using ion exchange resin as a catalyst in esterification reaction gives higher conversion of acetic acid than non-catalytic reaction. The conversion of acetic acid increases with increasing of the amount of catalyst, the molar ratio of acetic acid to ethanol and reaction temperature. At stirring speed higher than 100 rpm and molar ratio of acetic acid to ethanol higher than 1:4 do not affect to the esterification reaction. The kinetic model during initial period of production of ethyl acetate using ion exchange resin (Amberlyst BD 20) without and with continuous water removal are pseudo-first order irreversible reaction. The activation energy of without and with continuous water removal are 44 and 88.08 kJ/mole of acetic acid respectively.

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

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

Academic Year : 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความรู้ แนวคิดทฤษฎี และคำแนะนำต่างๆ เพื่อนำมาใช้ ในการพัฒนางานวิจัย รวมทั้งความช่วยเหลือในทุกๆด้านมาตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ ประธานกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช และ อาจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้มาตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification Reaction).....	5
2.1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	5
2.1.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	6
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพิพันธุ์ ชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	8
2.2.1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Resin)	8
2.2.2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Resin)	9
2.3 โมเลคิวลาร์ซีฟ (Molecular sieve).....	13
2.4 จลนพลศาสตร์เคมี	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์	28
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	30
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20)....	30

3.2.2 การเตรียมโมเลกุลคาร์ซีฟชนิด 3A.....	30
3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	30
3.2.4 สภาวะการทดลอง.....	31
3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
3.4 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและการวิเคราะห์.....	31
3.4.1 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (Experimental Error).....	31
3.4.2 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ (Analysis Error)	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	34
4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล	35
4.2 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)	39
4.2.1 ผลกระทบของความเร็วยวรอบในการกวน	39
4.2.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล.....	42
4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	45
4.2.5 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	46
4.2.6 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	50
4.3 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	52
4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล.....	52
4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	54
4.3.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	55
4.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ กับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	58
4.4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล	58
4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	60

4.4.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20).....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	64
รายการอ้างอิง	65
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	74
ภาคผนวก ค	85
ภาคผนวก ง	87
ภาคผนวก จ	92
ภาคผนวก ฉ	95
ภาคผนวก ช	99
ภาคผนวก ซ	103
ภาคผนวก ฌ	106
ภาคผนวก ฎ	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	28
ตารางที่ 3.2	สภาวะการทดลอง.....	31
ตารางที่ 3.3	ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง.....	32
ตารางที่ 3.4	ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์.....	33
ตารางที่ 4.1	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาทีของปฏิกิริยา เอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
ตารางที่ 4.2	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุล ที่ความเร็วรอบในการกวนต่างๆ	40
ตารางที่ 4.3	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	41
ตารางที่ 4.4	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ.....	44
ตารางที่ 4.5	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ	46
ตารางที่ 4.6	ค่าความชันจากกราฟการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง แบบไม่ผันกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	48
ตารางที่ 4.7	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	48
ตารางที่ 4.8	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ.....	50
ตารางที่ 4.9	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละครั้ง	51
ตารางที่ 4.10	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อัตราส่วนโดยโมล ของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	53
ตารางที่ 4.11	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	55

ตารางที่ 4.12	ค่าความชันของกราฟการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง แบบไม่ผันกลับที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	57
ตารางที่ 4.13	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	57
ตารางที่ 4.14	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ	59
ตารางที่ 4.15	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	61
ตารางที่ ก-1	สภาวะของคอลัมน์	71
ตารางที่ ก-2	ค่าแฟคเตอร์ตอบสนองของกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท	72
ตารางที่ ข-1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของกรดอะซิติก	75
ตารางที่ ข-2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของเอทานอล	76
ตารางที่ ข-3	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของเอทิลอะซิเตท	77
ตารางที่ ข-4	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 420 และ 480 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ	84
ตารางที่ ข-5	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 420 และ 480 นาที ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	84
ตารางที่ ข-6	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีและวิธีไตเตรต	84
ตารางที่ ค-1	ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส	85
ตารางที่ ค-2	ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส	86
ตารางที่ ง-1	ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ กรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที	87

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	29
รูปที่ 4.1	โครมาโตแกรมของสารตัวอย่าง	35
รูปที่ 4.2	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกกับเวลาของสารตัวอย่าง ที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไตเตรต.....	36
รูปที่ 4.3	ผลของการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอล.....	37
รูปที่ 4.4	ผลของการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอล.....	38
รูปที่ 4.5	ผลกระทบของความเร็วยวอบในการกวนที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	39
รูปที่ 4.6	ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	41
รูปที่ 4.7	ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่มีต่อปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	43
รูปที่ 4.8	ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	45
รูปที่ 4.9	ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับของปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	47
รูปที่ 4.10	ค่าคงที่ของปฏิกิริยากับอุณหภูมิต่างๆตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	49
รูปที่ 4.11	ผลกระทบของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีต่อปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล	51
รูปที่ 4.12	ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่มีต่อปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	53

รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของ กรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในระบบที่มีการแยกน้ำ อย่างต่อเนื่อง	54
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับของการผลิต เอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	56
รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ของปฏิกิริยากับอุณหภูมิต่างๆตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของการผลิต เอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง	58
รูปที่ 4.16 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ.....	59
รูปที่ 4.17 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	60
รูปที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของกรดอะซิติก.....	74
รูปที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของเอทานอล.....	75
รูปที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของเอทิลอะซิเตท.....	76
รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ.....	78
รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 420 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ.....	79
รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ.....	80
รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 นาที ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	81
รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 420 นาที ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	82
รูปที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง.....	83

บทที่ 1

บทนำ

เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate) หรือเอทิลเอทานอย (Ethyl Ethanoate) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีลักษณะใส มีกลิ่นผลไม้ สามารถละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์เช่น แอลกอฮอล์ อะซิโตน และอีเทอร์ เป็นต้น เอทิลอะซิเตทนิยมใช้เป็น ตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมสี ทินเนอร์ แล็กเกอร์ หมึกพิมพ์ กาว พลาสติก และเครื่องหนัง เนื่องจากเอทิลอะซิเตทเป็นตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุดในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังเป็นสารประกอบสำคัญในการสกัด ความเข้มข้นและการทำให้บริสุทธิ์ของยาปฏิชีวนะในทางเภสัชกรรม ใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ และใช้ในการทำไหมเทียม

เอทิลอะซิเตทสามารถผลิตได้จาก 2 ปฏิกิริยา คือ 1) ปฏิกิริยาทิชเชนโก (Tishchenko Reaction) [1] ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบอะลดีไฮด์ (Acetaldehyde) 2 โมเลกุล โดยมีแอลกอฮอล์ (Alkoxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ 2) ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้โดยทั่วไป เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอะซิติกกับเอทานอล และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดได้ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง วิธีนี้มีข้อดีคือ เกิดผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง และไม่ต้องมีกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานสูง เพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งย่อยตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีก 3 ชนิดคือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ เอนไซม์ที่นิยมใช้กันมากคือ เอนไซม์ไลเปส [2] ข้อดีของการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ และมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีแม้จะใช้ในปริมาณน้อย แต่มีข้อเสียคือ เอนไซม์มีราคาแพงและเกิดปฏิกิริยาช้า 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพังก์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพังก์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ สารละลายกรด โดยเฉพาะ กรดซัลฟิวริก [3] ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพังก์มีข้อดีคือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูก ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วและได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง

[4] แต่มีข้อเสียคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตรถยนต์อาจมีการปนเปื้อนของซัลเฟต ไอออน ต้องใช้กระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ และไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้ 3) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ที่นิยมใช้คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ และสามารถแก้ไขข้อเสียที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธุ์ได้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ไม่กัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ ไม่ต้องมีกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนอย่างแพร่หลายเช่น งานวิจัยของ Altiokka และ Citak [5] ที่ศึกษาการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันระหว่างกรดมาลิกกับไอโซบิวทานอล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี และช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และจากงานวิจัยของ Ozbay, Oktar และ Tapan [6] ที่ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนหลายชนิดในปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน พบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ไลต์ 15 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดอื่น และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ไลต์ 15 ยังมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์มากที่สุด นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Park, Kim และ Lee [7] ที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 2 ชนิดคือ แอมเบอร์ไลต์ 15 และแอมเบอร์ไลต์ บีดี 20 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ไลต์ บีดี 20 มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าแอมเบอร์ไลต์ 15

ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันระหว่างกรดอะซิติกกับเอทานอลเป็นปฏิกิริยาที่มีการผันกลับได้ ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นถูกจำกัดด้วยสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้น ต้องรบกวนสมดุลของปฏิกิริยาโดยการผลักให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้น และแยกผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lucena, Silva และ Fernandes [3] ที่ศึกษาพบว่าการแยกน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน ส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น ได้ร้อยละผลได้ (Yield) ของผลิตภัณฑ์มากกว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากเกินไป และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์คือ กรดซัลฟิวริก จะส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มากขึ้นและปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้น และจากงานวิจัยของ Oliveira และคณะ [8] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของการแยกน้ำโดยใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A พบว่าระบบที่มีการแยกน้ำด้วยโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงกว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A แยกน้ำออกจากระบบ เป็นการผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจึงมีค่าสูงขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยที่มีผลการศึกษาได้แก่ ความเร็วรอบในการกวน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องด้วยโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง มีปัจจัยที่ต้องการศึกษาดังนี้คือ

1. ความเร็วรอบในการกวนที่ 50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) คือร้อยละ 5 7 และ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก
3. อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลคือ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส
5. การแยกน้ำอย่างต่อเนื่องด้วยโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A แยกน้ำอย่างต่อเนื่องในการผลิตเอทิลอะซิเตทจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification Reaction)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดคาร์บอกซิลิก (R_1COOH) กับ แอลกอฮอล์ (R_2OH) ในสถานะที่เป็นกรด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ (R_1COOR_2) และมีน้ำ (H_2O) เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนแสดงเป็นสมการเคมีได้ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งในงานวิจัยนี้กรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ที่ใช้คือ กรดอะซิติก และเอทานอล ตามลำดับ



ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ โดยปฏิกิริยาที่ผันกลับเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ทำให้ปริมาณอัลคิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นถูกควบคุมโดยสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อให้มีปริมาณอัลคิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น จึงต้องรบกวนสมดุลของปฏิกิริยาให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าให้มากขึ้น เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุด ซึ่งการผลักดันให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าให้มากขึ้นทำได้โดย การเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นให้มากกว่าหลักมวลสารสัมพันธ์ และการแยกผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

2.1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง วิธีนี้มีข้อดีคือ เกิดผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง และไม่ต้องมีกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานสูงเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง

Somsai [9] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันปาล์มที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระร้อยละ 90.05 โดยน้ำหนัก กับเมทานอล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 300 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:1 1:5

และ 1:10 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 300 นาที ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล ผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส อัตราการ เกิดปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 90 นาที และเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 100 นาที เป็นต้นไป สภาพที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่สุดคือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อ เมทานอลคือ 1:5 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดันของระบบ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้เหลือร้อยละ 26.82 นอกจากนี้ การเพิ่มความดันไม่มีผลต่อ การเกิดปฏิกิริยา และคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมัน ปาล์มกับเมทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 31.5 กิโลจูลต่อโมล

2.1.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ 3 ชนิดดังนี้คือ

2.1.2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ที่นิยมใช้กันมากคือ เอนไซม์ไลเปส [2] ข้อดีของการใช้เอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ และใช้เอนไซม์ใน ปริมาณน้อยแต่เอนไซม์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามี ข้อเสียคือ เอนไซม์มีราคาแพง และใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยา

Martins และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของการสังเคราะห์ บิวทิลอะซิเตทโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ไลเปส บี (Novozym 435) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ การเกิดปฏิกิริยาได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อบิวทานอลคือ 1:3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2.5 ชั่วโมง ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ มากกว่าร้อยละ 90 และสามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการบำบัด เอนไซม์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ 3 วิธีคือ การล้างเอนไซม์ด้วยนอร์มัลเฮกเซน การล้างเอนไซม์ด้วยน้ำ และการแช่เอนไซม์ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้เอนไซม์ซ้ำทันที หรือการล้างเอนไซม์ด้วยน้ำมีผลทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ลดลงอย่างรวดเร็ว

ขณะที่การล้างเอนไซม์ด้วยนอร์มัลเฮกเซนจะส่งผลให้สามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ได้อีก 6 ครั้ง โดยสามารถรักษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไว้ได้ถึงร้อยละ 70

2.1.2.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ กรดซัลฟิวริก [3] ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์มีข้อดีคือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูก ปฏิกริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง [4] แต่มีข้อเสียคือ ตัวเร่งปฏิกิริยากัดร่อนเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์อาจมีการปนเปื้อนของซัลเฟตไอออนที่มาจากตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องใช้กระบวนการล้างน้ำเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์กับตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จึงต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการนี้ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ และไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้

Lucena , Silva และ Fernandes [3] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 3A ดูดซับน้ำ เพื่อแยกน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบ ทำการทดลองในเครื่องแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิเหนือจุดเดือดของเมทานอลและน้ำคือ ช่วงระหว่าง 90 – 110 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกระหว่างร้อยละ 0.5 – 1.0 โดยน้ำหนักของกรดโอเลอิก อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเมทานอลระหว่าง 1:3 – 1:9 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเมทานอลที่ใช้เป็นอัตราส่วนเดียวกันกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 80 นาที เก็บตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 10 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในระบบที่ไม่มี การแยกน้ำได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลคือ ร้อยละ 88.2 แต่ในระบบที่มีการแยกน้ำจะได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 99.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแยกน้ำออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อสมดุลของปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นส่งผลให้ได้รับร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมากขึ้น สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 3A ดูดซับคือ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดโอเลอิก และอัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเมทานอลคือ 1:3

2.1.2.3 ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทของแข็ง และตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์นี้มีข้อดีคือ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ และสามารถแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดจากการใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ได้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์จะไม่ก่กร่อนเครื่องปฏิกรณ์ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ทันที เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้

Liu และคณะ [10] ศึกษาเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเมทานอลแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ และชนิดเอกพันธ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาคือ นาโนคอมโพสิตแนฟิออน/ซิลิกา (SAC-13) และกรดซัลฟิวริก ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ นาโนคอมโพสิตแนฟิออน/ซิลิกา (SAC-13) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ กรดซัลฟิวริก

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน [11]

เรซิน หมายถึง สารพอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (Cross – linked) หรือแบบร่างแห (Three Dimension Network) ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป

การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนจากของแข็งกับไอออนในสารละลาย โดยที่กระบวนการนี้จะไม่ทำให้โครงสร้างของของแข็งเปลี่ยนแปลงมากนัก และของแข็งที่นิยมใช้กันมากคือเรซิน

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.2.1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Resin)

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) เช่น หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ทัั้งไพรมารี (Primary, 1°) เซเคิลดารี (Secondary, 2°) เทอร์เชียรี (Tertiary, 3°) และหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary Ammonium Group) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบ (Anion) จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2



โดย $R^+ A^-$ คือ เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ B^- คือ ไอออนลบที่อยู่ในสารละลาย
 $R^+ B^-$ คือ เรซินเมื่อแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว และ A^- คือ ไอออนลบที่เรซินปล่อยออกมา

สามารถแบ่งย่อยประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบตามหมู่ฟังก์ชันเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสแก่ (Strong Base Ion Exchange Resin)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสแก่ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันควอเตอร์นารีแอมโมเนียม
 ตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสแก่ได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 26 (Amberlyst 26)
 แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์เอ 400 (Amberlite IRA 400) และโดเวก เอ็มเอชเอ 1 (Dowex MHA 1)

2.2.1.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสอ่อน (Weak Base Ion Exchange Resin)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสอ่อนคือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันหมู่อะมิโน ($-NH_2$)
 ทั้งไพรมารี (Primary, 1°) เซเคิลดารี (Secondary, 2°) และเทอร์เชียรี (Tertiary, 3°) ตัวอย่างเรซิน
 แลกเปลี่ยนไอออนแบบเบสอ่อนได้แก่ แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์เอ 67 (Amberlite IRA 67) โดเวก 66
 (Dowex 66) และดูโอไลต์ เอ 7 (Duolite A 7)

2.2.2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Resin)

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group)
 เช่น $-OH$ $-COOH$ $-PO(OH)_2$ และ $-SO_3H$ เป็นต้น โดยเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะทำ
 ปฏิกิริยากับไอออนบวกในสารละลายดังแสดงในสมการ (2.3)



โดย $R^+ A^-$ คือ เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก B^+ คือ ไอออนบวกที่อยู่ในสารละลาย
 $R^+ B^+$ คือ เรซินเมื่อแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว และ A^+ คือ ไอออนบวกที่เรซินปล่อยออกมา

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยประเภทของเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกตามหมู่ฟังก์ชัน
 เป็น 2 ประเภทคือ

2.2.2.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่ (Strong Acid Ion Exchange Resin)

เรซินแบบกรดแก่ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิค ($-SO_3H$) และหมู่เมทิลีนซัลโฟนิค
 (CH_2SO_3H) ตัวอย่างเรซินแบบกรดแก่ได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 15 (Amberlyst 15) แอมเบอร์ลิสต์ 131
 (Amberlyst 131) และลิวาติทท์ จีเอฟ 101 (Lewatit GF 101)

Kirbaslar, Baykal และ Dramur [12] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของ กรดอะซิติกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่ แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลตามหลักมวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีเมื่อใช้แอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลที่ได้จากการ ทดลองคือ 104,129 กิโลจูลต่อกิโลโมล นอกจากนี้ได้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์การกลั่นแบบมี ปฏิกิริยาร่วม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การผลิตเอทิลอะซิเตทในเครื่องปฏิกรณ์การกลั่นแบบมี ปฏิกิริยาร่วมได้เอทิลอะซิเตทที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า

Lzci และ Bodur [13] ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของ กรดอะซิติกกับไอโซบิวทานอลในสารละลาย 1,4 ไดออกเซน โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเร็วรอบในการกวน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 45-75 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนระหว่าง 400-700 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.5 – 1.5 กรัมต่อปริมาณสารตั้งต้น 1 ลิตร อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อไอโซบิวทานอลคือ 1:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดคือ โดเวก 50 (Dowex 50 Wx2) และแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 (Amberlite IR 120) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดเวก 50 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 เนื่องจากโดเวก 50 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ขนาดพื้นที่ผิวและมีปริมาตรช่องว่างสูงกว่าแอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 และผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติก กับไอโซบิวทานอล แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมเป็นแบบจำลอง เสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน (Pseudo-homogeneous) เนื่องจากความเร็วรอบในการกวนที่ใช้ ในการศึกษาสามารถกำจัดอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกได้ นอกจากนี้ในช่วงแรก ของปฏิกิริยา อัตราการเกิดของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบในการกวนและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดเวก 50 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 1.745 กิโลจูลต่อโมล แต่ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเมื่อไม่ใช้โดเวก 50 คือ 59.3 กิโลจูล ต่อโมล แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดเวก 50 มีความสามารถในการเร่ง ปฏิกิริยาสูง

