

รายงานฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงกระบวนการไฮโดรไลซิสและทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อการ
ผลิตไบโอดีเซล

Process Improving of Hydrolysis and Transesterification for
Biodiesel Production

รหัสโครงการ

SCH-NR2012-226

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงกระบวนการไฮโดรไลซิสและทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อการ
ผลิตไบโอดีเซล

Process Improving of Hydrolysis and Transesterification for
Biodiesel Production

รายนามคณะผู้วิจัย

1. ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
 2. นางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์
 3. นายพนารท ก้องไพรินทร์
- ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันเริ่มต้นโครงการ 2 ธันวาคม 2556

วันสิ้นสุดโครงการ 2 มิถุนายน 2558

(...../ ตรวจสอบเนื้อหาแล้ว)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์และนายพนารท ก้องไพรินทร์ผู้ช่วยวิจัยนางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์ ช่วยการทดลองส่วนของการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส นายพนารท ก้องไพรินทร์ ช่วยการทดลองส่วนของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และนักศึกษาชั้นปีที่ 4 นายชัยพร จิงโชติกรพิศิฐ และนางสาวนัมมัญชยาพร ใจปลื้ม สำหรับการช่วยทำการทดลองในส่วนของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน นายชนินทร ตริมีงมิตร และนายธาดา ทรัพย์พิพัฒนา สำหรับการช่วยทำการทดลองในส่วนของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และขอขอบคุณนายธาดา ทรัพย์พิพัฒนา สำหรับการจัดรูปเล่มรายงาน

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท กรุงเทพ ซินธิติกส์ จำกัด ในการให้ความอนุเคราะห์สารเคมีเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ในการทำการทดลองในงานวิจัยนี้ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณผู้ที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ แต่มีส่วนในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จจุลวง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าผลงานในรายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับต่อยอดการผลิตไบโอดีเซลไม่มากนักน้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ธนวรรณ พิณรัตน์

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยคาดหวังว่าจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และ ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเมื่อมีการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกริยาทำให้ผลผลิตกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ในช่วงร้อยละ 20-50 โดยมวลของน้ำมัน ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 1:0.2 ถึง 1:4 อัตราส่วนโดยมวล ทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปจะส่งผลทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันอิสระลดลง ส่วนอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกริยา การศึกษาครั้งนี้ยังได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายค่าการแปลงผันของไตรกลีเซอไรด์ในช่วงอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียสด้วย

การทำปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าน้ำมีอิทธิพลต่อปฏิกริยามาก โดยการมีน้ำเพียงร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นควรกำจัดน้ำออกให้มากที่สุดก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันหรือทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน การศึกษาจลนพลศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 60 ทำให้สามารถทำนายความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่เปลี่ยนแปลงไปได้

การทำปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมง โดยใช้กรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมัน และตัวทำละลายอะซีโตนร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมัน พบว่าได้ผลผลิตไบโอดีเซลเพียงแค่ร้อยละ 7 เท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกริยาส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดไบโอดีเซล การใช้ตัวทำละลายช่วยลดอิทธิพลของการแพร่ในระบบ พบว่าเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เฮกเซน และอะซีโตนให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 81.58 81.22 และ 69.07 ตามลำดับ เทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย ได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 56.33 นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายทางเลือกที่น่าสนใจเพราะสามารถแยกออกหลังทำปฏิกริยาได้ง่าย ทั้งนี้ปริมาณแก๊สที่ใส่ในระบบต้องคำนึงถึงสมดุลเฟสของระบบด้วยเพื่อให้ได้ผลผลิตสูง การเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันจะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในระบบด้วย ถ้าปริมาณตัวเร่งปฏิกริยามีน้อย และทำการเพิ่มปริมาณเมทานอลจะเป็นการทำให้สารตั้งต้นของระบบเจือจางและผลผลิตของไบโอดีเซลจะลดลง การปั่นกววนสำหรับระบบที่ศึกษาจะเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในช่วงแรกแต่ถ้าการปั่นกววนเร็วเกินกว่า 200 รอบต่อนาทีจะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลลดลง

ผลจากโครงการวิจัยนี้เป็นข้อมูลสำคัญเพื่อใช้ในการต่อยอดการผลิตไบโอดีเซลด้วยสารตั้งต้นราคาถูก

Abstract

This research studied three main parts, hydrolysis reaction, esterification reaction, and transesterification reaction.

Addition of free fatty acid to the reactants of triglyceride hydrolysis accelerates the reaction. The yield of fatty acid increased by 10 percent in the range of 20-50 percent initial free fatty acid by weight oil. Increasing the molar ratio of oil to water from 1:02 to 1:4, increased the fatty acid yield but excess amount of water will retard the reaction. Temperature has a major effect on fatty acid yield. This study also propose the mathematical model to predict the conversion of triglyceride in the temperature range of 50-90 °C

In esterification reaction, water affects the reaction. The biodiesel yield will decrease 10% with only 0.7 percent water by weight of reactant added to the reaction. Therefore, water should be removed before entering esterification and transesterification reaction. The model describes the concentration change of triglyceride also studied in the temperature range of 35-60 °C

Transesterification at low temperature of 50 °C for 11 hours using 5%wt sulfuric acid and 20%wt acetone, gave yield of biodiesel of only 7 %. When the temperature increases (100 to 150 °C), the biodiesel yield increases. It was proved that amount of sulfuric has strong effect on the reaction. The solvent helps reduce the diffusion effect of the system. We found that using tetramethylbutylether, hexane, and acetone as solvents gave biodiesel yield of 81.58%, 81.22%, and 69.07% respectively compared to the non-solvent condition, which gave the biodiesel yield of 56.33%. In addition, carbondioxide was found to be one of interesting solvent because of easy separation at the end of the process. The amount of gas supplies involves the phase equilibrium of the system. Methanol to oil molar ratio increases the biodiesel yield to a certain level. However, the amount of methanol use has to be in good portion with amount of acid catalyst and initial amount of triglyceride. Very high amount of methanol will dilute the system concentration and decrease biodiesel yield. The stirring speed increases the biodiesel yield until 200 rpm.

The work from this research will be useful for cheap feedstock biodiesel production.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม	4
2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน	7
2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	7
2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	9
2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย	10
บทที่ 3 การออกแบบการวิจัย	12
3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	12
3.2 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	12
3.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	13
บทที่ 4 ระเบียบวิจัย	14
4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	14
4.1.1 สารเคมี.....	14
4.1.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์.....	14
4.1.3 ขั้นตอนการทดลอง	15
4.1.4 การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น	17
4.1.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	18
4.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน.....	19
4.2.1 สารเคมี.....	19
4.2.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์.....	20
4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง	20
4.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	23
4.3.1 สารเคมี.....	23
4.3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์.....	23
4.3.3 วิธีการทดลอง	23
4.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	24
บทที่ 5 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล	27
5.1 การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	27
5.1.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์	27
5.1.2 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
5.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ	29
5.1.4 อิทธิพลของปริมาณการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	29
5.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	30
5.1.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	31
5.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	37
5.2.1 อิทธิพลของน้ำในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	37
5.2.2 การทดลองหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	38
5.3 การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	43
5.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาเป็นวัตถุดิบ	43
5.3.2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิที่ 50°C.....	44
5.3.3 ผลของอุณหภูมิ.....	44
5.3.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97-98%).....	46
5.3.5 ผลของชนิดของตัวทำละลาย.....	47
5.3.6 ผลของปริมาณตัวทำละลาย	49
5.3.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	52
5.3.8 ผลของอัตราเร็วในการปั่นกวน	54
5.3.9 ระยะเวลาที่ใช้เพิ่มและลดอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ท่อนอุณหภูมิและทนความดันสูง ..	57
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	59
6.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์.....	59
6.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	59
6.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ	59
6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	59
6.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	59
6.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	60
6.4.1 ผลของอุณหภูมิ.....	60
6.4.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก.....	60
6.4.3 ผลของชนิดตัวทำละลาย	61
6.4.4 เวลาในการทำปฏิกิริยา	61
6.4.5 ผลของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน	61
6.4.6 ผลของการปั่นกววน	61
เอกสารอ้างอิง	62
ประวัติผู้วิจัย	67

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ก) แบบเบส ข) แบบกรด	9
รูปที่ 4.1	ชุดเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันและอุณหภูมิสูง	14
รูปที่ 4.2	ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	16
รูปที่ 4.3	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	18
รูปที่ 5.1	การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้นและไม่ เติมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำคือ 1:4	28
รูปที่ 5.2	อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 60 องศา เซลเซียส และมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาที โดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยมวล ของน้ำมันใน ตอนเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที.....	29
รูปที่ 5.3	อิทธิพลของปริมาณกรดโอเลอิกในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวล น้ำมันต่อน้ำ 1:4 ที่ 60 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	30
รูปที่ 5.4	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาต่างๆ โดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ 1:4	31
รูปที่ 5.5	การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 5.6	การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 5.7	การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 5.8	การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 5.9	การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	35
รูปที่ 5.10	อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปข้างหน้า	36
รูปที่ 5.11	อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสย้อนกลับ	36
รูปที่ 5.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลได้กับปริมาณน้ำที่ใส่ลงในสารตั้ง ต้นที่สภาวะเมทานอลต่อกรดโอเลอิก 10:1 ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดย น้ำหนักกรดโอเลอิก อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง	38

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตไปไอดีเซลที่เวลา 0-360 นาที ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิก 10:1 และ กรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก.....	39
รูปที่ 5.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที	40
รูปที่ 5.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที	40
รูปที่ 5.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที	41
รูปที่ 5.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที	41
รูปที่ 5.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที.....	42
รูปที่ 5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln kA$ กับ $1/T$	42
รูปที่ 5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตไปไอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที อะซิโตนร้อยละ 20% โดยมวลน้ำมันที่อุณหภูมิ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บรรยากาศ	45
รูปที่ 5.21	อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลผลิตไปไอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 อะซิโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.22	อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย ที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที.....	47
รูปที่ 5.23	อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที.....	49
รูปที่ 5.24	อิทธิพลระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บรรยากาศ ปริมาณกรดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที.....	50
รูปที่ 5.25	อิทธิพลของความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณกรดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที.....	51
รูปที่ 5.26	อิทธิพลของความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณกรดร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที.....	52
รูปที่ 5.27	ความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน	52
รูปที่ 5.28	อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เติตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที.....	53
รูปที่ 5.29	อิทธิพลของอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณกรด 1-2 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที.....	54
รูปที่ 5.30	อิทธิพลของอัตราเร็วของการปั่นกววนต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเวลา 20 นาที โดยกราฟของเติตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 เติตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และกราฟของอะซีโตนมีอัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 อะซีโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน	54
รูปที่ 5.31	อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณกรด 1% โดยน้ำหนักน้ำมัน.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.32 อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณกรดร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน	56
รูปที่ 5.33 อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน ที่ภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 ปริมาณ กรดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน	57
รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก่อนทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยา และทนความดันสูง.....	58
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลงหลังทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยา และทนความดันสูง.....	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยา.....	6
ตารางที่ 4.1	แสดงขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง	15
ตารางที่ 4.2	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	16
ตารางที่ 4.3	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	16
ตารางที่ 4.4	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	17
ตารางที่ 4.5	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	17
ตารางที่ 5.1	อิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและ อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.4 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที	27
ตารางที่ 5.2	ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลอง	32
ตารางที่ 5.3	ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง	37
ตารางที่ 5.4	ค่า k_A อันดับปฏิกิริยาของสาร A (α) และ อันดับปฏิกิริยาของสาร B (β) ที่อุณหภูมิต่างๆ	43
ตารางที่ 5.5	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบ	43
ตารางที่ 5.6	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด และผลการประมาณค่าไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 50 องศา- เซลเซียส.....	44
ตารางที่ 5.7	ค่าความมีขี้ของสารต่างๆ	48
ตารางที่ 5.8	ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาเมื่อใช้อะซิโตนหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ...	48

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันนักวิจัยพยายามแสวงหาแหล่งพลังงานทางเลือกนอกเหนือจากพลังงานจากการขุดเจาะน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งมีแนวโน้มลดลงและใช้เวลานานในการสะสมตัวเป็นน้ำมันใต้ดิน แหล่งพลังงานทางเลือกเหล่านี้รวมถึงพลังงานทดแทนที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้หรือแหล่งพลังงานที่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว พลังงานในรูปของเชื้อเพลิงที่น่าสนใจตัวหนึ่งคือ น้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้ด้วยวัตถุดิบที่หาได้ในประเทศไทย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ

น้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำมันที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซลที่เกิดจากการสกัดน้ำมันจากพืชและผ่านขั้นตอนการลดความหนืดและปรับคุณสมบัติให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมเพื่อที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องมีการดัดแปลง [1] น้ำมันไบโอดีเซลมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซลที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม [2] นอกจากนี้ น้ำมันไบโอดีเซลจะมีประสิทธิภาพต่อเครื่องยนต์เทียบเท่ากับน้ำมันดีเซลแล้วนั้น [3] ข้อดีในการใช้น้ำมันไบโอดีเซลคือ ช่วยในการลดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล [4,5] แม้ว่าการใช้น้ำมันไบโอดีเซลมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยหล่อลื่นเครื่องยนต์ แต่การใช้งานในประเทศไทยปัจจุบันนั้นยังนิยมใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนที่น้อยซึ่งนิยมใช้กันคือ B5 มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลอยู่ร้อยละ 5 ในน้ำมันดีเซลร้อยละ 95 เหตุที่ไม่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 100 นั้นเพราะน้ำมันไบโอดีเซลมีราคาแพงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลซึ่งเป็นผลมาจากต้นทุนการผลิตที่มีราคาสูงของกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ดังนั้นถ้าสามารถหาวิธีการผลิตที่มีต้นทุนราคาถูกลง จะส่งผลให้การใช้งานน้ำมันไบโอดีเซลเป็นที่นิยมมากขึ้น

วิวัฒนาการของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลนั้นเริ่มต้นจากการใช้พืชน้ำมันที่สามารถนำมาบริโภคได้ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดเรป น้ำมันปาล์ม เป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาการแย่งตลาดระหว่างตลาดอาหารกับตลาดพลังงานทำให้อาหารมีราคาสูงขึ้นเป็นการรบกวนระบบเศรษฐกิจ ต่อมาได้มีการสรรหาวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ เช่น สบู่ดำ และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการค้นพบแหล่งน้ำมันจากพืชที่น่าสนใจคือสาหร่าย ซึ่งมีการเติบโตที่รวดเร็วและให้ปริมาณน้ำมันต่อพื้นที่เป็นปริมาณสูงเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ [6]

สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) ให้ปริมาณน้ำมันมากกว่าปาล์มซึ่งเป็นพืชที่หาได้ง่ายในประเทศไทยถึง 7-31 เท่า [7] การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็กจึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจซึ่งปัจจุบันอยู่ในระดับงานวิจัยยังไม่มีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่ายในขนาดอุตสาหกรรม

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลระดับอุตสาหกรรมจากพืชน้ำมันชนิดต่างๆ นั้นจะผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการเลือกใช้ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ [5,8,9]

สำหรับวัตถุดิบที่มีราคาถูกมักมีสิ่งเจือปนอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดสิ่งเจือปนโดยการทำปฏิกิริยาในสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ตามด้วยปฏิกิริยาทรานส์/เอสเทอร์ิฟิเคชัน (trans/esterification) (สองปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน) ซึ่งสามารถทำที่สภาวะที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมหรือภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (supercritical) เพื่อผลิตไบโอดีเซล

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการสองขั้นตอนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่คาดว่าจะช่วยลดต้นทุนและมีผลผลิตสูงรวมทั้งมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม โดยจะใช้วิธีการที่คำนึงถึงการใช้พลังงานน้อยที่สุดและใช้วัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด กระบวนการที่นำเสนอนี้ประกอบไปด้วยสองขั้นตอนสำคัญคือ

1. ไฮโดรไลซิส ณ สภาวะใต้วิกฤต (subcritical water hydrolysis) ซึ่งจะทำให้การศึกษาที่อุณหภูมิไม่สูงมากในช่วง 50-90 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วง 0-120 นาทีโดยใช้กรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ทรานส์/เอสเทอร์ิฟิเคชัน (*in situ* trans/esterification) โดยขั้นตอนนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ร่วมกับตัวทำละลายโดยจะศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อนำเสนอการปรับปรุงกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดต้นทุนการผลิตโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการสองขั้นตอน คือ ไฮโดรไลซิส และ ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยมีตัวแปรหลักที่จะทำการศึกษาในแต่ละขั้นตอนซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของโครงการดังนี้

ขั้นตอนแรก ไฮโดรไลซิส

1. การใช้ไอ้มัลซิฟายเออร์และการปั่นกววนเพื่อลดความต้านทานการแพร่
2. การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่สอง ทรานส์/เอสเทอร์ิฟิเคชัน

เนื่องจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันสองปฏิกิริยา คือ เอสเทอร์ิฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จึงทำการศึกษาทั้งสองปฏิกิริยา ดังนี้

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. อิทธิพลของปริมาณน้ำในสารตั้งต้นที่มีต่อปฏิกิริยา
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 35-60 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ชนิดและปริมาณของตัวทำละลาย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก ปริมาณเมทานอลต่อน้ำมัน และอัตราเร็วการปั่นกวาน

ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาที่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้สองขั้นตอนมีขอบเขตในการศึกษาตัวแปรดังนี้

ขั้นตอนแรก ไฮโดรไลซิส

1. การใช้มีลชีฟายเออร์ (สแปน 60) และการปั่นกวานเพื่อลดความต้านทานการแพร่
2. การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาปัจจัยของ อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำช่วง 1:02 ถึง 1:8 ปริมาณกรดโอเลอิกร้อยละ 20-50 โดยมวลของน้ำมัน เริ่มต้น และอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส โดยมีทั้งอัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับ

ขั้นตอนที่สอง แบ่งออกเป็นสองปฏิกิริยา คือ เอสเทอร์ิฟิเคชัน และ ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. อิทธิพลของปริมาณน้ำในสารตั้งต้นที่มีต่อปฏิกิริยาในช่วงร้อยละ 0-103.6 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 35-60 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาในช่วง 100-150 องศาเซลเซียส
2. เวลาในการทำปฏิกิริยา 20-120 นาที
3. ชนิดและปริมาณตัวทำละลาย โดยเลือกศึกษาตัวทำละลาย อะซีโตน เฮกเซน เตตระเมทิล-บิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักน้ำมัน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 1-70 บรรยากาศ (เกจ)
4. ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5-3 โดยน้ำหนักน้ำมัน
5. ปริมาณเมทานอลต่อน้ำมันร้อยละ 10:1-50:1 โดยโมล
6. ความเร็วรอบการปั่นกวาน 200-600 รอบต่อนาที

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

แหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญแหล่งหนึ่งคือ พืช (biomass) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน มีเทน ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว น้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น โครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยการศึกษาที่นำพืชมาเป็นวัตถุดิบนั้นมีมานานมากกว่า 10 ปี โดยช่วงแรกพืชที่สามารถนำมาบริโภคได้นั้นถูกนำมาใช้และก่อให้เกิดปัญหาความขัดแย้งเรื่องการแย่งตลาดระหว่างการใช้พืชเพื่อการบริโภคหรือใช้เพื่อการผลิตพลังงาน ต่อมาจึงได้มีการค้นหาพืชที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์และไม่สามารถนำมาบริโภคได้ เพื่อลดปัญหาความขัดแย้งเรื่องการตลาด เมื่อไม่กี่ปีมานี้ นักวิจัยจำนวนมากมีความสนใจในการนำพืชน้ำ เช่น สาหร่ายเซลล์เล็ก (microalgae) มาใช้

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันนั้นสามารถทำได้โดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก [8] โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสที่นิยมใช้กันคือ KOH, NaOH, NaOCH₃, KOCH₃ แต่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะไม่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำและไขมันอิสระอยู่ด้วย [10,11] โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงอย่างมากถ้าวัตถุดิบมีปริมาณน้ำเกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักและปริมาณกรดไขมันอิสระเกินร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก [9]

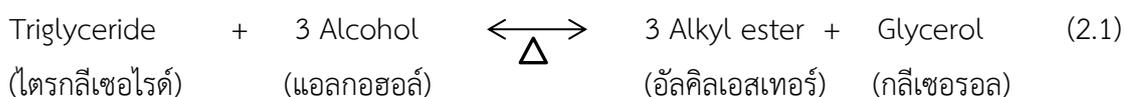
ถ้าวัตถุดิบที่นำมาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่มาก วิธีที่นิยมใช้คือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้กลายเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ กรดที่นิยมใช้คือกรดซัลฟิวริก แต่กรดประเภทอื่นก็สามารถนำมาใช้ได้ เช่น กรด HCl, BF₃, H₃PO₄, กรดซัลฟูนิค เป็นต้น โดยสภาพที่ใช้ใช้นั้นประมาณ 77 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณกรดร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดจะช่วยแก้ปัญหาการมีกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบได้ แต่ถ้าวัตถุดิบมีน้ำอยู่ด้วยจะไปทำการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา [12] และปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้นั้นจะมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งชนิดเบส โดยจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 30:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยาค่อนข้างนาน ประมาณ 20 ชั่วโมง [5] Wang และคณะ [13] ได้เสนอการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดในขั้นแรกและตามด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเพื่อเป็นการลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาสำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันสูง

วิธีที่กล่าวมาข้างต้นสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดหรือเบสนั้นเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอกพันธ์ซึ่งหลังจากสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาจะต้องมีขั้นตอนในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนามาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

เพื่อให้่ายต่อการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ก็ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ลดลงเมื่อวัตถุดิบมีน้ำและไขมันอิสระ [14]

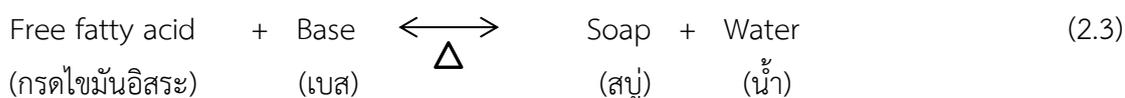
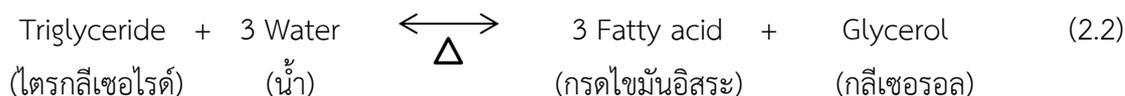
เนื่องจากปฏิกิริยาหลักในการผลิตไบโอดีเซล คือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จึงทำการศึกษารายละเอียดของงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นแนวทางและจุดประเด็นในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยให้สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็ว โดยที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์) กับแอลกอฮอล์โดยมีการให้ความร้อน เกิดเป็นอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และมีสารข้างเคียงที่เกิดขึ้นคือ กลีเซอรอล แสดงดังสมการที่ (2.1)

ตัวเร่งปฏิกิริยา



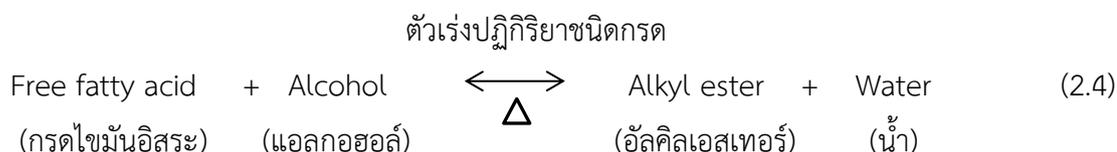
วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีผลอย่างมากกับการเลือกใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสม ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีอยู่ในสารตั้งต้น โดยงานวิจัยของ Kusdiana และ Saka [12] แสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดไขมันอิสระเพียงร้อยละ 20 จะทำให้อัตราผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง ถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงร้อยละ 65 เทียบกับการใช้วัตถุดิบบริสุทธิ์ที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เกือบร้อยละ 100 นอกจากนี้ น้ำที่ปริมาณเพียงร้อยละ 1 จะส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตไบโอดีเซลอย่างมาก ซึ่งถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 10 และถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 20 [12] เพราะน้ำและกรดไขมันอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น สำหรับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส น้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ตามสมการที่ (2.2) และกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่ในปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ตามสมการที่ (2.3) นอกจากนี้ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงแล้วจะทำให้การแยกสารผลิตภัณฑ์กับสารที่ไม่ต้องการนั้นยากขึ้นอีกด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส



ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะใช้ได้ดีกับวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ซึ่งปกติมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนสูง สำหรับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระอยู่เป็นจำนวนมากเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว ไขมันสัตว์

ไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ หรือสาหร่าย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีถ้าทำการแยกน้ำออกก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยากรดเกิดเป็นไบโอดีเซลและน้ำได้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดังในสมการที่ (2.4) และหากไม่ทำการแยกน้ำออกจากสารตั้งต้น กรดจะเกิดการแตกตัวในน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของกรดลดลง [5]



นอกจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดและเบส ยังมีนักวิจัยบางส่วนได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาโดยที่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำปนเปื้อน [15-17] อีกหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจคือ การใช้สภาวะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ที่สภาวะนี้คุณสมบัติของน้ำมันและแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลง โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ในสภาวะดังกล่าว ประกอบกับอุณหภูมิและความดันที่สูงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและรวดเร็ว รวมทั้งการทำปฏิกิริยา ณ สภาวะนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งสิ่งเจือปน (กรดไขมันอิสระและน้ำ) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา [12,18,19]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

วิธีการ	สภาวะ			ชนิดของสิ่งเจือปน		เวลา (นาที)	ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	อัตราส่วนโดยโมล (เมทานอล: น้ำมัน)	กรดไขมันอิสระ	น้ำ			
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส	65	P ^{sat}	12:1	มีผล	มีผล	180	95	[20]
	55	P ^{sat}	6:1	มีผล	มีผล	30	100	[21]
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด	65	P ^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	4,140	99	[22]
	200	P ^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	300	85	[23]
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์	50	P ^{sat}	1:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	480	96	[16]
	37	P ^{sat}	5:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	3,600	94	[17]
สภาวะเหนือวิกฤต	255	P ^{sat}	9:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	25	90	[18]
	400	200	40:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	40	96	[19]

หมายเหตุ P^{sat} คือ ความดันไอของระบบ

สภาวะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน ซึ่งเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยอิทธิพลของแต่ละตัวแปรจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิและความดันถือเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ภายในโมเลกุลทำให้สารตั้งต้นนั้นทำปฏิกิริยากัน ผลผลิตไปโอดีเซลจะเกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสอุณหภูมิทำปฏิกิริยามักนิยมใช้ใกล้จุดเดือดของแอลกอฮอล์ ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดย Rashid และ Anwar ทำการศึกษาอุณหภูมิ 35 50 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าให้ร้อยละผลผลิตไปโอดีเซลที่ประมาณ 90 ใกล้เคียงกันทั้งสามอุณหภูมิ โดยใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน คือ 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 และทำการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที [24]

โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยาจะมีการให้ความดันกับระบบเล็กน้อย 2-3 บรรยากาศ (bar) เพื่อให้เมทานอลกลั่นตัวกลับลงมาอยู่ในสภาวะของเหลวให้มากที่สุด

สำหรับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดวิกฤตของแอลกอฮอล์ (โดยทั่วไปใช้เมทานอล) ประมาณ 240-270 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในระยะเวลาสั้น 15 นาที โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารตั้งต้นอยู่ในเฟสเดียวกันที่สภาวะดังกล่าวและประกอบกับสภาวะอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว [25,26] แต่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่ควรมีค่าสูงเกิน 300 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ และมีการเปลี่ยนจากไอโซเมอร์แบบ cis เป็น trans ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้อยลงถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารตั้งต้นที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง [26]

2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1)) การทำปฏิกิริยาโดยเริ่มต้นจากน้ำมันปริมาณ 1 โมลจะใช้แอลกอฮอล์ปริมาณ 3 โมล แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน และเป็นการผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดในทิศทางของผลิตภัณฑ์มากขึ้น สำหรับข้อมูลส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็นแบบชนิดเบสและชนิดกรด

โดยทั่วไปการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันไม่มากซึ่งการทดลองของ Agarwal และคณะ [27] ศึกษาในช่วง 3:1 ถึง 10:1 ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 จะมีค่าผลผลิตไปโอดีเซลมากที่สุดที่

ร้อยละ 98.5 และเมื่อเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 ซึ่งได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 94.1 เพราะปริมาณของแอลกอฮอล์ส่งผลทำให้ความเข้มข้นรวมของสารตั้งต้นลดลงเกิดการเจือจาง จึงทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลน้อยลง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 9:1 ยังทำให้การแยกกลีเซอรอลยากขึ้นอีกด้วย [27]

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะใช้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดเบส จากการทดลองของ Soriano และคณะ [28] ที่สภาวะ 75 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 12:1 24:1 42:1 และ 60:1 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลต่ำมากประมาณร้อยละ 20 และที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 24:1 จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุกร้อยละ 86 และถ้าอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 42:1 จะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลงเพราะการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง [28]

นอกจากนี้การใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะทำให้การเข้าทำปฏิกิริยายากขึ้น และทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 90 เป็น 77 และ 70 เมื่อใช้เมทานอล เอทานอล และ โพรพานอล ตามลำดับ สำหรับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน [29] โดยส่วนใหญ่แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ คือ เมทานอล เพราะหาง่ายและราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นการเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นหลัก และปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลอย่างมากต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

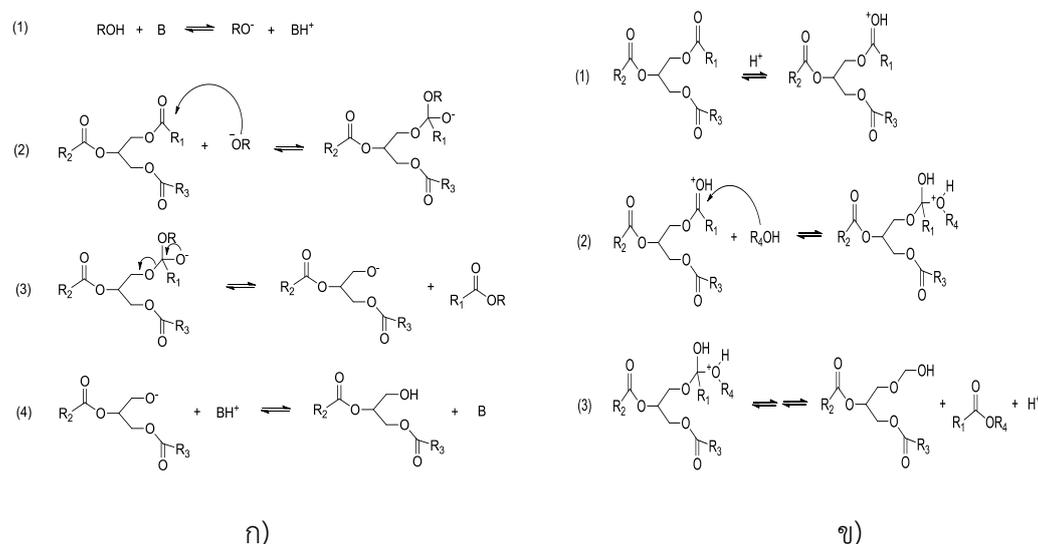
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนิยมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า แต่ Ramadhas และคณะ [30] นำสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนทดลองศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.3-1 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 45 ± 5 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 9:1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดประมาณร้อยละ 98 และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะอาจมีสบู่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจากสมการ (2.3)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสแต่เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระปนเปื้อน โดยในการทดลองที่ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเมื่อใช้ร้อยละ 1 2 และ 4 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 เมทานอลต่อไอเมทิลอีเทอร์ 1.76:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดคือ 95 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 4 แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายเนื้อเดียวกันจะทำให้ขั้นตอนในการแยกไบโอดีเซลยากขึ้น [31]

สำหรับการใช้งานสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น คือ ของเหลวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) หรือสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) มักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สามารถทำการแยกออกได้ง่ายหลังการทำปฏิกิริยา [23]

2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ ถ้าเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสและกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า ดังแสดงในกลไกการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 [5] โดยรูป ก) ขั้นที่ (1) คือ เบสทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลคอกไซด์ (RO^-) และตัวเร่งปฏิกิริยาโปรตอนเนต (BH^+) ขั้นที่ (2) คือ การเข้าทำปฏิกิริยา nucleophilic attack ของแอลคอกไซด์ที่หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) ของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็น tetrahedral intermediate ในขั้นที่ (2) และแตกตัวออกเป็นแอลคิลเอสเทอร์และไดกลีเซอไรด์ในขั้นที่ (3) และไดกลีเซอไรด์จะดึงโปรตอนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา (BH^+) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปใช้ได้อีกครั้งในขั้นที่ (4) ส่วนการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งแสดงดังรูป ข) ขั้นที่ (1) คือ การได้รับโปรตอนที่หมู่คาร์บอนิลโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ขั้นที่ (2) คือ เกิด nucleophilic attack ของแอลกอฮอล์จะเกิดเป็น tetrahedral intermediate ขั้นที่ (3) คือ เมื่อเกิดการแตกตัวของโมเลกุลจะได้ เอสเทอร์ ไดกลีเซอไรด์ และได้ตัวเร่งปฏิกิริยา H^+ กลับมาด้วยและไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาต่อในลักษณะเดียวกันจะได้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลพร้อมทั้งเกิดแอลคิลเอสเทอร์ 3 โมเลกุลเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา



B : ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

$\text{R}_1, \text{R}_2, \text{R}_3$: สายโซ่คาร์บอนของกรดไขมันอิสระ

R, R_4 : หมู่แอลคิลของแอลกอฮอล์

รูปที่ 2.1 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ก) แบบเบส ข) แบบกรด [5]

เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดจะใช้ช่วงระยะเวลา 300-4,140 นาที [22,23] ซึ่งนานกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสมีช่วงระยะเวลา 30-180 นาที [20,21] เพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 95-100 และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์จะใช้ระยะเวลาจนถึง 480-3,600 นาที [16,17] ส่วนการทำปฏิกิริยาในสภาวะเหนือวิกฤตจะใช้ช่วงระยะเวลานั้นที่สุดคือ 25-40 นาที [18,19]

2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายสามารถช่วยลดการใช้อุณหภูมิที่มีค่าสูง และลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้ การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำ 25 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (MTBE) หรือไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) หรือไดเมทิลอีเทอร์ (DME) หรือเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ที่สภาวะการเขย่าความถี่ 2.6 เฮิร์ตส์ เวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที อัตราส่วนโดยโมลตัวทำละลายต่อเมทานอลใช้น้อยที่สุดที่ต้องการให้สารละลายกัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายทั้งหมดพบว่าร้อยละไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นผกผันกับค่าความหนืดของตัวทำละลาย โดยไดเมทิลอีเทอร์มีประสิทธิภาพมากที่สุด ให้ปริมาณไบโอดีเซลถึงร้อยละ 80 แต่ถ้าไม่ใช้ตัวทำละลายจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อย ร้อยละ 60 นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น อิทธิพลของตัวทำละลายจะลดลง ถ้าเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8:1 ร้อยละไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันจะไม่มี ความแตกต่าง และให้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 99 เนื่องจากเมทานอลมีส่วนทำหน้าที่เป็นสารละลายด้วย ทำให้น้ำมันและเมทานอลผสมกันได้ดีขึ้น [32]

Pena และคณะ [33] ได้ศึกษาวิจัยการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันละหุ่ง และใช้ตัวทำละลายคือ เฮกเซน จากผลการทดลองพบว่าถ้าไม่มีการเพิ่มตัวทำละลายจะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 86.4 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเพียงร้อยละ 15 โดยปริมาตร ส่งผลให้เกิดไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93.7 โดยใช้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โซเดียมเมทอกไซด์ (sodium methoxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที

Alhassan และคณะ [34] ได้ศึกษาวิจัยการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันฝ้าย และใช้ตัวทำละลายคือ ไดเอทิลอีเทอร์ จากผลการทดลองพบว่าถ้าเพิ่มตัวทำละลายร้อยละ 10 โดยปริมาตร ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 70 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ได้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นร้อยละ 97 โดยใช้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที งานวิจัยของ Thanh และคณะ [35] ใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลายให้ผลที่คล้ายคลึงกัน คือ ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 98 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้อะซีโตนร้อยละ 25

โดยน้ำหนัก และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 4.5:1 และใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที

การเพิ่มตัวทำละลายในปฏิกิริยามีอิทธิพลอย่างมากต่อการเพิ่มปริมาณไบโอดีเซล แต่จากการค้นคว้าข้อมูล สังกัดได้จากงานวิจัยหลายเรื่องพบว่านิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสในการศึกษา [33-35] แต่มีงานวิจัยส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดคู่กับตัวทำละลาย เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ต้องการนำผลการวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้กับสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งน้ำมันราคาถูก ซึ่งมีน้ำและกรดไขมันอิสระเจือปนอยู่เป็นปริมาณมากจึงเหมาะกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดมากกว่าจึงสนใจการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและใช้ตัวทำละลายเพราะสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีราคาถูกได้ และตัวทำละลายจะช่วยให้สภาวะที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลไม่สูงมากอีกด้วย จึงเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลลงได้

บทที่ 3

การออกแบบการวิจัย (Research design)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนี้เน้นการใช้พลังงานน้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพมาก โดยกระบวนการจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน

ขั้นตอนที่ 1: ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

3.1.1 อิทธิพลของการใช้อิมัลซิฟายเออร์และการปั่นกวนในการลดอิทธิพลของการแพร่

3.1.2 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

3.1.2.1 อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.2 1:2 1:4 1:6 และ 1:8

3.1.2.2 ปริมาณกรดโอเลอิกร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น

3.1.2.3 อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส (หมายเหตุ ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน แต่ไม่พบผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น)

การเลือกช่วงอุณหภูมินี้เพราะต่ำกว่าช่วงจุดเดือดของน้ำ จะได้ทำการวิเคราะห์ว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้โดยที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิต่ำได้หรือไม่ และไม่เลือกอุณหภูมิสูงเกินไปเนื่องจากไม่ต้องการความสิ้นเปลืองพลังงานในการนำวิธีการมาประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม

3.1.3 ศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส เพื่อสามารถใช้ในการทำนายผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2: ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับในขั้นตอนที่สองเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ 2 ปฏิกิริยาพร้อมกัน คือ เอสเทอร์ฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จึงทำการศึกษาทั้งสองปฏิกิริยา โดยจะเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเพราะเป็นกรดที่มีราคาถูก แอลกอฮอล์ที่เลือกใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ เมทานอล

3.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification)

การศึกษาในขั้นตอนนี้จะเน้นเฉพาะปริมาณน้ำเริ่มต้นที่สามารถมีได้โดยไม่ทำให้ปฏิกิริยามีผลผลิตไบโอดีเซลน้อยลง ซึ่งจะศึกษาปริมาณน้ำในช่วงร้อยละ 0-103.6 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนั้นส่วนของอิทธิพลของน้ำขาเข้าจะไม่ศึกษาอีกครั้งสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิ 35-60 องศาเซลเซียสด้วย

3.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (*in situ* transesterification)

การศึกษาในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย

- 3.3.1 อุณหภูมิ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส
- 3.3.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 40 60 80 100 และ 120 นาที โดยช่วงเวลานี้อ้างอิงจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ซึ่งปกติจะใช้เวลาการทำปฏิกิริยาค่อนข้างนานแต่ที่เลือกช่วงเวลาข้างต้นเนื่องจากคาดว่าตัวทำละลายจะช่วยให้การผสมกันของสารตั้งต้นคือ ไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นโดยลดอิทธิพลของความต้านทานเนื่องจากการแพร่ข้ามเฟสในการทำปฏิกิริยา
- 3.3.3 ชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสม สำหรับทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ชนิดของตัวทำละลายนั้นจะเลือกโดยดูจากปัจจัยดังต่อไปนี้ ต้องไม่ละลายน้ำ ละลายในไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่ใช้ในที่นี้คือ เมทานอล ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา มีความหนาแน่นต่างกับสารตั้งต้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในที่นี้ได้เลือกศึกษาตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ อะซีโตน เฮกเซน เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- 3.3.4 ปริมาณตัวทำละลาย โดยศึกษาตามนี้คือ
 อะซีโตนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
 เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
 เฮกเซนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 2.5 5 7.5 10 30 50 และ 70 บรรยากาศ (เกจ)
 จากความดันเริ่มต้น
- 3.3.5 ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 1 และ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน
- 3.3.6 ความเร็วรอบการปั่นกวน 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาที
- 3.3.7 ปริมาณเมทานอล 10 20 30 40 และ 50 อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน

บทที่ 4

ระเบียบวิจัย

สำหรับบทนี้จะแบ่งการอธิบายออกเป็น 3 ส่วนคือ

- 4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
- 4.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน
- 4.3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

สารเคมี อุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์ผล และแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์ม (ยี่ห้ออมรกด)
2. ฟีนอล์ฟทาลีนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก
3. กรดโอเลอิก
4. น้ำกลั่น
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.09 โมลาร์
6. เอทานอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก จากบริษัท Sigma Aldrich

4.1.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์

1. ชุดเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันและอุณหภูมิสูง (autoclave) ดังรูปที่ 4.1
2. ชุดเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate stirrer)
3. ชุดเครื่องมือสำหรับการไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระ



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันและอุณหภูมิสูง

4.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรก: การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ และส่วนที่สอง: การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (auto-catalysis)

ส่วนที่ 1: การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

เพื่อลดอิทธิพลของการแพร่สำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในที่นี้ทำโดยสองวิธี คือ การปั่นกววนและการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ ซึ่งขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ชั่งน้ำมันปาล์มและน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยโมล 1:0.4 กรดโอเลอิกร้อยละ 0.1 ของน้ำมันเริ่มต้น และสารอิมัลซิฟายเออร์ (สแปน 60) ร้อยละ 5 ของสารตั้งต้นทั้งหมด
2. นำสารตั้งต้นทั้งหมดใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันสูง ดังรูปที่ 4.1
3. ตั้งค่าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการจึงเปิดการปั่นกววนและเริ่มจับเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที
4. เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จ รอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงประมาณ 30 องศาเซลเซียสจึงนำสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น

การทำปฏิกิริยาในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

การทดลองที่	อัตราการปั่นกววน (รอบต่อนาที)	เติมสารอิมัลซิฟายเออร์ (สแปน 60)
1	200	-
2	200	ร้อยละ 5 ของสารตั้งต้นทั้งหมด
3	-	ร้อยละ 5 ของสารตั้งต้นทั้งหมด

ส่วนที่ 2: การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (auto-catalysis)

จากงานวิจัยของ Changi และคณะ [36] แนะนำว่า กรดไขมันสามารถแตกตัวให้โปรตอนซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดังนั้นเราจึงศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมัน ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ชั่งน้ำมันปาล์ม น้ำกลั่น กรดโอเลอิกตามอัตราส่วนที่ต้องการศึกษาตามตารางที่ 4.2 - 4.5
2. นำสารตั้งต้นทั้งหมดใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

3. ตั้งค่าอุณหภูมิ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาจึงเปิดการปั่นกวนและเริ่มจับเวลาในการทำปฏิกิริยาตามที่ต้องการศึกษา
4. เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จ นำมาตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น
5. ปิเปตสารชั้นบนซึ่งเป็นส่วนผสมของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรดไขมันตามวิธีในหัวข้อที่ 4.1.4

ตารางที่ 4.2 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:4
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
เวลา (นาที)	180
ตัวแปรที่ศึกษา	
กรดโอเลอิก	- เติมกรดโอเลอิกร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น - ไม่เติมกรดโอเลอิก

ตารางที่ 4.3 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
ปริมาณกรดโอเลอิก	ร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น
เวลา (นาที)	120
ตัวแปรที่ศึกษา	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:0.2 1:2 1:4 1:6 และ 1:8

ตารางที่ 4.4 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:4
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
เวลา (นาที)	120
ตัวแปรที่ศึกษา	
กรดโอเลอิก	ร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น

ตารางที่ 4.5 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:4
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
ปริมาณกรดโอเลอิก	ร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น
ตัวแปรที่ศึกษา	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	50 60 70 80 และ 90
เวลา (นาที)	0 ถึง 120

4.1.4 การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น

1. หลังเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยานำสารทั้งหมดออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นที่อุณหภูมิห้อง

2. นำสารที่อยู่ชั้นบนซึ่งคือ กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยามาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.09 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลินร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักเป็นอินดิเคเตอร์

3. คำนวณปริมาณกรดไขมันที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันดังสมการที่ 4.2 และค่าการแปลงผันทางเคมีดังสมการที่ 4.3

ร้อยละกรดไขมันที่เกิดขึ้น %FFA

$$= \frac{\text{สารละลายต่างที่ใช้ไป} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลายต่าง} \times \text{โมเลกุลของกรดไขมัน}}{\text{น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ สารละลายต่างที่ใช้ไป = ค่าสิ้นสุดของไตเตรท - ค่าเริ่มต้นของไตเตรท (มิลลิลิตร)

ความเข้มข้นของสารละลายต่าง = 0.09 โมลาร์ (โมล/ลิตร)