Ozbay, Oktar และ Tapan [6] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่ ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันไข่แล้วที่มีกรดไขมันอิสระในปริมาณสูง ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ศึกษาได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 15 (Amberlyst 15) แอมเบอร์ลิสต์ 35 (Amberlyst 35) แอมเบอร์ลิสต์ 16 (Amberlyst 16) และโดเว็กซ์ เอชซีอาร์ ดับบลิว 2 (Dowex HCR-W2) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 50 – 60 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 – 2 โดยน้ำหนักของกรดไขมันอิสระ ทำการทดลองในเครื่องแก้วขนาดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการกวน 1,500 รอบต่อนาที ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ เริ่มต้นเก็บตัวอย่างที่เวลา 3 5 และ 10 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างทุกๆ 20 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ แอมเบอร์ลิสต์ 15 > แอมเบอร์ลิสต์ 35 > แอมเบอร์ลิสต์ 16 > โดเว็กซ์ เอชซีอาร์ ดับบลิว 2 เนื่องจากแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมาก ทำให้กรดไขมันอิสระสามารถเข้าไปสัมผัสกับพื้นผิวด้านในของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้มาก ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้มากขึ้น นอกจากนี้แอมเบอร์ลิสต์ 15 ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพดีกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดอื่น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์คือ กรดซัลฟิวริก พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับกรดซัลฟิวริกมากที่สุด เนื่องจากการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ลิสต์ 15 ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์คือ ร้อยละ 45 ขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์คือ ร้อยละ 50 และผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

Park, Kim และ Lee [7] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนคือ แอมเบอร์ลิสต์ 15 และแอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 ทำการทดลองโดยน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 2.5 50 และ 99.8 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลคือ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 4 kgf/cm² ความเร็วรอบในการกวนคือ 200 รอบต่อนาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 มีประสิทธิภาพดีกว่าแอมเบอร์ลิสต์ 15 เนื่องจากเมื่อนำเรซิน

แลกเปลี่ยนไอออนกลับมาใช้ใหม่ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแอมเบอร์ลิสต์ 15 มีค่าลดลง ขณะที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20 ไม่ลดลง เมื่อนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนไปวิเคราะห์ SEM ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20 ไม่มีรูพรุน ซึ่งช่วยลดปัญหาการยับยั้งของน้ำที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในระหว่างทำปฏิกิริยาที่ทำให้ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลดลง การมีรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแอมเบอร์ลิสต์ 15 ทำให้โมเลกุลของน้ำที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมถูกดูดซับเข้าไป และทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งไม่ให้น้ำมันในส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าไปสัมผัสกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ ทำให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีรูพรุนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้น้อยกว่าแบบที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นแอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าแอมเบอร์ลิสต์ 15

2.2.2.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดอ่อน (Weak Acid Ion Exchange Resin)

เรซินแบบกรดอ่อน คือเรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ($-COOH$) หมู่ฟอสโฟนิก ($-PO_3^{2-} H_2^+$) และหมู่ฟีนอลิกไฮดรอกซิล ตัวอย่างเรซินได้แก่ แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ซี 50 (Amberlite IRC 50) แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์พี 64 (Amberlite IRP 64) และโดเวก ซีซีอาร์ 3 (Dowex CCR 3)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในสภาวะที่เป็นกรด และนิยมใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่มากกว่าแบบกรดอ่อน เนื่องจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าแบบกรดอ่อน

ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกและเอทานอล ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จะถูกจำกัดด้วยสมดุลของปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ [14] นอกจากนี้ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งเอทิลอะซิเตทและน้ำจะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการรวมตัวกับสารตั้งต้นที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา ทำให้แยกผลิตภัณฑ์เอทิลอะซิเตทได้ยาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องในระหว่างการทำปฏิกิริยา [2] เพื่อผลักสมดุลของปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของเอทิลอะซิเตทเพิ่มขึ้น

2.3 โมเลคิวลาร์ซีฟ (Molecular sieve) [15]

โมเลคิวลาร์ซีฟเป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างผลึก ประกอบด้วยช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมาก ลักษณะเด่นของโมเลคิวลาร์ซีฟ คือสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ โดยที่โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อไล่น้ำออกจากโมเลคิวลาร์ซีฟหมดแล้ว สามารถนำโมเลคิวลาร์ซีฟกลับมาดูดซับโมเลกุลของน้ำได้อีก แต่ถ้าไม่มีน้ำอยู่ในระบบโมเลคิวลาร์ซีฟจะดูดซับโมเลกุลของสารอื่นที่มีขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาในช่องว่างของผลึก

ในปัจจุบันมีโมเลคิวลาร์ซีฟหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งตามขนาดของช่องว่างที่มีอยู่ภายในโมเลคิวลาร์ซีฟได้ดังนี้คือ โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A 4A 5A 10A และ 13X โดยโมเลคิวลาร์ซีฟแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างของผลึก สามารถเรียงลำดับโมเลคิวลาร์ซีฟตามขนาดของโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับจากโมเลกุลเล็กไปถึงขนาดโมเลกุลใหญ่ได้ดังนี้คือ $3A < 4A < 5A < 10A < 13X$

Oliveira และคณะ [8] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวใช้แล้วโดยทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับเอทานอล และศึกษาผลกระทบของการแยกน้ำออกจากระบบโดยกระบวนการดูดซับ ทำการทดลองโดยตัวใช้เร่งปฏิกิริยา คือ กรดซัลฟิวริกในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันมะพร้าวใช้แล้ว และใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ดูดซับน้ำในเฟสแก๊ส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันมะพร้าวใช้แล้วต่อเอทานอลคือ 1:3 และ 1:9 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 90 – 110 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีการใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ดูดซับน้ำ ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันคือ ร้อยละ 99 ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ที่ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันคือ ร้อยละ 80 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ดูดซับน้ำ ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมีค่าสูงขึ้น

Hayook และ Teppitoo [16] ได้ศึกษาการแยกสารผสมเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการดูดซับ โดยใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 4A ดูดซับไอน้ำออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 4A สามารถแยกน้ำออกจากสารผสมของเอทานอล-น้ำได้ ทำให้เอทานอลที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เนื่องจากโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 4A ดูดซับโมเลกุลของน้ำได้เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโมเลกุลของเอทานอลมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของช่องว่างในผลึกของโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 4A

2.4 จลนพลศาสตร์เคมี [17]

จากหนังสือของ Levenspiel [17] ได้อธิบายถึงความหมายของจลนพลศาสตร์เคมีไว้ว่า เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราและกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเปลี่ยนแปลงสารเคมีหนึ่งไปเป็นอีกสารเคมีหนึ่ง

อัตราการเกิดปฏิกิริยาหมายถึง การเปลี่ยนแปลงจำนวนโมลของสารตั้งต้นที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา หรือจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งสามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการ (2.4)

$$r_i = \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{โมลของสารที่เปลี่ยนไป}}{\text{เวลา}} \quad (2.4)$$

โดย อัตราการเกิดปฏิกิริยา = อัตราการลดลงของสารตั้งต้น = อัตราการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์

อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถนิยามได้หลายรูปแบบขึ้นกับสถานะของสาร หรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา เป็นต้น โดยทั่วไปในระบบที่มีสารเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับปริมาตรของสาร ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการ (2.5)

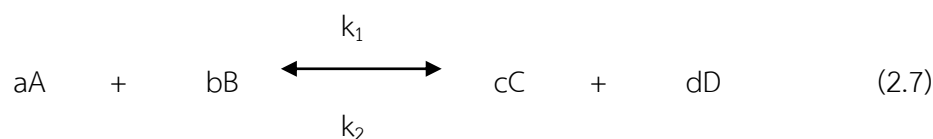
$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{โมลของสารที่เปลี่ยนไป}}{(\text{ปริมาตรของสาร})(\text{เวลา})} \quad (2.5)$$

ในระบบที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สามารถนิยามอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดังสมการ (2.6) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$r_i = \left(\frac{1}{W}\right) \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{โมลของสารที่เปลี่ยนไป}}{(\text{น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา})(\text{เวลา})} \quad (2.6)$$

โดย	r_i	คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร i
	N_i	คือจำนวนโมลของสาร i
	V	คือปริมาตรของสาร
	W	คือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

เอทิลอะซิเตท (C) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของ กรดอะซิติก (A) กับ เอทานอล (B) โดยมีน้ำ (D) เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และเนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ จึงสามารถเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในรูปสมการเคมีดังแสดงในสมการที่ (2.7) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังอันดับของปฏิกิริยา และสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่นี้จะเขียนแสดงในรูปของอัตราการลดลงของกรดอะซิติก ($-r_A$) เนื่องจากกรดอะซิติกถูกใช้ป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันได้ดังแสดงในสมการที่ (2.8)



$$-r_A = k_1 C_A^a C_B^b - k_2 C_C^c C_D^d \quad (2.8)$$

โดยที่	$-r_A$	คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดอะซิติก
	C_A	คือความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)
	C_B	คือความเข้มข้นของเอทานอล (โมลต่อลิตร)
	C_C	คือความเข้มข้นของเอทิลอะซิเตท (โมลต่อลิตร)
	C_D	คือความเข้มข้นของน้ำ (โมลต่อลิตร)
	a	คืออันดับปฏิกิริยาของกรดอะซิติก
	b	คืออันดับปฏิกิริยาของเอทานอล
	c	คืออันดับปฏิกิริยาของเอทิลอะซิเตท
	d	คืออันดับปฏิกิริยาของน้ำ

k_1 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า

k_2 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาย้อนกลับ

การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยรูปแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ มีความเป็นไปได้ 4 รูปแบบคือ

1. ปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ (Reversible Second-order Reaction) โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้คือ

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ เนื่องจากมีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ จนกระทั่งปฏิกิริยาย้อนกลับมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด

จากสมมติฐานสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D \quad (2.9)$$

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่สภาวะสมดุล อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่แล้ว จะได้

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = 0 = k_1 C_{A_e} C_{B_e} - k_2 C_{C_e} C_{D_e} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) สามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุล (K_e) ได้ดังนี้คือ

$$K_e = \frac{k_1}{k_2} = \frac{C_{C_e} C_{D_e}}{C_{A_e} C_{B_e}} \quad (2.11)$$

แทนค่า k_2 จากสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.10) และเปลี่ยนความเข้มข้นให้อยู่ในรูปของ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก โดยที่ $X_A = \frac{C_A - C_{A0}}{C_{A0}}$ จะได้

$$-\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A0} (1 - X_A)(M - X_A) - \frac{(1 - x_{Ae})(M - x_{Ae})x_A^2}{x_{Ae}^2} \quad (2.12)$$

โดยที่ $M = \frac{C_{B0}}{C_{A0}}$, ในกรณีที่ $M = 1$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.12) จะเขียนสมการ อัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$\ln \frac{x_{Ae} - (2x_{Ae} - 1)x_A}{x_{Ae} - x_A} = 2k_1 \left(\frac{W}{V}\right) \left(\frac{1}{x_{Ae}} - 1\right) C_{A0} t \quad (2.13)$$

ในกรณีที่ $M \neq 1$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.12) จะได้

$$\ln \frac{x_{Ae} - \left(\frac{1+M}{M}\right)x_{Ae} - 1)x_A}{x_{Ae} - x_A} = 2k_1 \left(\frac{W}{V}\right) \left(\frac{M}{x_{Ae}} - \frac{M+1}{2}\right) C_{A0} t \quad (2.14)$$

2. ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ (Reversible First-order Reaction) โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้คือ

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ เนื่องจากมีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ จนกระทั่งปฏิกิริยาย้อนกลับมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง (Pseudo-first Order) เนื่องจากมีปริมาณเอทานอลมากเกินพออยู่ในระบบ จนปริมาณของเอทานอลไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว จึงสามารถกำหนดให้ความเข้มข้นของเอทานอล (C_B) เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถนำไปรวมกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของกรดอะซิติก (C_A) เพียงชนิดเดียว จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = k' C_A - k_2 C_c C_D \quad (2.15)$$

โดยที่ $k' = k_1 C_B$ และเนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่สภาวะสมดุล อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่แล้ว ดังนั้นจะได้ว่า

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = 0 = k' C_{A_e} - k_2 C_{c_e} C_{D_e} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลได้ดังนี้คือ

$$K_e = \frac{k'}{k_2} = \frac{C_{c_e} C_{D_e}}{C_{A_e}} \quad (2.17)$$

แทนค่า k_2 จากสมการ (2.17) ลงในสมการ (2.16) และเปลี่ยนความเข้มข้นให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก จะได้

$$-\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dx_A}{dt} = k' C_{A_0} \left((1 - x_A) - \frac{(1 - x_{A_e}) x_A^2}{x_{A_e}^2} \right) \quad (2.18)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.18) จะได้

$$\ln \frac{x_{A_e} - (x_{A_e} - 1)x_A}{x_{A_e} - x_A} = k_1 \left(\frac{W}{V}\right) \left(\frac{2}{x_{A_e}} - 1\right) t \quad (2.19)$$

3. ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่ผันกลับ (Irreversible Second-order Reaction) โดยมีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้คือ

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ เนื่องจากในช่วงแรกของปฏิกิริยามีปริมาณผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้น้อยมาก จึงถือว่าปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) เปลี่ยนความเข้มข้นให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะได้

$$-\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dx_A}{dt} = k_1 C_{A_0} (1 - x_A)(M - x_A) \quad (2.21)$$

โดยที่ $M = \frac{C_{B_0}}{C_{A_0}}$, ในกรณีที่ $M = 1$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.21) จะได้

$$\frac{x_A}{1 - x_A} = k_1 \left(\frac{W}{V}\right) C_{A_0} t \quad (2.22)$$

ในกรณีที่ $M \neq 1$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.21) จะได้

$$\ln \frac{(M - x_A)}{M(1 - x_A)} = k_1 \left(\frac{W}{V}\right) C_{A_0} (M - 1)t \quad (2.23)$$

4. ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ (Irreversible First-order Reaction) มีสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้คือ

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาไม่ผันกลับ เนื่องจากในช่วงแรกของปฏิกิริยา มีปริมาณผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้น้อยมาก จึงถือว่าปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว

- ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง (Pseudo-first Order) เนื่องจากมีปริมาณเอทานอลมากเกินไปจนอยู่ในระบบ จนปริมาณของเอทานอลไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว จึงสามารถกำหนดให้ความเข้มข้นของเอทานอล (C_B) เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถนำไปรวมกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของกรดอะซิติก (C_A) เพียงชนิดเดียว จากสมมติฐานสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-r_A = -\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dC_A}{dt} = k' C_A \quad (2.24)$$

โดยที่ $k' = k_1 C_B$ และจากสมการที่ (2.24) เปลี่ยนความเข้มข้นให้อยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก จะได้

$$-\left(\frac{V}{W}\right) \frac{dX_A}{dt} = k' C_{A_0} (1 - X_A) \quad (2.25)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.25) จะได้

$$-\ln(1 - X_A) = k' \left(\frac{W}{V}\right) t \quad (2.26)$$

จากแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่ของปฏิกิริยาส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยานั้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ซึ่งแสดงดังสมการ (2.27)

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (2.27)$$

โดย	k	คือค่าคงที่ของปฏิกิริยา
	A	คือค่าแฟคเตอร์ความถี่ (Frequency Factor)
	E	คือพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (Activation Energy) มีหน่วย กิโลจูลต่อโมล
	R	คือค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (Gas Constant) มีค่า 8.314 มีหน่วย จูลต่อโมล เคลวิน
	T	คืออุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน

เปลี่ยนสมการ (2.27) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (2.28)$$

สมการ (2.28) แสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสในรูปแบบสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชันคือ $-E/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$ ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้เป็นค่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Smejkal, Kolena และ Hanika [14] ศึกษาการสังเคราะห์เอทิลอะซิเตทโดยเชื่อมต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์การกลั่นแบบมีปฏิกิริยาร่วม โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 60 – 120 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 เมกะพาสคัล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งคือ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกวานี้เอทานอลจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และการแยกผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผสมอะซิโธโรปโดยการกลั่น ทำให้สามารถเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ให้มากกว่าจุดสมดุลของปฏิกิริยา ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย

โปรแกรม AspenPlus ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ควรใช้โมเดลในการออกแบบและทำนายสถานะ การทดลองต่างๆก่อนทำการสังเคราะห์เอทิลอะซิเตท

Lee, Huang และ Chien [18] ศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบและควบคุมกระบวนการ กลั่นแบบมีปฏิริยาร่วม ในการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธ์ (กรดซัลฟิวริก) และตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ (เรซินแลกเปลี่ยนไอออน พิโรไลต์ ซีที 179) โดยใช้โปรแกรม ASPEN PLUS เพื่อคำนวณหาสถานะที่เหมาะสมในการทำปฏิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธ์มีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูงกว่า แต่เสียค่าใช้จ่ายทางพลังงานน้อยกว่า และมี ปัญหาในเรื่องการติดตั้งและเปลี่ยนตัวเร่งปฏิริยาน้อยมาก แต่การใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ทำให้เกิดปฏิริยาได้เร็วกว่าทั้งปฏิริยาไปข้างหน้าและปฏิริยาผันกลับ จึงใช้จำนวนชั้นน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์มีการตอบสนองต่อการรบกวนได้เร็วกว่า และปรับ เสถียรภาพของระบบในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ได้น้อยกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพในการควบคุม กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธ์

Calver, Gonzalez และ Dominguez [19] ศึกษาปฏิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของ กรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธ์ (กรดอะซิติก) และแบบวิวิธพันธ์ (แอมเบอร์ลิสต์ 15) ในเครื่องปฏิกรณ์การกลั่นแบบมีปฏิริยาร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 30 - 80 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรคือ องค์ประกอบของสารป้อนและอัตราส่วนของปริมาณการควบแน่นกลับสู่หอกลั่นต่อปริมาณการ ควบแน่นที่ออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ (reflux ratio) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความบริสุทธิ์ของ เอทิลอะซิเตทในส่วนยอดหอถูกจำกัดด้วยองค์ประกอบของอะซิโโทรป เมื่อควบคุมการดำเนินไปของ ปฏิริยาที่สภาวะความดันต่ำ ส่งผลให้สารอะซิโโทรปสององค์ประกอบระหว่างเอทิลอะซิเตทและน้ำ จะสามารถควบแน่นแยกกันได้

Hu และคณะ [20] ศึกษาการออกแบบและจำลองเครื่องปฏิกรณ์การกลั่นแบบมีปฏิริยาร่วม สำหรับการผลิตเอทิลอะซิเตท โดยการเติมนอร์มัลบิวทิวอะซิเตทเพื่อลดการเกิดน้ำในส่วนของหอกลั่น เหนือสายป้อน (Rectifying Section) เนื่องจากในการเกิดปฏิริยา น้ำและเอทิลอะซิเตทจะรวมตัว กันเป็นสารอะซิโโทรป ทำให้แยกผลิตภัณฑ์เอทิลอะซิเตทได้ยาก จึงได้ออกแบบโดยคำนวณหาชั้นที่ สมดุล จำนวนชั้นในส่วนเหนือสายป้อน จำนวนชั้นในส่วนทำปฏิริยา อัตราการไหลสาร และ อัตราส่วนของปริมาณการควบแน่นกลับสู่หอกลั่นต่อปริมาณการควบแน่นที่ออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ (Reflux Ratio) โดยใช้โมเดล RADFRAC ของโปรแกรม Aspen Plus ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเติมนอร์มัลบิวทิวอะซิเตทช่วยลดการใช้พลังงานของระบบลง 32% แต่ต้นทุนเท่าเดิม

Yadav และ Thathager [21] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดมาเลอิกและเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดกรดคือ อินไดออน 170 (Indion-170) แอมเบอร์ลิสต์ 15 (Amberlyst 15) แอมเบอร์ลิสต์ 36 (Amberlyst 36) แอมเบอร์ลิสต์ ไออาร์เอ 120 (Amberlyst IRA 120) และ 20% DTP/K-10 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดมาเลอิกต่อเอทานอลคือ 1:5 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 80 องศาเซลเซียส ที่สภาวะความดันบรรยากาศ เวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างๆสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ แอมเบอร์ลิสต์ 36 > แอมเบอร์ลิสต์ 15 > อินไดออน 170 > แอมเบอร์ลิสต์ ไออาร์เอ 120 > 20% DTP/K-10 ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์แบบเสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน (Pseudo-homogeneous) เนื่องจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สามารถแพร่เข้าและออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย และใช้ความเร็วรอบในการกวน 800 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบในการกวนที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอก และสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาได้เท่ากับ 14.2 กิโลแคลอรีต่อโมล

Altiocka และ Citak [5] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับไอโซบิวทานอลในสารละลายไดออกเซน แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนคือ แอมเบอร์ไลต์ ไออาร์ 120 ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในสารละลายไดออกเซน อุณหภูมิช่วงที่ทำการศึกษาระหว่าง 45 – 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนคือ 600 รอบต่อนาที ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆคือ อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของน้ำและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 59.3 เป็น 49 กิโลจูลต่อโมล

Teo และ Saha [22] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันระหว่างกรดอะซิติกและไอโซเอมิลแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาคือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน พิวโรไลต์ ซีที 175 ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆได้แก่ ความเร็วรอบในการกวนระหว่าง 300–800 รอบต่อนาที ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 500–850 ไมโครเมตร อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อไอโซเอมิลแอลกอฮอล์คือ 1:1 1:2 1:5 และ 1:10 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 90 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ระหว่างร้อยละ 2.5 – 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก และศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเร็ว

รอบในการกวนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก โดยเลือกทำการทดลองที่ความเร็วรอบในการกวนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นความเร็วรอบในการกวนที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับการถ่ายโอนมวลสารภายนอก ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาณไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ที่มากเกินไป การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ปฏิกิริยาจะเข้าสู่ภาวะสมดุลในชั่วโมงที่ 6 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ปฏิกิริยาจะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 1.5 ชั่วโมง นอกจากนี้ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน พิวโรไลต์ ซีที 175 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไม่เปลี่ยนแปลง

Zhang, Ma และ Yang [23] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดแลคติกและเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดบวก ศึกษาผลกระทบของชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 5 ชนิดได้แก่ Amberlyst 15, D001, D002, NKC และ 002 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 88 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 450 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นความเร็วรอบในการกวนที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 5 ชนิดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 002 > NKC > Amberlyst 15 > D001 > D002 และผลจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการของอาร์เรเนียสแสดงให้เห็นว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด 002 และ NKC มีค่าเท่ากับ 52.58 และ 52.26 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

Toor และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับนอร์มัลบิวทานอลและไอโซบิวทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแอมเบอร์ลิสต์ 15 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 78 – 93 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการกวนคือ 500 รอบต่อนาที เพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น และสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา

เอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับนอร์มัลบิวทานอลและไอโซบิวทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 28.45 และ 23.29 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

Tsai, Lin และ Lee [25] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันระหว่างกรดอะซิติกและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ลิสต์ 36 ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 55 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเมทานอลอยู่ในช่วงระหว่าง 1:1 - 1:5 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเมทานอลเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเมทานอลส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นและปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีขึ้น และสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยานี้ได้เท่ากับ 51.88 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

Akyalcin และ Altiokka [26] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับออกทานอลทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอมเบอร์ลิสต์ 36 ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อออกทานอลในช่วงระหว่าง 1:1.20 – 1:3.53 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 60 – 85 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยาในสารละลายโทลูอิน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับออกทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ามาก โดยมีรูปแบบทางจลนพลศาสตร์คือ ปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับออกทานอลแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกสูงขึ้นถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อออกทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโดยใช้โมเดล Eley-Rideal

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสามารถสรุปปฏิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันได้ดังนี้คือ

1. ปฏิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันเกิดจากการทำปฏิริยาระหว่าง กรดคาร์บอกซิลิกกับ แอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์คือ อัลคิลเอสเทอร์ และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ปฏิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในสถานะที่เป็นกรด ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีคือ

- แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิริยา โดยใช้สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้กรด เปลี่ยนสภาพเป็นตัวเร่งปฏิริยาด้วยตัวเอง

- แบบใช้ตัวเร่งปฏิริยา ตัวเร่งปฏิริยาที่นิยมใช้คือ กรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิริยาแบบ เอกพันธ์ เนื่องจากกรดซัลฟิวริกมีความเป็นกรดสูงจึงสามารถเร่งให้ปฏิริยาเกิดได้ดี แต่การใช้ตัวเร่ง ปฏิริยาแบบเอกพันธ์มีข้อเสียคือ ตัวเร่งปฏิริยาจะรวมตัวอยู่ในวัฏภาคเดียวกับผลิตภัณฑ์ จึงต้องมี กระบวนการแยกตัวเร่งปฏิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงมีการเปลี่ยนมาใช้ ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ุ โดยตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ุที่นิยมใช้คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย มีความสามารถในการเร่งปฏิริยาได้ดีเช่นเดียว กับการใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธ์ุ และสามารถนำตัวเร่งปฏิริยากลับมาใช้ใหม่ได้

2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปฏิริยาเอสเทอร์รีฟเคชัน ได้แก่ แอมเบอร์ลิสต์ 36 และแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นต้น โดยเฉพาะแอมเบอร์ลิสต์ 15 เป็นเรซิน แลกเปลี่ยนไอออนที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จากงานวิจัยของ Park และคณะ [7] ที่ศึกษาความสามารถ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 2 ชนิดคือ แอมเบอร์ลิสต์ 15 และแอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดีกว่า เนื่องจากแอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 ไม่มีรูพรุน จึงไม่ดูดซับโมเลกุลของน้ำที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจะเข้าไปขัดขวางการเข้าทำปฏิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดียวกับแอมเบอร์ลิสต์ 15 ดังนั้น แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 จึงเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดีกว่า แอมเบอร์ลิสต์ 15

3. ปฏิริยาเอสเทอร์รีฟเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธ์ุ ปัจจัยความเร็วรอบใน การกวนมีผลต่อปฏิริยา เนื่องจากมีอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกที่ส่งผลต่อการเกิด ปฏิริยา แต่จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการกวนที่สูงขึ้น จะช่วยลดอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกให้มีผลกระทบต่อปฏิริยาน้อยลงจนถึงค่า ความเร็วรอบในการกวนค่าหนึ่ง ที่ทำให้อิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกไม่มีผลต่อ การเกิดปฏิริยาแล้ว

4. ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ โดยปฏิกิริยาย้อนกลับคือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมโดยสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นวิธีที่จะผลักดันปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้าให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดย

- เพิ่มปริมาณสารตั้งต้น โดยนิยมเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากขึ้นจนถึงปริมาณหนึ่ง ที่ทำให้ปริมาณแอลกอฮอล์มีมากเกินไปจนไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว

- แยกผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยา เพื่อลดโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ โดยสามารถแยกน้ำในวัฏภาคที่เป็นไอหรือของเหลวโดยกระบวนการดูดซับ

5. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น

บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการอธิบายขั้นตอนการทดลองและวิธีการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อคือ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีดำเนินการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง และความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

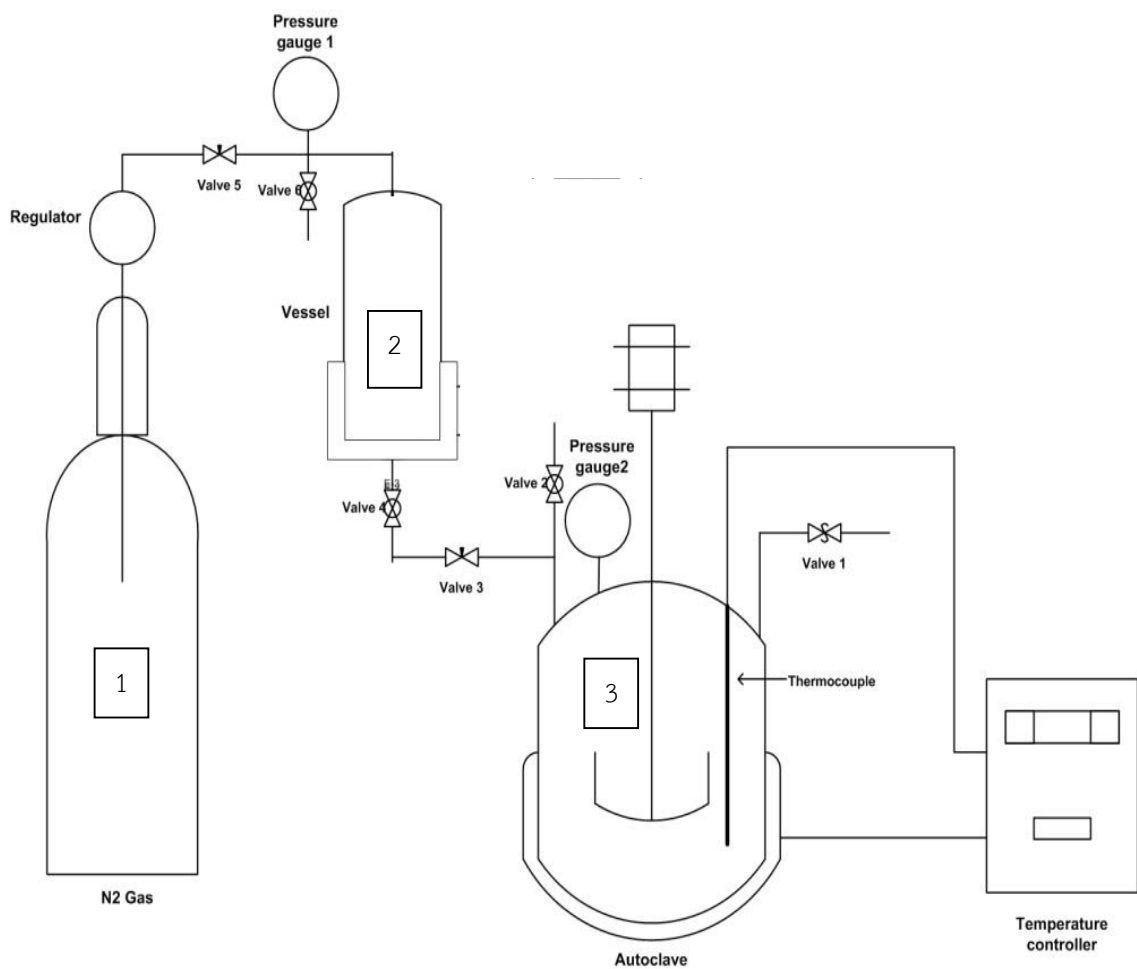
สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สารเคมี	เกรด/ความบริสุทธิ์
กรดอะซิติก (Acetic acid)	99.85%
เอทานอล (Ethanol)	99.9%
เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20 (Amberlyst BD 20)	Industrial
โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A	Industrial
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	Analytical reagent
เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน (Methyl Isobutyl Ketone)	Analytical reagent
อะซิโตน (Acetone)	Analytical reagent

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1 โดยประกอบด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้
 หมายเลข 1 คือ แก๊สไนโตรเจนที่ต่อกับเกจวัดความดัน หมายเลข 2 คือ ถังบรรจุแอลกอฮอล์ และ
 หมายเลข 3 คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ซึ่งทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
 อันเกิดจากสารเคมีและสภาวะที่ใช้ในการทดลอง เครื่องปฏิกรณ์สามารถทนความดันได้ถึง 2,000
 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [27]

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

1. ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนตามปริมาณที่ต้องการ
2. ปรับค่า pH ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยแช่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำที่ไม่มีไอออน (Deionized Water) แล้ววัดค่า pH ทำซ้ำจนกระทั่งค่า pH ของเรซิน แลกเปลี่ยนไอออน มีค่าคงที่ ที่ค่า pH ประมาณ 5
3. นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการปรับค่า pH แล้ว มาแช่ในขวดบรรจุเอทานอล เพื่อให้เรซินอยู่ในสภาวะพร้อมที่จะนำไปใช้งาน

3.2.2 การเตรียมโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A

อบโมเลคิวลาร์ซีฟที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งกรดอะซิติกตามปริมาณที่ต้องการ บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์
2. บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ในตระกร้าสแตนเลส แล้วนำตระกร้าสแตนเลสแขวนไว้กลางเครื่องปฏิกรณ์
3. ไล่อากาศในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจน
4. บรรจุเอทานอลในปริมาณที่ต้องการลงในถังบรรจุเอทานอล
5. ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
6. ป้อนเอทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จนหมดจึงเริ่มจับเวลา
7. เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 5 10 15 30 45 60 120 180 240 300 360 420 และ 480 นาที
8. นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตร จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3.2.4 สภาวะการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลอง

สภาวะการทดลอง	
สารตั้งต้น	กรดอะซิติกและเอทานอล
ตัวเร่งปฏิกิริยา	เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20
โมเลคิวลาร์ซีฟ	ชนิด 3A
ความเร็วรอบในการกวน	50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละ 5 7 และ 10 โดยน้ำหนักกรดอะซิติก
อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล	1:1 1:2 1:4 และ 1:8
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. วิเคราะห์ปริมาณของกรดอะซิติกที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ด้วยวิธีการไตเตรตกับสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เพื่อใช้ในการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก
2. วิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีในบางสภาวะ โดยมี internal standard คือ เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน และตัวทำละลายคือ อะซิโตน

3.4 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและการวิเคราะห์

3.4.1 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (Experimental Error)

ในการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลอง สามารถหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$\text{ค่าเฉลี่ย, } \bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (3.1)$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, } SD = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{X})^2}{n}} \quad (3.2)$$

ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งที่สภาวะการทดลองหนึ่งคือ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส นำค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก						
เวลา นาที	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานเฉลี่ย
0	0	0	0	0.00	0.00	2.64
5	9.76	11.63	10.00	10.46	0.83	
10	12.20	16.28	15.00	14.49	1.71	
15	14.63	23.26	15.00	17.63	3.98	
30	29.27	37.21	32.50	32.99	3.26	
45	41.46	46.51	35.00	40.99	4.71	
60	48.78	51.16	45.00	48.31	2.54	
120	58.54	65.12	62.50	62.05	2.70	
180	70.73	79.07	75.00	74.93	3.40	
240	80.49	81.40	82.50	81.46	0.82	
300	82.93	88.37	85.00	85.43	2.24	
360	73.17	90.70	85.00	82.96	7.30	
420	90.24	93.02	87.50	90.26	2.25	
480	87.80	90.70	90.00	89.50	1.23	

จากตารางที่ 3.3 จะได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่เกิดจากการทดลองคือ 2.64 และ 7.30 ตามลำดับ

3.4.2 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ (Analysis Error)

ในการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวิเคราะห์ กระทำได้โดยการนำสารตัวอย่างมาไทเตรตซ้ำ 3 ครั้ง ที่สภาวะการทดลองหนึ่งคือ ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส นำค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก						
เวลา นาที	การไทเตรต ครั้งที่ 1	การไทเตรต ครั้งที่ 2	การไทเตรต ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานเฉลี่ย
0	0	0	0	0.00	0.00	0.49
5	9.76	7.32	7.32	8.13	1.15	
10	12.20	12.20	12.20	12.20	0.00	
15	14.63	17.07	14.63	15.45	1.15	
30	29.27	29.27	29.27	29.27	0.00	
45	41.46	41.46	39.02	40.65	1.15	
60	48.78	48.78	46.34	47.97	1.15	
120	58.54	58.54	58.54	58.54	0.00	
180	70.73	73.17	70.73	71.54	1.15	
240	80.49	80.49	78.05	79.67	1.15	
300	82.93	82.93	82.93	82.93	0.00	
360	73.17	73.17	73.17	73.17	0.00	
420	90.24	90.24	90.24	90.24	0.00	
480	87.80	87.80	87.80	87.80	0.00	

จากตารางที่ 3.4 จะได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเตรตคือ 0.49 และ 1.15 ตามลำดับ

บทที่ 4

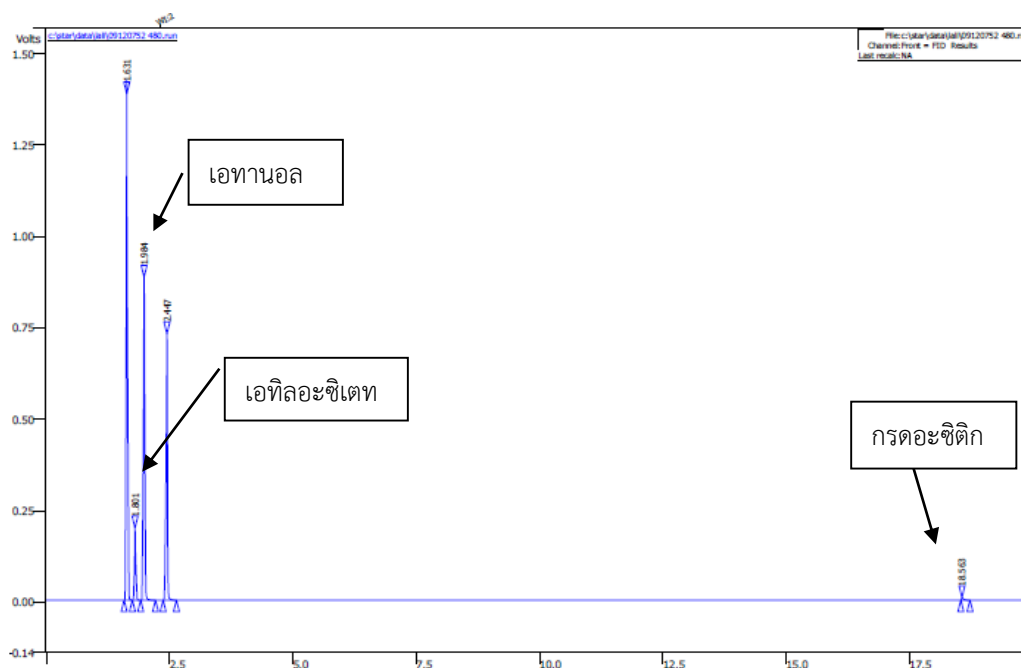
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน(แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเร็วรอบในการกวน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองจะนำเสนอตามลำดับดังนี้