โมเลกุลของกรดไขมัน = น้ำหนักกรดไขมัน (กรัม/โมล)

(มวลโมเลกุลของกรดโอเลอิก = 282.46 กรัม/โมล)

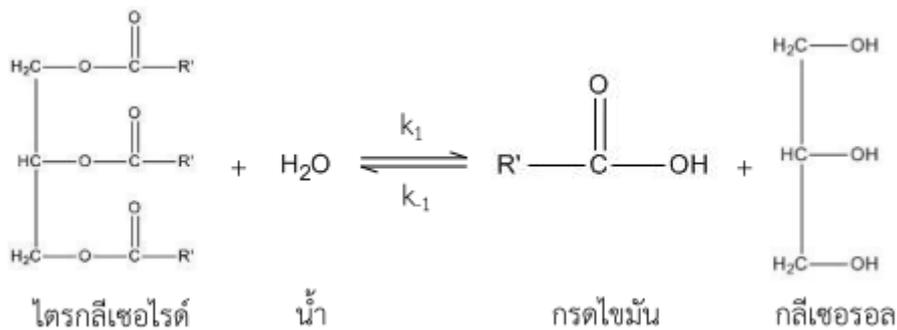
น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง = ปีเปตสารตัวอย่างขึ้นบนออกมา (กรัม)

$$\text{ร้อยละผลผลิตของกรดไขมัน} = \frac{\text{กรัมกรดไขมันที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} &\text{ร้อยละค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์} \\ &= \frac{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย} \times 100}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \quad (4.3) \end{aligned}$$

4.1.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเลือกศึกษาในกรณีที่มีการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับในช่วงอุณหภูมิต่ำ (50 ถึง 90 องศาเซลเซียส) และได้เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการทำปฏิกิริยา โดยสมการรวมของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์เขียนได้เป็น



รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

โครงการวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยจะศึกษาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับของปฏิกิริยา รวมถึงค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วย โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ตามสมการที่ (4.4)



เริ่มจากสมการออกแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรคงที่และสมมติให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบกับสารแต่ละตัวโดยเขียนได้เป็น

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = r_{TG} \quad (4.5)$$

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_W + k_{-1} C_{FFA} C_G \quad (4.6)$$

โดยที่ C_i , k_1 และ k_{-1} เป็นความเข้มข้นของแต่ละสาร ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามลำดับ จากนั้นเขียนในเทอมของความเข้มข้นหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาที่เป็นฟังก์ชันของการแปลงผันทางเคมี

$$C_i = C_{TG_0} \left(\frac{C_{i_0}}{C_{TG_0}} + v_i X \right) \quad (4.7)$$

โดยที่ C_{TG_0} และ C_{i_0} เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของไตรกลีเซอไรด์และความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละสารตามลำดับ และ v_i คือเลขสมมูลโมลของแต่ละสารโดยจะมีค่าเป็นบวกสำหรับผลิตภัณฑ์และค่าเป็นลบสำหรับสารตั้งต้น เมื่อแทนสมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.6) และจัดรูปจะได้เป็น

$$\frac{dX}{dt} = k_1 C_{TG_0} \left[\theta_w - \left(\frac{k_{-1}}{k_1} \theta_{FFA} + \theta_w + 3 \right) X + \left(3 - 3 \frac{k_{-1}}{k_1} \right) X^2 \right] \quad (4.8)$$

โดยที่ θ_w คือ $\frac{C_{W_0}}{C_{TG_0}}$ และ θ_{FFA} คือ $\frac{C_{FFA_0}}{C_{TG_0}}$

คำตอบในรูปทั่วไปของสมการที่ (4.8) เขียนได้เป็น

$$X_{cal} = \frac{p(1 - \exp(Z))}{\left[1 - \left(\frac{p}{q} \right) \exp(Z) \right]} \quad (4.9)$$

โดยที่

$$Z = C_{TG_0} t (3k_1 - 3k_{-1})(p - q) \quad (4.10)$$

และ

$$p, q = \frac{-(k_{-1}\theta_{FFA} + k_1\theta_w + 3k_1) / k_1 \pm \sqrt{\left(\frac{k_{-1}\theta_{FFA} + k_1\theta_w + 3k_1}{k_1} \right)^2 - 4\theta_w \left(\frac{3k_1 - 3k_{-1}}{k_1} \right)}}{2 \left(\frac{3k_1 - 3k_{-1}}{k_1} \right)} \quad (4.11)$$

4.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง การวิเคราะห์ผล และแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดโอเลอิก
2. เมทานอล
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 97 โดยปริมาตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
5. ฟีนอล์ฟทาลินร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก
6. น้ำกลั่น

4.2.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์

- | | |
|---|--------------|
| 1. บิวเรต | จำนวน 1 อัน |
| 2. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิด | จำนวน 5 ชุด |
| 3. บีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร | จำนวน 1 ชุด |
| 4. บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร | จำนวน 1 ชุด |
| 5. บีกเกอร์ ขนาด 600 มิลลิลิตร | จำนวน 1 ชุด |
| 6. หลอดทดลอง ขนาด 10 มิลลิลิตร | จำนวน 3 หลอด |
| 7. ปิเปต ขนาด 1 มิลลิลิตร | จำนวน 1 อัน |
| 8. ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร | จำนวน 1 อัน |
| 9. หลอดวัดปริมาตร ขนาด 10 มิลลิลิตร | จำนวน 1 หลอด |
| 10. ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิด | จำนวน 1 ชุด |
| 11. ขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิด | จำนวน 1 ชุด |
| 12. กรวยแก้ว | จำนวน 2 อัน |
| 13. หลอดดูดสาร | |
| 14. ลูกยาง | |
| 15. ขาตั้งบิวเรต | |
| 16. เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ ชนิด K และเทอร์โมคัพเปิล ชนิด K | |
| 17. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirring) | |
| 18. ชุดเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate stirrer) พร้อมตัวปรับอุณหภูมิ | |
| 19. เครื่องชั่งสาร 2 ตำแหน่ง | |
| 20. ถังมือกันความร้อน | |
| 21. แว่นตานิรภัย | |

4.2.3 วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาในอัตราส่วนที่ต้องการศึกษา (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิก เท่ากับ 10:1)
2. เตรียมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามปริมาณที่กำหนด (ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกต่อน้ำหนักของกรดโอเลอิก)
3. เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการหยุดปฏิกิริยาและใช้ในการไทเทรตหาปริมาณกรดโอเลอิกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยคำนวณหาปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา จากปริมาณของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปิเปตใส่หลอดทดลองเพื่อใช้หยุดปฏิกิริยาทันทีที่เสร็จสิ้นการทดลอง



$$a N_1 V_1 = b N_2 V_2 \quad (4.12)$$

โดยที่ a = เลขคู่ในสมการเคมีหน้ากรด (1) b = เลขคู่ในสมการเคมีหน้าเบส (2)

N_1 = ความเข้มข้นเบส (โมลาร์)

N_2 = ความเข้มข้นกรด (โมลาร์)

V_1 = ปริมาตรเบส (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาตรกรด (มิลลิลิตร)

4. เตรียมสารละลายเมทานอลที่เป็นกลางตามมาตรฐาน AOCS วิธีมาตรฐาน Ca 5a-40 สำหรับผสมกับสารตัวอย่างเพื่อใช้หาปริมาณกรดโอเลอิก

4.1 นำเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร มาหยดอินดิเคเตอร์ ซึ่งคือ ฟีนอล์ฟทาลีน

4.2 ทำการไทเทรตจนได้เมทานอลที่เป็นสีชมพูอ่อน จะได้สารละลายเมทานอลที่เป็นกลาง

4.3 นำสารละลายเมทานอลที่เป็นกลางเก็บไว้ในภาชนะปิดเพื่อนำไปผสมกับสารตัวอย่างสำหรับการไทเทรตหากรดโอเลอิกโดยการทดลองได้ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.1 นอร์มอล

เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์/เอสเทอร์ฟิเคชัน (สองปฏิกิริยาเกิดพร้อมกันคือ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน) เป็นการทำปฏิกิริยาในขั้นที่สองหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังนั้นการทดลองในส่วนของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะเป็นการหาปริมาณน้ำสูงสุดที่สามารถมีอยู่ก่อนเข้าทำปฏิกิริยาซึ่งจะศึกษาเฉพาะส่วนของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพราะเป็นปฏิกิริยาที่มีความว่องไวมากกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน รวมทั้งจะศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันอีกด้วย

4.2.3.1 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อหาอิทธิพลของน้ำต่อปฏิกิริยา

1. นำขวดรูปชมพู่ที่ใส่สารตั้งต้น (เมทานอลกับกรดโอเลอิก) ในอัตราส่วน 10:1 วางบนเครื่องทำความร้อนที่สามารถกวนสารด้วยแม่เหล็ก (hot plate) และนำแท่งแม่เหล็กใส่ลงไปในช่วง และเติมน้ำตามปริมาณที่ต้องการศึกษา (ร้อยละ 0-103.6 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น)

2. ทำการวัดอุณหภูมิของสารระหว่างทำปฏิกิริยาด้วยเทอร์โมคัพเปิล จดบันทึกไว้ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ

3. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปในช่วงรูปชมพู่เป็นปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักกรดโอเลอิก เปิดเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที พร้อมกับเริ่มจับเวลา (ระวังอย่าให้เกิด vortex ขณะทำปฏิกิริยา)

4. เมื่อหมดเวลา 1 ชั่วโมงในการทำปฏิกิริยาที่กำหนด เติมน้ำหยุดปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป ปล่อยให้ปั่นกวนอีกประมาณ 10 วินาที แล้วปิดเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก แล้วนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการไทเทรต

5. เก็บตัวอย่างสารที่ทำปฏิกิริยาแล้วจำนวน 7 กรัมตามมาตรฐาน AOCS วิธีมาตรฐาน Ca 5a-40

6. ผสมสารตัวอย่างกับแอลกอฮอล์ที่เป็นกลางจำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นจะได้สารตัวอย่างที่พร้อมสำหรับการไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

4.2.3.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

- นำขบวนการผสมฟู้ที่ใส่สารตั้งต้น (เมทานอลกับกรดโอเลอิก) ในอัตราส่วน 10:1 วางไว้บนเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก และนำแท่งแม่เหล็กใส่ลงไปในช่วง
- กำหนดอุณหภูมิของสาร (35 41 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส) ทำการวัดอุณหภูมิของสารระหว่างทำปฏิกิริยาด้วยเทอร์โมคัพเปิล ตลอดการทดลอง
- ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิกลงไปในช่วงผสมฟู้ เปิดเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที พร้อมกับเริ่มจับเวลา (ระวังอย่าให้เกิด vortex ขณะทำปฏิกิริยา)
- เมื่อถึงเวลาที่กำหนด (5, 10, 15, 30, 45 นาที, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง) ให้ทำการเก็บสารตัวอย่างมา 7 กรัมตามมาตรฐาน AOCS วิธีมาตรฐาน Ca 5a-40 นำมาเติมตัวหยุดปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์
- นำสารตัวอย่างที่ทำการหยุดปฏิกิริยาแล้วไปผสมกับแอลกอฮอล์ที่เป็นกลาง จากนั้นจะได้สารตัวอย่างที่พร้อมสำหรับการไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

4.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

- นำขบวนการผสมฟู้ที่ใส่สารตัวอย่างที่พร้อมสำหรับการไทเทรตมาหยดอินดิเคเตอร์ (ฟีนอล์ฟ-ทาลีน) แล้วไทเทรตหากรดโอเลอิกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
- เมื่อสารในขบวนการผสมฟู้เปลี่ยนเป็นสีชมพูทำการจดบันทึกปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณกรดโอเลอิกที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยา
- นำปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปในการไทเทรตมาคำนวณในสมการ (4.13)

$$\% \text{FFAs Oleic Acid} = \frac{\text{NaOH Volume (ml)} \times \text{NaOH Concentration (N)} \times 28.2}{\text{Sample Weight (g)}} \quad (4.13)$$

- คำนวณหาร้อยละค่าการแปลงผันเมื่อเทียบกับปริมาณของสารที่เปลี่ยนไปจากการทำปฏิกิริยาดังสมการ (4.14)

$$\% \text{Conversion} = \frac{\% \text{FFA}_o - \% \text{FFA}_i}{\% \text{FFA}_o} \times 100 \quad (4.14)$$

โดยที่ $\% \text{FFA}_o$ = ร้อยละของกรดไขมันโอเลอิกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างก่อนการทำปฏิกิริยา
 $\% \text{FFA}_i$ = ร้อยละของกรดไขมันโอเลอิกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างหลังการทำปฏิกิริยา
 $\% \text{Conversion}$ = ร้อยละค่าการแปลงผันเมื่อเทียบกับปริมาณของสารที่เปลี่ยนไปจากการทำปฏิกิริยา

4.3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน รายละเอียดวิธีการดำเนินงานของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 สารเคมี

1. น้ำมันดอกทานตะวัน
1. เมทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 99.85 โดยปริมาตร
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95 – 97 โดยปริมาตร (Conc. H₂SO₄ – AR Grade, QREC)
3. อะซีโตนเข้มข้น 99.5 โดยปริมาตร (acetone - AR Grade, J.T.Baker)
4. เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (tert-butyl methyl ether – Analytical Reagent Grade, ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท กรุงเทพ ซินธิติกส์ จำกัด)
5. เฮกเซน

4.3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ทนอุณหภูมิและความดันสูง (autoclave) ตามรูปที่ 4.1
2. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร
4. เครื่องชั่งน้ำหนักสองตำแหน่ง
5. ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. ประแจปากตายเบอร์ 20 และประแจเลื่อน

4.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนัก เมทานอล น้ำมันดอกทานตะวัน ตัวทำละลาย และกรดซัลฟิวริกตามปริมาณที่ต้องการศึกษา ผสมสารตั้งต้นในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
ตัวแปรที่ศึกษา : 1. อุณหภูมิ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส
2. เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 40 60 80 100 และ 120 นาที
3. ปริมาณอะซีโตนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
4. ปริมาณเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
5. ปริมาณเฮกเซนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน
6. ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 1 2.5 5 7.5 10 30 50 และ 70 บรรยากาศ (เกจ)
7. ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน
8. ความเร็วรอบการปั่นกววน 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาที
9. ปริมาณเมทานอลร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักน้ำมัน

2. เตรียมความพร้อมเครื่องทนอุณหภูมิและความดันสูง (autoclave: Amar equipment PVT LTD) และทำการตรวจสอบการรั่วไหล (check leak)
3. เมื่อเครื่องพร้อมใช้งานตั้งอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ตั้งการหมุนรอบความเร็ว (รอบต่อนาที: rpm) ตามที่ต้องการศึกษา เมื่อระดับอุณหภูมิถึงที่กำหนด จึงเริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ต้องการศึกษา
4. อัดความดันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการศึกษา (ในกรณีที่ศึกษาอิทธิพลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์)
5. หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จทำการปิดสวิตช์เครื่องปั่นกวน ปิดเครื่องกำเนิดความร้อน และเปิดการหล่อเย็นแบบอัตโนมัติ นำผลิตภัณฑ์ออกและเติมน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตรเพื่อหยุดปฏิกิริยาทันที
6. นำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างใส่กรวยแยกตั้งทิ้งข้ามคืนเพื่อรอแยกชั้นโดย ชั้นบนคือ ไบโอดีเซล และชั้นล่างคือ กลีเซอรอล น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริก และเมทานอล ไซแยกส่วนชั้นกลีเซอรอลทิ้ง
7. หลังจากนั้นจะทำการล้างด้วยน้ำเพื่อล้างเมทานอลและกรดซัลฟิวริกที่คงเหลืออยู่ในชั้นน้ำมัน โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เป็นจำนวน 3 ครั้ง แยกชั้นน้ำมันออก และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอการตรวจวิเคราะห์ต่อไป

4.3.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ใช้การเทียบจากค่าความหนืดไดนามิกส์ (dynamic viscosity) จากงานวิจัยของ Borges และคณะได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดไดนามิกส์ และผลผลิตของไบโอดีเซลตามสมการที่ (4.15) [37]

$$\% \text{yield} = 158.5e^{[(-\text{Kinematic viscosity} \cdot \text{Density}) / 6.8]} \quad (4.15)$$

ความหนืดไดนามิกส์สามารถหาได้จากความหนืดไคเนมาติก (kinematic viscosity) และความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่น

1. ทำความสะอาดขวดวัดความหนาแน่น (pycnometer) ให้สะอาดและแห้ง
2. ชั่งน้ำหนักขวดวัดความหนาแน่น (m_1)
3. ใส่สารตัวอย่างในขวดวัดความหนาแน่น และชั่งน้ำหนักอีกรอบ (m_2)
4. คำนวณหาความหนาแน่น จากสมการที่ (4.16)

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.16)$$

โดย

ρ คือ ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาตรของขวดวัดความหนาแน่นที่ผ่านการสอบเทียบ (ในที่นี้คือ 10.101 มิลลิลิตร)

การวัดความหนืด

ความหนืดไคนิเมติก

ความหนืดไคนิเมติกของไปโอดีเซลจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความหนืดมีดังนี้

1. เลือกเครื่องวัดความหนืดให้เหมาะสมกับความหนืด เครื่องวัดความหนืดมี 2 เบอร์ คือ size 100 (3 – 15 เซนติสโตกส์) กับ size 150 (7 – 35 เซนติสโตกส์)
2. นำสารตัวอย่างใส่ในเครื่องวัดความหนืดโดยคว่ำเครื่องวัดความหนืดและจุ่มปลายด้านที่มีกระเปาะในสารตัวอย่าง จากนั้นดูดสารตัวอย่างขึ้นมาถึงขีดที่กำหนด
3. แช่เครื่องวัดความหนืดในถังควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าการวัดดำเนินที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
4. ดูดสารตัวอย่างในเครื่องวัดความหนืดให้มีระดับเหนือจุดเริ่มต้น
5. เริ่มจับเวลาเมื่อระดับสารตัวอย่างอยู่ที่จุดเริ่มต้น และหยุดเวลาเมื่อระดับสารตัวอย่างถึงขีดที่กำหนด
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ย
7. คำนวณหาความหนืดจากเวลาจากการไหล (t) และค่าคงที่ของเครื่องวัดความหนืด (C) จากสมการ (4.17)

$$v = t \cdot C \quad (4.17)$$

โดย

v คือ ความหนืดไคนิเมติก (centistoke: cSt หรือ ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที: mm^2/s)

t คือ เวลาการไหล (วินาที: s)

C คือ ค่าคงที่ของเครื่องวัดความหนืด (cSt/s) ซึ่งมีค่า 0.01518 cSt/s (สำหรับเครื่องวัดความหนืดเบอร์ 100)* และ 0.03901 cSt/s (สำหรับเครื่องวัดความหนืดเบอร์ 150)**

* เครื่องวัดความหนืดเบอร์ 100 ใช้วัดความหนืดในช่วง 3 – 15 cSt

** เครื่องวัดความหนืดเบอร์ 150 ใช้วัดความหนืดในช่วง 7 – 35 cSt

ความหนืดไดนามิกส์

ความหนืดไดนามิกส์ สามารถคำนวณได้จากความหนืดไคนิเมติกและความหนาแน่น จากสมการที่ (4.18)

$$\eta = \rho \cdot v \quad (4.18)$$

โดย

η คือ ความหนืดไดนามิกส์ (centipoise: cP หรือ มิลลิปาสคาล-วินาที: mPa.s)

ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3 หรือ kg/m^3)

ทั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยค่าของความหนืดกับการตรวจวัดโดยวิธีมาตรฐานโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี (GC) โดยใช้มาตรฐานของยุโรป (EN14103) มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานในการประมาณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester: FAME) เป็นวิธีที่ใช้ประมาณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในช่วงขนาด C_{12} ถึง C_{24} งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันซึ่งมี C_{16} และ C_{18} เป็นส่วนมาก ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถใช้มาตรฐานนี้วิเคราะห์ได้

บทที่ 5

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

เนื่องจากขั้นตอนการทำปฏิกริยานั้นมี 2 ขั้นตอนหลัก คือ

ขั้นที่ 1: การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

ขั้นที่ 2: การทำปฏิกริยาทรานส์/เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองปฏิกริยาที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ดังนั้นสำหรับบทนี้จะแบ่งการอธิบายถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 3 ตอนคือ การศึกษาปฏิกริยาไฮโดรไลซิส การศึกษาปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และการศึกษาปฏิกริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตอนที่ 1: การศึกษาปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

5.1 การศึกษาปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

5.1.1 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำมันและน้ำนั้น จะมีส่วนของอิทธิพลจากการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้อง ณ ที่นี้ใช้วิธีการลดอิทธิพลจากการแพร่ 2 วิธี คือ การปั่นกวนและการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 จะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลจากการใช้และไม่ใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ในการทดลองที่ 1 และ 2 จะพบว่าให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของการทำปฏิกริยาที่มีการปั่นกวนและไม่มีการปั่นกวนในการทดลองที่ 2 และ 3 จะพบว่าเมื่อมีการปั่นกวนจะทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการปั่นกวนประมาณร้อยละ 6 โดยจะเห็นว่าผลการลดอิทธิพลของการแพร่โดยใช้วิธีการปั่นกวนจะให้ผลที่ดีกว่าการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ อาจเนื่องมาจากในกรณีที่เติมสารอิมัลซิฟายเออร์ สภาพะในการทดลองอาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมหรือสารอิมัลซิฟายเออร์นี้อาจไม่ใช่ตัวที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดลองจึงไม่ส่งผลให้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างน้ำมันและน้ำก็ได้

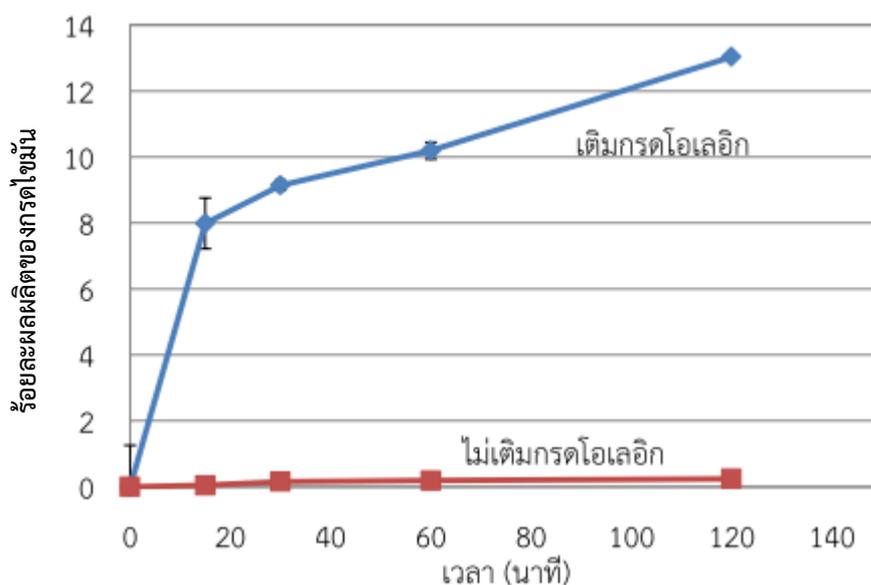
ตารางที่ 5.1 อิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.4 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกริยา 180 นาที

การทดลองที่	อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	การเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ (สเปน 60)	ร้อยละผลผลิต ของกรดไขมัน
1	200	-	8.03
2	200	ร้อยละ 5 ของสารตั้งต้นทั้งหมด	8.31
3	-	ร้อยละ 5 ของสารตั้งต้นทั้งหมด	2.04

การศึกษาในส่วนของ การเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ ในความจริงแล้วอาจจะมีสารอิมัลซิฟายเออร์บางตัวที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็ได้ แต่เมื่อทบทวนดูอีกครั้งพบว่า ถ้านำไปใช้ระดับภาคอุตสาหกรรมจะทำให้ส่วนของการแยกสารอิมัลซิฟายเออร์ออกจากผลิตภัณฑ์นั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากสารอิมัลซิฟายเออร์ละลายรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจต้องใช้เทคนิคในการแยกที่ยากขึ้นและทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายหรือพลังงานในส่วนของการแยกสารอิมัลซิฟายเออร์ออกมากขึ้น ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อในกรณีของการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

5.1.2 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (auto-catalysis)

การทำปฏิกิริยาโดยไม่เติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้น จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะพบว่าเมื่อเวลามากขึ้นร้อยละผลผลิตของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะสังเกตได้ว่าร้อยละผลผลิตนั้นเพิ่มขึ้นน้อยมากอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยานั้นไม่สูงคือที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจำกัดการทำปฏิกิริยา เพราะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ส่งผลให้ร้อยละกรดไขมันที่ได้ค่อนข้างน้อย การทำปฏิกิริยาโดยเติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้น จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 11 โดยมีความสูงกว่าในกรณีแรกที่ไม่เติมกรดไขมันตอนเริ่มต้น ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากันคือ 60 นาที อาจเนื่องจากกรดไขมันที่เติมในตอนเริ่มต้นสามารถแตกตัวให้โปรตอนโดยแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงส่งผลให้กรดไขมันที่ต้องการเพิ่มขึ้น เมื่อเวลามากขึ้น ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น จึงเป็นการสนับสนุนสมมติฐานที่ว่ากรดไขมันสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (auto-catalysis)

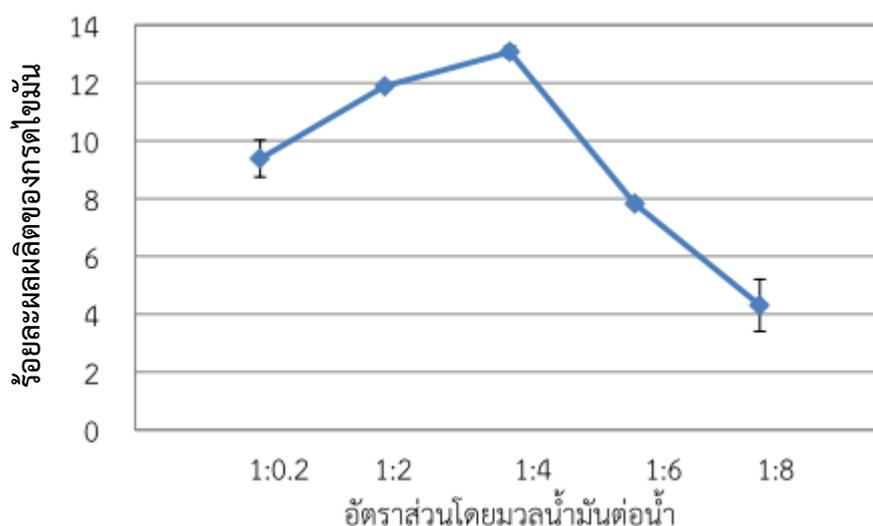


รูปที่ 5.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้นและไม่เติมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำคือ 1:4

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.66 และที่เส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

5.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีเลขสมดุลโมลของน้ำมันต่อน้ำคือหนึ่งต่อสามตามสมการสมดุลปฏิกิริยา ดังนั้นในการทดลองจึงให้มีปริมาณน้ำที่มากเกินไปเพื่อให้เพียงพอในการทำปฏิกิริยา โดยจากการทดลองจะเห็นว่าที่ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในช่วงอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำเป็น 1:0.2 ถึง 1:4 (คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลคือ 1:10 ถึง 1:440) จะส่งผลให้ได้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นมากกว่า 1:4 จะทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะเป็นการเจือจางกรดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาลดลง แสดงดังรูปที่ 5.2



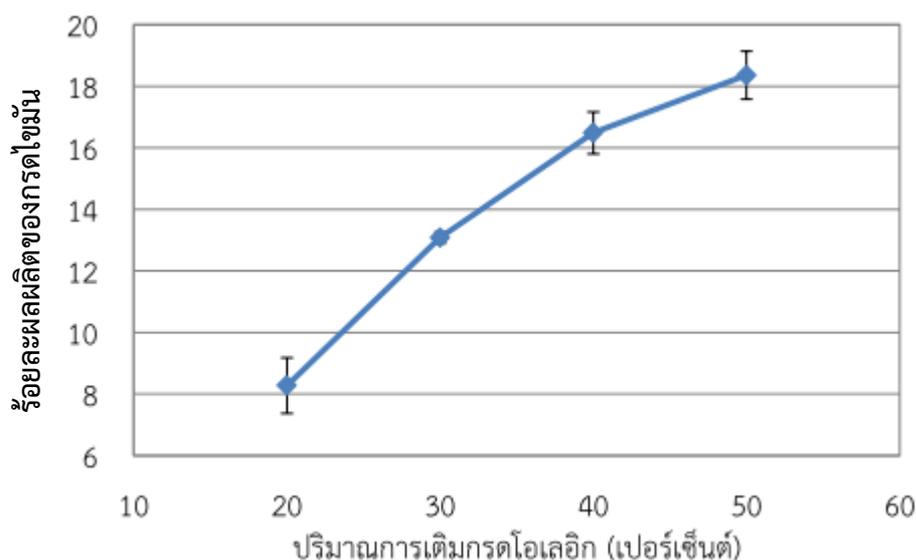
รูปที่ 5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 60 องศาเซลเซียส และมีการปั่นกววน 750 รอบต่อนาที โดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันในตอนเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.90 และเส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

5.1.4 อิทธิพลของปริมาณการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของกรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก) ในตอนเริ่มต้น โดยเติมกรดโอเลอิกร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยมวลของน้ำมันในตอนเริ่มต้น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไขมันในตอนเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยาจะทำให้

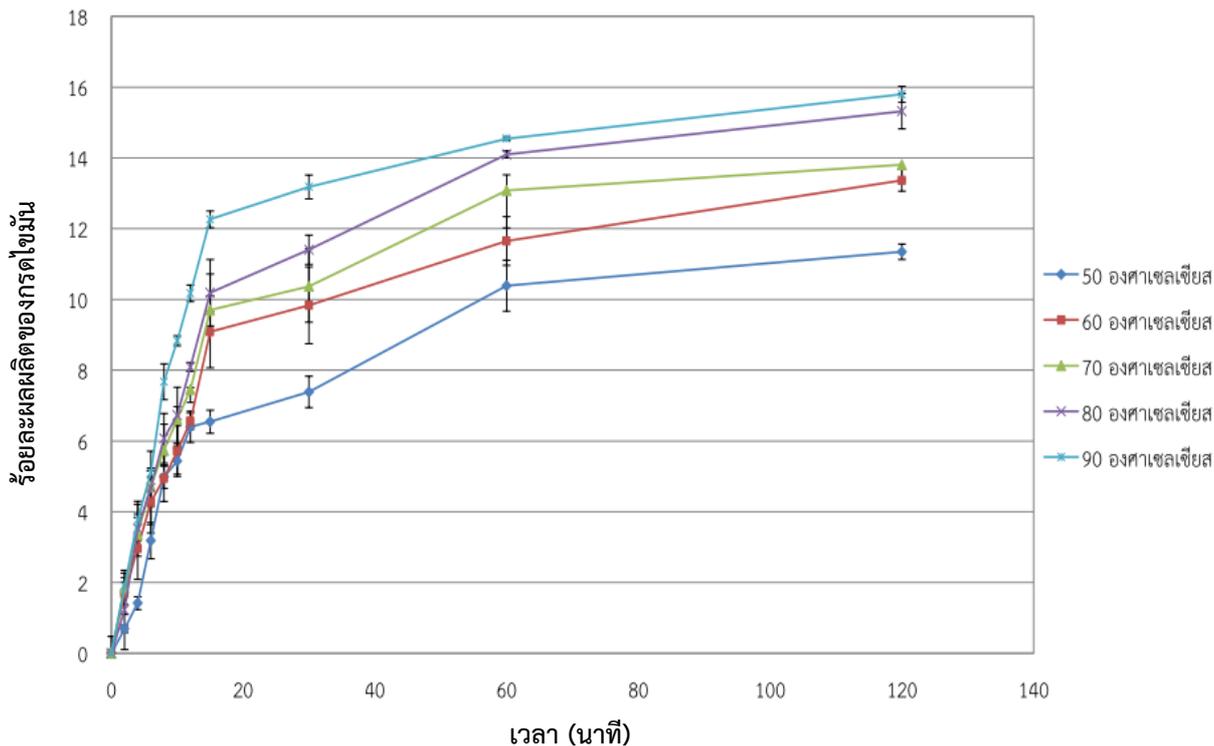
ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย อาจเนื่องจากการเป็นการเพิ่มการแตกตัวของกรดไขมันอิสระให้ประจุบวกซึ่งแสดงสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเอง จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี



รูปที่ 5.3 อิทธิพลของปริมาณกรดโอเลอิกในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ที่ 60 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.90 และเส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

5.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

จากการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ (50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส) ที่เวลา 2 ถึง 120 นาที เพื่อนำไปศึกษาในส่วนของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์ม โดยผลการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และที่เวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลผลิตของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาต่างๆ โดยเติมกรดไขมันร้อยละ 30 โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ 1:4

หมายเหตุ : ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 1.01 และเส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

5.1.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

แบบจำลองศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบผันกลับได้ ดังคำอธิบายในบทที่ 4 โดยใช้ผลการทดลองการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาหาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเริ่มจากสมการคำตอบในรูปทั่วไปดังสมการที่ (4.9)

$$X_{cal} = \frac{p(1 - \exp(Z))}{1 - \left(\frac{p}{q}\right)\exp(Z)} \quad (4.9)$$

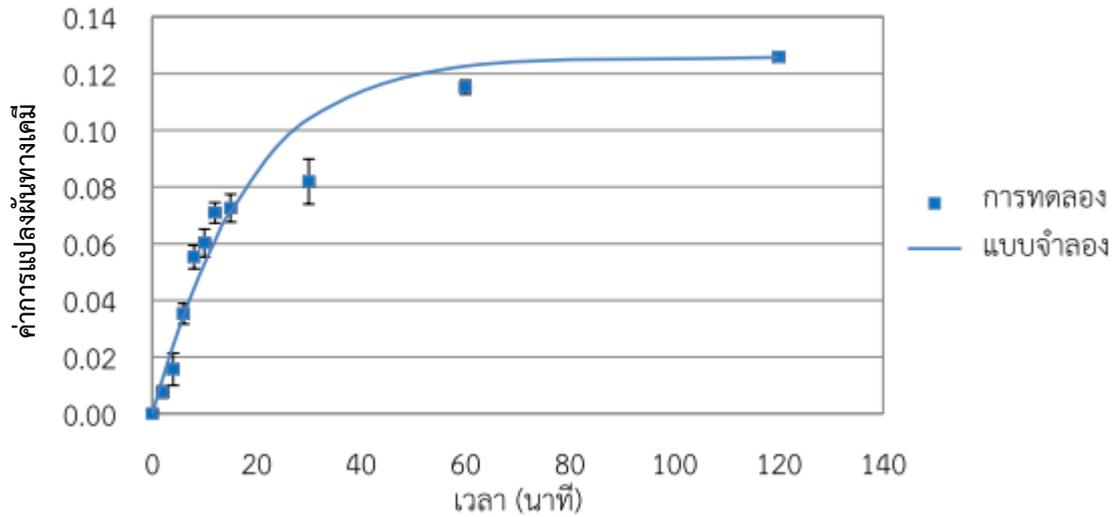
และทำการลองผิดลองถูกในสมการ $\sum (X_{cal} - X_{exp})^2 = 0$ โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Excel จนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์โดยสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลอง

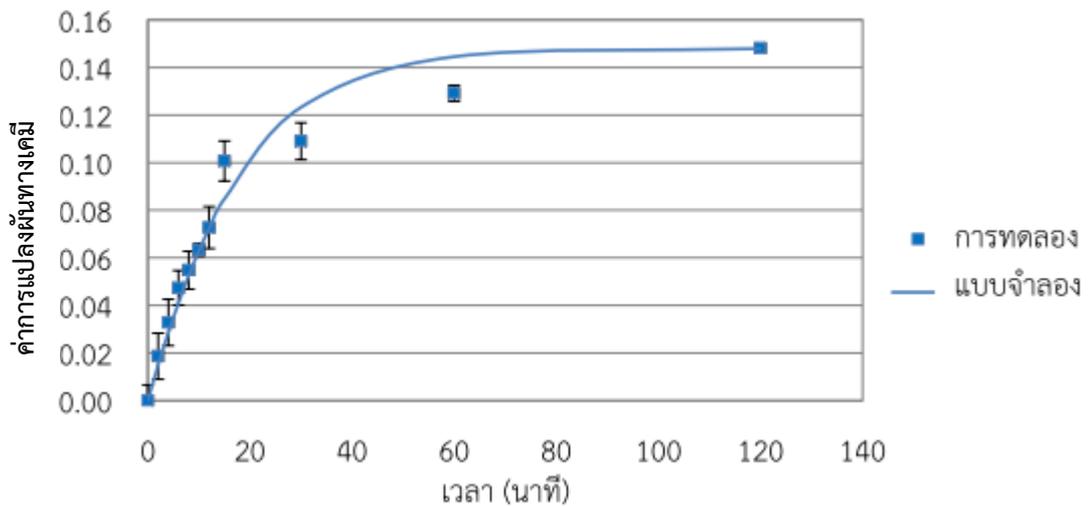
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	k_1 ($L^2/mol^2 \cdot min^{-1}$)	k_{-1} ($L^2/mol^2 \cdot min^{-1}$)
50	1.60×10^{-4}	1.45×10^{-1}
60	1.89×10^{-4}	1.49×10^{-1}
70	1.96×10^{-4}	1.50×10^{-1}
80	2.36×10^{-4}	1.55×10^{-1}
90	2.72×10^{-4}	1.69×10^{-1}

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าคงที่อัตราเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้า (k_1) และค่าคงที่อัตราย้อนกลับ (k_{-1}) สูงขึ้นด้วย ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Alenezi และคณะ [38] ที่ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวันที่สภาวะน้ำกึ่งวิกฤต อุณหภูมิในช่วง 270 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 20 เมกะปาสคาลพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่อัตราจะสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 270 และ 350 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าจะเพิ่มจาก 1.80×10^{-3} เป็น 3.60×10^{-2} โดยจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าค่าคงที่อัตราที่ได้จากแบบจำลองนี้มีค่าน้อยกว่าค่าของ Alenezi และคณะ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลองนั้นต่ำกว่าคือ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า

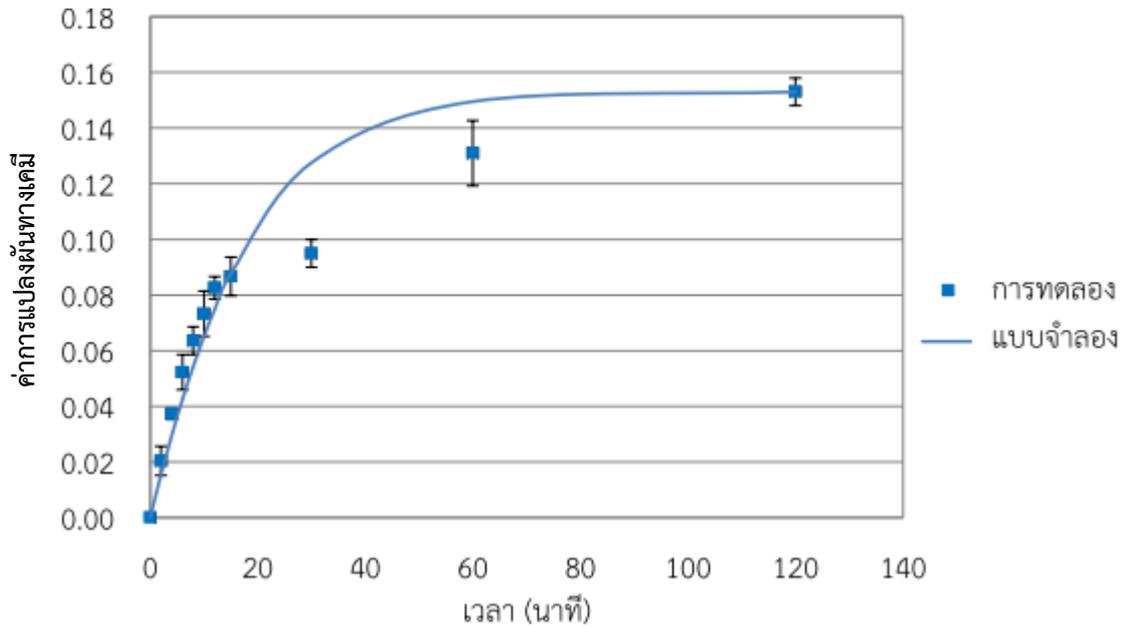
เมื่อนำการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองแสดงด้วยเส้นทึบเปรียบเทียบกับค่าแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองแสดงด้วยจุดสัญลักษณ์ ในช่วงอุณหภูมิการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้ดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.9 โดยทุกการทดลอง มีการเติมกรดไขมันอิสระร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 และการปั่นกวาน 750 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.79

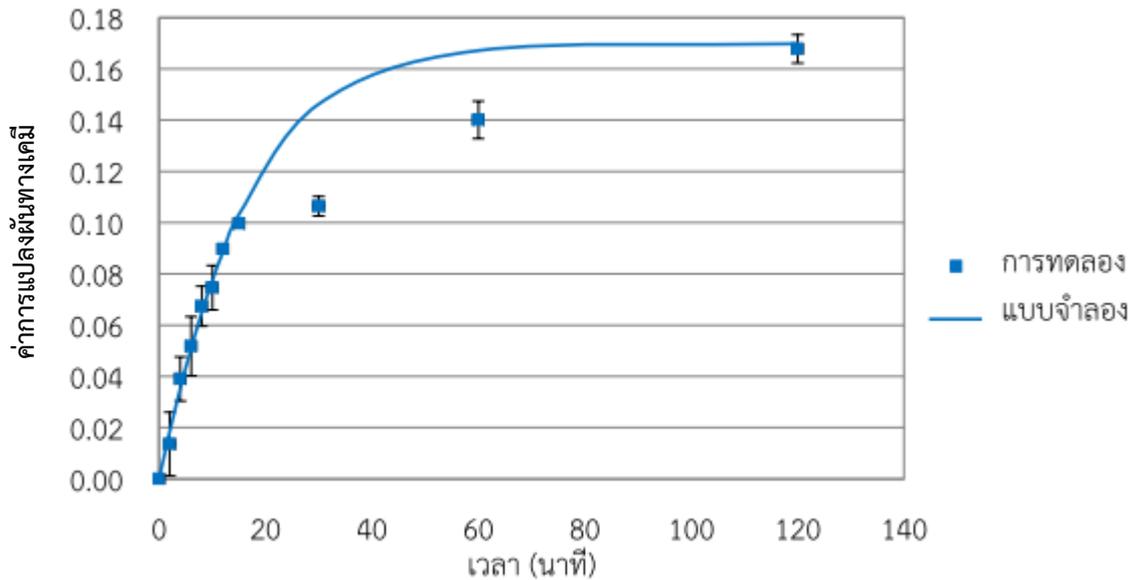


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.97



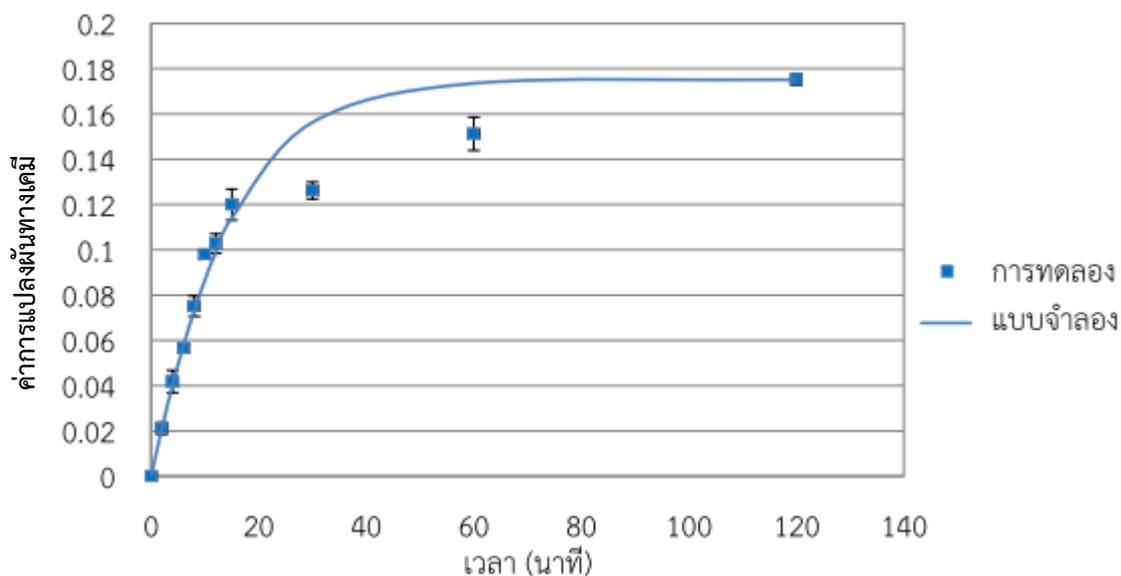
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.81