- 4.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล
- 4.2 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20)
 - 4.2.1 ผลกระทบของความเร็วยรอบในการกวน
 - 4.2.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
 - 4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล
 - 4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
 - 4.2.5 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน
 - 4.2.6 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
- 4.3 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง
 - 4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล
 - 4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
 - 4.3.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง
- 4.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ
 - 4.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล
 - 4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
 - 4.4.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

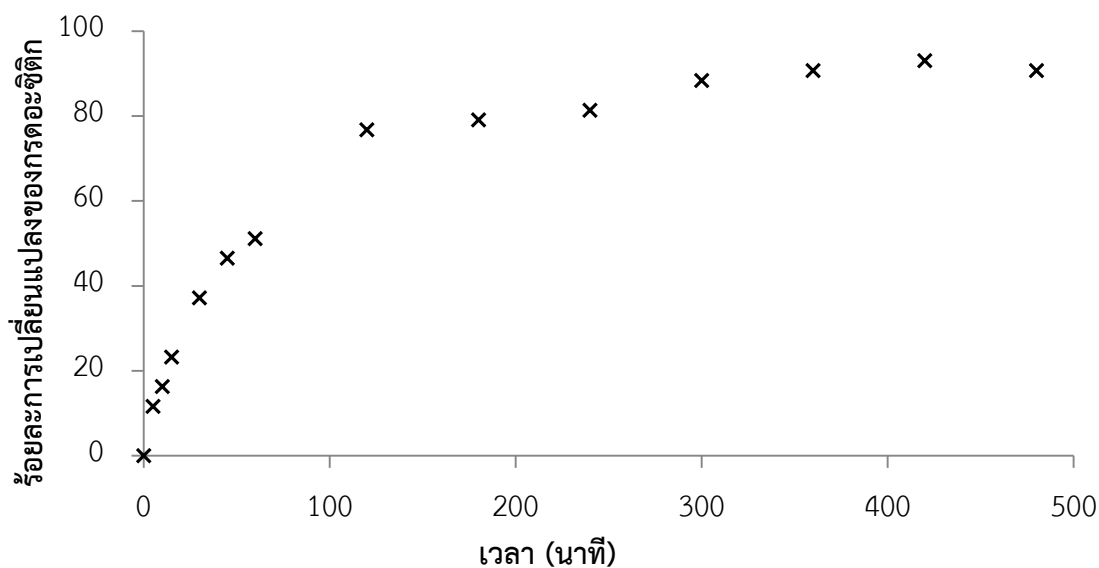
4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล

ศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทที่เกิดจากการทำปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม เมื่อนำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกริยา 90 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีจะได้โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในสารตัวอย่างมีเพียงกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท ซึ่งเป็นสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน และเมื่อนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์หาหน้าที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมด้วยวิธีคาร์ลฟีชเชอร์ไตเตรชันพบว่า มีน้ำอยู่ในสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลเพียงปฏิกริยาเดียว เนื่องจากไม่พบสารชนิดอื่นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี



รูปที่ 4.1 โครมาโตแกรมของสารตัวอย่าง

นอกจากนี้ เมื่อนำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่สภาวะข้างต้นมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไตเตรตกับสายละลายเบส เพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิติกที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยนำผลการไตเตรตที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซีติกกับเวลาของสารตัวอย่างที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไตเตรต

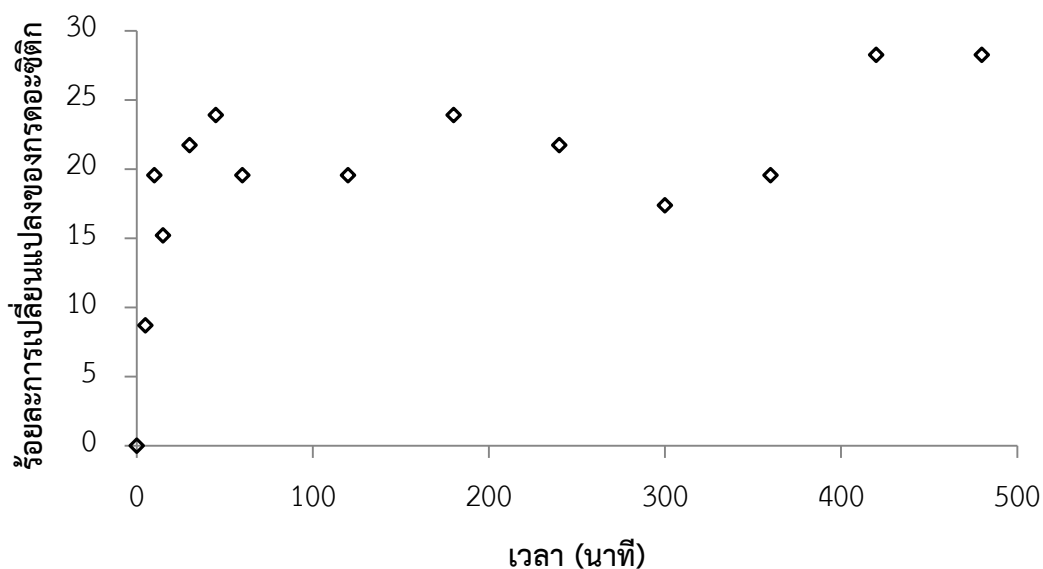
ผลการทดลองในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซีติกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซีติกมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง และเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 300 นาที จนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาได้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว

เนื่องจากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซีติกที่สภาวะสมดุลมีค่าไม่ถึงร้อยละ 100 ประกอบกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารในสารตัวอย่างด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ที่พบว่ายังมีสารตั้งต้นคือ กรดอะซีติกและเอทานอลเหลืออยู่ในสารตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยามีการผันกลับ จากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปสมการของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซีติกกับเอทานอลที่เกิดขึ้นได้ดังแสดงในสมการที่ (4.1)



เมื่อศึกษาการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซีติกกับเอทานอล โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกันคือ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซีติกต่อ

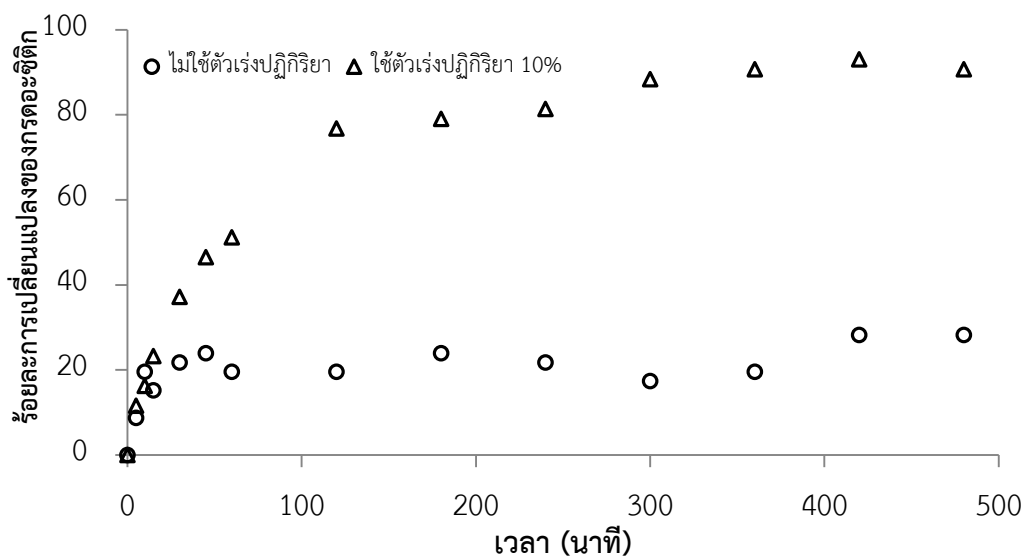
เอทานอล 1:8 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงอยู่ในภาคผนวก ค และเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลของการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล

ผลการทดลองในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ 480 นาที โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 28.26 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลสามารถเกิดขึ้นได้แม้ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับแบบที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่สภาวะการทดลองเดียวกันคือ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ซึ่งผลการทดลองเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 ผลของการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติคกับเอทานอล

ตารางที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่เวลา 480 นาทีของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติคกับเอทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดอะซิติค)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติค
0	28.26
10	90.70

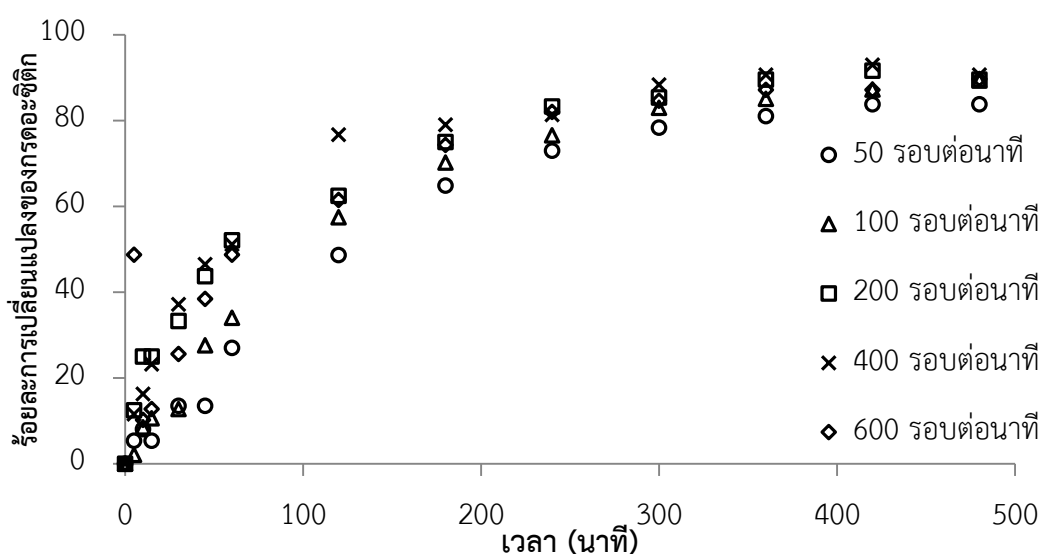
ผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีพฤติกรรมเดียวกันในช่วงแรกของปฏิกิริยา คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปมากกว่า 60 นาที ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่ได้จากการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แตกต่างจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่เวลา 480 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคสูงกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

4.2 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

4.2.1 ผลกระทบของความเร็รรอบในการกวน

ในการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นระบบวิวิธพันธุ์คือ สารในระบบมี 2 วัฏภาค ดังนั้นอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มความเร็รรอบในการกวนจะส่งผลให้อิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกมีค่าลดลง เนื่องจากสารในระบบสามารถไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาหาความเร็รรอบในการกวนที่เหมาะสมที่ทำให้อิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกมีค่าน้อยมาจนไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ในการศึกษาผลกระทบของความเร็รรอบในการกวนทำการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ศึกษาที่ความเร็รรอบในการกวนต่างๆคือ 50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที ผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ง เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความเร็รรอบในการกวนที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกที่สถานะสมดุลที่ความเร็วรอบในการกวาดต่างๆ

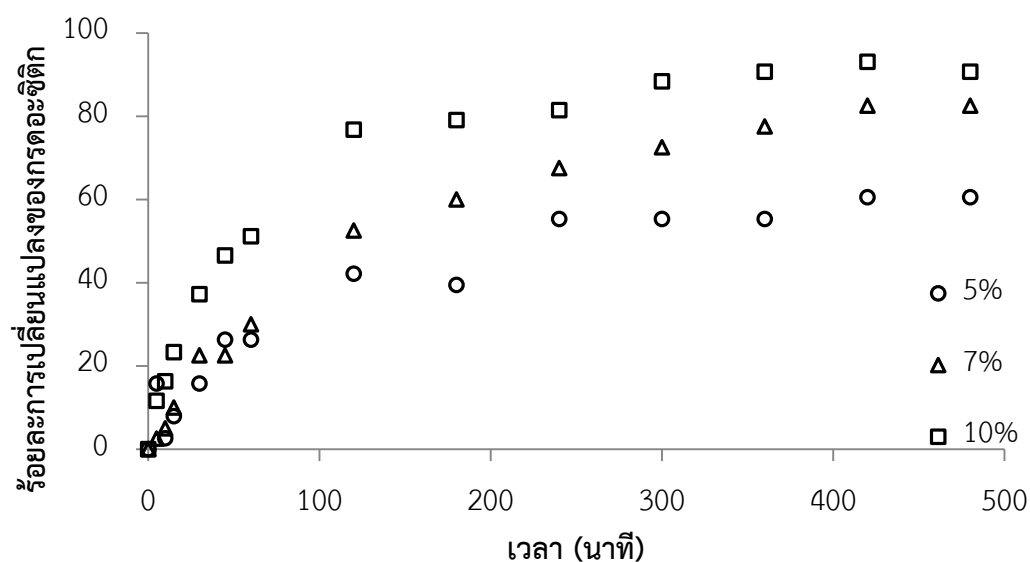
ความเร็วรอบในการกวาด (รอบต่อนาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิดิก
50	83.78
100	89.36
200	89.58
400	90.70
600	89.74

ผลการทดลองในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง และมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปมากกว่า 360 นาที แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาได้เข้าสู่สถานะสมดุลแล้ว โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกที่สถานะสมดุลแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งมีพฤติกรรมเดียวกันในทุกๆความเร็วรอบในการกวาด

การศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวาด ตั้งแต่ที่ความเร็วรอบในการกวาด 50 รอบต่อนาที ถึง 600 รอบต่อนาที ผลการทดลองในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวาดจาก 50 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเร็วรอบในการกวาดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วรอบในการกวาดส่งผลให้สารในระบบสามารถไหลผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้มากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวาดตั้งแต่ 100 รอบต่อนาทีขึ้นไป ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิดิกที่ความเร็วรอบในการกวาดต่างๆมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบในการกวาดมากกว่า 100 รอบต่อนาที ค่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกมีค่าน้อยมากจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกเป็นขั้นควบคุมการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรถัดไปจะใช้ความเร็วรอบในการกวาดที่ 400 รอบต่อนาที เพื่อกำจัดอิทธิพลของความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

4.2.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากผลการศึกษาที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆคือ ร้อยละ 5 7 และ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในภาคผนวก จ เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดอะซิติก)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
5	60.53
7	82.50
10	90.70

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรกของปฏิกิริยา และมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงจนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งมีพฤติกรรมเดียวกันทั้งการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ซึ่งแตกต่างจากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เวลา 300 นาทีจนสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที ที่การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.3

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ปฏิกิริยาได้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว จึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นและปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มโอกาสการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดอะซิติกกับเอทานอลให้มากขึ้น

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Teo และ Saha [22] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับไอโซเฮกซิลแอลกอฮอล์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน พิวโรไลต์ ซีที 175 โดยศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงระหว่างร้อยละ 2.5 – 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ปฏิกิริยาจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในชั่วโมงที่ 6 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก ปฏิกิริยาจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 1.5 ชั่วโมง

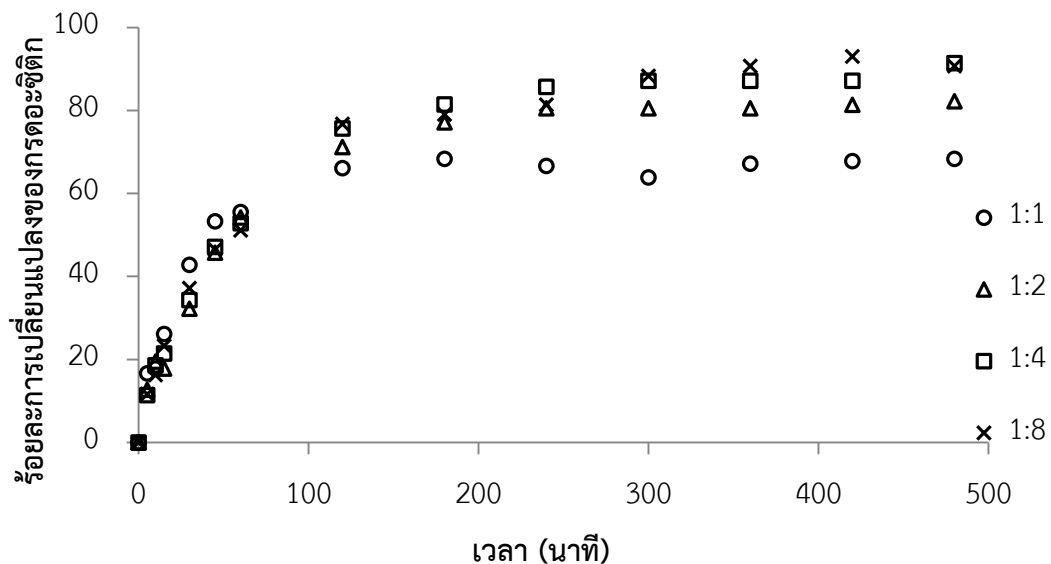
ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรถัดไปจะเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก

4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีรูปแบบสมการโดยทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (4.2) เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการผันกลับได้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมโดยสมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อให้มีปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้น วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งให้มากขึ้น เพื่อผลักดันให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเพิ่มปริมาณของเอทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ



การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล ทำการทดลองที่ สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของกรดอะซิติก อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆดังนี้คือ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8 ผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ใน ภาคผนวก ฉ เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา ต่างๆจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่มีต่อปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกซึ่งถูกใช้เป็นสารตั้งต้นเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปมากกว่า 300 นาที ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว โดยผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกันในทุกๆอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อัตราส่วนโดยโมลของ

กรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลมีค่าไม่ถึงร้อยละ 100 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยามีการผันกลับ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ

อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
1:1	68.33
1:2	82.20
1:4	91.43
1:8	90.70

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลจาก 1:1 ถึง 1:8 ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเอทานอล เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเอทานอลเป็นการผลักปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น

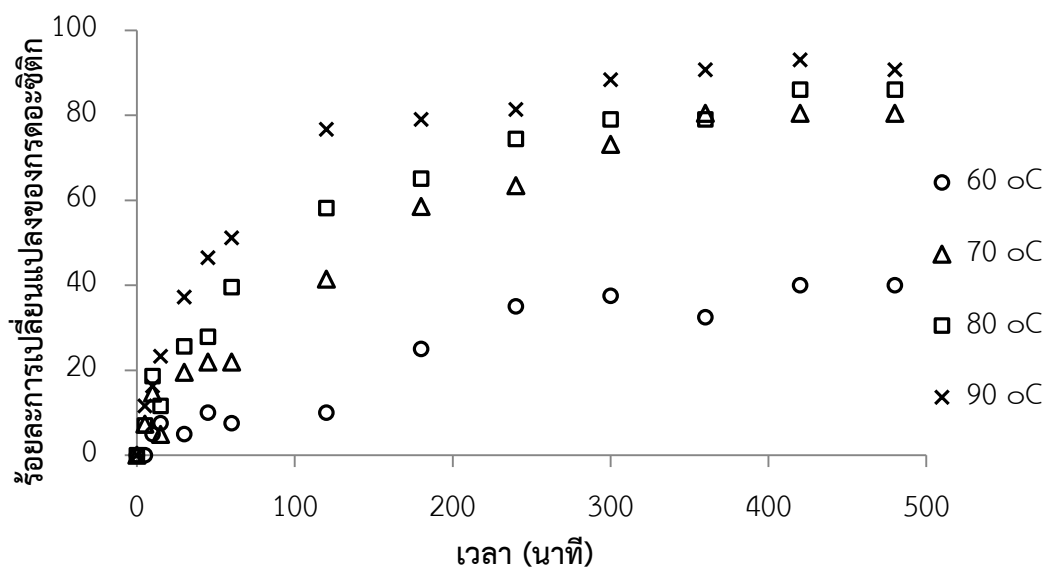
ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toor และคณะ [24] ที่ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับบอร์นัลบิวทานอลและไอโซบิวทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากนี้ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsai, Lin และ Lee [25] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเมทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน แอมเบอร์ลิสต์ 36 อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเมทานอลที่ทำการศึกษายู่ในช่วงระหว่าง 1:1-1:5 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเมทานอลเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลคือ 1:4 และ 1:8 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณเอทานอลมีมากเกินไปจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ซึ่งในการศึกษาตัวแปรถัดไปจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 เพื่อให้มีปริมาณเอทานอลมากเกินไปจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างๆดังนี้คือ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในภาคผนวก ข เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติค
60	40.00
70	80.49
80	86.05
90	90.70

ผลการทดลองในรูปที่ 4.8 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทุกๆอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีพฤติกรรมเดียวกันคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงจนกระทั่งมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.5

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่แต่ละอุณหภูมิซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงแรกจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีและเร็วขึ้น

ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang, Ma และ Yang [23] ที่ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดแลคติกกับเอทานอล โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดบวก ศึกษาอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 60 – 88 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

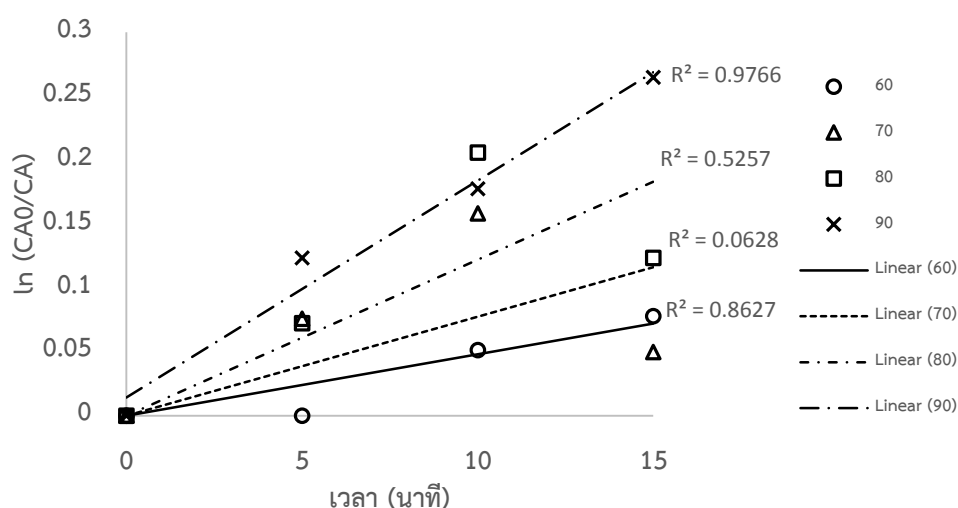
4.2.5 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติคกับเอทานอล ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยา โดยใช้

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส มาคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา

เนื่องจากในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกของปฏิกิริยาเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นในปริมาณน้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้น้อย จึงถือได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีเพียงปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว และจากผลการศึกษาข้างต้นที่พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณของเอทานอลไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากมีปริมาณของเอทานอลที่มากเกินไป จนกระทั่งความเข้มข้นของเอทานอลไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเป็นค่าคงที่ และถูกรวมเข้ากับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้

จากสมมติฐานดังกล่าวนำไปสู่การเลือกแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมกับปฏิกิริยานี้คือ แบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ (Pseudo-first Order Irreversible Reaction) ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการที่ (2.24) และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากสมการ (2.26) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะได้ค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.26) ดังแสดงในตารางที่ 4.7

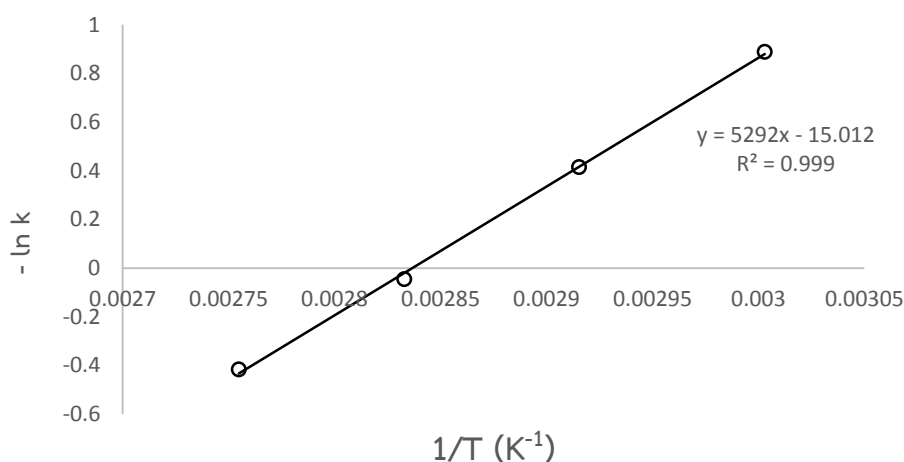
ตารางที่ 4.6 ค่าความชันจากกราฟการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชันของกราฟ
60	0.0048
70	0.0077
80	0.0122
90	0.0182

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k' , $(\text{g/ml})^{-1} (\text{min})^{-1}$)
60	0.4114
70	0.6600
80	1.0457
90	1.5167

ผลการคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น และเมื่อนำค่าคงที่ของปฏิกิริยามาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียสในสมการที่ (2.28) จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าคงที่ของปฏิกิริยากับอุณหภูมิต่างๆตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

กราฟความสัมพันธ์ตามสมการอาร์เรเนียสดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาแปรผันกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นและเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ ปีตี 20) ได้เท่ากับ 44 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก

นอกจากนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณต่างๆ ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค และภาคผนวก จ ที่ทำการทดลองที่สภาวะเดียวกันคือ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของรูปแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเหมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ซึ่งพิจารณาเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา เพื่อนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

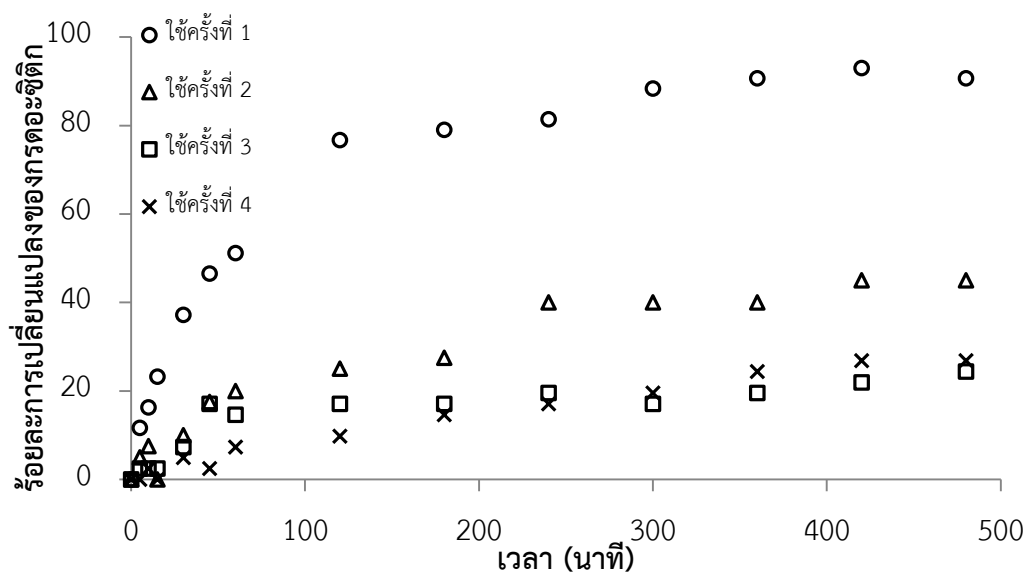
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดอะซิติก)	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k' , $(\text{g/ml})^{-1} (\text{min})^{-1}$)
0	0.0146
5	1.1167
7	1.0500
10	1.5167

ตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยา และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้เท่ากับ 64.96 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ที่มีค่าเท่ากับ 44 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาได้ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

4.2.6 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ข้อดีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนคือ สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) กลับมาใช้ใหม่ โดยนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ซ้ำที่สภาวะการทดลองเดียวกันคือ ที่ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ข เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีต่อปฏิกิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติคกับเอทานอล

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่เวลา 480 นาที ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละครั้ง

จำนวนครั้ง ในการนำกลับมาใช้ใหม่	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติค
ครั้งที่ 1	90.70
ครั้งที่ 2	45.00
ครั้งที่ 3	24.39
ครั้งที่ 4	26.83

ผลการทดลองในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาใช้ใหม่ในแต่ละครั้ง ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่การนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 และเมื่อนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 3 และ 4 พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคที่เวลา 480 นาที แสดงดังตารางที่ 4.9

ผลการทดลองในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ไม่เหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาในแต่ละครั้ง ลักษณะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีสีเข้มขึ้นเรื่อยๆ จากสีน้ำตาลจนกระทั่งกลายเป็นสีดำ และผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนจากไม่มีสีกลายเป็นมีสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งเป็นผลมาจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนถูกกรดอะซิติกกัดกร่อน ทำให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลงในการนำกลับมาใช้ใหม่ในแต่ละครั้ง

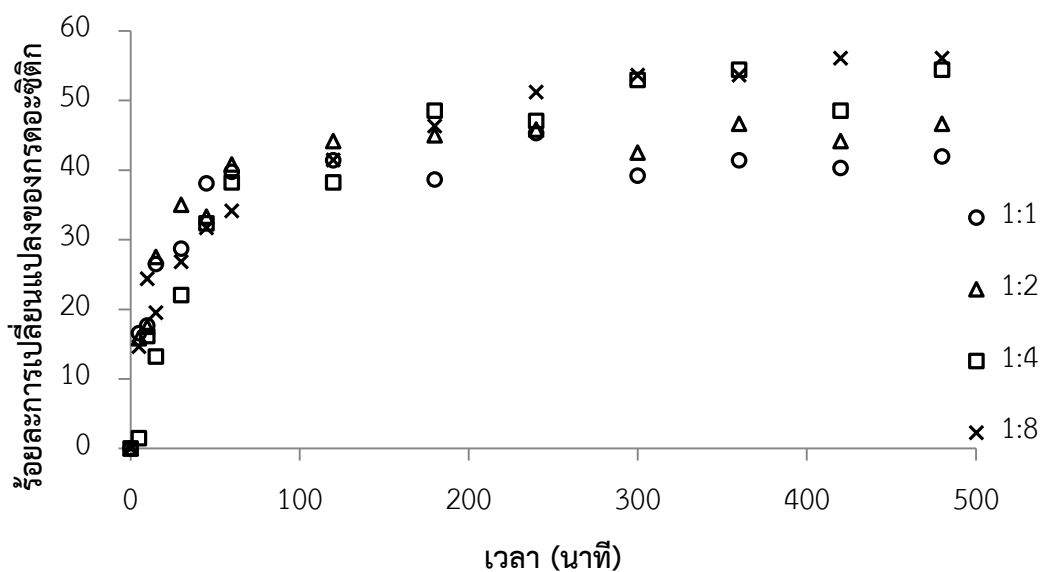
4.3 การผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะผลักดันปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นนอกเหนือจากการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากขึ้น คือ การแยกผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบในระหว่างการทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการแยกน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกจากระบบโดยใช้โมเลคิวลาร์ซีฟฟิกันต์ 3A

ผลการศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ดังที่ได้แสดงไปแล้วข้างต้นซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วรอบในการกวนมากกว่า 100 รอบต่อนาที อิทธิพลของการถ่ายโอนมวลสารภายนอกไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา และการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมากที่สุดและปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วที่สุด ดังนั้นการศึกษการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง จะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกับการทดลองแบบไม่มีการแยกน้ำ เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการแยกน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยา คือ ทำการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก

4.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล ทำการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่อัตราส่วนต่างๆดังนี้คือ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8 ผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ฅ เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

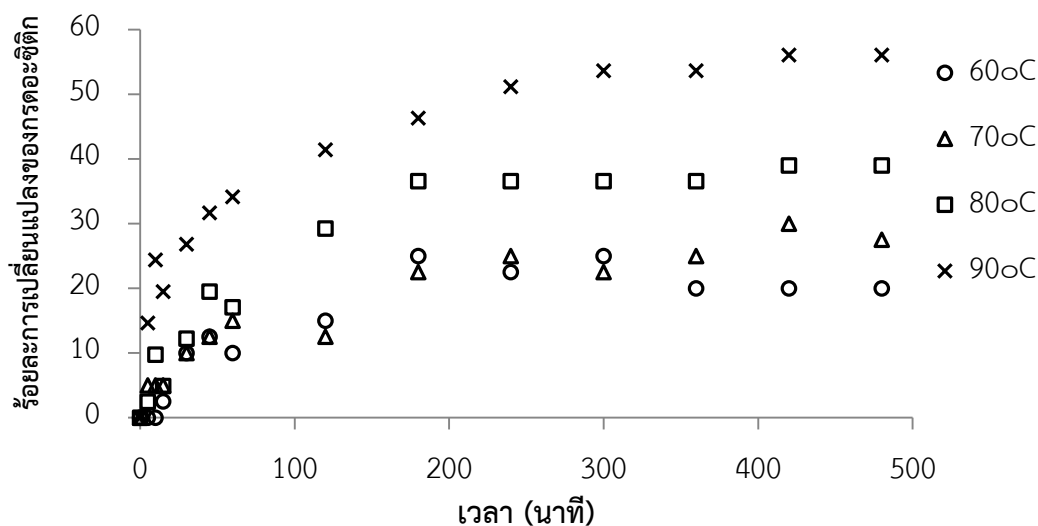
อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอะซิติกต่อเอทานอล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
1:1	41.99
1:2	46.67
1:4	54.41
1:8	56.10

ผลการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกซึ่งถูกใช้เป็นสารตั้งต้นเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปมากกว่า 60 นาที ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง และเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 360 นาที แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาได้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว โดยที่สภาวะสมดุลมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกแสดงดังตารางที่ 4.10

ผลการทดลองในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลจาก 1:1 ถึง 1:8 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเอทานอลเป็นการผลักดันของปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกต่อเอทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลคือ 1:4 และ 1:8 ที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณเอทานอลมีมากเกินไปจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ในการทดลองศึกษาตัวแปรถัดไปจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลเท่ากับ 1:8 เพื่อให้มีปริมาณเอทานอลมากเกินไปจนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกรดอะซิติกอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ญ เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกจะแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.11 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
60	20.00
70	27.50
80	39.02
90	56.10

ผลการทดลองในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงจนกระทั่งมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาได้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลแสดงดังตารางที่ 4.11

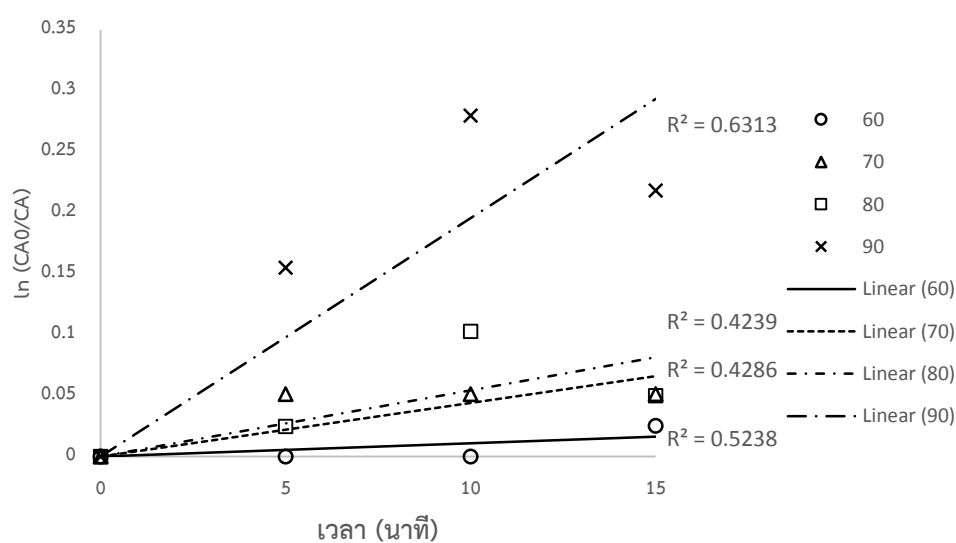
ผลการทดลองในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมากที่สุดคือ ร้อยละ 56.10

4.3.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกของปฏิกิริยา ที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกน้อย ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยานี้

เนื่องจากในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา ซึ่งมีปริมาณผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อย ปฏิกิริยาผันกลับจึงเกิดขึ้นได้น้อย จึงถือได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีเพียงปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว และจากผลการศึกษาที่ได้นำเสนอไปแล้วข้างต้นที่แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณของเอทานอลมีมากเกินไปจนไม่มีผลต่อปฏิกิริยา จึงสามารถกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเป็นค่าคงที่และถูกรวมเข้ากับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้

จากสมมติฐานข้างต้นนำไปสู่การเลือกแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่มีความสอดคล้องกับสมมติฐานของงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการที่ (2.24) และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากสมการ (2.26) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ผลการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะได้ค่าความชันของกราฟที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา โดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.26) ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 ค่าความชันของกราฟการทดสอบแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

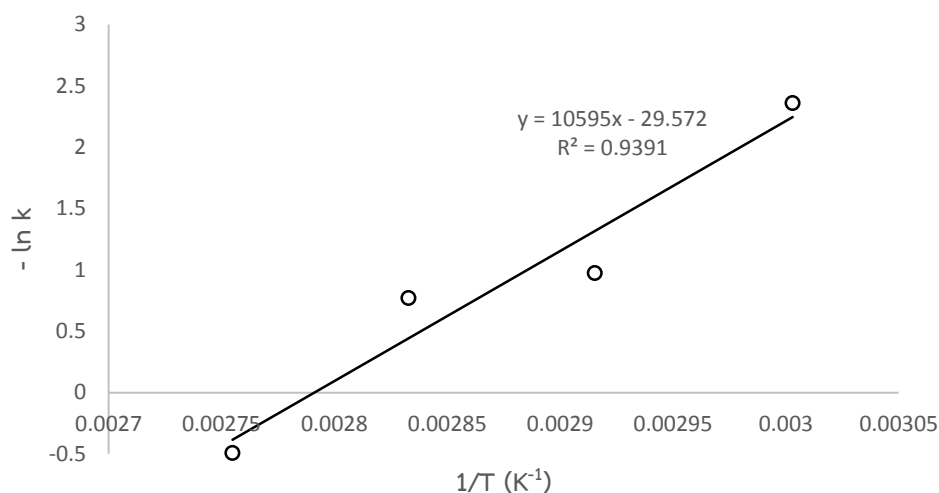
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชันของกราฟ
60	0.0011
70	0.0044
80	0.0054
90	0.0196

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k' , $(\text{g/ml})^{-1} (\text{min})^{-1}$)
60	0.0943
70	0.3771
80	0.4629
90	1.6333

ผลการคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้นและเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น เมื่อนำค่าคงที่ของปฏิกิริยามาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียสในสมการที่ (2.28) จะได้สมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.15

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องได้เท่ากับ 88.08 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก

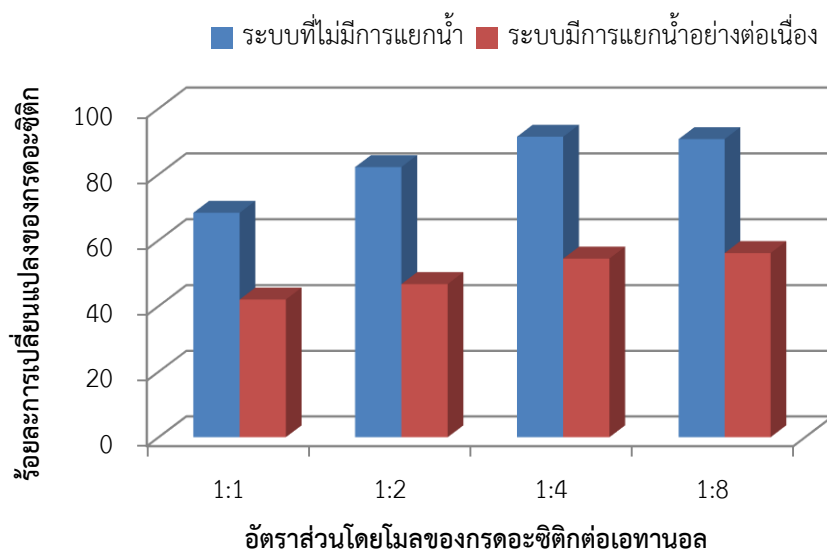


รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ของปฏิกิริยากับอุณหภูมิต่างๆตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

4.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

4.4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล

ศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) เปรียบเทียบระหว่าง ระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องด้วยโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆคือ 1:1 1:2 1:4 และ 1:8 ที่สภาวะการทดลองเดียวกันคือ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.16 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรตอะซิดิกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรตอะซิดิกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ

ตารางที่ 4.14 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรตอะซิดิกที่สภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรตอะซิดิกต่อเอทานอลต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ

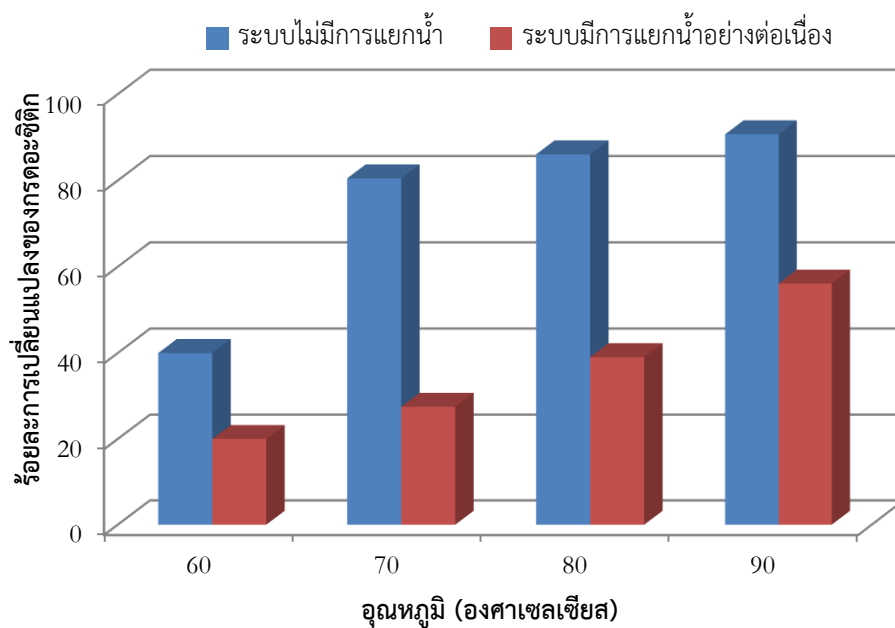
อัตราส่วนโดยโมลของกรตอะซิดิกต่อเอทานอล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรตอะซิดิก	
	ไม่มีการแยกน้ำ	มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง
1:1	68.33	41.99
1:2	82.20	46.67
1:4	91.43	54.41
1:8	90.70	56.10

ผลการทดลองในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรตอะซิดิกต่อเอทานอล ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรตอะซิดิกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีกล่าวคือ ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกริยาผันกลับได้ การเพิ่มปริมาณเอทานอลที่ถูกใช้ป็นสารตั้งต้นเป็นการรบกวนสมดุลของปฏิกริยา ส่งผลให้ปฏิกริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น นอกจากนี้ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรตอะซิดิกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณเอทานอลมีมากเกินไปจนไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกริยาแล้ว ซึ่งมีพฤติกรรมเดียวกันทั้งในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกระหว่างระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ กับระบบที่มีการแยกน้ำที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบที่ไม่มีการแยกน้ำได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกสูงกว่าระบบที่มีการแยกน้ำในทุกๆอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล

4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆคือ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 ดังแสดง ในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.17 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.15 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ
ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

อุณหภูมิที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก	
	ไม่มีการแยกน้ำ	มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง
60	40.00	20.00
70	80.49	27.50
80	86.05	39.02
90	90.70	56.10

ผลการทดลองในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน โดยผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกันทั้ง 2 ระบบ และเมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่อุณหภูมิต่างๆ ของทั้ง 2 ระบบ แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่ได้จากระบบที่ไม่มีการแยกน้ำมีค่าสูงกว่าระบบที่มีการแยกน้ำ ในทุกๆอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

4.4.3 จลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในช่วงแรกของปฏิกิริยา ในการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ทั้งแบบไม่มีการแยกน้ำและมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ได้แบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับสมมติฐานและข้อมูลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้คือแบบจำลองปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ เมื่อคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งทั้ง 2 ระบบมีแนวโน้มเดียวกัน

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 44 และ 88.08 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติกตามลำดับ ดังที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.2.5 และ 4.3.3 ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่ได้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

กว่าระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องด้วยโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A เนื่องจากมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาต่ำกว่า

ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ไม่สามารถแยกน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปฏิกิริยาไม่สามารถดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น แต่เข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ เนื่องจากกรดอะซิติกเข้าไปกีดกร่อนโมเลคิวลาร์ซีฟ ทำให้โมเลคิวลาร์ซีฟไม่สามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และทำให้กรดอะซิติกเข้าทำปฏิกิริยากับเอทานอลน้อยลง ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Lucena, Silva และ Fernandes [3] ที่ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดโอเลอิก กับเมทานอล และงานวิจัยของ Oliveira และคณะ [8] ที่ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวใช้แล้วกับเอทานอล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบมีการแยกน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยา จะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นมากกว่าระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ไม่ก่อกกร่อนโมเลคิวลาร์ซีฟ ทำให้โมเลคิวลาร์ซีฟแยกน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี เนื่องจากการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ที่สภาวะความเร็วรอบในการกวนต่ำ ความเร็วรอบในการกวนจะส่งผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อความเร็วรอบในการกวนมีค่ามากกว่า 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบ ในการกวนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว เนื่องจากอิทธิพลของความต้านทานการถ่ายโอนมวลสาร ภายนอกมีค่าน้อยมาก จนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา
3. การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น
4. การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น แต่ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอลมากกว่า 1:4 ปริมาณเอทานอลมีมากเกินไป จนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว
5. การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น
6. เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ใหม่สำหรับ ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดอะซิติกกับเอทานอล เนื่องจากถูกกรดอะซิติกกัดกร่อน ทำให้ ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง
7. การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในช่วงแรกของปฏิกิริยาในการผลิต เอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำได้ แบบจำลองปฏิกิริยาแบบเดียวกันคือ ปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ
8. ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน ไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำกับระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่องคือ 44 และ 88.08 กิโลจูลต่อโมลของกรดอะซิติก ตามลำดับ

9. การใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A แยกน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยา ไม่ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A ถูกกรดอะซิติกทำลายโครงสร้าง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำลดลง และกรดอะซิติกเข้าทำปฏิกิริยากับเอทานอลได้น้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

การศึกษาการผลิตเอทิลอะซิเตทโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20) โดยระบบมีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง ควรใช้โมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A แยกน้ำในวัฏภาคของแก๊สมากกว่าในวัฏภาคของของเหลว เพื่อลดโอกาสในการสัมผัสกับกรดอะซิติก

นอกจากนี้ เพื่อเป็นการพิสูจน์การถูกกรดอะซิติกทำลายโครงสร้างของโมเลคิวลาร์ซีฟชนิด 3A นอกเหนือจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพ ควรมีการนำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์เพิ่มเติม เช่นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อพิสูจน์ว่ามีโมเลกุลของซีโอไลต์ถูกกัดกร่อนหลุดออกมาอยู่ในสารตัวอย่างหรือไม่ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Kloker, M., et al. Investigation of different column configurations for the ethyl acetate synthesis via reactive distillation. Chemical Engineering and Processing 43 (2004): 791-801
- [2] Martins, A.B., et al. Rapid and high yields of synthesis of butyl acetate catalyzed by Novozym 435: Reaction optimization by response surface methodology. Process Biochemistry 46 (2011): 2311–2316.
- [3] Lucena, I.L., Silva, G.F. and Fernandes, F. Biodiesel Production by Esterification of Oleic Acid and Methanol Using a Water Adsorption Apparatus. Ind. Eng. Chem. Res. 47 (2008): 6885-6889.
- [4] Bianchi, C.L., et al. A new method to clean industrial water from acetic acid via esterification. Applied Catalysis B: Environmental 40 (2003): 93-99.
- [5] Altiokka, M.R. and Citak, A. Kinetics study of esterification of acetic acid with isobutanol in the presence of amberlite catalyst. Applied Catalysis A: General (2003): 141-148.
- [6] Ozbay, N., Oktar, N. and Tapan, N. Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resin. Turk J Engineer Environment Science 25 (2001): 569-577.
- [7] Park, J.Y., Kim, D.K. and Lee, J.S. Esterification of free fatty acids using water-tolerable Amberlyst as a heterogeneous catalyst. Bioresource Technology 101 (2010): s62-s65.
- [8] Oliveira, J., et al. Biodiesel production from waste coconut oil by esterification with ethanol: The effect of water removal by adsorption. Renewable Energy 35 (2010):2581-2584.

- [9] Somsai S. Kinetics of non-catalytic esterification of fatty acids in palm oil. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [10] Liu, Y., et al. A comparison of the esterification of acetic acid with methanol using heterogeneous versus homogeneous acid catalyst. Journal of Catalysis 242 (2006): 278–286.
- [11] Prasannam, P. Removal of heavy metal ions from solution using ion exchangers based on hydroxyethyl cellulose. Master's Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Silpakorn University, 2004.
- [12] Kirbaslar, S., Baykal, Z. and Dramur, U. Esterification of acetic acid with ethanol catalysed by an acidic ion-exchange resin. Turk J Engineer Environment Science 25 (2001): 569-577.
- [13] Izci, A. and Bodur, F. Liquid-phase esterification of acetic acid with isobutanol catalyzed by ion-exchange resins. Reactive & Functional Polymers 67 (2007): 1458-1464.
- [14] Smejkal, Q., Kolena, J. and Hanika, J. Ethyl acetate synthesis by coupling of fixed-bed reactor and reactive distillation column-Process integration aspects. Chemical Engineering journal 154 (2009): 236-240.
- [15] Qadeer, R., Hussain, R. and Ahmad, M. A Study of thermal effects on Molecular Sieve, Type 13X. Jour.Chem.Soc.Pak 26 (2004): 120-122
- [16] Hayook, C. and Teppitoo, W. Ethanol-Water Mixture Separation by Adsorption. Department of Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [17] Octave, L. Chemical Reaction Engineering. 3rd ed. New York. John Wiley & Sons, 1999
- [18] Lee, H.Y., Huang, H.P. and Chien I.L. Design and control of homogeneous and heterogeneous reactive distillation for ethyl acetate process. Elsevier B.V. (2006): 1045-1050.

- [19] Calvar, N., Gonzalez, B. and Dominguez, A. Esterification of acetic acid with ethanol: Reaction kinetics and operation in a packed bed reactive distillation column. Chemical Engineering and Processing 46 (2007): 1317-1323.
- [20] Hu, S., et al. Design and simulation of an entrainer-enhanced ethyl acetate reactive distillation process. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification (2011)
- [21] Yadav, G.D. and Thathager, M.B. Esterification of maleic with methanol over cation exchange resin catalysts. Reactive & Functional Polymers 52 (2002): 99-110.
- [22] Teo, H.T.R. and Saha, B. Heterogeneous catalysed esterification of acetic acid with isoamyl alcohol: kinetics studies. Journal of catalysis 228 (2004): 174-182.
- [23] Zhang, Y., Ma, L. and Yang, J. Kinetics of esterification of lactic acid with ethanol catalyzed by cation-exchange resin. Reactive & Functional Polymers 61 (2004): 101-114.
- [24] Toor, A.P., et al. Kinetic study of esterification of acetic acid with n-butanol and isobutanol catalysed by ion exchange resin. Bulletin of chemical reaction engineering & catalysis 6 (1) (2011): 23-30.
- [25] Tsai, Y.T., Lin, H.M. and Lee, M.J. Kinetics behavior of esterification of acetic acid with methanol over Amberlyst 36. Chemical Engineering Journal 171 (2011): 1367-1372.
- [26] Akyalcin, S. and Altiokka, M.R. Kinetics of esterification of acetic acid with 1-octanol in the presence of Amberlyst 36. Applied Catalysis A: General 429-430 (2012): 79-84
- [27] Khamhangdatepon, T. Kinetics of non-catalytic esterification of lauric acid and stearic acid with ethanol. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2011.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ก-1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการไตเตรต

ในการทดลองนี้ สารตัวอย่างที่ได้จะทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก โดยนำสารตัวอย่างมาไตเตรตกับสารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร สามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้จากสมการที่ 1 และคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกได้จากสมการที่ 2

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1)$$

โดย C_1 คือ ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง (โมลต่อลิตร)

C_2 คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)

V_1 คือ ปริมาตรของสารตัวอย่างที่นำไปใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

V_2 คือ ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำมาใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่เวลาใดๆ (โมลต่อลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ หาค่าความเข้มข้นและร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที ที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

- หาค่าความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 1.00 โมลต่อลิตร

ปริมาตรของสารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการไตเตรต = 2.00 มิลลิลิตร

ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต = 0.4 มิลลิลิตร

แทนค่าต่างๆลงในสมการเพื่อหาความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ดังนี้คือ

$$N_1 (2.00) = (1.00) (0.40)$$

$$N_1 = 0.20$$

จะได้ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที คือ 0.20 โมลต่อลิตร

- หาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที

ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่เวลาเริ่มต้น = 2.15 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่เวลาใดๆ = 0.20 โมลต่อลิตร

แทนค่าต่างๆลงในสมการเพื่อหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก} = \frac{2.15 - 0.20}{2.15} \times 100$$

จะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกที่เวลา 480 นาที คือ ร้อยละ 90.70

ก-2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่อยู่ในสารตัวอย่าง และวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี Varian รุ่น 3800 โดยใช้คอลัมน์แบบคาปิลารีรุ่น Innowax m 20 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ตัวตรวจวัดเป็นแบบเฟรมไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 สภาวะของคอลัมน์

สภาวะของคอลัมน์	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	55
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิเริ่มต้น (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 56 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	1
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 57 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	1
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 58 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	1
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 59 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	1
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	1
ระยะเวลาคงที่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (นาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 150 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	30
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	150
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	250
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250

ก-3 การคำนวณค่าแฟคเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟคเตอร์ตอบสนองมีนิยามดังนี้

$$\text{แฟคเตอร์ตอบสนองของกรดอะซิติก} = \frac{\text{พื้นที่ของกรดอะซิติก} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักกรดอะซิติก}}$$

$$\text{แฟคเตอร์ตอบสนองของเอทานอล} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทานอล} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักของเอทานอล}}$$

$$\text{แฟคเตอร์ตอบสนองของเอทิลอะซิเตท} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลอะซิเตท} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักของเอทิลอะซิเตท}}$$

ค่าแฟคเตอร์ตอบสนองของกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตทแสดงดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 ค่าแฟคเตอร์ตอบสนองของกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท

ชนิดของสาร	แฟคเตอร์ตอบสนอง
กรดอะซิติก	0.3337
เอทานอล	0.4944
เอทิลอะซิเตท	0.4163

ก-4 การคำนวณปริมาณสาร

$$\text{น้ำหนักของกรดอะซิติก} = \frac{\text{พื้นที่ของกรดอะซิติก} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนองของกรดอะซิติก}}$$

$$\text{น้ำหนักของเอทานอล} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทานอล} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนองของเอทานอล}}$$

$$\text{น้ำหนักของเอทิลอะซิเตท} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลอะซิเตท} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนองของเอทิลอะซิเตท}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาปริมาณสารที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟของสารตัวอย่าง ที่เวลา 480 นาที ที่สภาวะความเร็วรอบในการกวาด 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส น้ำหนักของสารมาตรฐาน 0.0897 กรัม

- จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟ จะได้

$$\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} = 1448492$$

$$\text{พื้นที่ของเอทิลอะซิเตท} = 368145$$

$$\text{พื้นที่ของเอทานอล} = 1812240$$

$$\text{พื้นที่ของกรดอะซิติก} = 20871$$

แทนค่าหาน้ำหนักของสารต่างๆดังนี้

$$\text{น้ำหนักของเอทิลอะซิเตท} = \frac{368145 \times 0.0897}{1448492 \times 0.4163}$$

$$\text{น้ำหนักของเอทานอล} = \frac{1812240 \times 0.0897}{1448492 \times 0.4944}$$

$$\text{น้ำหนักของกรดอะซิติก} = \frac{20871 \times 0.0897}{1448492 \times 0.3337}$$

$$\text{จะได้ น้ำหนักของเอทิลอะซิเตท} = 0.0547 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของเอทานอล} = 0.2269 \text{ กรัม}$$

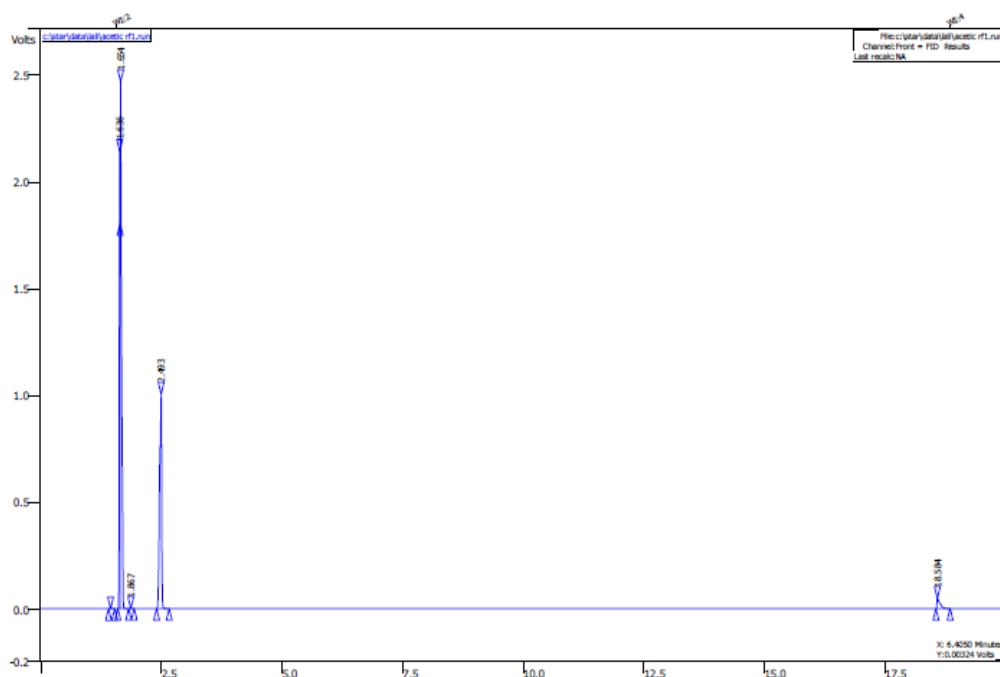
$$\text{น้ำหนักของกรดอะซิติก} = 0.0039 \text{ กรัม}$$

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี

ข-1 การวิเคราะห์สารบริสุทธิ์กรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท

นำกรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตท ที่เป็นสารบริสุทธิ์มาวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งและคำนวณปริมาณ โดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลคีโตนเป็นสารมาตรฐาน และอะซิโตนเป็นสารทำละลาย ผลจากการวิเคราะห์สารบริสุทธิ์ทั้ง 3 ชนิด พบกรดอะซิติกที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ ข-1 และตารางที่ ข-1 พบเอทานอลที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ ข-2 และตารางที่ ข-2 และพบเอทิลอะซิเตทที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ ข-3 และตารางที่ ข-3

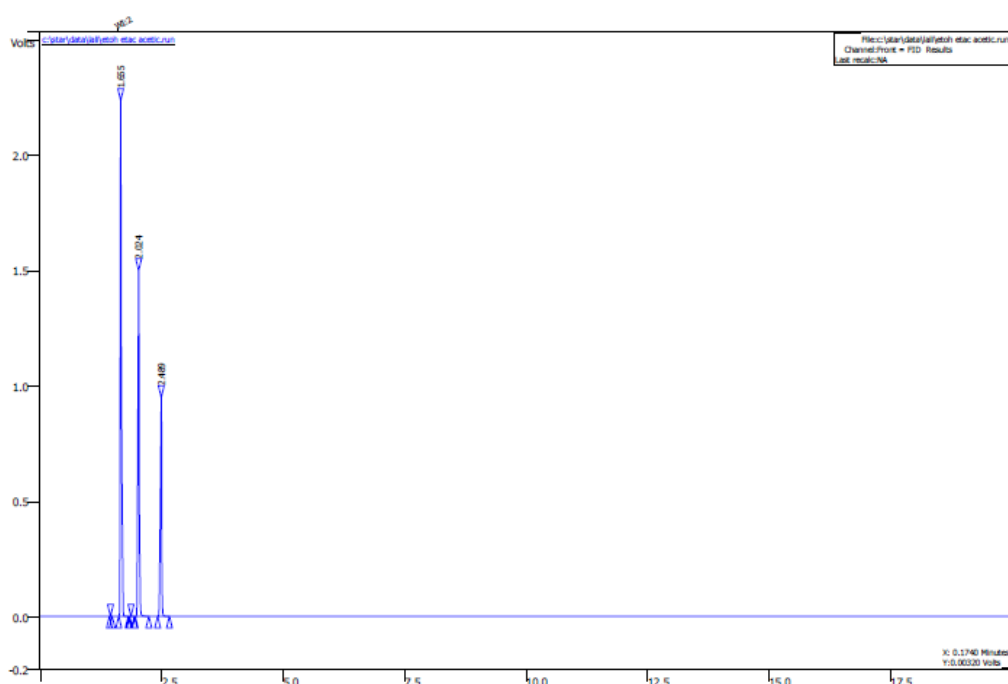


Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		22.4048	1.636	0.000	2205857
2		46.3239	1.654	0.000	4560817
3		0.0168	1.867	0.000	1650
4		29.1598	2.493	0.000	2870928
5		2.0947	18.584	0.000	206237
Totals:		100.0000		0.000	9845489

รูปที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของกรดอะซิติก

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของกรดอะซิติก

ชนิดของสาร	Retention time (นาที)
อะซิโตน	1.645
เมทิลไฮโซบิวทิลคีโตน	2.493
กรดอะซิติก	18.584

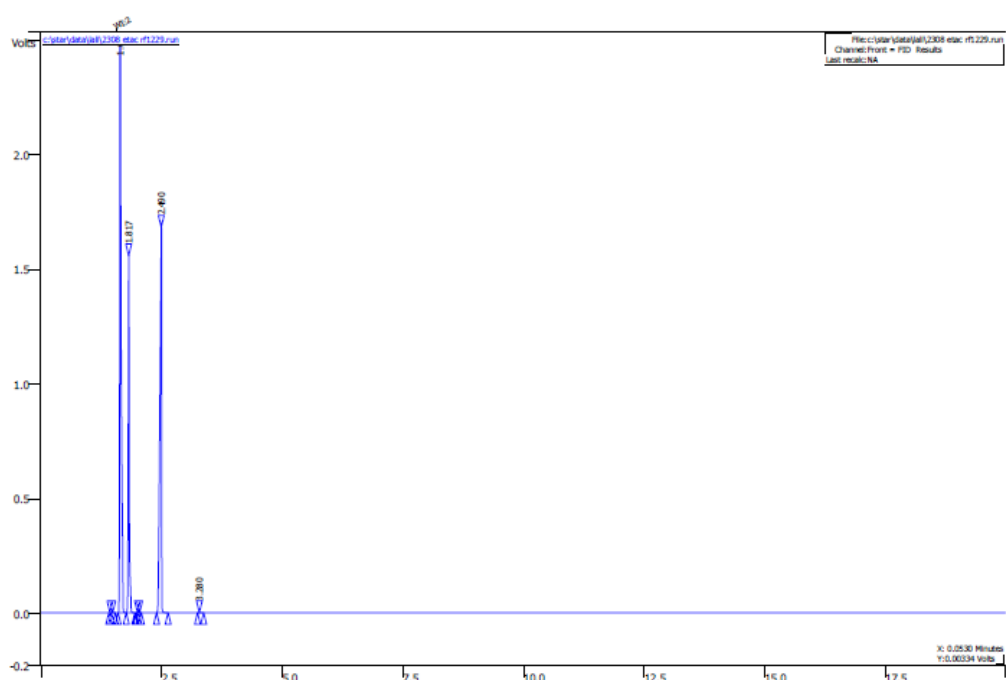


Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		45.4010	1.655	0.000	3898719
2		33.4122	2.024	0.000	2869209
3		21.1868	2.489	0.000	1819371
Totals:		100.0000		0.000	8587299

รูปที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของเอทานอล

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของเอทานอล

ชนิดของสาร	Retention time (นาที)
อะซีโตน	1.655
เอทานอล	2.024
เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน	2.489



Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		54.6513	1.640	0.000	7305369
2		15.5553	1.817	0.000	2079318
3		29.7819	2.490	0.000	3981019
4		0.0115	3.280	0.000	1534
Totals:		100.0000		0.000	13367240

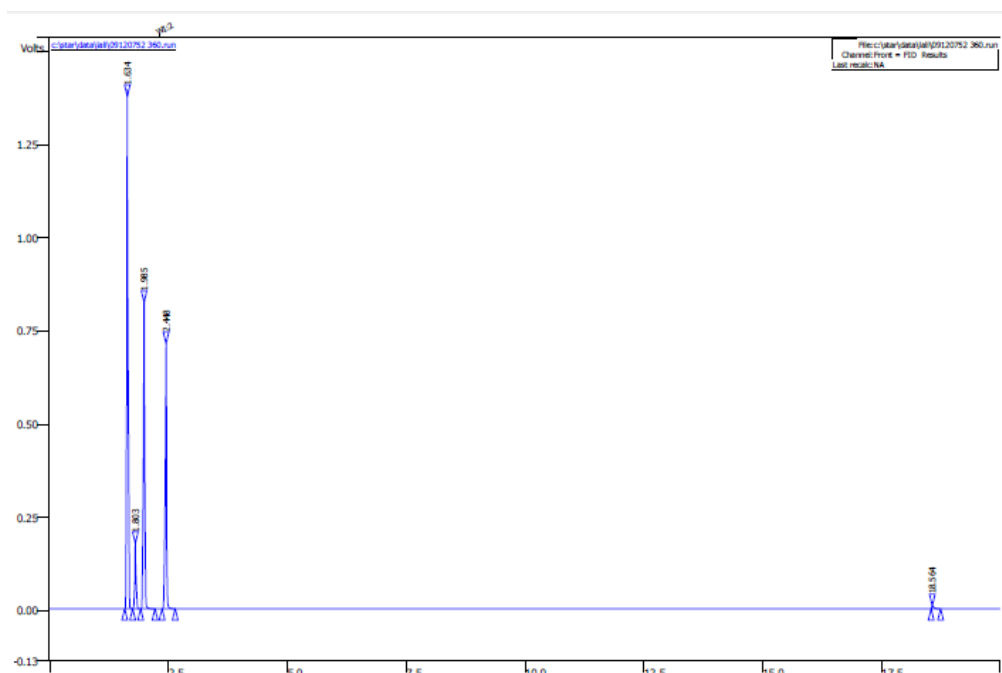
รูปที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟของเอทิลอะซีเตท

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของเอทิลอะซิเตท

ชนิดของสาร	Retention time (นาที)
อะซิโตน	1.640
เอทิลอะซิเตท	1.817
เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน	2.490

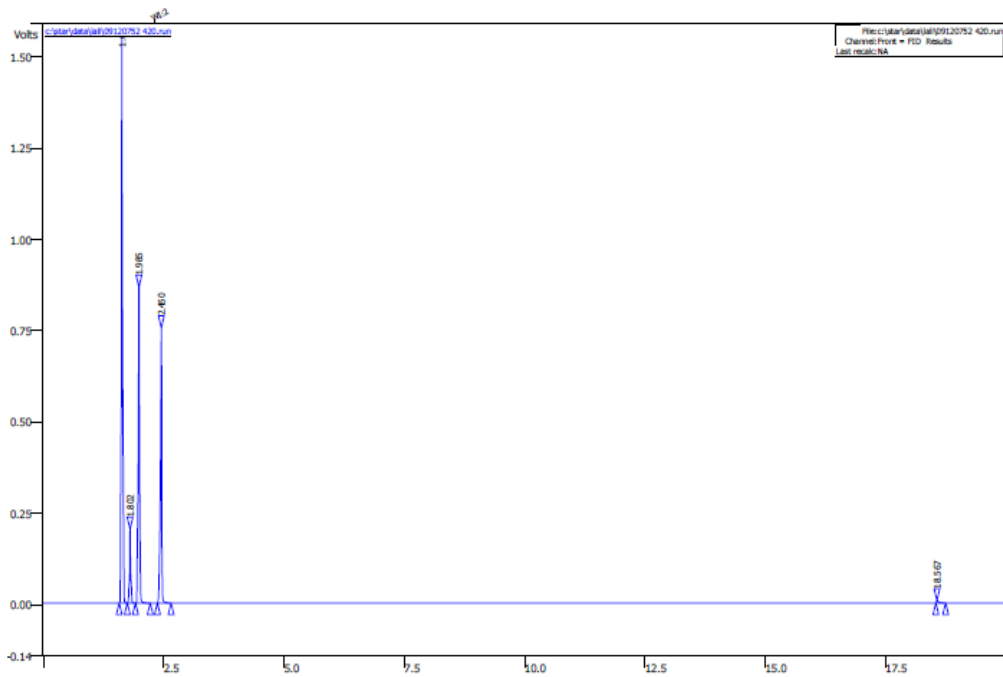
ข-2 การวิเคราะห์กรดอะซิติก เอทานอล และเอทิลอะซิเตทในสารตัวอย่างในบางสถานะ

ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวาน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 360 420 และ 480 นาที ทั้งในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำและระบบที่มีการแยกน้ำด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี แสดงในรูปที่ ข-4 ถึง รูปที่ ข-9



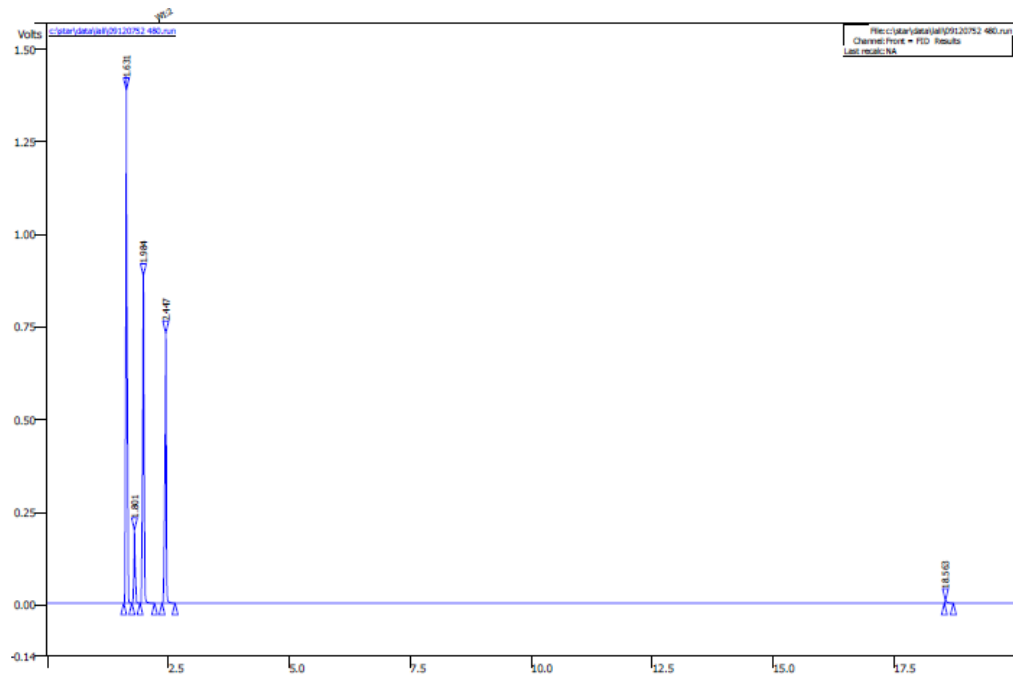
Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		44.0951	1.634	0.000	2646535
2		5.2689	1.803	0.000	316235
3		27.2292	1.985	0.000	1634263
4		22.9943	2.448	0.000	1380087
5		0.4125	18.564	0.000	24758
Totals:		100.0000		0.000	6001878

รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ



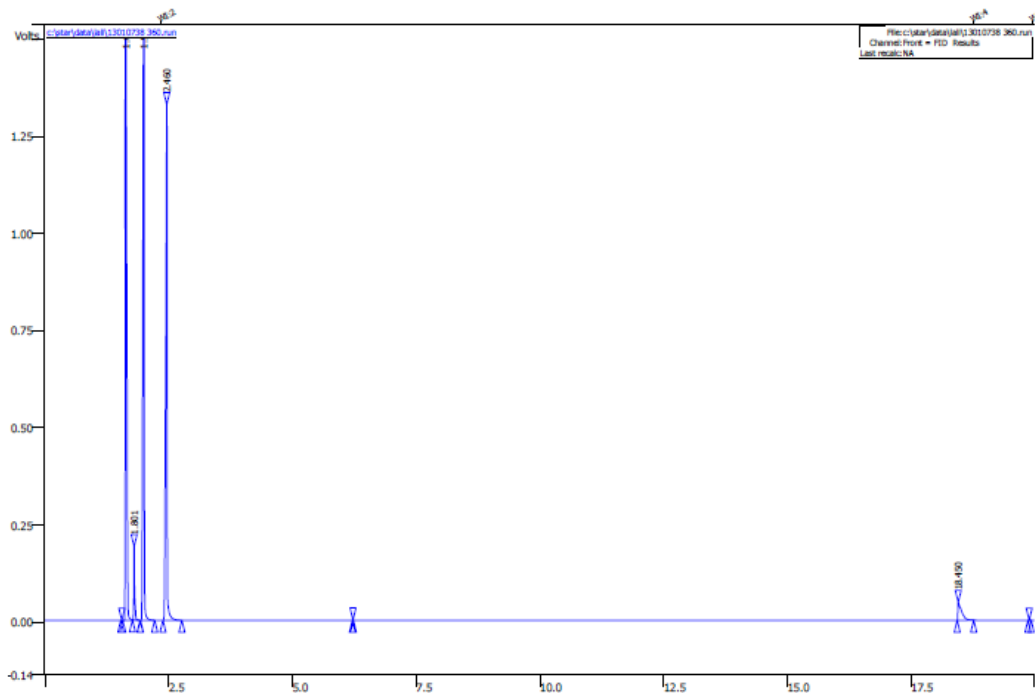
Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		43.9076	1.633	0.000	2693266
2		5.4217	1.802	0.000	332563
3		26.7304	1.985	0.000	1639630
4		23.5991	2.450	0.000	1447557
5		0.3412	18.567	0.000	20932
Totals:		100.0000		0.000	6133948

รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 420 นาที
ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ



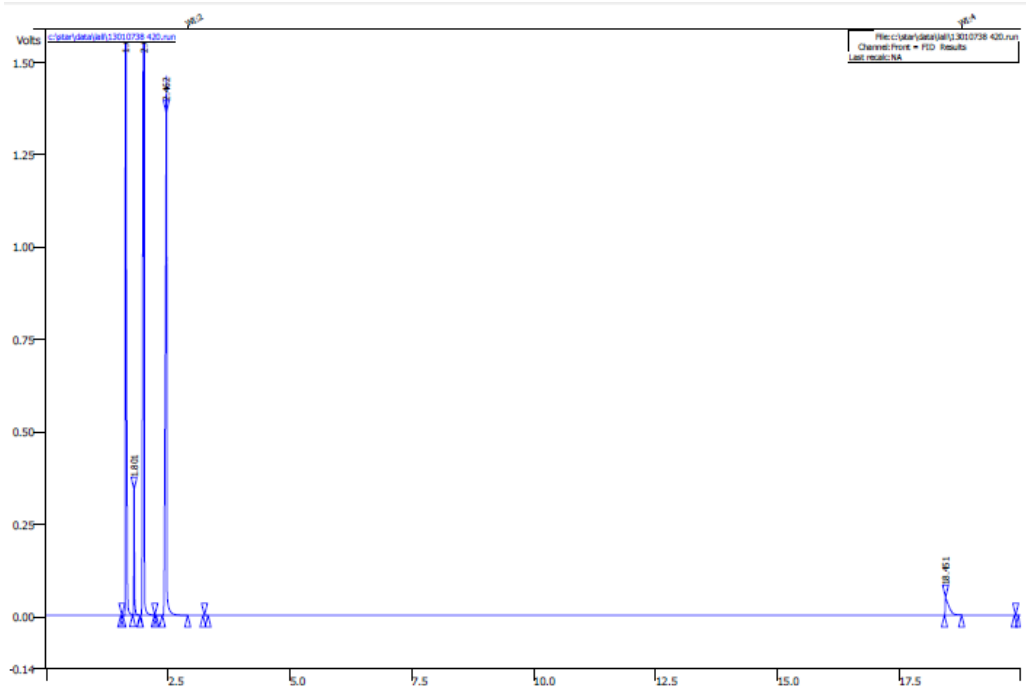
Peak No.	Peak Name	Result (%)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		42.4908	1.631	0.000	2696626
2		5.8009	1.801	0.000	368145
3		28.5555	1.984	0.000	1812240
4		22.8239	2.447	0.000	1448492
5		0.3289	18.563	0.000	20871
Totals:		100.0000		0.000	6346374

รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที
ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ



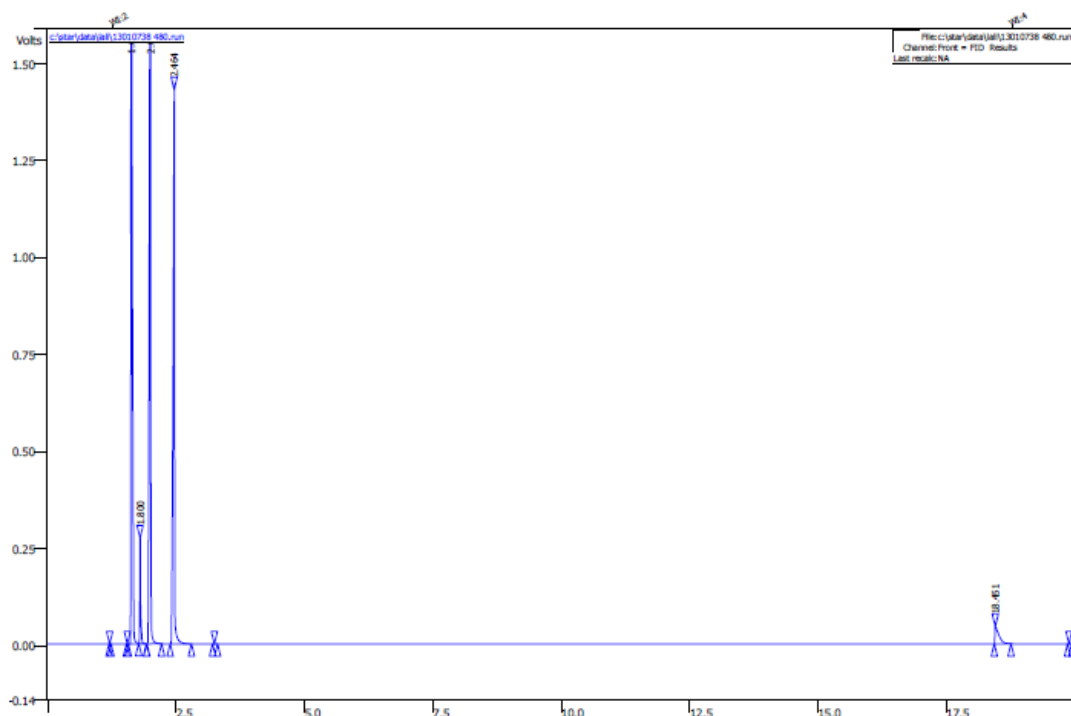
Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		43.3536	1.631	0.000	4850412
2		2.0921	1.801	0.000	234060
3		29.4780	1.993	0.000	3298007
4		22.9441	2.460	0.000	2566991
5		2.1322	18.450	0.000	238555
Totals:		100.0000		0.000	11188025

รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 นาที
ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง



Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		46.3795	1.630	0.000	6821786
2		2.2821	1.801	0.000	335666
3		30.0651	2.000	0.000	4422173
4		19.6024	2.462	0.000	2883251
5		1.6708	18.451	0.000	245759
Totals:		99.9999		0.000	14708635

รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 420 นาที
ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง



Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)
1		44.7834	1.629	0.000	6078494
2		2.2607	1.800	0.000	306842
3		29.8089	2.000	0.000	4045990
4		21.3532	2.464	0.000	2898292
5		1.7939	18.451	0.000	243493
Totals:		100.0001		0.000	13573111

รูปที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที
ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีดังแสดงในรูปที่ ข-4 ถึงรูปที่ ข-9 สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของกรดอะซิติคที่เวลา 360 420 และ 480 นาที สำหรับระบบที่ไม่มีการแยกน้ำและระบบที่มีการแยกน้ำได้ดังแสดงในตารางที่ ข-4 และตารางที่ ข-5 ตามลำดับ และสามารถนำไปคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคในสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีไตเตรตดังแสดงในตารางที่ ข-6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติคใกล้เคียงกัน

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 420 และ 480 นาที ในระบบที่ไม่มีการแยกน้ำ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)
360	0.23
420	0.20
480	0.18

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีของสารตัวอย่างที่เวลา 360 420 และ 480 นาที ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)
360	1.30
420	1.13
480	0.98

ตารางที่ ข-6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกของสารตัวอย่างที่เวลา 480 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีและวิธีไตเตรต

การทดลอง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก	
	เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี	วิธีไตเตรต
ระบบไม่มีการแยกน้ำ	91.62	90.70
ระบบมีการแยกน้ำ	53.50	56.10

ภาคผนวก ค
ผลการทดลองการศึกษาการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.10	0
5	2.05	2.38
10	2.05	2.38
15	2.05	2.38
30	2.00	4.76
45	2.00	4.76
60	2.00	4.76
120	2.00	4.76
180	2.00	4.76
240	2.00	4.76
300	1.95	7.14
360	1.95	7.14
420	1.95	7.14
480	1.95	7.14

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล
ของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.30	0
5	2.10	8.70
10	1.85	19.57
15	1.95	15.22
30	1.80	21.74
45	1.75	23.91
60	1.85	19.57
120	1.85	19.57
180	1.75	23.91
240	1.80	21.74
300	1.90	17.39
360	1.85	19.57
420	1.65	28.26
480	1.65	28.26

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบในการกวน

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วยรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	1.85	0
5	1.75	5.41
10	1.70	8.11
15	1.75	5.41
30	1.60	13.51
45	1.60	13.51
60	1.35	27.03
120	0.95	48.65
180	0.65	64.86
240	0.50	72.97
300	0.40	78.38
360	0.35	81.08
420	0.30	83.78
480	0.30	83.78

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.35	0
5	2.30	2.13
10	2.15	8.51
15	2.10	10.64
30	2.05	12.77
45	1.70	27.66
60	1.55	34.04
120	1.00	57.45
180	0.70	70.21
240	0.55	76.60
300	0.40	82.98
360	0.35	85.11
420	0.30	87.23
480	0.25	89.36

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.40	0
5	2.10	12.50
10	1.80	25.00
15	1.80	25.00
30	1.60	33.33
45	1.35	43.75
60	1.15	52.08
120	0.90	62.50
180	0.60	75.00
240	0.40	83.33
300	0.35	85.42
360	0.25	89.58
420	0.20	91.67
480	0.25	89.58

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	1.90	11.63
10	1.80	16.28
15	1.65	23.26
30	1.35	37.21
45	1.15	46.51
60	1.05	51.16
120	0.50	76.74
180	0.45	79.07
240	0.40	81.40
300	0.25	88.37
360	0.20	90.70
420	0.15	93.02
480	0.20	90.70

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองที่สภาวะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	1.95	0
5	1.00	48.72
10	1.75	10.26
15	1.70	12.82
30	1.45	25.64
45	1.20	38.46
60	1.00	48.72
120	0.75	61.54
180	0.50	74.36
240	0.35	82.05
300	0.30	84.62
360	0.25	87.18
420	0.25	87.18
480	0.20	89.74

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก

นาที่ (นาที่)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	1.86	0
5	1.57	15.79
10	1.81	2.63
15	1.72	7.89
30	1.57	15.79
45	1.37	26.32
60	1.37	26.32
120	1.08	42.11
180	1.13	39.47
240	0.83	55.26
300	0.83	55.26
360	0.83	55.26
420	0.74	60.53
480	0.74	60.53

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล
ของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	1.88	0
5	1.83	2.50
10	1.79	5.00
15	1.69	10.00
30	1.46	22.50
45	1.46	22.50
60	1.32	30.00
120	0.89	52.50
180	0.75	60.00
240	0.61	67.50
300	0.52	72.50
360	0.42	77.50
420	0.33	82.50
480	0.33	82.50

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	1.90	11.63
10	1.80	16.28
15	1.65	23.26
30	1.35	37.21
45	1.15	46.51
60	1.05	51.16
120	0.50	76.74
180	0.45	79.07
240	0.40	81.40
300	0.25	88.37
360	0.20	90.70
420	0.15	93.02
480	0.20	90.70

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:1

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	9.00	0
5	7.50	16.67
10	7.40	17.78
15	6.65	26.11
30	5.15	42.78
45	4.20	53.33
60	4.00	55.56
120	3.05	66.11
180	2.85	68.33
240	3.00	66.67
300	3.25	63.89
360	2.95	67.22
420	2.90	67.78
480	2.85	68.33

ตารางที่ ฉ-2 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:2

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	5.90	0
5	5.15	12.71
10	4.75	19.49
15	4.85	17.80
30	4.00	32.20
45	3.20	45.76
60	2.70	54.24
120	1.70	71.19
180	1.35	77.12
240	1.15	80.51
300	1.15	80.51
360	1.15	80.51
420	1.10	81.36
480	1.05	82.20

ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:4

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	3.50	0
5	3.10	11.43
10	2.85	18.57
15	2.75	21.43
30	2.30	34.29
45	1.85	47.14
60	1.65	52.86
120	0.85	75.71
180	0.65	81.43
240	0.50	85.71
300	0.45	87.14
360	0.45	87.14
420	0.45	87.14
480	0.30	91.43

ตารางที่ ฉ-4 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	1.90	11.63
10	1.80	16.28
15	1.65	23.26
30	1.35	37.21
45	1.15	46.51
60	1.05	51.16
120	0.50	76.74
180	0.45	79.07
240	0.40	81.40
300	0.25	88.37
360	0.20	90.70
420	0.15	93.02
480	0.20	90.70

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.00	0
5	2.00	0.00
10	1.90	5.00
15	1.85	7.50
30	1.90	5.00
45	1.80	10.00
60	1.85	7.50
120	1.80	10.00
180	1.50	25.00
240	1.30	35.00
300	1.25	37.50
360	1.35	32.50
420	1.20	40.00
480	1.20	40.00

ตารางที่ ช-2 ผลการทดลองที่สภาวะ ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.05	0
5	1.90	7.32
10	1.75	14.63
15	1.95	4.88
30	1.65	19.51
45	1.60	21.95
60	1.60	21.95
120	1.20	41.46
180	0.85	58.54
240	0.75	63.41
300	0.55	73.17
360	0.40	80.49
420	0.40	80.49
480	0.40	80.49

ตารางที่ ช-3 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติก
ต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	2.00	6.98
10	1.75	18.60
15	1.90	11.63
30	1.60	25.58
45	1.55	27.91
60	1.30	39.53
120	0.90	58.14
180	0.75	65.12
240	0.55	74.42
300	0.45	79.07
360	0.45	79.07
420	0.30	86.05
480	0.30	86.05

ตารางที่ ช-4 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกววน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติก
ต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	1.90	11.63
10	1.80	16.28
15	1.65	23.26
30	1.35	37.21
45	1.15	46.51
60	1.05	51.16
120	0.50	76.74
180	0.45	79.07
240	0.40	81.40
300	0.25	88.37
360	0.20	90.70
420	0.15	93.02
480	0.20	90.70

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองการศึกษานำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
(แอมเบอร์ลิสต์ บีดี 20)

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองการนำกลับมาใช้ใหม่ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ครั้งที่ 1 ที่สภาวะ
 ความเร็วรอบในการกววน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10
 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8
 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.00	0
5	1.90	5.00
10	1.85	7.50
15	2.00	0.00
30	1.80	10.00
45	1.65	17.50
60	1.60	20.00
120	1.50	25.00
180	1.45	27.50
240	1.20	40.00
300	1.20	40.00
360	1.20	40.00
420	1.10	45.00
480	1.10	45.00

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ครั้งที่ 2 ที่สภาวะ
 ความเร็วรอบในการกววน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10
 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8
 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.05	0
5	2.00	2.44
10	2.00	2.44
15	2.00	2.44
30	1.90	7.32
45	1.70	17.07
60	1.75	14.63
120	1.70	17.07
180	1.70	17.07
240	1.65	19.51
300	1.70	17.07
360	1.65	19.51
420	1.60	21.95
480	1.55	24.39

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ครั้งที่ 3 ที่สภาวะ
ความเร็วรอบในการกววน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 10
โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.05	0
5	2.05	0.00
10	2.00	2.44
15	2.05	0.00
30	1.95	4.88
45	2.00	2.44
60	1.90	7.32
120	1.85	9.76
180	1.75	14.63
240	1.70	17.07
300	1.65	19.51
360	1.55	24.39
420	1.50	26.83
480	1.50	26.83

ภาคผนวก ฅ

ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกกับเอทานอล
ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ ฅ-1 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:1

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	9.50	0
5	7.93	16.57
10	7.82	17.68
15	6.98	26.52
30	6.77	28.73
45	5.88	38.12
60	5.72	39.78
120	5.57	41.44
180	5.83	38.67
240	5.20	45.30
300	5.78	39.23
360	5.57	41.44
420	5.67	40.33
480	5.51	41.99

ตารางที่ ฅ-2 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติค อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติคต่อเอทานอล 1:2

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติค (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติค
0	6.36	0
5	5.35	15.83
10	5.25	17.50
15	4.61	27.50
30	4.13	35.00
45	4.24	33.33
60	3.76	40.83
120	3.55	44.17
180	3.50	45.00
240	3.45	45.83
300	3.66	42.50
360	3.39	46.67
420	3.55	44.17
480	3.39	46.67

ตารางที่ ฅ-3 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:4

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	3.57	0
5	3.52	1.47
10	2.99	16.18
15	3.10	13.24
30	2.78	22.06
45	2.42	32.35
60	2.21	38.24
120	2.21	38.24
180	1.84	48.53
240	1.89	47.06
300	1.68	52.94
360	1.68	52.94
420	1.84	48.53
480	1.68	52.94

ตารางที่ ฅ-4 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.09	0
5	1.79	14.63
10	1.58	24.39
15	1.68	19.51
30	1.53	26.83
45	1.43	31.71
60	1.38	34.15
120	1.22	41.46
180	1.12	46.34
240	1.07	48.78
300	0.97	53.66
360	0.97	53.66
420	0.92	56.10
480	0.92	56.10

ภาคผนวก ญ
ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
ในระบบที่มีการแยกน้ำอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ ญ-1 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติกต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.10	0
5	2.10	0.00
10	2.10	0.00
15	2.05	2.50
30	1.89	10.00
45	1.84	12.50
60	1.89	10.00
120	1.79	15.00
180	1.58	25.00
240	1.63	22.50
300	1.58	25.00
360	1.68	20.00
420	1.68	20.00
480	1.68	20.00

ตารางที่ ๓-๒ ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวาด 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติก
ต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.10	0
5	2.00	5.00
10	2.00	5.00
15	2.00	5.00
30	1.89	10.00
45	1.84	12.50
60	1.79	15.00
120	1.84	12.50
180	1.63	22.50
240	1.58	25.00
300	1.63	22.50
360	1.58	25.00
420	1.47	30.00
480	1.52	27.50

ตารางที่ ๓-3 ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติก
ต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.15	0
5	2.10	2.44
10	1.94	9.76
15	2.05	4.88
30	1.89	12.20
45	1.73	19.51
60	1.79	17.07
120	1.52	29.27
180	1.37	36.59
240	1.37	36.59
300	1.37	36.59
360	1.37	36.59
420	1.31	39.02
480	1.31	39.02

ตารางที่ ๓-๔ ผลการทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของกรดอะซิติก อัตราส่วนโดยโมลของกรดอะซิติก
ต่อเอทานอล 1:8 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของกรดอะซิติก
0	2.09	0
5	1.79	14.63
10	1.58	24.39
15	1.68	19.51
30	1.53	26.83
45	1.43	31.71
60	1.38	34.15
120	1.22	41.46
180	1.12	46.34
240	1.07	48.78
300	0.97	53.66
360	0.97	53.66
420	0.92	56.10
480	0.92	56.10

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวลลิตา เมฆเสรีวัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จนสำเร็จการศึกษา