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

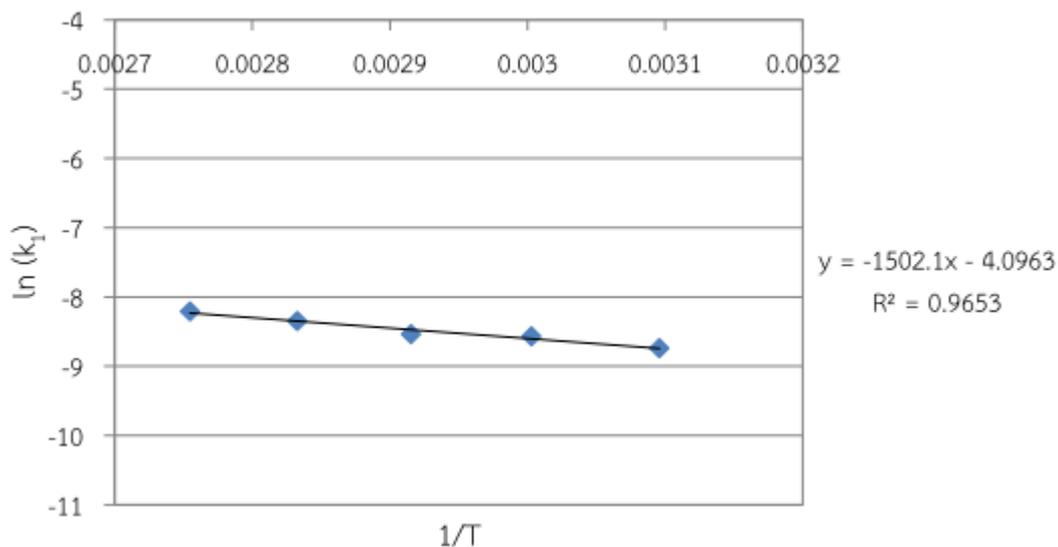
หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.87



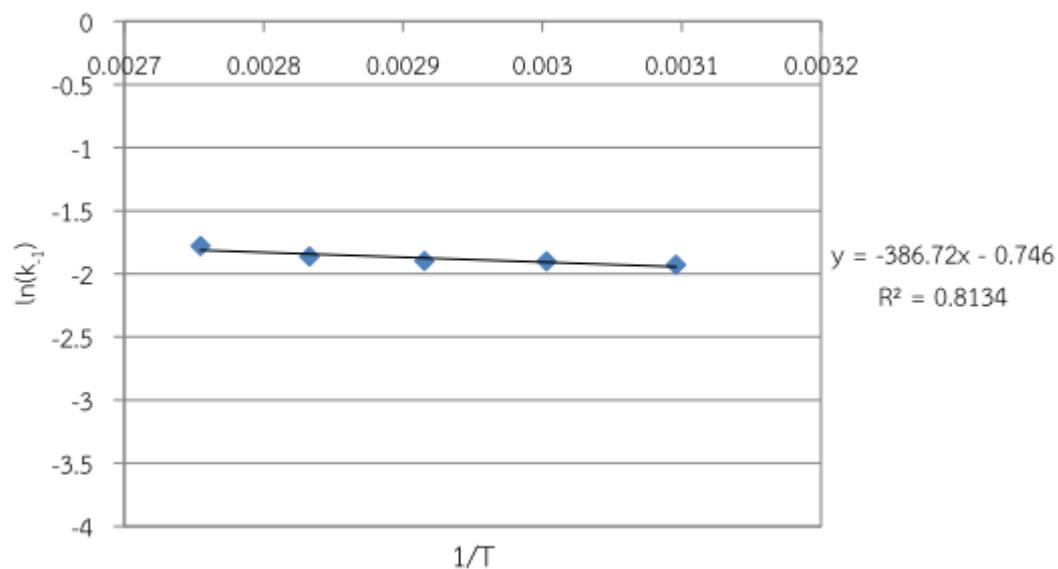
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือร้อยละ 0.73

จากการเปรียบเทียบกับค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.9 จะพบว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลอง และค่าจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณจะมากกว่าจากการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้นหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นด้วย เนื่องจากในแบบจำลองนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงในส่วนของอิทธิพลจากการแพร่ แต่จะเห็นว่าในเวลาช่วงแรกประมาณ 0 ถึง 20 นาทีของทุกอุณหภูมิ ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าแบบจำลอง แต่ค่าการแปลงผันทางเคมีของการทดลองสามารถมีค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง ดังนั้นค่าการแปลงผันทางเคมีจากแบบจำลองและจากการทดลองยังอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยรวมแล้วจะเห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลที่ค่อนข้างดีและยอมรับได้

จากนั้นเมื่อนำค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับของปฏิกิริยาจากแบบจำลอง ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส มาหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่า A (คงที่อาร์เรเนียส) ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11



รูปที่ 5.10 อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปข้างหน้า



รูปที่ 5.11 อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสย้อนกลับ

โดยค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 12.48 กิโลจูลต่อโมล และปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 3.21 กิโลจูลต่อโมล เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Milliren และคณะ [39] พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ (26.77 กิโลจูลต่อโมล และ 95.23 กิโลจูลต่อโมล) มีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นการคิดจากปฏิกิริยารวมของไฮโดรไลซิส แต่ในงานวิจัยของ Milliren และคณะนั้นคิดจากปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอนจึงอาจทำให้ค่าที่ได้ออกมาแตกต่างกัน รวมทั้งช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษานั้นเป็นช่วงที่แคบคือ 50-90 องศาเซลเซียส ความแตกต่างระหว่างช่วงอุณหภูมิเองจึงมีค่าไม่สูงมากค่า $\ln k_1$ และ $\ln k_2$ ที่ได้จากรูป 5.10 และรูป 5.11 จึงมีความชันน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งสัดส่วนย้อนกลับ ความสัมพันธ์ในช่วงที่ศึกษาเกือบเป็นเส้นตรงหรือไม่ส่งผลมากนักต่อระบบโดยรวม

จากนั้นได้นำแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีที่อุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าการแปลงผันทางเคมี (-)			
	จากการคำนวณ (X_{cal})	จากการทดลอง (X_{exp})	%ความคลาดเคลื่อน จากการทำนาย	%ความคลาดเคลื่อน จากการทดลอง
55	0.142	0.136	4.411	± 0.042
65	0.151	0.15	0.662	± 0.232
75	0.161	0.164	1.863	± 0.057

หมายเหตุ: การทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีการเติมกรดไขมันอิสระร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง 0.057

โดยการหาละยะความคลาดเคลื่อนจากการทำนายคือ

$$\text{ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย} = \frac{X_{cal} - X_{exp}}{X_{exp}} \times 100 \quad (5.1)$$

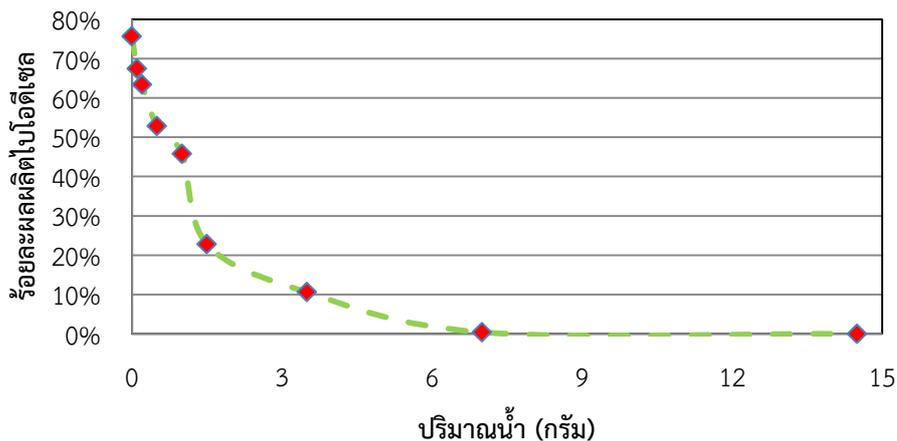
จากผลการทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีในตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยค่าที่ทำนายมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง อาจเนื่องมาจากสมมติฐานที่เรากำหนดในแบบจำลองโดยไม่มีการรวมปัจจัยการแพร่และการกำหนดอันดับการเกิดปฏิกิริยา แต่จะเห็นว่าที่ 75 องศาเซลเซียสนั้น ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณ แต่ร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั้นมีค่า ± 0.057 ดังนั้นค่าการแปลงผันที่ได้จากการคำนวณยังอยู่ในช่วงเดียวกัน

ตอนที่ 2

5.2 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

5.2.1 อิทธิพลของน้ำในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

หลังจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจมีปริมาณน้ำอยู่ในสารต้นตื้นที่จะใช้ในขั้นที่สอง คือปฏิกิริยาทรานส์/เอสเทอร์ฟิเคชัน จึงต้องการศึกษาหาปริมาณน้ำมากที่สุดที่สามารถมีได้ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนที่สองนี้



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลผลิตไปโอติเซลกับปริมาณน้ำที่ใส่ลงในสารตั้งต้นที่สถานะเมทานอลต่อกรดโอเลอิก 10:1 ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนักกรดโอเลอิก อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าปริมาณน้ำทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

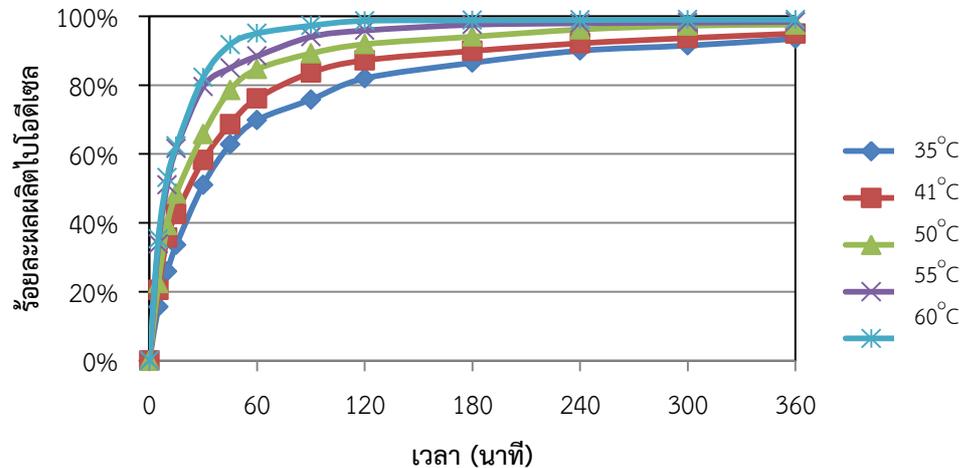
1. น้ำที่ใส่ลงไปมีผลยับยั้งปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และเมื่อน้ำที่ใส่เข้าไปผสมกับสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาดำเนินการได้น้อยลงเนื่องจากน้ำมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง
2. น้ำที่ใส่ลงไปมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปมีความเข้มข้นลดลง ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะปกติหากขาดตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นการเติมน้ำลงไปทำให้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ปริมาณน้ำจึงมีผลต่อตัวเร่งอย่างเห็นได้ชัด ดังที่จะเห็นได้จากรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าปริมาณน้ำที่มากกว่า 0.1 มิลลิลิตรหรือร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เพียงแค่อ้อยละ 67.48

โดยเมื่อเทียบกับการทดลองของ Park และคณะที่ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิกเท่ากับ 6:1 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านไป 6 ชั่วโมง จะได้อ้อยละผลได้ประมาณ 90 เมื่อมีน้ำผสมอยู่กับสารตั้งต้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น จะพบว่าร้อยละผลได้ลดลงร้อยละ 2.98 [40]

5.2.2 การทดลองหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

หลังจากทำการทดลองเพื่อหาผลของปริมาณน้ำต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้ทราบว่าน้ำมีผลต่อการทำปฏิกิริยามาก ดังนั้นจึงต้องการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา-เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกและเมทานอล การทดลองมีการทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง เมื่อทำการ

ทดลองปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและนำผลการทดลองมาคำนวณและนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 โดยผลการทดลองทั้งหมดมีร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเพียงร้อยละ 1.85



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่เวลา 0-360 นาที ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดโอเลอิก 10:1 และกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก

จากรูปที่ 5.13 พบว่าในช่วงแรกปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของเมทานอลกับกรดโอเลอิก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆช้าลง เมื่อเวลาผ่านไป และมีค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากนั้นทำการคำนวณหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์จากการกำหนดให้แบบจำลอง ต้นแบบ ในการคำนวณจะไม่คิดการผันกลับของปฏิกิริยาเนื่องจากปฏิกิริยามีอัตราผลผลิตของการเกิดปฏิกิริยาที่เข้าใกล้ร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิต่างๆ ถึงแม้ที่อุณหภูมิต่ำจะต้องใช้เวลาที่มากกว่า อุณหภูมิที่สูงก็ตาม เพื่อลดขั้นตอนที่ยุ่งยากในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ได้สมการเป็นดังนี้

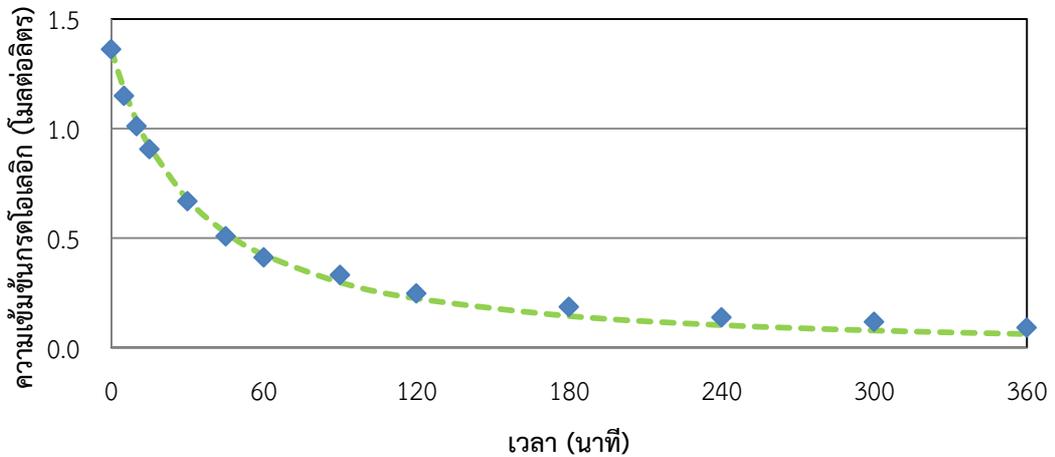
$$\frac{dC_A}{dt} = r_A = -k_A C_A^\alpha C_B^\beta \quad (5.2)$$

โดยที่

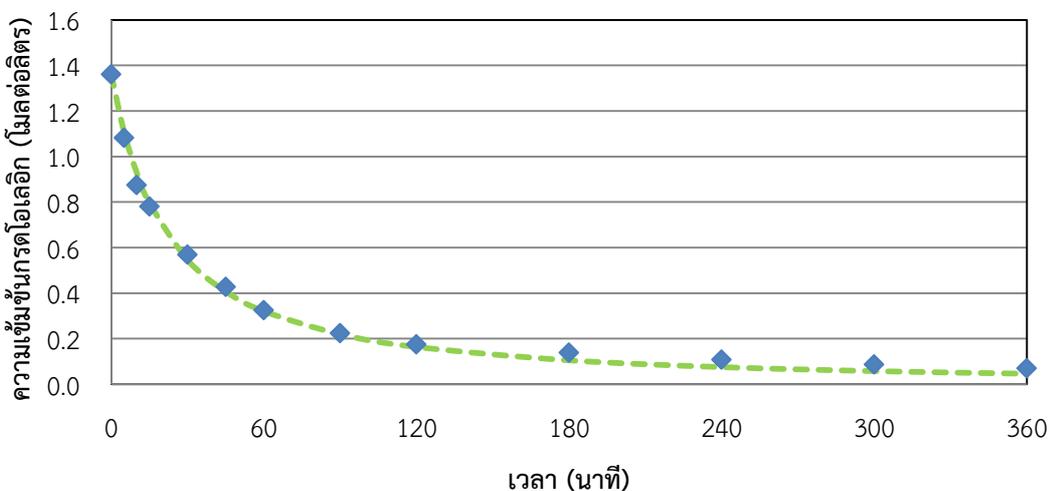
$$k_A(T) = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (5.3)$$

การแก้สมการแบบจำลองข้างต้นใช้วิธีออยเลอร์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจากนั้นทำการ trial & error เพื่อหาค่า α , β , E_a และ k_0 ที่จะทำให้สมการต้นแบบเป็นจริง โดยทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายให้ได้ต่ำที่สุด ได้ผล

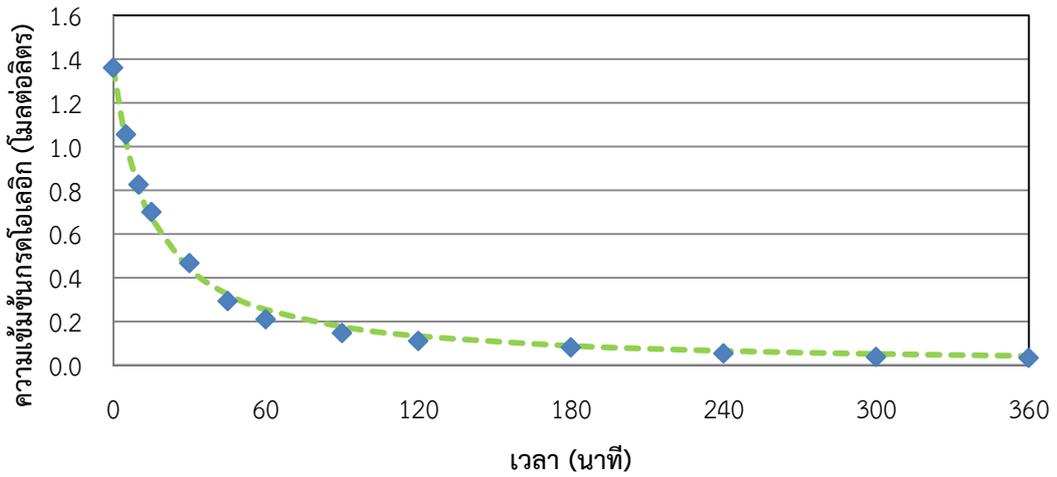
ออกมาดังรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.18 โดยค่าจากการทดลองแสดงโดยจุดสัญลักษณ์และค่าที่ทำนายจากแบบจำลองแสดงด้วยเส้นประ



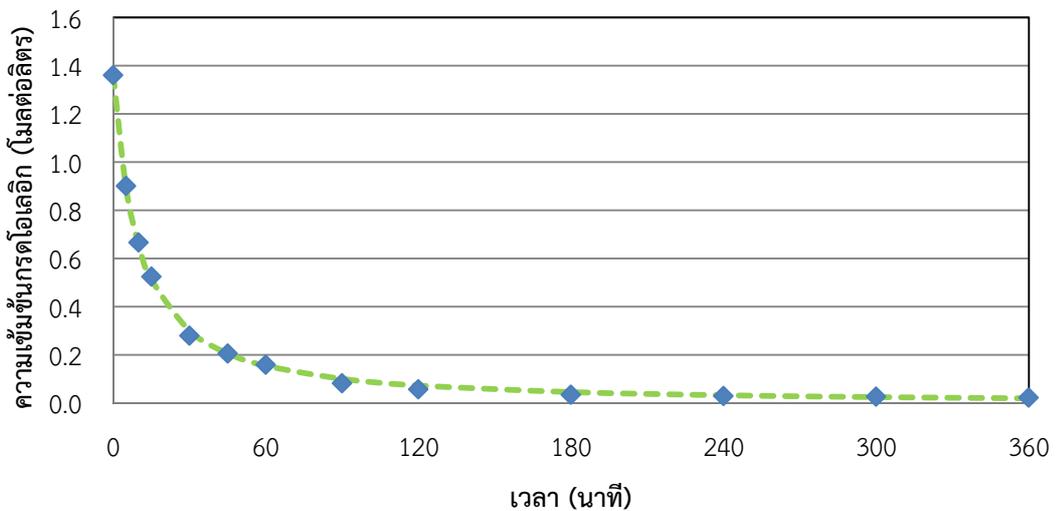
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที



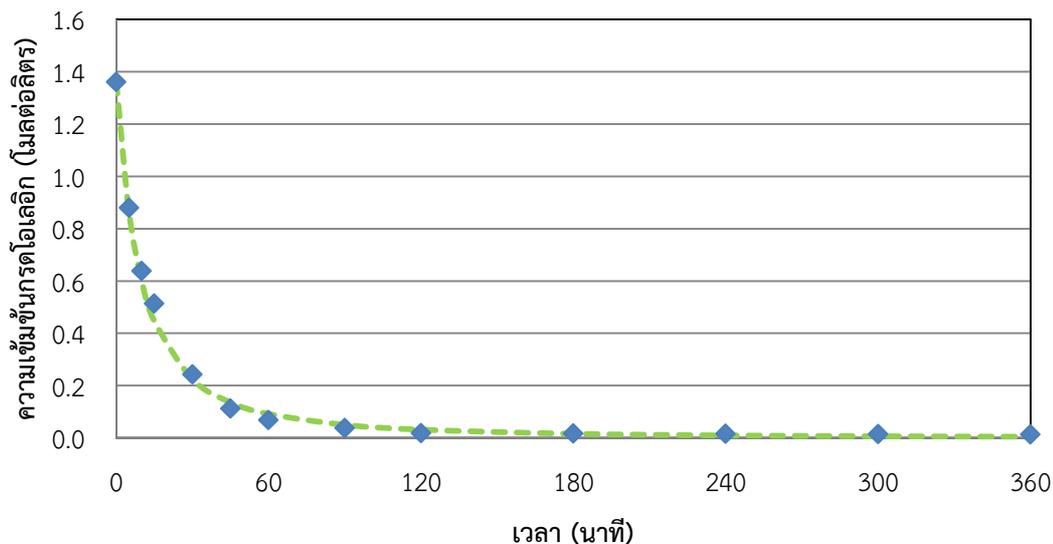
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลอิกกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลอิก 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลอิก การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที

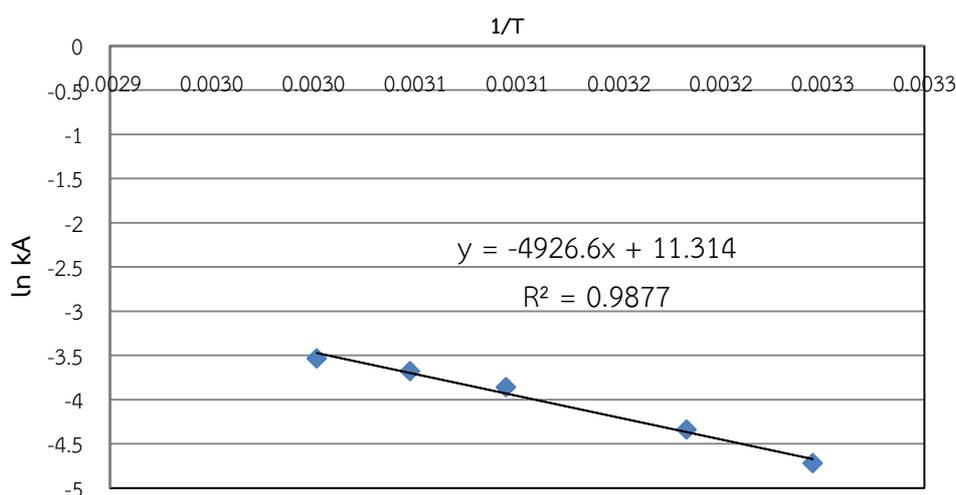


รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดโอเลฟินกับเวลา เทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สภาวะเมทานอลต่อโอเลฟิน 10:1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักโอเลฟิน การปั่นกววน 1,500 รอบต่อนาที

จากสมการความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (5.3) สามารถจัดรูปใหม่ตามสมการที่ (5.4)

$$\ln k_A = \ln k_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (5.4)$$

จะได้เป็นสมการเส้นตรง โดยเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/T$ กับ $\ln k_A$ ตามรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_A$ กับ $1/T$

จากรูปที่ 5.19 จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับสมการเส้นตรงค่าความชันของกราฟก็คือค่า $-E_a/R$ มีค่าเท่ากับ $-4,926.6$ ดังนั้นเมื่อ $R = 8.314$ จูลต่อเคลวิน.โมล ค่า E_a จะเท่ากับ $40,960$ จูลต่อโมล และค่าจุดตัดแกน Y ก็คือค่า $\ln k_0$ มีค่าเท่ากับ 11.314 ดังนั้นค่า k_0 จะเท่ากับ $81,961$ โดยที่ค่า k_A

อันดับปฏิกิริยาของสาร A (α) และ อันดับปฏิกิริยาของสาร B (β) แต่ละอุณหภูมิแสดงด้วยตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่า k_A อันดับปฏิกิริยาของสาร A (α) และ อันดับปฏิกิริยาของสาร B (β) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	k_A	α	β
35	0.0089	1.67	0.384
41	0.0130	1.74	0.376
50	0.0210	1.87	0.322
55	0.0252	1.78	0.422
60	0.0291	1.52	0.410

โดยสามารถเขียนสมการแบบจำลองที่นำค่าอันดับปฏิกิริยาของสาร A และสาร B ค่า E_a ค่า k_0 ได้ดังนี้

$$r_A = -k_A C_A^{1.716} C_B^{0.3828} \quad (5.4)$$

หมายเหตุ : สาร A คือ กรดโอเลอิก, สาร B คือ เมทานอล

โดยที่

$$k_A(T) = 81961 \cdot e^{\frac{-40960}{RT}} \quad (5.5)$$

ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะใช้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส

ตอนที่ 3

5.3 การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

5.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาเป็นวัตถุดิบ

น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน นำมาตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 150 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และตรวจวัดค่าความหนาแน่นด้วยเครื่องมือ pycnometer ได้ค่าความหนืดและความหนาแน่นดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน
ความหนืด ที่ 40°C	28.01 cSt
ความหนาแน่น	0.926 g/cm ³

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของเครื่องวัดความหนืดเบอร์ 150 เท่ากับ 0.03901 cSt/s

5.3.2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมง โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) ร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมัน และตัวทำละลาย (อะซีโตน) ร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันพบว่าความหนืดไคเนติกของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืดไคเนติกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่เป็นวัตถุดิบโดยลดลงจาก 28.01 cSt (ตารางที่ 5.5) เป็น 23.30 cSt (ตารางที่ 5.6) แต่จากค่าความหนืดที่ลดลง เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลแล้วพบว่าปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่ำเพียงแค่ประมาณร้อยละ 7 ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด และผลการประมาณค่าไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ร้อยละโดย โมลเมทา- นอลต่อ น้ำมัน	ครั้งที่ 1 (s)	ครั้งที่ 2 (s)	ครั้งที่ 3 (s)	เวลา เฉลี่ย (s)	ความหนืด ไคเนติก (cSt)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความหนืด ไดนามิกส์ (cP)	ร้อยละ ผลได้ไบ- โอดีเซล
30:1	597	597	598	597.33	23.30	0.903	21.04	7.19

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของเครื่องวัดความหนืดเบอร์ 150 เท่ากับ 0.03901 cSt/s

การประมาณค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นผลมาจากไคเนติกจำกัดของปฏิกิริยา เพราะการดำเนินปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำจำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณมากในการลดผลของไคเนติกจำกัด จึงจะให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น แต่ผลเสียจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนและอาจเป็นอันตรายได้ จึงจำเป็นต้องลดผลของไคเนติกจำกัดด้วยการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นแทนการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมาก เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

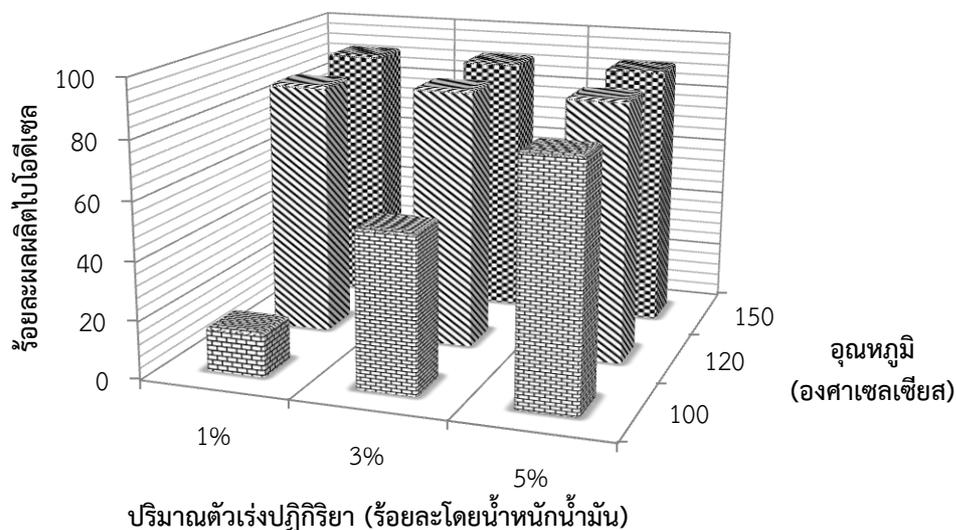
การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะใต้วิกฤต (subcritical) โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ที่จะทำการศึกษา ณ ที่นี้ คือ อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวทำละลาย ปริมาณตัวทำละลาย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อัตราเร็วการปั่นกวน และเวลาในการดำเนินปฏิกิริยา

5.3.3 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักในส่วนของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (kinetics) อีกทั้งความหนืดแปรผกผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่มากพอ

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จะใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 3 และ 5 โดยมวลของน้ำมัน และ

อะซีโตนร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมัน ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส แสดงค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลดังรูปที่ 5.20

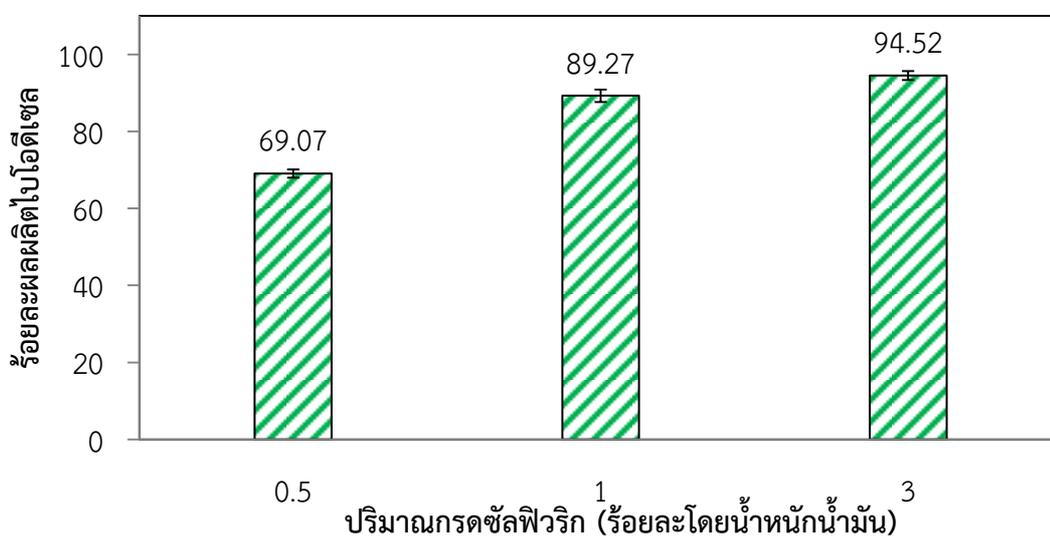


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 เวลา 20 นาที อะซีโตนร้อยละ 20 โดยมวลน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บรรยากาศ

จากรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 100 องศาเซลเซียส เป็น 120 องศาเซลเซียส ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 15.46 เป็นร้อยละ 87.95 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมัน และร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 54.22 เป็นร้อยละ 89.72 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมัน แต่สำหรับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมัน ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 150 องศาเซลเซียส ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จะเริ่มคงที่ ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันและเมทานอลทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้อย่างสมบูรณ์ ในการศึกษาเราจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 120 องศาเซลเซียส เพราะให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลสูงใกล้เคียงกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส รวมทั้งได้ทดลองศึกษาที่สภาวะ 100 องศาเซลเซียส แต่ใช้กรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเพื่อศึกษาปัจจัยอื่น

5.3.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 97-98)

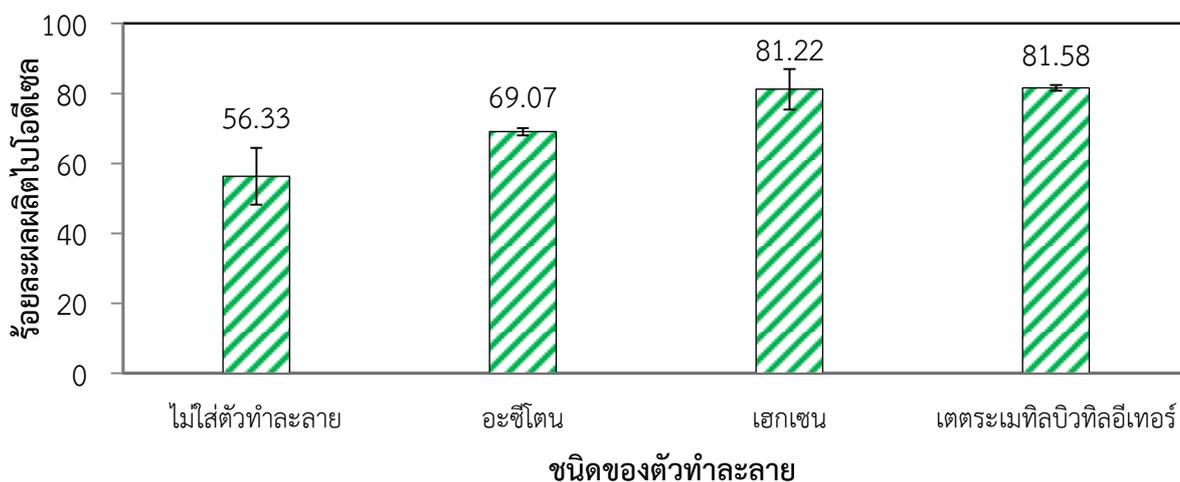
ตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น จากรูปที่ 5.20 พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นมีผลอย่างมากต่อการเกิดไบโอดีเซล โดยจะเห็นอิทธิพลอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำที่ 100 องศาเซลเซียส และมีผลน้อยลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น โครงการนี้ได้ทดลองศึกษาผลของกรดซัลฟิวริกที่ปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเติมตัวทำละลายอะซีโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน เพราะคาดหวังว่าจะได้ปริมาณไบโอดีเซลใกล้เคียงกับเมื่อใช้กรดร้อยละ 1 เพราะจะได้เป็นการลดการใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความกัดกร่อนสูง ผลแสดงดังรูปที่ 5.21 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันจาก 0.5 ถึง 3 ผลผลิตไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69.07 เป็นร้อยละ 94.52 แต่ในโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อ เนื่องจากการใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณมาก (ร้อยละ 3) จะทำให้เกิดการกัดกร่อนจึงเลือกใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และอีกเหตุผลหนึ่งคือ ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน 0.5 ยังได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ไม่สูงมาก (ร้อยละ 69.07) การศึกษาที่สภาวะนี้จึงนำไปสู่การสังเกตอิทธิพลอื่นและเห็นการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตไบโอดีเซลได้ชัดเจนกว่าการใช้กรดในปริมาณมากเพราะถ้ามีผลผลิตไบโอดีเซลสูงมากแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลอื่นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น รวมทั้งพบว่าในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่นนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการแยกชั้นนานขึ้นในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่น และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลต่อน้ำเสียด้วย



รูปที่ 5.21 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 อะซีโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

5.3.5 ผลของชนิดของตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้นระหว่างน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอลและยังส่งผลให้สามารถใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองที่ไม่ใส่ตัวทำละลาย และใส่ตัวทำละลายโดยใช้ชนิดของตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ อะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย ที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 5.22 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวทำละลายได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 56.33 แต่เมื่อมีการเพิ่มตัวทำละลายจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 69.07 81.22 และ 81.58 สำหรับกรณีของอะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ตามลำดับ เนื่องจากตัวทำละลายจะช่วยทำให้สารตั้งต้น คือ น้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอลละลายเข้ากันได้ดีขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวทำละลาย จากรูปที่ 5.22 จะเห็นว่าตัวทำละลายเฮกเซนและเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่มากกว่าอะซีโตนและมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากค่าความมีขั้ว (dielectric constant) จากตารางที่ 5.7 ถ้าตัวทำละลายมีค่าความมีขั้วน้อยจะทำให้ละลายในน้ำมันได้ดีกว่าอะซีโตนที่มีความมีขั้วมาก และเมื่อละลายในน้ำมันจะส่งผลให้ช่วยลดความหนืดของน้ำมันทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ง่ายขึ้นและได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงขึ้น แต่ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์สามารถต้านทานการน็อกของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้นและสะอาดขึ้นจึงเลือกเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายเพื่อศึกษาอิทธิพลอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 5.7 ค่าความมีชีวะของสารต่างๆ

ตัวทำละลาย	น้ำมันดอกทานตะวัน	เมทานอล	อะซีโตน	เฮกเซน	เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์
ค่าความมีชีวะ (ε)	3.109	32.6	20.7	1.89	2.6

หมายเหตุ: ค่าความมีชีวะที่ 20 องศาเซลเซียส สำหรับ อะซีโตน เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ น้ำมันดอกทานตะวัน เมทานอล และที่ 25 องศาเซลเซียส สำหรับเฮกเซน

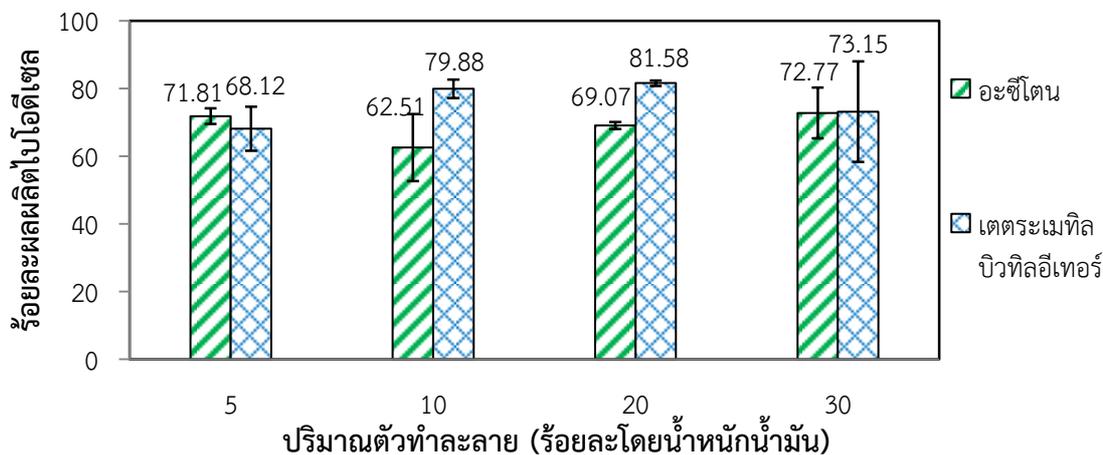
นอกจากนี้การศึกษาครั้งนี้ได้เลือกทดลองทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำลงมาด้วย คือ การทำปฏิกิริยาที่ 100 องศาเซลเซียส ของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 หรือ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที (60 นาทีสำหรับการทดลองที่ไม่ใส่ตัวทำละลาย) ในการทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของอะซีโตน (acetone) กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลแสดงดังตารางที่ 5.8 พบว่าการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยไม่มีการเติมตัวทำละลายจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลน้อยเนื่องจากสารตั้งต้นไม่ละลายกัน (น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันเป็นสารไม่มีชีวะ ส่วนสารตั้งต้นที่เป็นเมทานอลเป็นสารมีชีวะ) การทดลองที่ 2 และ 3 มีการเติมตัวทำละลายอะซีโตนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ ทำให้สารตั้งต้นผสมกันได้ดีขึ้น เนื่องจากตัวทำละลายสามารถช่วยลดระยะเวลาในการผสม (initial lag phase) เพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) และเพิ่มการละลายของสารตั้งต้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น และทำให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอะซีโตนรวมทั้งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์ได้ง่ายเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันปกติ คุณสมบัติในส่วนนี้ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการแยกและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตอีกด้วย ดังนั้นโครงการวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายในระบบด้วย

ตารางที่ 5.8 ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาเมื่อใช้อะซีโตนหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองที่	ตัวทำละลาย	ปริมาณ	เวลาทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล
1	ไม่มี	ไม่มี	60	24.95
2	อะซีโตน	20% โดยน้ำหนักน้ำมัน	20	54.22
3	คาร์บอนไดออกไซด์	70 ความดันบรรยากาศ	20	67.21

5.3.6 ผลของปริมาณตัวทำละลาย

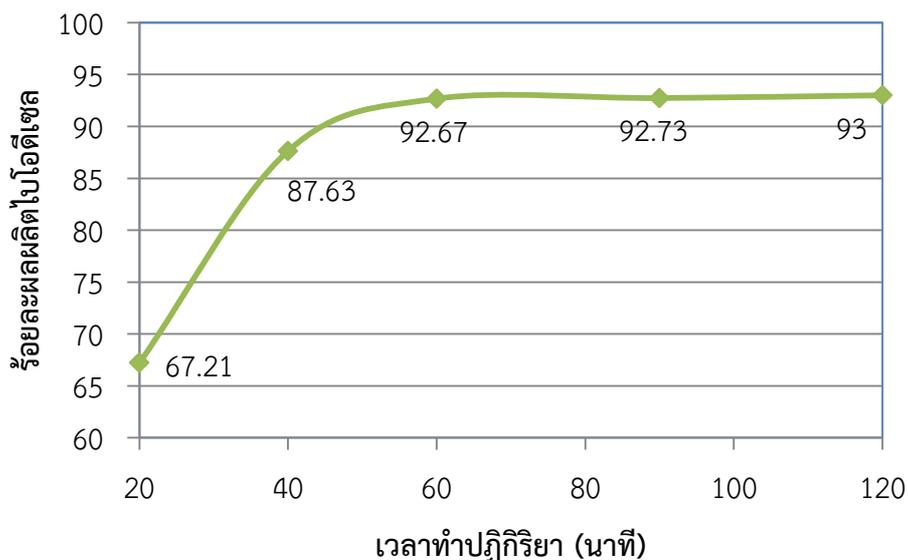
จากคำอธิบายข้างต้นตัวทำละลายจะช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้น และยังส่งผลให้ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำ แต่การเพิ่มตัวทำละลายทำให้ความเข้มข้นของระบบเจือจางลง ดังนั้นจึงศึกษาปริมาณตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณตัวทำละลายร้อยละ 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน



รูปที่ 5.23 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายต่อผลผลิตไปโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

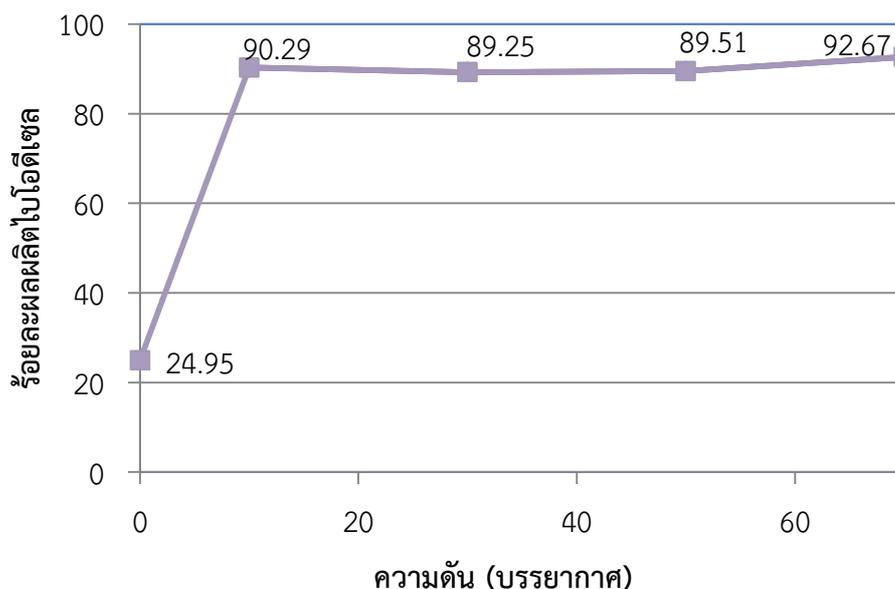
จากรูปที่ 5.23 พบว่าการใช้เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ส่งผลให้ผลผลิตไปโอดีเซลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มตัวทำละลายจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และปริมาณผลผลิตไปโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มตัวทำละลายเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน และผลผลิตไปโอดีเซลจะลดลงเมื่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้น คือตัวทำละลายจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะไปเจือจางระบบ แต่สำหรับตัวทำละลายอะซีโตน พบว่าการเพิ่มตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อระบบมากนัก

สำหรับปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลคือที่ 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.24 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ เมื่อทำปฏิกิริยาถึงระยะเวลาหนึ่งสารในระบบจะเข้าสู่สมดุลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดสารผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จะสนใจศึกษาระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเข้าสู่สมดุล ผลการทดลองในรูปที่ 5.24 พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 40 และ 60 นาที จะได้ผลผลิตไปโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนการทำปฏิกิริยาโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 90 และ 120 นาที จะได้ผลผลิตคงที่ประมาณร้อยละ 92-93 ไปโอดีเซล ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมในการทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บรรยากาศ (เกจ) ปริมาณกรดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1



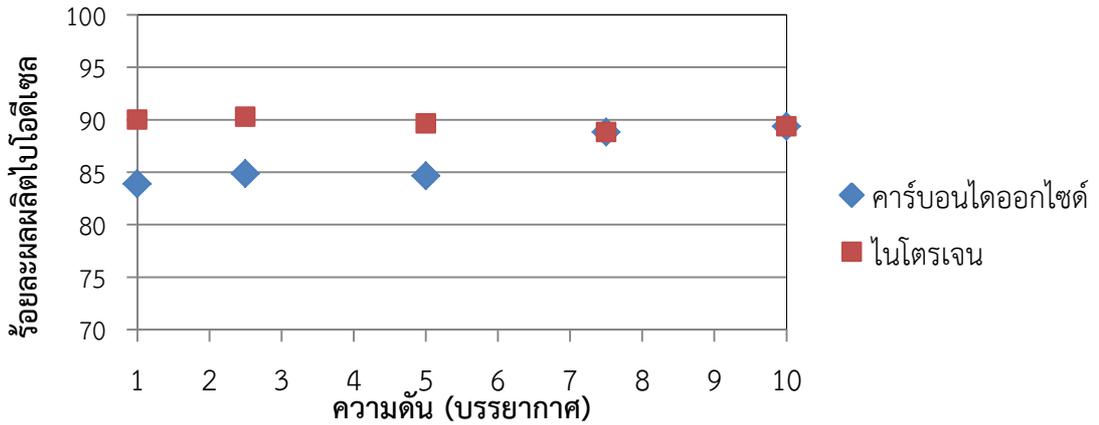
รูปที่ 5.24 อิทธิพลระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บรรยากาศ ปริมาณกรดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวทำละลาย พบว่าการเติมตัวทำละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (70 บรรยากาศ) ส่งผลดีต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ขยายของเหลว (gas-expanded liquid: GXL) ซึ่งปรากฏการดังกล่าวสามารถช่วยลดความหนืด เพิ่มความสามารถในการแพร่ของสารและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาการทำปฏิกิริยาที่ความดันต่างๆของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทดลองด้วยความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยลงเพื่อลดความอันตรายและลดปริมาณแก๊สที่ใช้ในระบบลง ผลการทดลองอิทธิพลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รูปที่ 5.25 จากผลการทดลองพบว่าการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 10 บรรยากาศ การเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่านี้จะได้ผลผลิตโพลีเอทีเชลใกล้เคียงกัน (ร้อยละผลผลิตโพลีเอทีเชล 89-92) แต่ความดันสูงส่งผลให้ระบบการทดลองอันตรายและสิ้นเปลืองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น

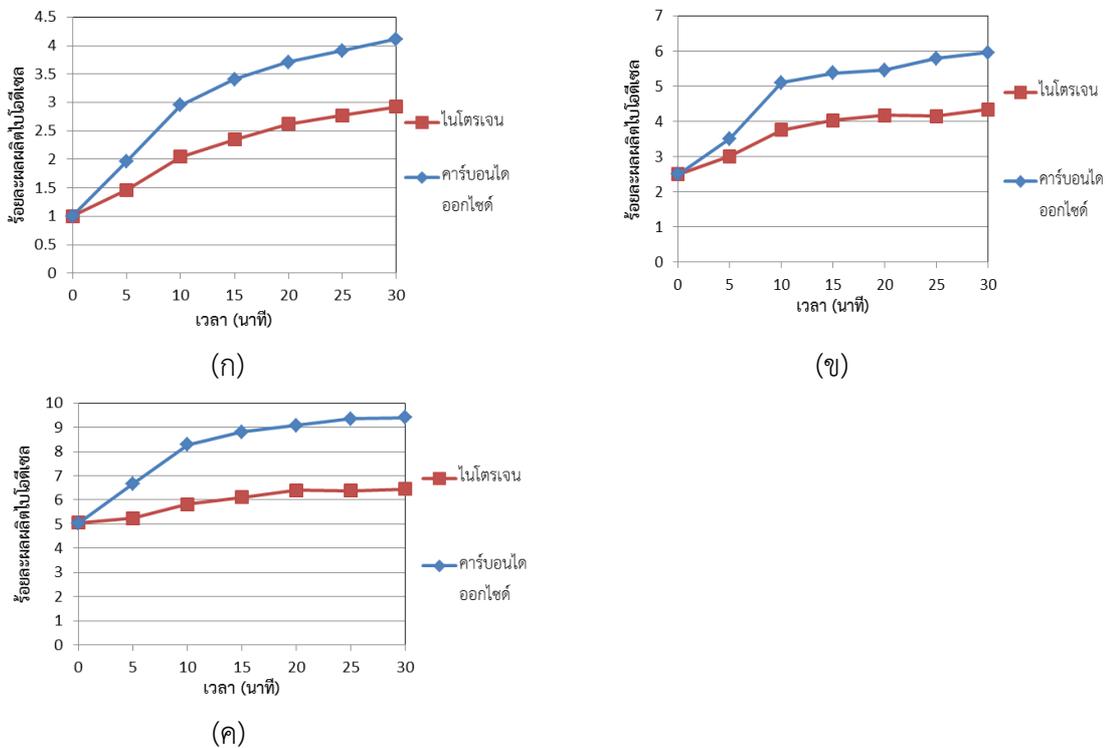


รูปที่ 5.25 อิทธิพลของความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณกรดร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทดลองด้วยความดันต่ำกว่า 10 บรรยากาศ (1 2.5 และ 5 บรรยากาศ) และเปรียบเทียบกับกรณีเติมแก๊สไนโตรเจนที่ความดันเดียวกัน จากผลการทดลองในรูปที่ 5.26 พบว่าที่ความดัน 1 2.5 และ 5 บรรยากาศ ได้ผลผลิตไปโอดีเซลใกล้เคียงกันเมื่อใช้แก๊สชนิดเดียวกัน แต่สำหรับระบบที่ใช้ไนโตรเจนจะได้ผลผลิตไปโอดีเซลสูงกว่าระบบที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เมทานอลระเหยกลายเป็นไอ และไอของเมทานอลนี้สามารถละลายได้ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าแก๊สไนโตรเจน ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 5.27 ว่าความดันในระบบที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจน เนื่องจากมีปริมาณไอของเมทานอลผสมอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า ส่งผลให้เมทานอลในชั้นของเหลวมีปริมาณน้อยลงและเกิดไปโอดีเซลได้น้อยลงเช่นเดียวกับการลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน



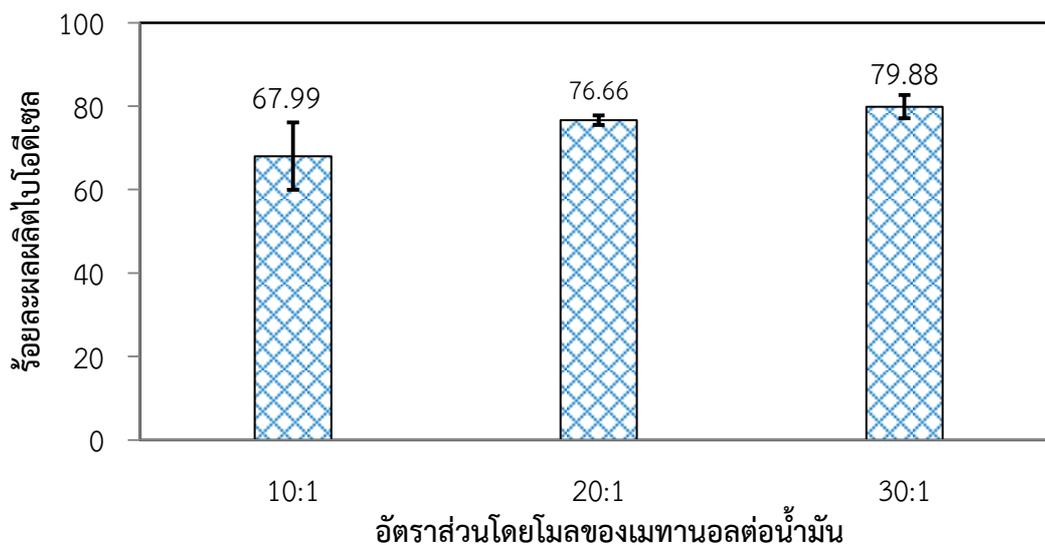
รูปที่ 5.26 อิทธิพลของความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณกรดร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.27 ความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน (ก) ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ (ข) ความดันเริ่มต้น 2.5 บรรยากาศ (ค) ความดันเริ่มต้น 5 บรรยากาศ

5.3.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

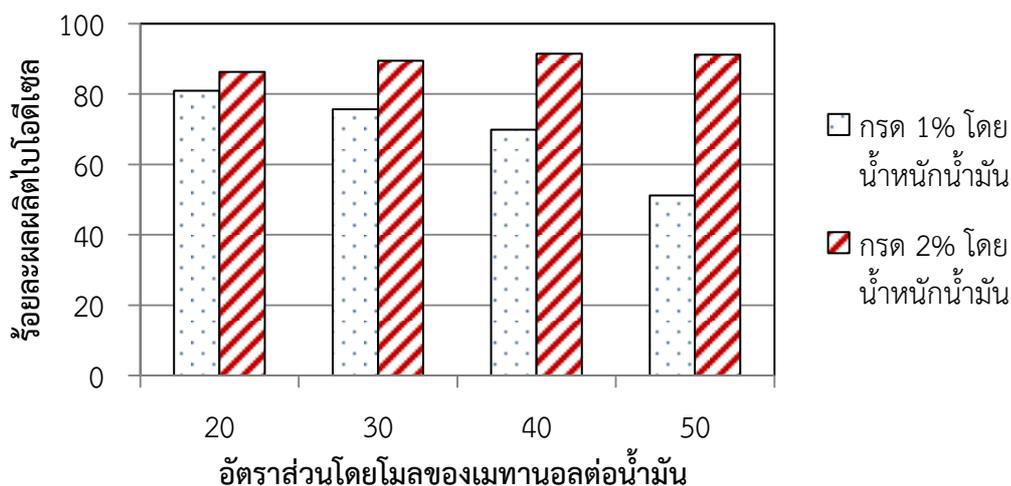
การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันไปข้างหน้ามากขึ้นส่งผลให้ผลผลิตไปเอตีเซลเพิ่มขึ้นแต่ผลเสียของการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปอาจทำให้ความเข้มข้นของระบบและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 20:1 และ 30:1 ดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เติตระเมทิลบิวทิลเอทีเออร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 5.28 จะเห็นว่าอิทธิพลของสมมูลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่ยังเป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมและไม่ทำให้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง ผลผลิตไบโอดีเซลจึงเพิ่มขึ้นจาก 67.99 จนถึง 79.88 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 จนถึง 30:1 แต่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 20:1 และ 30:1 มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมที่สุดคือ 20:1 เพราะใช้ปริมาณน้อยกว่า 30:1 แต่ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ใกล้เคียงกัน

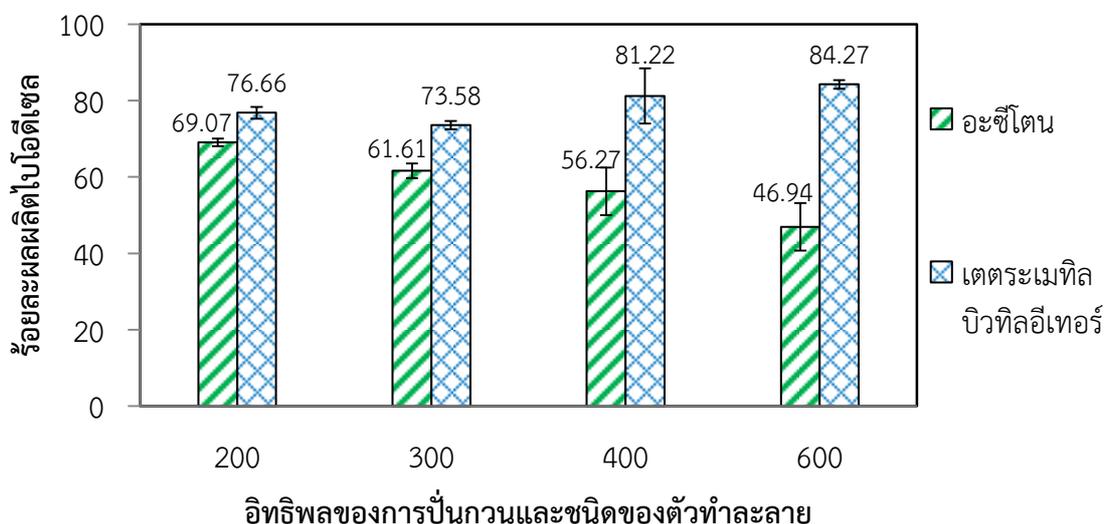
สำหรับการทดลองที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมีสารตั้งต้นสองชนิดคือน้ำมันกับเมทานอล เมื่อใส่สารตั้งต้นมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาขับเคลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จะสนใจศึกษาอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันให้สูงขึ้นเพื่อให้ปฏิกิริยาขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้ดีขึ้น จากการทดลองอิทธิพลของปริมาณกรดพบว่าปริมาณกรดที่เหมาะสมคือร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน แต่ผู้ทดลองคาดว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะสามารถเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลสำหรับการใช้ตัวเร่งชนิดกรดปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันได้ ดังนั้นในการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะศึกษาโดยใช้ปริมาณกรด 2 ค่า คือร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน สำหรับการเติมตัวเร่งปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลเพิ่มขึ้นจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และผลการทดลองสำหรับการใช้ปริมาณกรดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันส่งผลให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากเกิดการเจือจางของตัวเร่งจากปริมาณเมทานอลที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 อิทธิพลของอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณกรดร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

5.3.8 ผลของอัตราเร็วในการปั่นกววน

การปั่นกววนเป็นอิทธิพลหนึ่งที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพราะน้ำมัน-ดอกทานตะวันและเมทานอลที่เป็นสารตั้งต้นจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปั่นกววนให้สารตั้งต้นทั้งสองมีโอกาสสัมผัสกันได้มากขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายเข้าช่วย และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมากขึ้น โดยอัตราเร็วในการปั่นกววนที่ศึกษา คือ อัตราเร็วรอบที่ 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาทีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.30



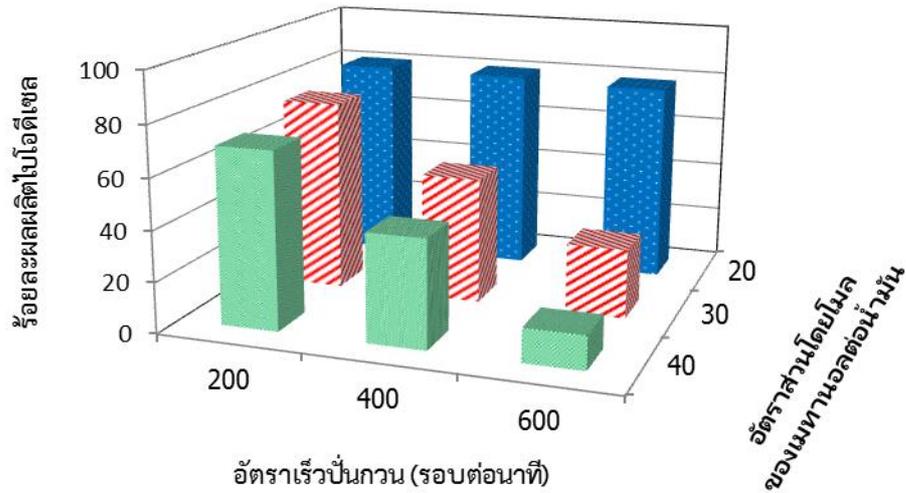
รูปที่ 5.30 อิทธิพลของอัตราเร็วของการปั่นกววนต่อผลผลิตไปโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเวลา 20 นาที โดยกราฟของเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และกราฟของอะซีโตนมีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 อะซีโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน

จากรูปที่ 5.30 จะเห็นว่ากราฟของเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกววนเพิ่มขึ้นผลผลิตไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำมัน เมทานอล และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์สามารถผสมกันได้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกววนผลผลิตไบโอดีเซลจึงไม่ส่งผลมากนัก ดังนั้นจึงเลือกอัตราเร็วในการปั่นกววนที่ 200 รอบต่อนาทีที่เป็นอัตราเร็วในการปั่นกววนที่ต่ำที่สุด และในส่วนของกราฟอะซิโตนจะเห็นว่า เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกววนเพิ่มขึ้นผลผลิตไบโอดีเซลจะลดลงกรณีเมื่อเติมอะซิโตนลงในสารผสมน้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอล สารผสมยังเกิดการแยกตัว และการปั่นกววนที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ช่วยให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากขึ้น เนื่องจากสมดุลเฟสจึงได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดคือร้อยละ 69.07

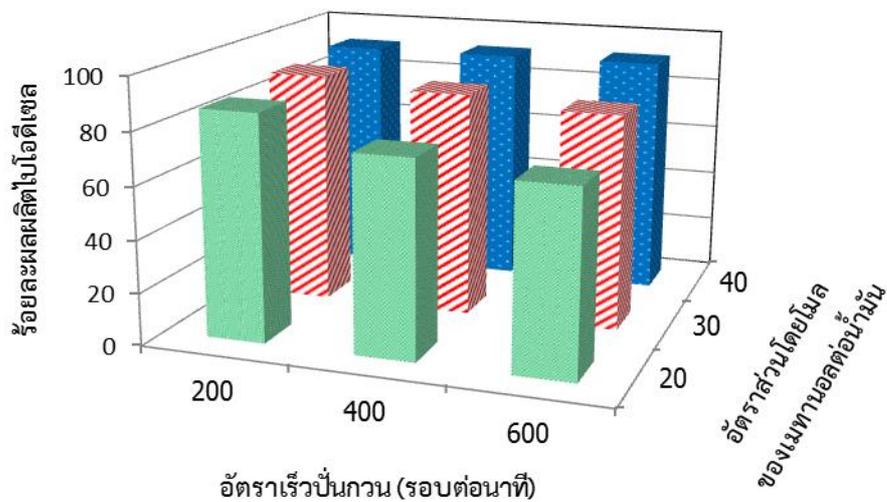
การทดลองอัตราเร็วปั่นกววนสำหรับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน เมื่อเพิ่มอัตราเร็วปั่นกววนจาก 200 เป็น 400 และ 600 รอบต่อนาทีพบว่ามีความโน้มที่จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากการปั่นกววนที่เร็วขึ้นส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายในส่วนของเหลวได้มากขึ้น และเมทานอลสามารถระเหยเป็นไอได้มากขึ้น การทดลองในส่วนแรกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 5.31 ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดประมาณร้อยละ 80 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 และอัตราเร็วปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

การทดลองในส่วนต่อมาจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน ผลที่ได้มีความโน้มคล้ายกันกับการทดลองในส่วนแรกคือเมื่อเพิ่มอัตราเร็วปั่นกววนจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลต่ำลง แต่ผลกระทบจากอัตราเร็วปั่นกววนในส่วนนี้มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลต่ำกว่าเนื่องจากระบบมีความเข้มข้นของตัวเร่งที่มากกว่า การทดลองในส่วนที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 5.32 ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดประมาณร้อยละ 90 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 40:1 สำหรับทุกอัตราเร็วปั่นกววน (200–600 รอบต่อนาที)

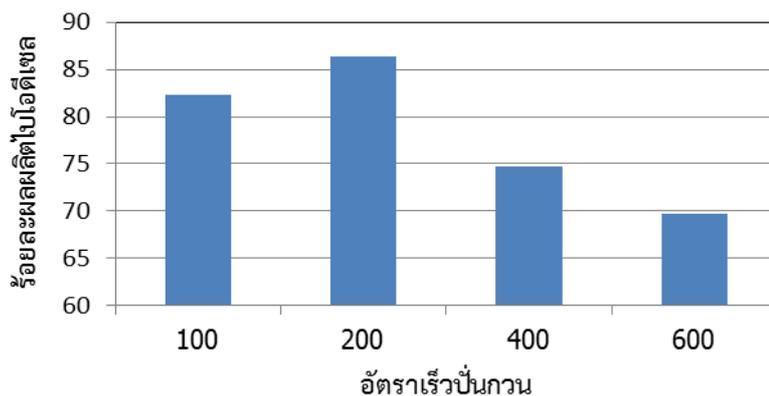
จากการทดลองที่ได้กล่าวมาพบว่าอัตราเร็วปั่นกววนที่มากกว่า 200 รอบต่อนาทีจะส่งผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ศึกษาผลการทดลองสำหรับอัตราเร็วปั่นกววนที่น้อยกว่า 200 รอบต่อนาที คือที่อัตราเร็วปั่นกววน 100 รอบต่อนาที ผลที่ได้คือได้ผลผลิตไบโอดีเซลต่ำลง เนื่องจากอัตราเร็วปั่นกววนที่ช้าเกินไปส่งผลให้สารตั้งต้น (น้ำมันกับเมทานอล) ละลายกันไม่ดี ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.33 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการปั่นกววนสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลได้ในการปั่นกววนต่ำๆ (100 - 200 รอบต่อนาที) และเมื่อใช้อัตราเร็วปั่นกววนที่มากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลต่ำลง (200 - 600 รอบต่อนาที)



รูปที่ 5.31 อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณ กรดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน



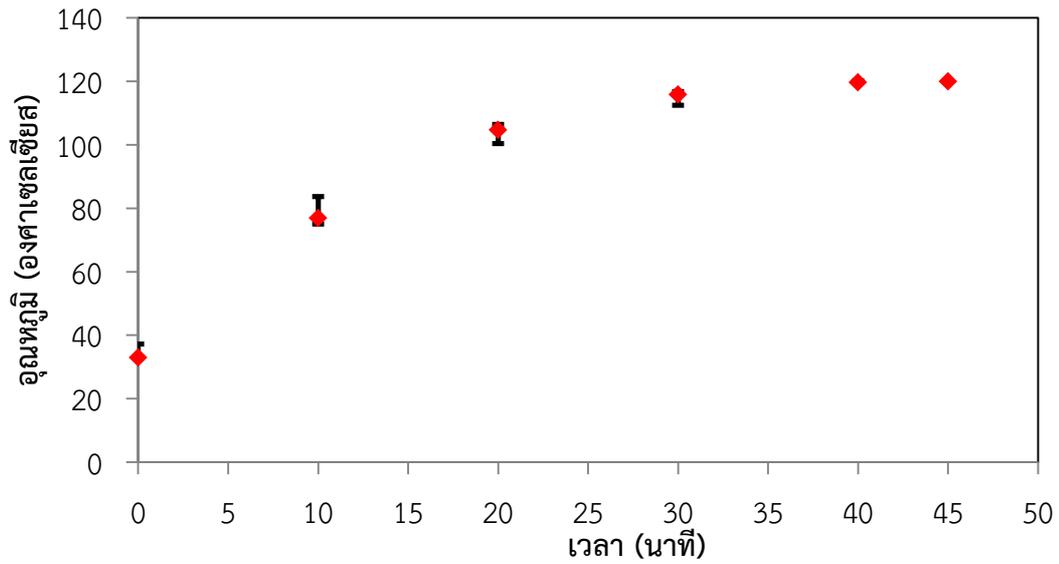
รูปที่ 5.32 อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่สภาวะ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ ปริมาณ กรดร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน



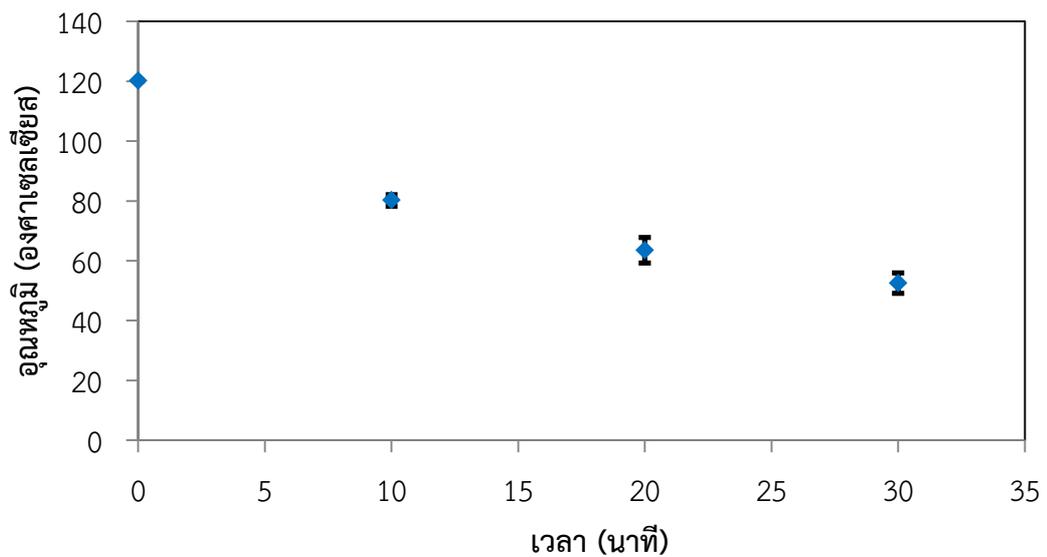
รูปที่ 5.33 อิทธิพลของอัตราเร็วปั่นกววน ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดัน 10 บรรยากาศ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 ปริมาณกรดร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน

5.3.9 ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มและลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง

สำหรับการทำปฏิกิริยาในการทดลองครั้งนี้ให้ความร้อนแก่สารผ่านเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูงนั้นต้องใช้ระยะเวลาสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิและการลดอุณหภูมิหลังการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นของสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง ซึ่งเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 120 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 45 นาที ในการเพิ่มอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิที่ต้องการ และใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการลดอุณหภูมิลงถึง 50 องศาเซลเซียส ที่สามารถนำสารตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ เวลาในการเพิ่มและลดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.34 และ รูปที่ 5.35 ตามลำดับซึ่งจุดการทดลองที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 6 ครั้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 7 ดังนั้นถ้ารวมเวลาดังกล่าว 75 นาทีจะทำให้เวลาที่แท้จริงในการทำปฏิกิริยามากกว่าเวลาการทำปฏิกิริยาที่รายงาน ข้อมูลในส่วนนี้ทำให้การนำผลจากโครงการวิจัยนี้ไปใช้งานจริงต้องคำนึงถึงช่วงเวลาดังกล่าวด้วย



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก่อนทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง



รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลงหลังทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

สำหรับสรุปผลการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกริยา-เอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ส่วนที่ 1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

6.1 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

การลดอิทธิพลของการแพร่โดย การปั่นกวนและ หรือการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ พบว่า กรณีที่มีการปั่นกวนจะทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 8.3 เมื่อเทียบกับเมื่อไม่มีการปั่นกวน และการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ (สเปน 60) โดยมีการปั่นกวนด้วย จะส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับผลที่ไม่มีการเติมสเปน 60 ซึ่งอาจเนื่องจากสารอิมัลซิฟายเออร์ที่เลือกใช้ยังไม่เหมาะสม หรือสภาวะการทดลองยังไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงการแยกสารอิมัลซิฟายเออร์ออกหลังปฏิกริยาซึ่งจะทำได้ยากจึงไม่มีการศึกษาต่อสำหรับกรณีนี้

6.2 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกริยา

6.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกริยา

การทำปฏิกริยาโดยเติมกรดไขมันอิสระร้อยละ 30 โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำคือ 1:4 จะทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 รวมทั้งปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นนั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ของกรดไขมันซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกรดไขมันเริ่มต้นที่สูงขึ้น ศึกษาในช่วงร้อยละ 20-50 โดยมวลของน้ำมัน

6.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ

จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ 1:02 ถึง 1:4 (ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมล คือ 1:10 ถึง 1:440) นั้นจะทำให้ร้อยละผลได้ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปจะส่งผลทำให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันอิสระลดลง

6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของกรดไขมันอิสระเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน

6.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ได้ศึกษาแบบจำลองในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยค่าพลังงานกระตุ้นปฏิกริยาไฮโดรไลซิสไปข้างหน้าเท่ากับ 12.48 กิโลจูลต่อ

โมล และค่าพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 3.21 กิโลจูลต่อโมล สามารถเขียนสมการออกแบบได้คือ

$$\frac{dC_{TG}}{dt} - k_1 C_{TG} C_W + k_{-1} C_{FFA} C_G \quad \text{โดยที่} \quad k_1 = 0.016 \exp\left(\frac{12.48}{RT}\right) \quad \text{และ} \quad k_{-1} = 0.474 \exp\left(\frac{3.21}{RT}\right)$$

และแบบจำลองสามารถทำนายค่าร้อยละการแปลงผันทางเคมีที่อยู่ในช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียสได้เป็นที่ยอมรับได้

ส่วนที่ 2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะศึกษาผลของปริมาณน้ำเริ่มต้นในสารตั้งต้น พบว่าปริมาณน้ำในสารตั้งต้นเพียง 0.1 มิลลิลิตรหรือร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตไปโอติเซลลดลงถึงร้อยละ 10 ดังนั้นควรกำจัดน้ำออกให้มากที่สุดก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันหรือทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน การศึกษาจลนพลศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 60 องศาเซลเซียสได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสามารถเขียนสมการแบบจำลองที่ได้ค่าอันดับปฏิกิริยาของสาร A และสาร B ค่า E_a ค่า k_0 ได้ ดังนี้

$$r_A = -k_A C_A^{1.716} C_B^{0.3828} \quad (6.1)$$

หมายเหตุ: สาร A คือ กรดโอเลอิก, สาร B คือ เมทานอล โดยที่

$$k_A(T) = 81961 \cdot e^{\frac{-40960}{RT}} \quad (6.2)$$

ส่วนที่ 3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

6.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

6.4.1 ผลของอุณหภูมิ

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมง โดยใช้ กรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมัน และตัวทำละลายอะซีโตนร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมัน พบว่าได้ผลผลิตไปโอติเซลเพียงแค่ร้อยละ 7 เท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตของไปโอติเซลมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส

6.4.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดไปโอติเซล โดยถ้าเพิ่มร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นผลโดยตรงให้ปริมาณไปโอติเซลเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ปริมาณที่ใช้ต้องคำนึงถึงการกัดกร่อน และการสิ้นเปลืองสารวัตถุดิบด้วย

6.4.3 ผลของชนิดตัวทำละลาย

ตัวทำละลายมีผลทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ดีขึ้นซึ่งอาจเป็นผลจากการลดอิทธิพลของการแพร่ในระบบ พบว่าเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เฮกเซน อะซีโตนและกรณีไม่มีตัวทำละลาย โดยให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 81.58 81.22 69.07 และ 56.33 ตามลำดับ ปริมาณตัวทำละลายที่ใช้จะมีผลคาบเกี่ยวกับปริมาณเมทานอลที่ใช้ ทั้งนี้ยังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายทางเลือกที่น่าสนใจ สามารถแยกออกหลังทำปฏิกิริยาได้ง่าย ทั้งนี้ปริมาณแก๊สที่ใส่ในระบบต้องคำนึงถึงสมดุลเฟสของระบบด้วยเพื่อให้ได้ผลผลิตสูง

6.4.4 เวลาในการทำปฏิกิริยา

เวลาในการทำปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของระบบที่ใช้เพื่อให้เข้าสู่สมดุล จากการทดลองระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 60 นาทีสำหรับอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

6.4.5 ผลของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันจะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบด้วย ถ้าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานั้นน้อย และทำการเพิ่มปริมาณเมทานอลจะเป็นการทำให้สารตั้งต้นของระบบเจือจางและผลผลิตของไบโอดีเซลจะลดลง

6.4.6 ผลของการปั่นกววน

การปั่นกววนนั้นในระยะแรกจะทำให้ปริมาณไบโอดีเซลมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วกการปั่นกววนมากเกินไปจะทำให้ปริมาณของผลผลิตไบโอดีเซลลดลง ซึ่งต้องคำนึงถึงสารที่อยู่ในระบบทั้งหมด และการรบกวนสมดุลเฟสของระบบ และการปั่นกววนที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการผลิตไบโอดีเซล

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Usta, "Use of tobacco seed oil methyl ester in a turbocharged indirect injection diesel engine," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, 2005, pp. 77–86.
- [2] J.M. Encinar, J.F. Gonzalez, and A. Rodriguez-Reinares, "Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 44, 2005, pp. 5491–5499.
- [3] F. Zaher, "Esters of sunflower oil as an alternative fuel for diesel engines," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 25, 2003, pp. 1015–1022.
- [4] C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.C. Rakopoulos, D.T. Hountalas, and E.G. Giakoumis, "Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, 2006, pp. 3272–3287.
- [5] E. Lotero, Y. Liu, D.E. Lopez, K. Suwannakarn, D.A. Bruce, and J.G. Goodwin Jr, "Synthesis of biodiesel via acid catalysis," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 44, 2005, pp. 5353–5363.
- [6] S.A. Scott, M.P. Davey, J.S. Dennis, I. Horst, C.J. Howe, D.J. Lea-Smith, and A.G. Smith, "Biodiesel from algae: challenges and prospects", *Energy Biotechnology*, vol. 21, 2010, pp. 277-286.
- [7] A. Demirbas and M.F. Demirbas, "Importance of algae oil as a source of biodiesel", *Energy Conversion and Management*, vol.52, 2011, pp. 163-170.
- [8] A. Singh, B. He, J. Thompson, and J. Van Gerpen, "Process optimization of biodiesel production using alkaline catalysts," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 22, 2006, pp. 597–600.
- [9] F. Ma, L.D. Clements, and M.A. Hanna, "The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow," *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, vol. 41, 1998, pp. 1261–1264.

- [10] D. Darnoko and M. Cheryan, "Continuous production of palm methyl esters," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 77, 2000a, pp. 1269–1272.
- [11] D. Darnoko and M. Cheryan, "Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 77, 2000b, pp. 1263–1267.
- [12] D. Kusdiana and S. Saka, "Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment," *Bioresource Technology*, vol. 91, 2004, pp. 289–295.
- [13] Y. Wang, S. Ou, Pengzhan Liu, and Z. Zhang, "Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process," *Energy conversion and management*, vol. 48, 2007, pp. 184–188.
- [14] M. Di Serio, M. Cozzolino, M. Giordano, R. Tesser, P. Patrono, and E. Santacesaria, "From homogeneous to heterogeneous catalysts in biodiesel production," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 46, 2007, pp. 6379–6384.
- [15] C.-H. Liu, C.-C. Huang, Y.-W. Wang, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Biodiesel production by enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles," *Appl. Energy*, vol. 100, pp. 41–46, Dec. 2012.
- [16] M. M. R. Talukder, P. Das, T. S. Fang, and J. C. Wu, "Enhanced enzymatic transesterification of palm oil to biodiesel," *Biochem. Eng. J.*, vol. 55, no. 2, pp. 119–122, Jul. 2011.
- [17] X. Li, X.-Y. He, Z.-L. Li, Y.-D. Wang, C.-Y. Wang, H. Shi, and F. Wang, "Enzymatic production of biodiesel from Pistacia chinensis bge seed oil using immobilized lipase," *Fuel*, vol. 92, no. 1, pp. 89–93, Feb. 2012.
- [18] P. D. Patil, V. G. Gude, A. Mannarswamy, S. Deng, P. Cooke, S. Munson-McGee, I. Rhodes, P. Lammers, and N. Nirmalakhandan, "Optimization of direct conversion of wet algae to biodiesel under supercritical methanol conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 118–122, Jan. 2011.

- [19] G. Madras, C. Kolluru, and R. Kumar, "Synthesis of biodiesel in supercritical fluids," *Fuel*, vol. 83, no. 14–15, pp. 2029–2033, Oct. 2004.
- [20] X. Liu, H. He, Y. Wang, S. Zhu, and X. Piao, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst," *Fuel*, vol. 87, no. 2, pp. 216–221, Feb. 2008.
- [21] M. Cetinkaya and F. Karaosmanoglu, "Optimization of base-catalyzed transesterification reaction of used cooking oil," *Energy Fuels*, vol. 18, no. 6, pp. 1888–1895, Nov. 2004.
- [22] B. Freedman, E. H. Pryde, and T. L. Mounts, "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 61, no. 10, pp. 1638–1643, Oct. 1984.
- [23] H. Sun, Y. Ding, J. Duan, Q. Zhang, Z. Wang, H. Lou, and X. Zheng, "Transesterification of sunflower oil to biodiesel on ZrO₂ supported La₂O₃ catalyst," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 953–958, Feb. 2010.
- [24] U. Rashid and F. Anwar, "Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil," *Fuel*, vol. 87, no. 3, pp. 265–273, Mar. 2008.
- [25] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, Apr. 2009.
- [26] H. Imahara, E. Minami, S. Hari, and S. Saka, "Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol," *Fuel*, vol. 87, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2008.
- [27] M. Agarwal, G. Chauhan, S. P. Chaurasia, and K. Singh, "Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 89–94, Jan. 2012.

- [28] N. U. Soriano Jr., R. Venditti, and D. S. Argyropoulos, "Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification," *Fuel*, vol. 88, no. 3, pp. 560–565, Mar. 2009.
- [29] R. D. Micic, M. D. Tomic, F. E. Kiss, E. B. Nikolic-Djoric, and M. D. Simikic, "Influence of reaction conditions and type of alcohol on biodiesel yields and process economics of supercritical transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 717–726, Oct. 2014.
- [30] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Biodiesel production from high FFA rubber seed oil," *Fuel*, vol. 84, no. 4, pp. 335–340, Mar. 2005.
- [31] G. Guan, K. Kusakabe, N. Sakurai, and K. Moriyama, "Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether," *Fuel*, vol. 88, no. 1, pp. 81–86, Jan. 2009.
- [32] G. Guan, N. Sakurai, and K. Kusakabe, "Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents," *Chem. Eng. J.*, vol. 146, no. 2, pp. 302–306, Feb. 2009.
- [33] R. Peña, R. Romero, S. L. Martínez, M. J. Ramos, A. Martínez, and R. Natividad, "Transesterification of castor oil: Effect of catalyst and co-solvent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 3, pp. 1186–1189, Feb. 2009.
- [34] Y. Alhassan, N. Kumar, I. M. Bugaje, H. S. Pali, and P. Kathkar, "Co-solvents transesterification of cotton seed oil into biodiesel: Effects of reaction conditions on quality of fatty acids methyl esters," *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 640–648, Aug. 2014.
- [35] L. T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, and H. Bandow, "A new co-solvent method for the green production of biodiesel fuel – Optimization and practical application," *Fuel*, vol. 103, pp. 742–748, Jan. 2013.
- [36] S.Changi, T.Pinnarat, and P.E.Savage, "Modeling Hydrolysis and Esterification Kinetics for Biofuel Processes", *Ind.Eng.Chem.Res.*, vol.50, pp.3206-3211, Feb.2011

- [37] M. E. Borges, L. Díaz, J. Gavín, and A. Brito, “Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 597–599, Mar. 2011.
- [38] R. Alenezi, G.A. Leeke, R.C.D. Santos and A.R. Khan, “Hydrolysis kinetics of sunflower oil under subcritical water conditions.” *chemical engineering research and design*, vol. 87, pp. 867-873, 2009.
- [39] A.L. Milliren, J.C. Wissinger, V. Gottumukala and Constance A, “Kinetic of soybean oil hydrolysis in subcritical water”, *Fuel* vol. 108, pp. 277-281, 2013
- [40] J.P. Park, Z.M. Wang, D.K. Kim and J.S. Lee, “Effects of water on the esterification of free fatty acids by acid catalysts”, *Renewable Energy*, vol 35, pp 614–618, 2010

ประวัติผู้วิจัย

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Dr.Tanawan Pinnarat
ตำแหน่ง อาจารย์
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
โทรศัพท์ 02-329-8360 #141
Email: kptanawa@gmail.com
ที่อยู่ปัจจุบัน 46/147 ซอย รามอินทรา 63 ถนน รามอินทรา แขวง ท่าแร้ง เขต
บางเขน จังหวัด กรุงเทพฯ 10230
โทรศัพท์มือถือ 081-628-8464

2. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ.
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2544
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2547
Doctor of Philosophy	วิศวกรรมเคมี	University of Michigan	2554

3. ประสบการณ์ทำงาน

- อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน)
- รักษาการผู้ช่วยอธิการบดี ฝ่ายองค์กรสัมพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ.2558-ปัจจุบัน)
- คณะกรรมการต่างประเทศ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (พ.ศ. 2557-2559)
- ผู้ช่วยคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายงานวิเทศสัมพันธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2557-2558)
- ผู้ช่วยคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายงานกิจการพิเศษ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2555-2557)
- วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัทสยามมิตซุยฟิทีเอ Siam Mitsui PTA Co., Ltd. ในเครือ SCG (พ.ศ. 2547-2549)

4. ทุนการศึกษา

ทุนรัฐบาลเพื่อการศึกษาต่อปริญญาโท เอก ภาควิทยาศาสตร์ ในความดูแลของสำนักงาน ก.พ. ในความต้องการของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พ.ศ. 2549-2554)

5. งานด้านวิชาการและงานวิจัย

สิทธิบัตร U.S. patent number 13/224872, Biodiesel synthesis from wet algae biomass, University of Michigan

6. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- Tanawan Pinnarat, “Modeling for Conversion of Two-phase Esterification for Biodiesel Production”, KMITL-Science and Technology Journal. 2013;13: 33-38.
- Shujauddin Changi, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage, “Mechanistic Modeling of Hydrolysis and Esterification for Biofuel Process. Industrial & Engineering Chemistry Research”, 2011; 50: 12471-12478.
- Shujauddin Changi, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage, “Modeling Hydrolysis and Esterification Kinetics for Biofuel Processes. Industrial & Engineering Chemistry Research”, 2011; 50: 3206-3211.
- Robert B. Levine, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage, “Biodiesel Production from Wet Algae Biomass Through in Situ Lipid Hydrolysis and Supercritical Transesterification”, Energy Fuels, 2010; 24: 5235-5243.
- Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage, “Noncatalytic esterification of oleic acid in ethanol”, Journal of Supercritical Fluids. 2010; 53: 53-59.
- Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage, “Assessment of Noncatalytic Biodiesel Synthesis Using Supercritical Reaction Conditions”, Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008; 47: 6801-6808.
-

7. การเสนอผลงานวิชาการ

- Panatorn Kongpairin and Tanawan Pinnarat, “Transesterification of Sunflower Oil using Expanded Carbon dioxide in Methanol”, The 4th International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2014
- ชัยพร จิงโชติกะพิศิฐ มนูญยาพร ใจปลื้ม และธนวรรณ พิณรัตน์ แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันจากกรดโอเลอิกโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557

- จตุพร ภักดี ธีรจักร วงศ์คำ ญาณีพร พัชรวรโชติ และธนวรรณ พิณรัตน์ เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557
- ธาดา ทรัพย์พัฒนา ชนินทร ตริ่มังมิตร และธนวรรณ พิณรัตน์ การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้อะซีโตนเพื่อลดความต้านทานจากการแพร่ ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557
- Patt Sribenjaluk and Tanawan Pinnarat, “Non-catalytic Hydrolysis of Triglyceride using co-solvent at moderate condition”, The 3rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2013
- Nuchanart Mordtad, Patt Sribenjaluk, and Tanawan Pinnarat, “Optimization of Algae Biodiesel Production by Acid Transesterification using ASPEN”, The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering. 2013

ประวัติผู้ช่วยวิจัย (เก่า)

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ (ภาษาไทย) ปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์
 ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Patt Sribenjaluk
 ตำแหน่ง นักศึกษาปริญญาโท (จบการศึกษา เดือนพฤษภาคม 2557)
 ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 Email: p.sribenjaluk@hotmail.com
 ที่อยู่ปัจจุบัน 251/12 หมู่ 2 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
 โทรศัพท์มือถือ 086-844-6100

2. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ.
วิศวกรรมศาสตร- บัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2	วิศวกรรมเคมี	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2556
วิศวกรรมศาสตร- มหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2557

3. ประสบการณ์ฝึกงาน

ชื่อหน่วยงาน (Office)	ตำแหน่ง (Position)	พ.ศ. (Year)
ท่อส่งปิโตรเลียมไทย	Operation	2555

4. รางวัลและเกียรติบัตร

Dean's list พ.ศ. 2554

Dean's list พ.ศ. 2555

5. ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

- Patt Sribenjaluk and Tanawan Pinnarat, "Non-catalytic Hydrolysis of Triglyceride using co-solvent at moderate condition", The 3rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2013
- Nuchanart Mordtad, Patt Sribenjaluk, and Tanawan Pinnarat, "Optimization of Algae Biodiesel Production by Acid Transesterification using ASPEN", The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering. 2013

ประวัติผู้ช่วยวิจัย (ใหม่)

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ (ภาษาไทย)	พนาธร ก้องไพรินทร์
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ)	Panatorn Kongpairin
ตำแหน่ง	นักศึกษาปริญญาโท (จบการศึกษา เดือนกรกฎาคม 2558)
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
โทรศัพท์	02-329-8360-3
Email:	po-tong@hotmail.com
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 61/130 หมู่ 3 ถ.เทพารักษ์ ต.บางป่า อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
โทรศัพท์มือถือ	088-008-0658

2. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ.
วิศวกรรมศาสตร- บัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2557
วิศวกรรมศาสตร- มหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2558

3. ประสบการณ์ฝึกงาน

ชื่อหน่วยงาน (Office)	ตำแหน่ง (Position)	พ.ศ. (Year)
ปตท จำกัด (มหาชน)	ผู้ช่วยนักวิจัย	2556
McDonald's	พนักงานขาย	2555

4. รางวัลและเกียรติบัตร

-

5. ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

Panatorn Kongpairin and Tanawan Pinnarat, "Transesterification of Sunflower Oil using Expanded Carbon dioxide in Methanol", The 4th International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2014

6. กิจกรรม

พ.ศ. 2553-2557 สมาชิกชมรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553-2557 สมาชิกชมรมบาสเกตบอล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555 สอนพิเศษวิชาคณิตศาสตร์

พ.ศ. 2554 คณะทำงานค่ายวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553 คณะทำงานค่าย Hypercube 20 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552 คณะทำงานรับน้อง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง