

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพใน
เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

THE EFFICIENT BIODIESEL PRODUCTION FROM REFINED PALM OIL
IN SPINNING DISC REACTOR

อัจฉราพร มีมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพใน
เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

อัจฉราพร มีมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

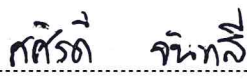
ปีการศึกษา 2562


ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพในเครื่องปฏิกรณ์
แบบจานหมุน
The Efficient Biodiesel Production from Refined Palm Oil in
Spinning Disc Reactor


ชื่อ – นามสกุล นางสาวอัจฉราพร มีมงคล
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วีรินทร์ดา อ่วมานะ, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิธรดี จันทร์ลี, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วัชรพงษ์ ขาวดี, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วีรินทร์ดา อ่วมานะ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 26 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวอัจฉราพร มีมงคล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วีรินทร์ดา อ่วมานะ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม และหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนโดยใช้เทคนิคพื้นผิวการตอบสนอง (response surface methodology, RSM) และการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design, CCD) โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเร็วรอบของจานหมุน และอัตราการไหลรวมสารป้อน ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์สามชนิด ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน แบบการกวนเชิงกล และแบบแรงเฉือนสูง

ในการทดลองได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล แบบแรงเฉือนสูงและแบบจานหมุน ที่สภาวะการดำเนินงานที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสและได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ถึง 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 500 ถึง 2000 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมเท่ากับ 130 ถึง 390 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล แบบแรงเฉือนสูงและแบบจานหมุน ที่สภาวะการดำเนินงานคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0438 0.0738 และ 1711.5 ต่อนาที สำหรับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล แบบแรงเฉือนสูง และแบบจานหมุน ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการ

ผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของ น้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 1028 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 156.3 มิลลิลิตรต่อนาที ให้อัตราผลได้เมทิลเอสเทอร์ 97.9 ซึ่งมีเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Residence time) เพียงแค่ 4.03 วินาที ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาใน เครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกลและแบบแรงเฉือนสูงที่มีเวลา 60 และ 30 นาที ตามลำดับ และเมื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลได้ (Yield efficiency) ของไบโอดีเซลที่ผลิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบ จานหมุน พบว่าให้ประสิทธิภาพผลได้เท่ากับ 1.4451×10^{-1} กรัมต่อจูล ซึ่งสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ แบบการกวนเชิงกล และเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูงถึง 65000 เท่า ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์แบบ จานหมุนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



Thesis Title	The Efficient Biodiesel Production from Refined Palm Oil in Spinning Disc Reactor
Name-Surname	Miss Autcharaporn Meemongkol
Program	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Miss Weerinda Appamana, D.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

This research studied the kinetics of transesterification of palm oil and the appropriate condition for producing biodiesel from refined palm oil via transesterification in spinning disc reactor with Response Surface Methodology (RSM) and Central Composite Design (CCD). It focused on variables affecting the percentage of methyl ester yield: the loading of NaOH catalysts, the rotational speed of the disc, and the total flow rate of feed together with the comparison of the efficiency of a mechanical stirrer reactor and a high shear reactor.

The researcher conducted the experiment on the kinetics of transesterification of palm oil in a mechanical stirrer reactor, a high shear reactor and a spinning disc reactor at the operating condition of the oil to methanol molar ratio of 1:6, catalyst loading of 1.0 %wt of oil and the reaction temperature of 60 °C. The biodiesel production using a spinning disc reactor was also investigated by changing the loading of NaOH catalysts from 0.5 to 1.25 %wt of palm oil, the rotational speed of the disc from 500 to 2000 rpm and the total flow rate of feed from 130 to 390 ml/min with the palm oil to methanol molar ratio of 1:6 and the reaction temperature of 60 °C.

The findings revealed that the constant rate of transesterification of palm oil was 0.0438, 0.0738 and 1711.5 per minute when using a mechanical stirrer reactor, a high shear reactor and a spinning disc reactor, respectively. The appropriate condition for producing biodiesel by using a spinning disc reactor was the catalyst loading of 1.25 %wt

of palm oil, the rotational speed of the disc of 1028 rpm and the total flow rate of 156.3 ml/min. This resulted in the percentage of methyl ester yield of 97.9 whose residence time was merely 4.03 seconds when compared with the reaction time spent in a mechanical stirrer reactor and that in a high shear reactor of 60 and 30 minutes, respectively. Regarding the comparison of yield efficiency of biodiesel gained from the spinning disc reactor, it was found that the yield efficiency was 1.4451×10^{-1} g/J which was higher than that of the mechanical stirrer reactor and the high shear reactor for up to 65000 times. It could be concluded that the spinning disc reactor was a high efficiency reactor for continuous biodiesel production.

Keywords: biodiesel, spinning disc reactor, transesterification



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.วีรินทร์ดา อัมมานะ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษาจึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิรดี จันทสี ประธานกรรมการการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย กรรมการการสอบ และ ดร. วิชรพงศ์ ขาวดี กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่อง รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเหวี่ยงในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้ปกครอง ที่คอยให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ที่ดีเสมอมาสุดท้ายนี้ หวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อัฉรวาพร มีมงคล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 ความหมายของไบโอดีเซล	17
2.2 ประเภทของไบโอดีเซล	17
2.3 กระบวนการในการผลิตไบโอดีเซล.....	18
2.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	20
2.5 กลไกของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	25
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	28
2.7 มาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล	28
2.8 คุณสมบัติของไบโอดีเซล	31
2.9 ประโยชน์จากการใช้ไบโอดีเซล.....	32
2.10 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	33
2.11 การออกแบบการทดลองแบบวิธีพินผิวตอบสนอง.....	35
2.12 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	36
2.13 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน	37
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
วิธีการดำเนินการ.....	44
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง.....	44
3.2 วิธีการทดลอง.....	45
บทที่ 4	
ผลการทดลอง.....	50
4.1 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจาก น้ำมันปาล์ม.....	50
4.2 ผลของการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์ แบบจานหมุน.....	59
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ.....	67
บทที่ 5	
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	75
ภาคผนวก ข การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	80
ภาคผนวก ค การคำนวณประสิทธิภาพผลได้.....	83
ภาคผนวก ง การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊ส โครมาโทกราฟี.....	86
ภาคผนวก จ การศึกษาจลนพลศาสตร์.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญตาราง

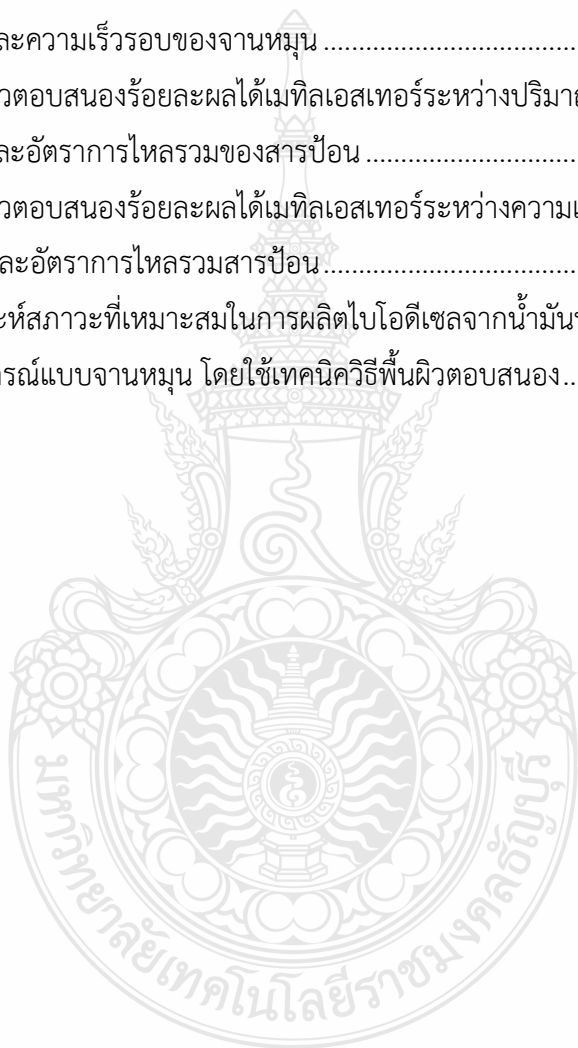
	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	20
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้แล้วสำหรับ ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	21
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแอลกอฮอล์	22
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีของแอลกอฮอล์.....	23
ตารางที่ 2.5 การใช้ประโยชน์ของแอลกอฮอล์	23
ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริเคชัน	25
ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริเคชัน	28
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมไฮดรอกไซด์	28
ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกา	29
ตารางที่ 2.10 มาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรป	30
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	32
ตารางที่ 2.12 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ	34
ตารางที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	41
ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลอง	48
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล	56
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	56
ตารางที่ 4.3 แสดงตัวแปร ระดับในการทดลองและผลได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์.....	59
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของจานหมุน ความหนาของฟิล์มบนจานหมุน และเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์.....	64
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติ ANOVA.....	66
ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ	67

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ได้เมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล.....	19
รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	25
รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	26
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน.....	38
รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกลสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	45
รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูงสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	46
รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	47
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์กับเวลาของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล.....	50
รูปที่ 4.2 จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล.....	51
รูปที่ 4.3 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล.....	52
รูปที่ 4.4 จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล.....	52
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์กับเวลาของการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	54
รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	54
รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	55
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง.....	55
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ แบบจานหมุน	58
รูปที่ 4.11 กราฟพื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ระหว่างปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาและความเร็วรอบของจานหมุน	61
รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ระหว่างปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาและอัตราการไหลรวมของสารป้อน	62
รูปที่ 4.13 กราฟพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ระหว่างความเร็วรอบของ จานหมุนและอัตราการไหลรวมสารป้อน	64
รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใน เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก หลายปีที่ผ่านมา ความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะน้ำมันดีเซล ทำให้พลังงานที่มีอยู่ไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ นำไปสู่การเพิ่มราคาของเชื้อเพลิง และเกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพตามมา เช่น การเพิ่มขึ้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ เป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาโลกร้อน เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรดและทำลายระบบทางเดินหายใจ [1] จึงมีการค้นคว้า วิจัยและพัฒนาพลังงานทางเลือก เพื่อให้มีเพียงพอต่อความต้องการในการดำรงชีวิตประจำวัน ซึ่งไบโอดีเซลถือเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

ไบโอดีเซลเกิดจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นสารประกอบโมโนแอลคิลเอสเทอร์ (Mono-alkyl esters) ของกรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว [2, 3] ไบโอดีเซลเป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่สะอาด มีคุณสมบัติที่ดี เช่น เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งช่วยลดการปล่อยแก๊สไนตรัสออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และปริมาณเลขซีเทนสูง [2, 4] ปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ซึ่งมีขนาดใหญ่ และต้นทุนในการผลิตสูง แต่ให้ผลผลิตที่มีประสิทธิภาพต่ำ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีข้อจำกัดเรื่องการถ่ายโอนมวลระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เนื่องจากสาร 2 ชนิดนี้ไม่ละลายซึ่งกันและกัน เกิดการผสมกันได้ยาก จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น [5]

ดังนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ ให้มีประสิทธิภาพในการผสมสูงขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและช่วยเพิ่มผลผลิต ในปี 2015 Pukale, D. D และคณะ ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องอัลตราโซนิคโดยใช้น้ำมันพืชที่ใช่แล้วและใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช่

แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับเมทานอล 1: 6 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 92.0 [3] ในปี 2013 Azcan, N. และคณะ ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ โดยใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับโซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่ใช้ในการดำเนินงาน คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 นาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 98.85 [6] จะเห็นว่า การใช้เครื่องไมโครเวฟและเครื่องอัลตราโซนิก ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ และลดเวลาในการทำปฏิกิริยา แต่มีข้อเสียคือ ใช้พลังงานและต้นทุนสูง [3, 7]

เทคโนโลยีที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เช่น การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถบำรุงรักษาและง่ายต่อการใช้งาน ภายในประกอบด้วยจานหมุน จานหมุนนี้จะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่บริเวณจุดศูนย์กลางของจานหมุน จะใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางโดยการหมุนของจานหมุน ของเหลวที่อยู่บนศูนย์กลางจานหมุนจะกระจายตัวออกไปด้านข้างภายใต้แรงเหวี่ยงอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเหลวมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ ปกคลุมอยู่บนจานหมุน เกิดการผสมกันในระดับไมโคร ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น [8-10]

ในปี 2014 K.-J. Chen และคณะ ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลเท่ากับ 1: 6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง ความเร็วรอบของจานหมุน 2400 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อน 773 มิลลิลิตรต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 96.9 ใช้เวลาเพียง 2-3 วินาที [8] ด้วยคุณสมบัติที่เด่นในเรื่องของการผสมในระดับไมโคร จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ เช่น การผลิตอนุภาคนาโน [10, 11] การตกตะกอนแบบเรียมซัลเฟต [12] กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) [13] การผลิตพอลิเมอร์ [14, 15] เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสามารถประยุกต์ใช้กับปฏิกิริยาอื่นๆได้ อย่างมากมาย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม และหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยใช้เทคนิคพื้นผิวการตอบสนองและทำการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางเพื่อช่วยลดจำนวนการทดลอง ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเร็วรอบของจานหมุน และอัตราการไหลรวมสารป้อน จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสามชนิด ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน แบบการกวนเชิงกล และแบบแรงเฉือนสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล แรงเฉือนสูง และจานหมุน

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน การกวนเชิงกล และแรงเฉือนสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์กวนเชิงกล แรงเฉือนสูงและแบบจานหมุน ที่สภาวะการดำเนินงานที่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 ถึง 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 500 ถึง 2000 รอบต่อนาที และอัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 130 ถึง 390 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลได้ของเครื่องปฏิกรณ์ 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบ
จานหมุน การกวนเชิงกล และแรงเฉือนสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน
- 4.2 เป็นแนวทางในการผลิตพลังงานทดแทนของประเทศ
- 4.3 เป็นแนวทางในการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่สำหรับผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติไม่เพียงพอต่อการใช้งาน นำไปสู่การเพิ่มมลพิษทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะและโรงงานไฟฟ้า ดังนั้นต้องมีการหาพลังงานทางเลือกเพื่อให้มีเพียงพอต่อการใช้งานและลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงจากชีวมวล (Biomass) เมื่อเผาไหม้แล้วไม่ก่อให้เกิดก๊าซมลพิษ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegradability) ปริมาณเลขซีเทนสูง จุดวาบไฟสูงและมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล [16]

2.1 ความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล หมายถึง สารประกอบโมโนแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง $C_{14}-C_{24}$ (C_{15-25} H_{28-48} O_2) มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันจากพืช หรือไขมันจากสัตว์ [2]

2.2 ประเภทของไบโอดีเซล

การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถแบ่งตามประเภทของการนำมาใช้ได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันหมู สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่ม เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์แตกต่างกับน้ำมันดีเซลมาก โดยเฉพาะความหนืดของน้ำมันพืชสูงกว่าน้ำมันดีเซล และเกิดไขที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในการป้อนและการเกิดการสันดาป จึงต้องใช้ความร้อนในการหลอมเหลวไขและลดความหนืด อีกทั้งยังเกิดการบวมตามจุดต่างๆ จึงไม่ควรใช้กับเครื่องยนต์โดยตรง แต่มีข้อดีคือ ราคาถูก หาได้ง่าย ใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ

2.2.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม เป็นการผสมของน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืช แต่ยังคงมีปัญหาเรื่องการอุดตันของเครื่องยนต์ จึงเหมาะกับเครื่องยนต์ที่มีรอบต่ำหรือเครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม และการประมง

2.2.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เกิดจากการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้น เนื่องจากไม่มีปัญหาต่อเครื่องยนต์ดีเซลทุกชนิด มีข้อดีคือเลขซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือ จุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดดี การสันดาปของเครื่องยนต์สมบูรณ์ ความหนืดคงที่ สามารถใช้กับเครื่องยนต์รอบสูง แต่ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น

2.3 กระบวนการในการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีการคิดค้นเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติของไบโอดีเซลให้ดีขึ้น และสามารถใช้งานได้จริง เริ่มตั้งแต่การใช้โดยตรงและการผสมการทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ [2, 4]

2.3.1 การใช้โดยตรงและการผสม

การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันหมู นำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่น ซึ่งน้ำมันดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมีความหนืดมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาภายในเครื่องยนต์ เช่น เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การเดินเครื่องที่ไม่ต่อเนื่อง เกิดตะกอนและเขม่าบริเวณหัวฉีดของเครื่องยนต์ วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ส่วนแบบผสมคือการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล วิธีการนี้ทำให้มีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [27,28]

2.3.2 การทำไมโครอิมัลชัน

เป็นวิธีการหนึ่งที่แก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีค่าความหนืดลดลง โดยใช้ร่วมกับตัวทำละลายเช่น เมทานอล เอทานอล เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีการสะสมตัวของคราบ (สารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบ ๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้ [18,26]

2.3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส

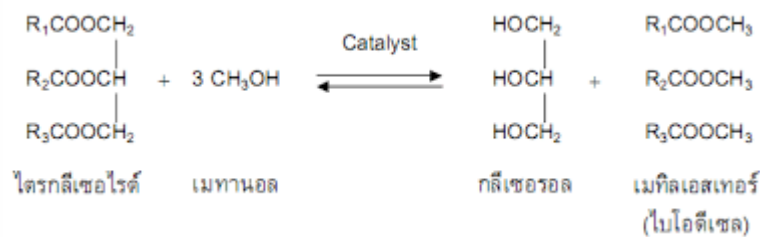
เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 500-850 องศาเซลเซียส หรือบางครั้งใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา จำเป็นต้องมีการจำกัด ออกซิเจนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สารที่ได้จะมีโมเลกุลขนาดเล็กถึงกลาง แต่คุณสมบัติของสารมีความคล้ายคลึงกับน้ำมันเบนซินมากกว่าน้ำมันดีเซล วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

2.3.4 การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต

เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือการนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ในสถานะเหนือวิกฤต ซึ่งจะใช้อุณหภูมิและความดันสูง โดยเมทานอลมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 239 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 8.09 เมกะปาสคาล ส่วนเอทานอลมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 243 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 6.38 เมกะปาสคาล กระบวนการนี้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยและมีความบริสุทธิ์สูง [17, 18]

2.3.5 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เป็นการทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์ ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า สารประกอบเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาทำปฏิกิริยา [2] ปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ [2]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล [18]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ไมโครอิมัลชัน	1. กระบวนการง่ายๆ	1. ความหนืดสูง 2. เสถียรภาพต่ำ
ไพโรไลซิส	1. กระบวนการง่ายๆ 2. ไม่มีมลพิษ	1. ใช้อุณหภูมิและความดันสูง 2. มีความบริสุทธิ์ต่ำ 3. ต้นทุนด้านอุปกรณ์สูง
การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต	1. ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2. ใช้เวลาทำปฏิกิริยาน้อย 3. เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย	1. ใช้อุณหภูมิและความดันสูง 2. ต้นทุนด้านอุปกรณ์สูง 3. ใช้พลังงานสูง
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	1. ต้นทุนการผลิตต่ำ 2. กระบวนการมีประสิทธิภาพ 3. เหมาะสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรม	1. ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ควรมีกรดไขมันอิสระและความชื้นปริมาณต่ำ (หากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบส) 2. เกิดมลพิษทางน้ำเนื่องจากต้องล้างผลิตภัณฑ์ 3. มีปฏิกิริยาข้างเคียง

2.4 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

2.4.1 ไตรกลีเซอไรด์

เป็นสารที่จัดอยู่ในกลุ่มไขมันและน้ำมัน มีคุณสมบัติ คือ เป็นสารที่ไม่มีขั้ว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนมากกว่า 2:1 ไตรกลีเซอไรด์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

2.4.1.1 น้ำมันพืช มีทั้งแบบที่สามารถบริโภคได้และไม่สามารถบริโภคได้ เป็นการใช้ น้ำมันพืชที่มีกำลังการผลิตส่วนเกินในการผลิตไบโอดีเซล คือ มีจำนวนมากพอเกินความต้องการของการบริโภคเป็นอาหาร หาได้จากการหมุนเวียนในธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับพื้นที่และลักษณะภูมิเทศนั้น ๆ เช่น ประเทศมาเลเซียสามารถเพาะปลูกน้ำมันปาล์มได้จำนวนมาก น้ำมันปาล์มส่วนเกินที่มีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังมีพืชชนิดอื่น เช่น เมล็ดถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันรำข้าว น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้ เช่น สบู่ดำ น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น [1, 5]

2.4.1.2 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว (Waste cooking oils) เป็นน้ำมันที่ผ่านการบริโภคแล้ว ถือเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้ผลิตไบโอดีเซล ในปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วน (Fast Food) ที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ทำให้เกิดน้ำมันที่เป็นของเหลือทิ้งจากครัวเรือนเป็นจำนวนมาก ประกอบกับน้ำมันบริโภคที่ผ่านการบริโภคแล้วมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลติกที่เกิดขึ้นระหว่างการทอด หากบริโภคในปริมาณมาก อาจเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งจากสารพิษตกค้างที่ปนเปื้อนมากับอาหาร การนำน้ำมันที่ผ่านการบริโภคแล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น จะช่วยลดของเสียและน้ำมันไบโอดีเซลมีราคาถูกลง เนื่องจากใช้วัตถุดิบที่มีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความชื้นและปริมาณกรดไขมันอิสระ [19] คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้แล้วสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้แล้วสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	น้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหาร	น้ำมันที่ใช้แล้ว
ค่าสะaponิฟิเคชัน (mg of KOH/g of oil)	–	201.5
ค่าความเป็นกรด (mg of KOH/g of oil)	0.5	1.9
กรดไขมันอิสระ (FFA) (%)	0.3	1.0
ปริมาณน้ำ (%)	0.1	2.6 ^a , 0.1 ^b
ความหนาแน่นที่ 15 °C (g/cm ³)	892	902
ความหนืดที่ 40 °C (mm ² /s)	25.6	32.0
สี	สีเหลืองอ่อน	สีเหลืองทอง
องค์ประกอบของกรดไขมัน (% mass)		
- กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	43.9	43.2
- กรดลิโนเลอิก (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	30.4	30.1
- กรดปาล์มมิติก (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	20.3	19.4
- กรดลิโนเลนิก (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)	4.8	4.7
กรดสเตียริก (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	2.9	2.6
มวลโมเลกุลเฉลี่ย	993.5	989.3

^a ปริมาณความชื้นของน้ำมันที่ใช้แล้ว (ไม่มีการปรับสภาพ)

^b ปริมาณความชื้นของน้ำมันที่ใช้แล้วหลังจากปรับสภาพด้วยซิลิกาเจลเพื่อกำจัดน้ำออก

ตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารมีจำนวนมากกว่าน้ำมันที่ใช้แล้ว เนื่องจากโมเลกุลน้ำมัน (ไตรกลีเซอไรด์) ถูกย่อยสลายลงในช่วงขั้นตอนการประกอบอาหารกลายเป็นกรดไขมันอิสระ และค่าสะaponิฟิเคชันของน้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าสูงกว่าน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง

2.4.2 แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล เมทานอลนิยมใช้มากที่สุด เพราะมีสายโซ่คาร์บอนที่สั้น มีราคาถูก ง่ายต่อกระบวนการแยกและมีนิวคลีโอไฟล์สูงกว่าเมื่อเทียบกับเอทานอล [4, 20] ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ชื่อสามัญ	สูตรโมเลกุล	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
เมทานอล	เมทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ OH	64.6
เอทานอล	เอทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ OH	78.2
โพรพานอล	โพรพิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	97.2
บิวทานอล	บิวทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	117.7
เพนทานอล	เพนทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	137.9

แอลกอฮอล์ เป็นของเหลวไม่มีสี เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทั่วไป คือ R-OH มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group ; -OH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน

จุดเดือดของแอลกอฮอล์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้นมีผลให้มวลโมเลกุลมีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้นด้วย แอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงมีทั้งแรงลอนดอนและแรงดึงดูดระหว่างขั้ว ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล นอกจากนี้หมู่ -OH สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแอลกอฮอล์ได้ ทำให้แอลกอฮอล์มีจุดเดือดสูงกว่าแอลเคนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน เนื่องจากแอลเคนเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว จึงมีเฉพาะแรงลอนดอนเท่านั้น [20]

แอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 1-3 อะตอม สามารถละลายน้ำได้ดี เนื่องจากแอลกอฮอล์มีหมู่ -OH ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ จึงทำให้แอลกอฮอล์ละลายน้ำ แต่หมู่ -OH ในแอลกอฮอล์ไม่แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เมื่อมีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น ทำให้การละลายน้ำน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วมีมากขึ้น สภาพขั้วของโมเลกุลจะอ่อนลง ส่งผลให้ละลายน้ำได้น้อยลง [20] สมบัติทางเคมีของแอลกอฮอล์แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีของแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาการเผาไหม้	ปฏิกิริยากับโลหะที่ว่องไว (Active metal)
<p>1. สามารถติดไฟได้ดี ไม่มีเขม่าและควัน ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์</p> $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}(\text{l}) + 3\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	<p>1. แอลกอฮอล์ไม่เกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) จึงไม่แสดงสมบัติเป็นกรด</p> <p>2. ปฏิกิริยากับโลหะที่ว่องไว เช่น โซเดียม (Na) โดยจะเข้าไปแทนที่อะตอมของไฮโดรเจน (H) ในหมู่ -OH ได้แก๊สไฮโดรเจน (H_2)</p> $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}(\text{l}) + 2\text{Na}(\text{g}) \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{ONa}(\text{l}) + \text{H}_2(\text{g})$

แอลกอฮอล์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เมทานอล เป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนน้อยที่สุด และเป็นพิษต่อร่างกาย เมื่อเข้าสู่ร่างกายทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ ตามัว อาจส่งผลกระทบต่อสายตาถึงชีวิต เอทานอลเตรียมได้จากกระบวนการหมักในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ใช้บริโภคในรูปของไวน์ เบียร์ และเหล้า ถ้าบริโภคมากเกินไปเกินความต้องการของร่างกาย จะเกิดอันตรายต่อสุขภาพ ตับ และเกิดการเสพติด ดังนั้นในการเลือกใช้งาน ต้องเลือกให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์ และไม่เป็นอันตราย ในภาคอุตสาหกรรมนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ในการทางการแพทย์นำไปใช้เกี่ยวกับยาบางชนิด ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค หรือเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง เช่น น้ำหอม สบู่ เป็นต้น และที่ใช้ในสุรา หรือของมีเมาทุกชนิด ใช้ในการรีนเรจ การบปปะสังสรรค์ การใช้ประโยชน์ของแอลกอฮอล์แต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การใช้ประโยชน์ของแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ประโยชน์
1. เมทานอล	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ 2. ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก ยา 3. สารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิง
2. เอทานอล	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมการผลิต น้ำหอมและยา 2. ใช้เป็นผสมกับน้ำมันเบนซินออกเทน 91 ในอัตราส่วนเอทานอล 1 ส่วน กับน้ำมันเบนซิน 9 ส่วน เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 3. ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในทางการแพทย์

2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.4.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น หากแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมี แบ่งได้ 2 ชนิด คือกรดและเบส

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นกรด เช่นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น สามารถใช้กับไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระให้เกิดขึ้นได้พร้อมกัน และเกิดน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมาก แต่มีข้อเสียคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่มีความต่อเนื่อง [24, 25]

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นเบส เช่น NaOH, KOH, $NaOCH_3$ และ $KOCH_3$ มีข้อดีคือสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นและใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ต่ำ ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ คือมีความว่องไวต่อปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำ เนื่องจากน้ำสามารถไฮโดรไลซ์เอสเทอร์ให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่ออกและยากต่อการทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ [21]

2.4.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น เช่น CaO, ZrO, ZnO_2 , KNO_3/ZrO_2 , KNO_3/KL zeolite, MoO_3/SiO_2 , MoO_3/ZrO_2 , $WO_3/SiO_2-Al_2O_3$ เป็นต้น [21] มีข้อดีคือ หลังทำปฏิกิริยาสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ผิว [2]

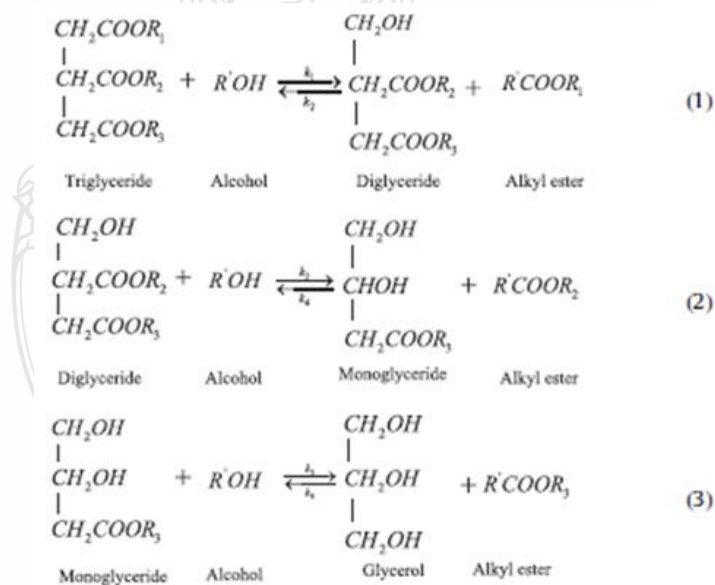
2.4.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์ เอนไซม์ที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล คือ ไลเปส ซึ่งมี 4 สปีชีส์ ได้แก่ *Mucormiehei* (Lipozyme IM60), *Candida 24epacian24a* (SP435), *Geotrichum candidum* และ *Pseudomonas 24epacian* (PS30) [18] เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยามีความบริสุทธิ์สูง กระบวนการผลิตแบบง่าย ใช้พลังงานที่ต่ำ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 35-45 องศาเซลเซียส การแยกเอนไซม์ออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และเอนไซม์มีต้นทุนที่สูง ภายใต้งานที่ง่ายโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน [18, 22] ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	1. มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น 2. มีคุณสมบัติที่เป็นกรดและเบส	1. การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์	1. มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น 2. การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย และนำกลับมาใช้ใหม่ได้	1. มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ผิว 2. ใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยา
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	1. กระบวนการผลิตแบบง่าย 2. ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง	1. ถูกยับยั้งการทำงานเมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

2.5 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible reaction) ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [26]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบไปด้วยปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นไดกลีเซอไรด์

ขั้นตอนที่ 2 ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และ
 ขั้นตอนที่ 3 โมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นกลีเซอรอลและเอสเทอร์
 แต่ละขั้นตอนใช้ไขมันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีโครงสร้างต่างกัน ดังนี้

2.5.1 โมโนกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 1 โมเลกุล

2.5.2 ไตรกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 2 โมเลกุล

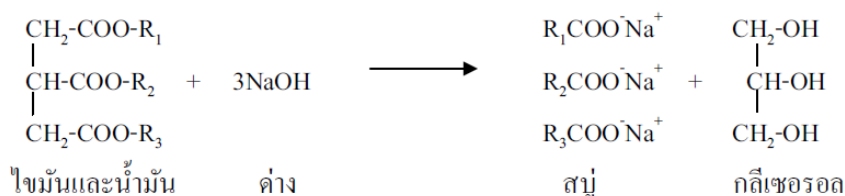
2.5.3 ไตรกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 3 โมเลกุล

[18,26]

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.6.1 ความชื้นและกรดไขมันอิสระ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น KOH, NaOH ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสม เพราะน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือการเกิดสบู่ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง สบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล คือทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้นและมีลักษณะเป็น เจล ทำให้การแยกน้ำมันไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลทำได้ยาก [16] ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดัง รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

นอกจากความชื้นแล้วกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไตรกลีเซอไรด์ก็มีผลต่อการเกิดสบู่ เมื่อใช้เบส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์ที่นำมาใช้ควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เพราะการมีกรดไขมันอิสระที่มากเกินไปจะทำให้ได้ ผลิตภัณฑ์น้อยลง หากมีค่าความเป็นกรดมากกว่า 2 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม จะต้อง ทำการลดค่าความเป็นกรดลง โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้น จึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [9,16]

2.6.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ ฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น สัดส่วนในการทำปฏิกิริยาพบว่าต้องใช้ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลต่อแอลกอฮอล์ 3 โมล [20] ดังนั้นยิ่งใช้อัตราส่วนที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มาก ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 6 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากทำให้เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเตอร์มากถึง 98.0

2.6.3 เวลาและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

การเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาก็คงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยลดความหนืดของน้ำมันและส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและใช้เวลาที่สั้นลง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น หากใช้เมทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 60 – 70 องศาเซลเซียส หรือเอทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 65 – 80 องศาเซลเซียส หากใช้อุณหภูมิที่มากกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ ทำให้แอลกอฮอล์บางส่วนระเหยออกสู่บรรยากาศ เป็นการทำให้สารตั้งต้นลดลง [4] นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลอง เช่น ความดันบรรยากาศ ยังมีผลในการทำปฏิกิริยา

2.6.4 อัตราการกวนผสม

การกวนผสมถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายโอนมวล น้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงจะเกิดและได้เป็นไบโอดีเซล

2.6.5 ปริมาณและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งคุณสมบัติที่เป็นกรดและเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบส เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้อง คุณสมบัติการกัดกร่อนน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด [21] ดังนั้นหากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ภาชนะที่ใช้ต้องมีมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เช่นกัน คือ หากใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณที่ต่ำ การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แสดงดังตารางที่ 2.7 และคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวแปร	ตัวเร่งปฏิกิริยากรด	ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ เอนไซม์
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60-70	55-80	30-40
2. กรดไขมันอิสระ	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
3. ความชื้น	มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อ ปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ ปฏิกิริยา
4. การแยกตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ทำได้ยาก	ทำได้ยาก	ทำได้ง่าย
5. ความบริสุทธิ์ของ เมทิลเอสเทอร์	ทำการล้างผลิตภัณฑ์	ทำการล้างผลิตภัณฑ์	ไม่จำเป็นต้องล้าง ผลิตภัณฑ์
6. ต้นทุน	ต้นทุนไม่สูง	ต้นทุนไม่สูง	ต้นทุนสูง

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชื่อตาม IUPAC	Sodium hydroxide
สูตรเคมี	NaOH
มวลโมเลกุล	39.997 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	318 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	1390 องศาเซลเซียส

2.7 มาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

มีน้ำมันพืชหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นไบโอดีเซลที่ได้ควรมีเสถียรภาพสูง และมีคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิง จะต้องได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ เช่น ในสหรัฐอเมริกาไบโอดีเซลต้องได้มาตรฐานตาม ASTM D6751 [23] ในสหภาพยุโรปต้องได้มาตรฐาน EN 14214 [2] มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกาแสดงดังตารางที่ 2.3 และมาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรปแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกา [23]

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด
ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม (ppm)	EN14538	ไม่สูงกว่า 5.0
จุดวาบไฟวิธีถ้วยปิด (°C)	D93	ไม่ต่ำกว่า 93
ปริมาณแอลกอฮอล์ (อย่างไรอย่างหนึ่ง)		
1. ปริมาณเมทานอล (%mass)	EN14110	ไม่สูงกว่า 0.2
2. จุดวาบไฟ (°C)	D93	ไม่สูงกว่า 130
น้ำและตะกอนดิน (%vol)	D2790	ไม่สูงกว่า 0.05
ความหนืดเชิงกลที่ 40 °C (mm ² /sec)	D445	1.9-6.0
เถ้าที่มีกำมะถัน (%mass)	D874	ไม่สูงกว่า 0.02
กำมะถัน		
1. S 15 Grade (%mass ppm)	D5453	ไม่สูงกว่า 0.0015 (15)
2. S 500 Grade (%mass ppm)	D5453	ไม่สูงกว่า 0.05 (500)
การกัดกร่อนของทองแดง	D130	ไม่สูงกว่า 3.0
เลขซีเทน	D613	ไม่ต่ำกว่า 47
จุดชุนตัว (°C)	D2500	-
กากคาร์บอน (ทดสอบ 100 ตัวอย่าง) (% mass)	D4530	ไม่สูงกว่า 0.05
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	D664	ไม่สูงกว่า 0.5
ปริมาณกลีเซอรินอิสระ (% mass)	D6584	ไม่สูงกว่า 0.02
ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด (% mass)	D6584	ไม่สูงกว่า 0.240

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกา (ต่อ)

ปริมาณโพแทสเซียม (% mass)	D4951	ไม่สูงกว่า 0.001
อุณหภูมิการกลั่น (°C)	D1160	ไม่สูงกว่า 360
ปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียม (ppm)	EN14538	ไม่สูงกว่า 5.0
เสถียรภาพการออกซิไดซ์ (Hours)	EN15751	ไม่ต่ำกว่า 3.00
การกรองขณะเย็น (Seconds)	D7501	ไม่สูงกว่า 360
สำหรับใช้ในอุณหภูมิต่ำกว่า -12 °C (Seconds)	D7501	ไม่สูงกว่า 200

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรป [2]

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด DIN EN 14214	
		ไม่ต่ำกว่า	ไม่สูงกว่า
1. เอสเทอร์ (% m/m)	DIN EN 14103	96.5	-
2. ความหนาแน่นที่ 5 °C (kg/m ³)	DIN EN ISO 12185	860	900
3. ความหนืดที่ 40 °C (mm ² /s)	DIN EN ISO 3104	3.5	5.0
4. จุดวาบไฟ (°C)	DIN EN ISO 36	120	-
5. จุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ (°C)	DIN EN 116	-	-
6. กำมะถัน (mg/kg)	DIN EN ISO 20884	-	10.0
7. สารอินทรีย์ (10%) (% m/m)	DIN EN ISO 10370	-	0.3
8. ค่าออกเทน	IP 498	51.0	-
9. เถ้ากำมะถัน (% m/m)	ISO 3987	-	0.02
10. น้ำ (mg/kg)	DIN EN ISO 12937	-	500
11. การปนเปื้อนทั้งหมด (mg/kg)	DIN EN ISO 2160	-	24
12. การกัดกร่อนของทองแดง (grad corrosion)	DIN EN ISO 2160	1	1

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรป (ต่อ)

13. เสถียรภาพการออกซิไดซ์ 110 °C (h)	DIN EN ISO 14112	6.0	-
14. ความเป็นกรด (mg KOH/g)	DIN EN ISO 14104	-	0.5
15. เลขไอโอดีน (g iod/100 g)	DIN EN ISO 14111	-	120
16. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	DIN EN ISO 14103	-	12.0
17. เมทานอล (% m/m)	DIN EN 14110	-	0.20
18. ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ (% m/m)		-	0.020
19. ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ (% m/m)		-	0.80
20. ปริมาณไดกลีเซอไรด์ (% m/m)	DIN EN ISO 14105	-	0.20
21. ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (% m/m)		-	0.20
22. ปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด (% m/m)		-	0.25
23. ฟอสฟอรัส	DIN EN ISO 14107	-	10.0
24. โลหะ ประเภทที่ 1 (โซเดียมและ โพแทสเซียม)		-	5.0
25. โลหะ ประเภทที่ 2 (แคลเซียมและ แมกนีเซียม)	DIN EN ISO 14538	-	5.0

2.8 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล แต่ยังมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่ต่างกัน ซึ่งมีทั้งข้อได้เปรียบ และข้อเสียเปรียบ ดังนี้

2.8.1 เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้กำมะถันจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และกรดซัลฟิวริก เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด

2.8.2 ไม่มีสารประกอบประเภอะโรมาติก (Aromatic compound) แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างร้อยละ 10-12 ทำให้ไอเสียที่เกิดขึ้นมีฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งน้ำมันดีเซลไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง แต่มีองค์ประกอบของสารอะโรมาติกร้อยละ 20-40

2.8.3 มีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

2.8.4 มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ในขณะที่น้ำมัน

2.8.5 ดีเซลไม่มีพันธะคู่ จึงทำให้ไม่มีความคงตัว เกิดออกซิเดชันได้รวดเร็ว และมีระยะเวลาเก็บรักษาหลังการผลิตน้อย

2.8.6 มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซล	น้ำมันดีเซล	วิธีทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะที่ 15:15 °C	0.8830	0.8380	ASTM D1298
สี	6.0	1.0	ASTM D1500
จุดขุ่นตัว (°C)	0.0	NA	ASTM D2500
จุดไหลเท	0.0	-3.0	ASTM D97
จุดวาบไฟ	109	75.0	ASTM D93
ดัชนีหักเห	1.45	NA	-
ค่าความร้อนโดยรวม (kJ / kg)	39305	43730	ASTM D240
ความหนืดเชิงกลที่ 20 °C (cSt)	15.09	NA	ASTM D445
สารตกค้างคาร์บอน (wt%)	0.30	NA	ASTM D189
กำมะถันทั้งหมด (wt%)	0.18	0.95	ASTM D1266

2.9 ประโยชน์จากการใช้ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่ปลอดภัยและลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าดีเซล เนื่องจากมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซล และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ในขณะที่ดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ยั่งยืน เพราะมีปริมาณความต้องการสูง จากที่กล่าวมาข้างต้นไบโอดีเซลมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

2.9.1 ทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าน้ำมัน โดยการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงต้องเสียภาษีการนำเข้า

2.9.2 ช่วยพยุงราคาผลผลิตผลการเกษตร มีส่วนช่วยผลักดันให้เศรษฐกิจของชาติฟื้นตัวได้รวดเร็ว ถ้าหากปลูกพืชที่ผลิตได้ทั้งอาหาร น้ำมันและแอลกอฮอล์ ซึ่งจะช่วยผลักดันให้มีแหล่งตลาดขนาดใหญ่สำหรับผลิตผลทางการเกษตร

2.9.3 ลดมลภาวะ เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ง่าย ลดการปล่อยก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก

2.9.4 สร้างความมั่นคงแก่ประเทศชาติ ในอนาคตหากไม่มีการลดการใช้น้ำมันดีเซล จะทำให้น้ำมันดีเซลหมดไปและมีราคาแพง หากมีการคิดค้นและพัฒนาพลังงานทดแทนเองได้ ช่วยสร้างความมั่นคงและไม่ต้องพึ่งพาความอยู่รอดจากต่างประเทศ

2.9.5 เกิดการส่งเสริมและเพิ่มพื้นที่การเพาะปลูก เป็นการเพิ่มพื้นที่การเพาะปลูกพืช เช่น มันสำปะหลัง ปาล์ม มะพร้าว ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

2.10 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

สมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆ ข้อมูลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ข้อมูลจากการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และแบบต่อเนื่อง วิธีแรกนั้นนิยมใช้กับปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อเดียว โดยทำการวัดข้อมูล เช่น ความดัน ปริมาตร หรือความเข้มข้นเป็นต้นที่เวลาต่างๆ สำหรับวิธีที่สองนั้นเป็นการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเครื่องปฏิกรณ์เคมีนั้นดำเนินงานอยู่ในสภาวะคงตัว โดยทำการวัดความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการป้อนสารตั้งต้นต่างๆกัน

2.10.1 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากข้อมูลการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะ

ข้อมูลจากการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่จำเป็นสำหรับการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การวัดความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ เช่น ความเข้มข้น ปริมาตร หรือความเข้มข้นที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ วิธีวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแบ่งได้หลายวิธีโดยในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการอินทิเกรต

วิธีการอินทิเกรต ทำโดยการสมมติอันดับของปฏิกิริยาแล้วจึงทำการอินทิเกรตสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้ และนำมาจัดรูปแบบสมการให้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จากนั้นให้นำผลการทดลองมาวาดกราฟตามความสัมพันธ์ที่ได้ เพื่อตรวจสอบดูว่าข้อมูลที่ได้อสอดคล้องกับที่สมมติหรือไม่ ถ้าไม่สอดคล้อง ให้ทำการสมมติอันดับใหม่และดำเนินการตรวจสอบด้วยวิธีเดิม วิธีนี้โดยทั่วไปเหมาะสมกับกรณีที่ทราบค่าอันดับของปฏิกิริยาอยู่แล้ว เพียงแต่ต้องการหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา เช่น ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ ถ้าอันดับปฏิกิริยาเท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$\frac{dC_A}{dt} = r_A = -kC_A \quad (2.1)$$

ดังนั้น เมื่อเวลา $t = 0$; $C_A = C_{A0}$ จะได้ว่า

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (2.2)$$

ดังนั้น ถ้าอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ 1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{C_{A0}}{C_A}$ กับ t เป็นเส้นตรง

ตารางที่ 2.12 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ

อันดับ	ปฏิกิริยา	สมการ	ความสัมพันธ์
0	$A \rightarrow B$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_0$	$C_A = C_{A0} - kt \quad (2.3)$
1	$A \rightarrow B$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A$	$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k_1 t \quad (2.2)$
2	$A \rightarrow P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_2 C_A^2$	$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k_2 t \quad (2.4)$

2.10.2 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากข้อมูลการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ที่ดำเนินงานแบบต่อเนื่อง ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) หรือเครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อไหล (Plug flow reactor, PFR) การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของสารผลิตภัณฑ์เมื่อใช้สายป้อนที่สภาวะต่าง ๆ กัน ในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์เคมีชนิดท่อไหล มักพบว่ามีความแตกต่างของ

สภาวะการดำเนินการตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น อุณหภูมิหรือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการตัดแปลง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนน้อยมาบรรจุเป็นชั้นบางๆ แทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมาก โดยเรียกว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบดิฟเฟอเรนเชียล เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นในปริมาณน้อย ทำให้สภาวะในเครื่องปฏิกรณ์ค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงสามารถสมมติว่า สภาวะการดำเนินงานเหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.5

$$-r_A = \frac{F_{A0}(X_A)}{V_{CSTR}} \quad (2.5)$$

2.11 การออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง

เป็นการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) ซึ่งรวบรวมเทคนิคทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด [24] ในทางปฏิบัติมักจะไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริง ระหว่างตัวแปรผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้น จึงต้องมีการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าว และพบว่ามีนิยมนิยมใช้ตัวแบบกำลังสอง (Second order model) เพราะมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น ๆ ซึ่งวิธีการที่นิยมสำหรับการออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง มีดังนี้

2.11.1 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สามระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นการประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง

2.11.2 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับวิเคราะห์ในกรณีที่ต้องการสมการเส้นโค้ง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับโดยที่มีการเพิ่มการทดลองที่แนวแกน (Axial Points) ขึ้นมา ทำให้วิเคราะห์สมการกำลังสองได้ [25] สำหรับโปรแกรม Minitab จะมีฟังก์ชันสำหรับช่วยในการออกแบบแนวแกน ได้ 3 วิธี คือ

2.11.2.1 Default คือการกำหนดจุดแนวแกนออกไป มีค่าเท่ากับ $n^{1/4}$ (n คือ จำนวนการทดลองที่ไม่รวมตำแหน่งค่ากลางและการทำซ้ำ)

2.11.2.2 Face Center คือการเปลี่ยนจุดแนวแกนให้มาอยู่ที่ระดับ -1 หรือ +1 ทำให้สะดวกในการทดลอง

2.11.2.3 Custom คือ การออกแบบจุดแนวแกนตามผู้ใช้งานกำหนดเอง เพื่อความเหมาะสมในการทดลอง

2.11.3 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เป็นการออกแบบที่มีการทดลอง 3 ระดับ คือ สูง กลาง และต่ำ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับที่มีการกำหนดตำแหน่งค่ากลาง แต่จะไม่มี การทดลองที่ตำแหน่งมุม โดยรูปแบบสมการเป็นสมการกำลังสอง [26]

2.12 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการทำให้อส่วนผสมที่เป็นของเหลวผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้หลักการในการอัดด้วยความดันสูง ทำให้ของเหลวผ่านช่องแคบ ที่เรียกว่า วาล์วโฮโมจีไนซ์ (Homogenization valve) ด้วยความเร็วสูงมาก พลังงานจากแรงดัน ทำให้เกิดแรงเฉือน (shear) แรงกระแทกและการแตกตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก (cavitation) อย่างรุนแรง ทำให้อุณหภูมิของเหลวมีขนาดเล็กลงและเกิดการกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน [27, 28] ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบเชิงกล อัลตราโซนิคและแรงดัน

2.12.1 แบบเชิงกล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบโรเตอร์สเตเตอร์และแบบใบพัด

2.12.1 แบบโรเตอร์สเตเตอร์ ใช้ในการเกิดระดับของฟองอากาศ ฟองอากาศถูกสร้างขึ้นมาขณะที่ของเหลวไหลผ่านของแข็งที่มีอัตราความเร็วสูง ซึ่งโพรบจะสั่นสะเทือนในอัตราความเร็วสูง

2.12.2 แบบใบพัด มีประสิทธิภาพน้อยกว่าแบบสเตเตอร์โรเตอร์ ถูกนำมาใช้เป็นเวลาหลายปีในการผลิตเนยแข็ง สารสกัดจากพืชและสัตว์ สามารถขับเคลื่อนที่ความเร็ว 6,000 ถึง 50,000 รอบต่อนาที มีอุปกรณ์เสริม คือ แจ็คเก็ตระบายความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิและภาชนะบรรจุปิด

2.12.2 แบบอัลตราโซนิค เป็นการสร้างคลื่นอัลตราโซนิคที่รุนแรงในของเหลว ทำให้อส่วนผสมกันในสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการก่อตัวอย่างรวดเร็วของไมโครฟอง จะก่อตัวขึ้นจนกว่าจะถึงขนาดที่คลื่นเรโซแนนซ์สั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและในที่สุดก็ยุบตัวลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าฟองอากาศ การระเบิดของฟองในเฟสไอทำให้เกิดคลื่นกระแทกที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสลายพันธะโควาเลนต์ ปัจจัยที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน รูปทรงและขนาดความจุ

2.12.3 แบบแรงดัน หลักการทำงาน คือ การบังคับให้สารแขวนลอยผ่านช่องทางแคบภายใต้ความดันขึ้น พารามิเตอร์ในการดำเนินงานให้ผลที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ

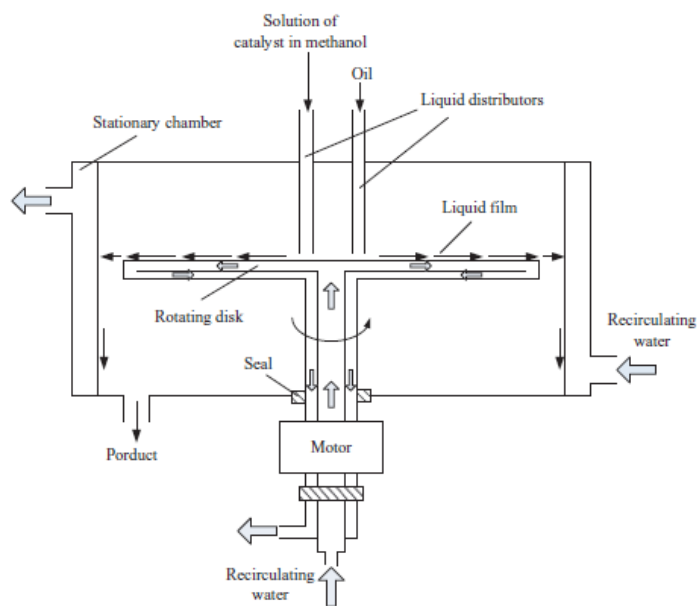
วาล์ว การออกแบบการกระแทกและอัตราการไหล นิยมใช้ในการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน หรือออกแบบ เพื่อผลิตอิมัลชันในอุตสาหกรรมอาหารและยา

2.13 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

ข้อจำกัดของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือความต้านทานการถ่ายโอนมวลระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เนื่องจากสาร 2 ชนิดนี้ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ดังนั้นจะใช้เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเป็นเวลานาน ข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้ โดยใช้วิธีการผสมชั้นรุนแรงหรือพัฒนาเทคโนโลยีให้มี ประสิทธิภาพในการผสมสูง และเกิดการถ่ายโอนมวลได้ดี [5, 7]

ในการนำไปใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ และค่าพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมในการทำงาน เช่น อัตราส่วนของสารที่ป้อนเข้า ซึ่งมีผลต่อความรุนแรง ของปฏิกิริยา ประเภทและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิของ ปฏิกิริยา อัตราการไหลรวมสารป้อน ความเร็วรอบของการหมุน ความหนืดของสาร เป็นต้น

ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ผลผลิต โครงสร้างของ เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน แสดงดังรูปที่ 2.4 ภายในประกอบด้วยจานหมุน จานหมุนนี้จะถูก ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่บริเวณจุดศูนย์กลางของจานหมุน จะใช้แรงเหวี่ยงหนี ศูนย์กลางโดยการหมุนของแผ่นดิสก์ ทำให้ของเหลวที่อยู่บนศูนย์กลางจานหมุนกระจายออกไปด้านนอก ภายใต้อิทธิพลของแรงเหวี่ยงอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเหลวมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆอยู่บนจานหมุน [8] ส่งผลให้เพิ่ม ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น [29] ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไป ประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ เช่นผลิตไบโอดีเซล [8, 30] การสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโน [10] การตกผลึก [12] การสังเคราะห์พอลิเมอร์สไตรีน [14] เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน [8]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.14.1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป

Madhu Agarwal และคณะ [31] ทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ KOH และ KOH/Alumina สำหรับใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับเมทานอล ผลการทดลองพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 98.2 และเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Alumina ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:9 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้ 96.8 จากนั้นทดสอบการนำ KOH/Alumina มาใช้ซ้ำ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ได้ 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 3 ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 83.0

Abdullah และคณะ [32] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกากตะกอนของน้ำมันปาล์ม (palm oil sludge) กับเมทานอล ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:20 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 6.0 โดย

น้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที และอัตราการกวนผสม 300 รอบต่อนาที และสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ถึง 2.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และอัตราการกวนผสม 300 รอบต่อนาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ได้ 93.00 ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่ามีความหนาแน่น 0.864 กรัมต่อมิลลิลิตร และความหนืดเชิงกล 12.8 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

Dian Celante และคณะ [33] ทำการศึกษาผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองกับไดเมทิลคาร์บอเนต ใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อไดเมทิลคาร์บอเนต และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อไดเมทิลคาร์บอเนตต่อเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 15 นาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 99.0

2.14.2 เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่นำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น เครื่องอัลตราโซนิค ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้เครื่องไมโครเวฟยังได้รับความนิยม เนื่องจากเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที แต่ข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดคือ มีค่าใช้จ่ายเรื่องการลงทุนที่สูงมาก เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.5

Dipak D. Pukale และคณะ [3] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยคลื่นอัลตราโซนิค เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด ดังนี้ K_3PO_4 , Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 และ KH_2PO_4 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา K_3PO_4 ร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ใช้ความถี่คงที่ คือ 11 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 92.0

M. Maghami และคณะ [34] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตทอดปลาและใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลของเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกกำลัง 400 วัตต์ กับวิธีทั่วไป ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ความเข้มข้นของเอนไซม์ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 79.6 และที่สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยใช้วิธีการผลิตแบบวิธีทั่วไป ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 78.0 จะเห็นว่าการใช้กำลังอัลตราโซนิกช่วยเพิ่มร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์

Guanyi Chen และคณะ [35] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เตรียมจากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก พบว่าเกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึง 92.7 ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ กำลังอัลตราโซนิก 60% (120 วัตต์) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:9 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ทำการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 8 ครั้ง

Kang-Shin Chen และคณะ [36] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนแบบธรรมดา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ CH_3OH และ NaOH สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ใช้ CH_3OH และ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 กำลังของไมโครเวฟ 750 วัตต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 97.9 และ 96.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เครื่องปฏิกรณ์	ไตรกลีเซอไรด์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์	อ้างอิง
เครื่องอัลตราโซนิค ความถี่ 11 กิโลเฮิร์ตซ์	น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	3% wt K_3PO_4	60	90	92.00	D.D. Pukale และคณะ [3]
เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิค ความถี่ 28, 40 และ 70 กิโลเฮิร์ตซ์	น้ำมันปาล์ม	1.0% wt KOH	60	15	93.00	S. Manickam และคณะ [37]
เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ 750 วัตต์	น้ำมันปาล์ม	0.75 %wt CH_3OH	60	3	99.50	Y.-C. Lin และคณะ [16]
เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ	น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	0.75 %wt CH_3OH	60	5	98.87	N. Azcan และคณะ [6]
เครื่องโฮโมจีไนเซอ์	น้ำมันถั่วเหลือง	3.0% wt CaO	50	5	84.00	S. Joshi และคณะ [5]
เครื่องโฮโมจีไนเซอ์	น้ำมันที่ใช้แล้ว	3.0% wt KOH	50	120	92.3	A.V. Mohod และคณะ [27]

2.14.3 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

Kai-Jie Chen และคณะ [8] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล และผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ แปรผันตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง และแปรผันตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์ร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิในการปฏิกิริยาเท่ากับ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส อัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 300 ถึง 1200 มิลลิลิตรต่อนาที และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 250 ถึง 2500 รอบต่อนาที สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษา คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหลรวมสารป้อน 773 มิลลิลิตรต่อนาทีและความเร็วรอบของจานหมุน 2400 รอบต่อนาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ได้ 96.9 โดยใช้เวลา 2 ถึง 3 วินาที และมีอัตราการผลิต 1.86 โมลต่อนาที

Z. Qiu และคณะ [25] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันคาโนลากับเมทานอล และใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนที่มีจานหมุน 2 แผ่น ตั้งอยู่คู่และขนานกันซึ่งมีช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างแผ่น จานหมุนด้านบนตั้งอยู่บนเพลลาหมุนในเครื่องปฏิกรณ์ขณะที่แผ่นล่างอยู่นิ่ง สารตั้งต้นผสมกันระหว่างจุดศูนย์กลางของช่องว่างระหว่างจานหมุนทั้งสอง ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบของจานหมุน 1000 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันคาโนลา ช่องว่างระหว่างจานหมุนทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 80.0 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส

2.14.4 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนกับกระบวนการอื่นๆ

Somaieh Mohammadi และคณะ [10] ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ผ่านกระบวนการโซลเจล ศึกษาผลของความเร็วยรอบของจานหมุน อัตราส่วนของน้ำต่อไทเทเนียมเตตระไฮโดรพอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$) พื้นผิวของจานหมุน 2 ชนิด คือพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ และระยะห่างของการป้อนสารตั้งต้น ผลการทดลองพบว่าการใช้ความเร็วรอบของจานหมุน อัตราการไหล และอัตราส่วนของน้ำต่อไทเทเนียมเตตระไฮโดรพอกไซด์ที่สูง ทำให้เกิดผลผลิตจำนวนมาก อนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ การใช้จานหมุนที่มีพื้นผิวขรุขระอนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากกว่าการใช้จานหมุนที่มีพื้นผิวเรียบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamics) ทำให้ฟิล์มมีขนาดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการป้อนสารตั้งต้นที่

จุดศูนย์กลาง ให้อนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดแรงเฉือนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสามารถผลิตอนุภาคนาโนที่มีอนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอได้จำนวนมาก

L. M. Cafiero และคณะ [12] ทำการตกตะกอนแบบเตรียมซิลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยพื้นผิวจานหมุนมีลักษณะเรียบ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เมตร ใช้สารละลายแบบเตรียมซิลเฟตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 200 ถึง 1000 รอบต่อนาที อนุภาคของแบบเตรียมซิลเฟตมีขนาดลดลง จาก 3.0 ไมโครเมตร เหลือเพียง 0.7 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า ใช้ความเร็วรอบของจานหมุน 1000 รอบต่อนาที อนุภาคมีขนาด 0.5 ถึง 1.0 ไมโครเมตร



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติไม่เพียงพอต่อการใช้งาน นำไปสู่การเพิ่มมลพิษทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะและโรงงานไฟฟ้า ดังนั้นต้องมีการหาพลังงานทางเลือกเพื่อให้มีเพียงพอต่อการใช้งานและลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงจากชีวมวล (Biomass) เมื่อเผาไหม้แล้วไม่ก่อให้เกิดก๊าซมลพิษ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegradability) ปริมาณเลขซีเทนสูง จุดวาบไฟสูงและมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล [16]

2.1 ความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล หมายถึง สารประกอบโมโนแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง $C_{14}-C_{24}$ (C_{15-25} H_{28-48} O_2) มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันจากพืช หรือไขมันจากสัตว์ [2]

2.2 ประเภทของไบโอดีเซล

การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถแบ่งตามประเภทของการนำมาใช้ได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันหมู สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่ม เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์แตกต่างกับน้ำมันดีเซลมาก โดยเฉพาะความหนืดของน้ำมันพืชสูงกว่าน้ำมันดีเซล และเกิดไขที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในการป้อนและการเกิดการสันดาป จึงต้องใช้ความร้อนในการหลอมเหลวไขและลดความหนืด อีกทั้งยังเกิดการบวมตามจุดต่างๆ จึงไม่ควรใช้กับเครื่องยนต์โดยตรง แต่มีข้อดีคือ ราคาถูก หาได้ง่าย ใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ

2.2.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม เป็นการผสมของน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืช แต่ยังคงมีปัญหาเรื่องการอุดตันของเครื่องยนต์ จึงเหมาะกับเครื่องยนต์ที่มีรอบต่ำหรือเครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม และการประมง

2.2.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เกิดจากการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้น เนื่องจากไม่มีปัญหาต่อเครื่องยนต์ดีเซลทุกชนิด มีข้อดีคือเลขซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือ จุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดดี การสันดาปของเครื่องยนต์สมบูรณ์ ความหนืดคงที่ สามารถใช้กับเครื่องยนต์รอบสูง แต่ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น

2.3 กระบวนการในการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีการคิดค้นเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติของไบโอดีเซลให้ดีขึ้น และสามารถใช้งานได้จริง เริ่มตั้งแต่การใช้โดยตรงและการผสมการทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ [2, 4]

2.3.1 การใช้โดยตรงและการผสม

การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันหมู นำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่น ซึ่งน้ำมันดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมีความหนืดมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาภายในเครื่องยนต์ เช่น เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การเดินเครื่องที่ไม่ต่อเนื่อง เกิดตะกอนและเขม่าบริเวณหัวฉีดของเครื่องยนต์ วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ส่วนแบบผสมคือการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล วิธีการนี้ทำให้มีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [27,28]

2.3.2 การทำไมโครอิมัลชัน

เป็นวิธีการหนึ่งที่แก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีค่าความหนืดลดลง โดยใช้ร่วมกับตัวทำละลายเช่น เมทานอล เอทานอล เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีการสะสมตัวของคราบ (สารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบ ๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้ [18,26]

2.3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส

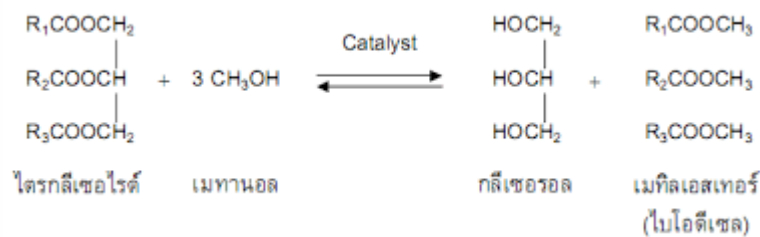
เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 500-850 องศาเซลเซียส หรือบางครั้งใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา จำเป็นต้องมีการจำกัด ออกซิเจนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สารที่ได้จะมีโมเลกุลขนาดเล็กถึงกลาง แต่คุณสมบัติของสารมีความคล้ายคลึงกับน้ำมันเบนซินมากกว่าน้ำมันดีเซล วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

2.3.4 การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต

เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือการนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ในสถานะเหนือวิกฤต ซึ่งจะใช้อุณหภูมิและความดันสูง โดยเมทานอลมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 239 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 8.09 เมกะปาสคาล ส่วนเอทานอลมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 243 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 6.38 เมกะปาสคาล กระบวนการนี้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยและมีความบริสุทธิ์สูง [17, 18]

2.3.5 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เป็นการทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์ ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า สารประกอบเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาทำปฏิกิริยา [2] ปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ [2]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล [18]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ไมโครอิมัลชัน	1. กระบวนการง่ายๆ	1. ความหนืดสูง 2. เสถียรภาพต่ำ
ไพโรไลซิส	1. กระบวนการง่ายๆ 2. ไม่มีมลพิษ	1. ใช้อุณหภูมิและความดันสูง 2. มีความบริสุทธิ์ต่ำ 3. ต้นทุนด้านอุปกรณ์สูง
การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต	1. ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2. ใช้เวลาทำปฏิกิริยาน้อย 3. เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย	1. ใช้อุณหภูมิและความดันสูง 2. ต้นทุนด้านอุปกรณ์สูง 3. ใช้พลังงานสูง
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	1. ต้นทุนการผลิตต่ำ 2. กระบวนการมีประสิทธิภาพ 3. เหมาะสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรม	1. ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ควรมีกรดไขมันอิสระและความชื้นปริมาณต่ำ (หากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบส) 2. เกิดมลพิษทางน้ำเนื่องจากต้องล้างผลิตภัณฑ์ 3. มีปฏิกิริยาข้างเคียง

2.4 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

2.4.1 ไตรกลีเซอไรด์

เป็นสารที่จัดอยู่ในกลุ่มไขมันและน้ำมัน มีคุณสมบัติ คือ เป็นสารที่ไม่มีขั้ว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนมากกว่า 2:1 ไตรกลีเซอไรด์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

2.4.1.1 น้ำมันพืช มีทั้งแบบที่สามารถบริโภคได้และไม่สามารถบริโภคได้ เป็นการใช้ น้ำมันพืชที่มีกำลังการผลิตส่วนเกินในการผลิตไบโอดีเซล คือ มีจำนวนมากพอเกินความต้องการของการบริโภคเป็นอาหาร หาได้จากการหมุนเวียนในธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับพื้นที่และลักษณะภูมิเทศนั้น ๆ เช่น ประเทศมาเลเซียสามารถเพาะปลูกน้ำมันปาล์มได้จำนวนมาก น้ำมันปาล์มส่วนเกินที่มีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังมีพืชชนิดอื่น เช่น เมล็ดถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันรำข้าว น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้ เช่น สบู่ดำ น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น [1, 5]

2.4.1.2 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว (Waste cooking oils) เป็นน้ำมันที่ผ่านการบริโภคแล้ว ถือเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้ผลิตไบโอดีเซล ในปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วน (Fast Food) ที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ทำให้เกิดน้ำมันที่เป็นของเหลือทิ้งจากครัวเรือนเป็นจำนวนมาก ประกอบกับน้ำมันบริโภคที่ผ่านการบริโภคแล้วมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลติกที่เกิดขึ้นระหว่างการทอด หากบริโภคในปริมาณมาก อาจเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งจากสารพิษตกค้างที่ปนเปื้อนมากับอาหาร การนำน้ำมันที่ผ่านการบริโภคแล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น จะช่วยลดของเสียและน้ำมันไบโอดีเซลมีราคาถูกลง เนื่องจากใช้วัตถุดิบที่มีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความชื้นและปริมาณกรดไขมันอิสระ [19] คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้แล้วสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้แล้วสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	น้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหาร	น้ำมันที่ใช้แล้ว
ค่าสะaponิฟิเคชัน (mg of KOH/g of oil)	–	201.5
ค่าความเป็นกรด (mg of KOH/g of oil)	0.5	1.9
กรดไขมันอิสระ (FFA) (%)	0.3	1.0
ปริมาณน้ำ (%)	0.1	2.6 ^a , 0.1 ^b
ความหนาแน่นที่ 15 °C (g/cm ³)	892	902
ความหนืดที่ 40 °C (mm ² /s)	25.6	32.0
สี	สีเหลืองอ่อน	สีเหลืองทอง
องค์ประกอบของกรดไขมัน (% mass)		
- กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	43.9	43.2
- กรดลิโนเลอิก (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	30.4	30.1
- กรดปาล์มมิติก (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	20.3	19.4
- กรดลิโนเลนิก (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)	4.8	4.7
กรดสเตียริก (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	2.9	2.6
มวลโมเลกุลเฉลี่ย	993.5	989.3

^a ปริมาณความชื้นของน้ำมันที่ใช้แล้ว (ไม่มีการปรับสภาพ)

^b ปริมาณความชื้นของน้ำมันที่ใช้แล้วหลังจากปรับสภาพด้วยซิลิกาเจลเพื่อกำจัดน้ำออก

ตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหารมีจำนวนมากกว่าน้ำมันที่ใช้แล้ว เนื่องจากโมเลกุลน้ำมัน (ไตรกลีเซอไรด์) ถูกย่อยสลายลงในช่วงขั้นตอนการประกอบอาหารกลายเป็นกรดไขมันอิสระ และค่าสเปกโตรนิฟิเคชันของน้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าสูงกว่าน้ำมันพืชที่ใช้ปรุงอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง

2.4.2 แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล เมทานอลนิยมใช้มากที่สุด เพราะมีสายโซ่คาร์บอนที่สั้น มีราคาถูก ง่ายต่อกระบวนการแยกและมีนิวคลีโอไฟล์สูงกว่าเมื่อเทียบกับเอทานอล [4, 20] ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ชื่อสามัญ	สูตรโมเลกุล	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
เมทานอล	เมทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ OH	64.6
เอทานอล	เอทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ OH	78.2
โพรพานอล	โพรพิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	97.2
บิวทานอล	บิวทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	117.7
เพนทานอล	เพนทิลแอลกอฮอล์	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	137.9

แอลกอฮอล์ เป็นของเหลวไม่มีสี เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทั่วไป คือ R-OH มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group ; -OH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน

จุดเดือดของแอลกอฮอล์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้นมีผลให้มวลโมเลกุลมีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้นด้วย แอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงมีทั้งแรงลอนดอนและแรงดึงดูดระหว่างขั้ว ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล นอกจากนี้หมู่ -OH สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแอลกอฮอล์ได้ ทำให้แอลกอฮอล์มีจุดเดือดสูงกว่าแอลเคนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน เนื่องจากแอลเคนเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว จึงมีเฉพาะแรงลอนดอนเท่านั้น [20]

แอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 1-3 อะตอม สามารถละลายน้ำได้ดี เนื่องจากแอลกอฮอล์มีหมู่ -OH ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ จึงทำให้แอลกอฮอล์ละลายน้ำ แต่หมู่ -OH ในแอลกอฮอล์ไม่แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เมื่อมีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น ทำให้การละลายน้ำน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วมีมากขึ้น สภาพขั้วของโมเลกุลจะอ่อนลง ส่งผลให้ละลายน้ำได้น้อยลง [20] สมบัติทางเคมีของแอลกอฮอล์แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีของแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาการเผาไหม้	ปฏิกิริยากับโลหะที่ว่องไว (Active metal)
<p>1. สามารถติดไฟได้ดี ไม่มีเขม่าและควัน ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์</p> $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}(\text{l}) + 3\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	<p>1. แอลกอฮอล์ไม่เกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) จึงไม่แสดงสมบัติเป็นกรด</p> <p>2. ปฏิกิริยากับโลหะที่ว่องไว เช่น โซเดียม (Na) โดยจะเข้าไปแทนที่อะตอมของไฮโดรเจน (H) ในหมู่ -OH ได้แก๊สไฮโดรเจน (H_2)</p> $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}(\text{l}) + 2\text{Na}(\text{g}) \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{ONa}(\text{l}) + \text{H}_2(\text{g})$

แอลกอฮอล์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น เมทานอล เป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนน้อยที่สุด และเป็นพิษต่อร่างกาย เมื่อเข้าสู่ร่างกายทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ ตามัว อาจส่งผลกระทบต่อสายตาถึงชีวิต เอทานอลเตรียมได้จากกระบวนการหมักในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ใช้บริโภคในรูปของไวน์ เบียร์ และเหล้า ถ้าบริโภคมากเกินไปเกินความต้องการของร่างกาย จะเกิดอันตรายต่อสุขภาพ ตับ และเกิดการเสพติด ดังนั้นในการเลือกใช้งาน ต้องเลือกให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์ และไม่เป็นอันตราย ในภาคอุตสาหกรรมนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ในการทางการแพทย์นำไปใช้เกี่ยวกับยาบางชนิด ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค หรือเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง เช่น น้ำหอม สบู่ เป็นต้น และที่ใช้ในสุรา หรือของมีเมาทุกชนิด ใช้ในการรีนเรจ การบปปะสังสรรค์ การใช้ประโยชน์ของแอลกอฮอล์แต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การใช้ประโยชน์ของแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ประโยชน์
1. เมทานอล	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ 2. ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก ยา 3. สารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิง
2. เอทานอล	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมการผลิต น้ำหอมและยา 2. ใช้เป็นผสมกับน้ำมันเบนซินออกเทน 91 ในอัตราส่วนเอทานอล 1 ส่วน กับน้ำมันเบนซิน 9 ส่วน เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 3. ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในทางการแพทย์

2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.4.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น หากแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมี แบ่งได้ 2 ชนิด คือกรดและเบส

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นกรด เช่นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น สามารถใช้กับไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระให้เกิดขึ้นได้พร้อมกัน และเกิดน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมาก แต่มีข้อเสียคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่มีความต่อเนื่อง [24, 25]

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นเบส เช่น NaOH, KOH, $NaOCH_3$ และ $KOCH_3$ มีข้อดีคือสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นและใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ต่ำ ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ คือมีความว่องไวต่อปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำ เนื่องจากน้ำสามารถไฮโดรไลซ์เอสเทอร์ให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่ออกและยากต่อการทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ [21]

2.4.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น เช่น CaO, ZrO, ZnO_2 , KNO_3/ZrO_2 , KNO_3/KL zeolite, MoO_3/SiO_2 , MoO_3/ZrO_2 , $WO_3/SiO_2-Al_2O_3$ เป็นต้น [21] มีข้อดีคือ หลังทำปฏิกิริยาสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ผิว [2]

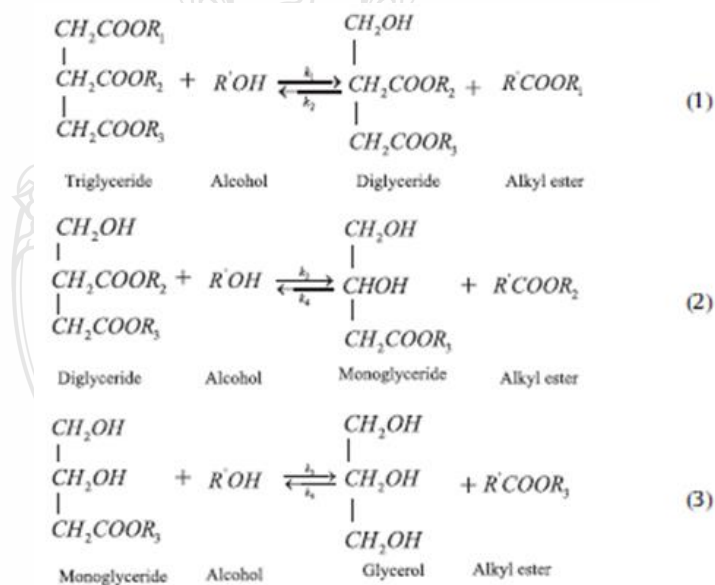
2.4.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์ เอนไซม์ที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล คือ ไลเปส ซึ่งมี 4 สปีชีส์ ได้แก่ *Mucormiehei* (Lipozyme IM60), *Candida 24epacian24a* (SP435), *Geotrichum candidum* และ *Pseudomonas 24epacian* (PS30) [18] เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยามีความบริสุทธิ์สูง กระบวนการผลิตแบบง่าย ใช้พลังงานที่ต่ำ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 35-45 องศาเซลเซียส การแยกเอนไซม์ออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และเอนไซม์มีต้นทุนที่สูง ภายใต้งานที่ทำได้ง่ายโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน [18, 22] ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	1. มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น 2. มีคุณสมบัติที่เป็นกรดและเบส	1. การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์	1. มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น 2. การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย และนำกลับมาใช้ใหม่ได้	1. มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ผิว 2. ใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยา
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	1. กระบวนการผลิตแบบง่าย 2. ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง	1. ถูกยับยั้งการทำงานเมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

2.5 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible reaction) ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [26]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบไปด้วยปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นไดกลีเซอไรด์

ขั้นตอนที่ 2 ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และ
 ขั้นตอนที่ 3 โมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เป็นกลีเซอรอลและเอสเทอร์
 แต่ละขั้นตอนใช้ไขมันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีโครงสร้างต่างกัน ดังนี้

2.5.1 โมโนกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 1 โมเลกุล

2.5.2 ไตรกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 2 โมเลกุล

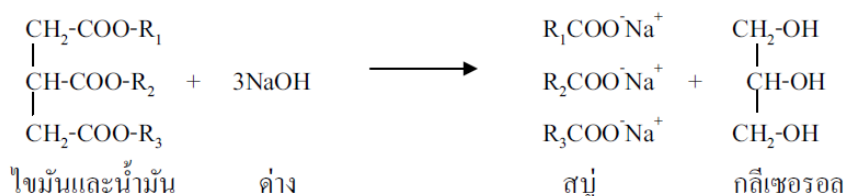
2.5.3 ไตรกลีเซอไรด์ เป็นไขมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุลรวมกับกรดไขมัน 3 โมเลกุล

[18,26]

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.6.1 ความชื้นและกรดไขมันอิสระ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น KOH, NaOH ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสม เพราะน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือการเกิดสบู่ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง สบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง นอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล คือทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้นและมีลักษณะเป็น เจล ทำให้การแยกน้ำมันไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลทำได้ยาก [16] ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดัง รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

นอกจากความชื้นแล้วกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไตรกลีเซอไรด์ก็มีผลต่อการเกิดสบู่ เมื่อใช้เบส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์ที่นำมาใช้ควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เพราะการมีกรดไขมันอิสระที่มากเกินไปจะทำให้ได้ ผลิตภัณฑ์น้อยลง หากมีค่าความเป็นกรดมากกว่า 2 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม จะต้อง ทำการลดค่าความเป็นกรดลง โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้น จึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [9,16]

2.6.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ ฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น สัดส่วนในการทำปฏิกิริยาพบว่าต้องใช้ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลต่อแอลกอฮอล์ 3 โมล [20] ดังนั้นยิ่งใช้อัตราส่วนที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มาก ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 6 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากทำให้เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเตอร์มากถึง 98.0

2.6.3 เวลาและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

การเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาก็คงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยลดความหนืดของน้ำมันและส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและใช้เวลาที่สั้นลง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น หากใช้เมทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 60 – 70 องศาเซลเซียส หรือเอทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 65 – 80 องศาเซลเซียส หากใช้อุณหภูมิที่มากกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ ทำให้แอลกอฮอล์บางส่วนระเหยออกสู่บรรยากาศ เป็นการทำให้สารตั้งต้นลดลง [4] นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลอง เช่น ความดันบรรยากาศ ยังมีผลในการทำปฏิกิริยา

2.6.4 อัตราการกวนผสม

การกวนผสมถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายโอนมวล น้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจึงจะเกิดและได้เป็นไบโอดีเซล

2.6.5 ปริมาณและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งคุณสมบัติที่เป็นกรดและเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบส เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้อง คุณสมบัติการกัดกร่อนน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด [21] ดังนั้นหากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ภาชนะที่ใช้ต้องมีมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เช่นกัน คือ หากใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณที่ต่ำ การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน แสดงดังตารางที่ 2.7 และคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวแปร	ตัวเร่งปฏิกิริยากรด	ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ เอนไซม์
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60-70	55-80	30-40
2. กรดไขมันอิสระ	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
3. ความชื้น	มีผลกระทบต่อปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อ ปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ ปฏิกิริยา
4. การแยกตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ทำได้ยาก	ทำได้ยาก	ทำได้ง่าย
5. ความบริสุทธิ์ของ เมทิลเอสเทอร์	ทำการล้างผลิตภัณฑ์	ทำการล้างผลิตภัณฑ์	ไม่จำเป็นต้องล้าง ผลิตภัณฑ์
6. ต้นทุน	ต้นทุนไม่สูง	ต้นทุนไม่สูง	ต้นทุนสูง

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชื่อตาม IUPAC	Sodium hydroxide
สูตรเคมี	NaOH
มวลโมเลกุล	39.997 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	318 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	1390 องศาเซลเซียส

2.7 มาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

มีน้ำมันพืชหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นไบโอดีเซลที่ได้ควรมีเสถียรภาพสูง และมีคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิง จะต้องได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ เช่น ในสหรัฐอเมริกาไบโอดีเซลต้องได้มาตรฐานตาม ASTM D6751 [23] ในสหภาพยุโรปต้องได้มาตรฐาน EN 14214 [2] มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกาแสดงดังตารางที่ 2.3 และมาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรปแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกา [23]

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด
ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม (ppm)	EN14538	ไม่สูงกว่า 5.0
จุดวาบไฟวิธีถ้วยปิด (°C)	D93	ไม่ต่ำกว่า 93
ปริมาณแอลกอฮอล์ (อย่างไรก็ตามอย่างหนึ่ง)		
1. ปริมาณเมทานอล (%mass)	EN14110	ไม่สูงกว่า 0.2
2. จุดวาบไฟ (°C)	D93	ไม่สูงกว่า 130
น้ำและตะกอนดิน (%vol)	D2790	ไม่สูงกว่า 0.05
ความหนืดเชิงกลที่ 40 °C (mm ² /sec)	D445	1.9-6.0
เถ้าที่มีกำมะถัน (%mass)	D874	ไม่สูงกว่า 0.02
กำมะถัน		
1. S 15 Grade (%mass ppm)	D5453	ไม่สูงกว่า 0.0015 (15)
	D5453	ไม่สูงกว่า 0.05 (500)
2. S 500 Grade (%mass ppm)		
การกัดกร่อนของทองแดง	D130	ไม่สูงกว่า 3.0
เลขซีเทน	D613	ไม่ต่ำกว่า 47
จุดชุนตัว (°C)	D2500	-
กากคาร์บอน (ทดสอบ 100 ตัวอย่าง) (% mass)	D4530	ไม่สูงกว่า 0.05
ความเป็นกรด (mg KOH/g)	D664	ไม่สูงกว่า 0.5
ปริมาณกลีเซอรินอิสระ (% mass)	D6584	ไม่สูงกว่า 0.02
ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด (% mass)	D6584	ไม่สูงกว่า 0.240

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของไบโอดีเซล ASTM D6751 ในสหรัฐอเมริกา (ต่อ)

ปริมาณโพแทสเซียม (% mass)	D4951	ไม่สูงกว่า 0.001
อุณหภูมิการกลั่น (°C)	D1160	ไม่สูงกว่า 360
ปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียม (ppm)	EN14538	ไม่สูงกว่า 5.0
เสถียรภาพการออกซิไดซ์ (Hours)	EN15751	ไม่ต่ำกว่า 3.00
การกรองขณะเย็น (Seconds)	D7501	ไม่สูงกว่า 360
สำหรับใช้ในอุณหภูมิต่ำกว่า -12 °C (Seconds)	D7501	ไม่สูงกว่า 200

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรป [2]

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด DIN EN 14214	
		ไม่ต่ำกว่า	ไม่สูงกว่า
1. เอสเทอร์ (% m/m)	DIN EN 14103	96.5	-
2. ความหนาแน่นที่ 5 °C (kg/m ³)	DIN EN ISO 12185	860	900
3. ความหนืดที่ 40 °C (mm ² /s)	DIN EN ISO 3104	3.5	5.0
4. จุดวาบไฟ (°C)	DIN EN ISO 36	120	-
5. จุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ (°C)	DIN EN 116	-	-
6. กำมะถัน (mg/kg)	DIN EN ISO 20884	-	10.0
7. สารอินทรีย์ (10%) (% m/m)	DIN EN ISO 10370	-	0.3
8. ค่าออกเทน	IP 498	51.0	-
9. เถ้ากำมะถัน (% m/m)	ISO 3987	-	0.02
10. น้ำ (mg/kg)	DIN EN ISO 12937	-	500
11. การปนเปื้อนทั้งหมด (mg/kg)	DIN EN ISO 2160	-	24
12. การกัดกร่อนของทองแดง (grad corrosion)	DIN EN ISO 2160	1	1

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานของไบโอดีเซล EN 14214 ในสหภาพยุโรป (ต่อ)

13. เสถียรภาพการออกซิไดซ์ 110 °C (h)	DIN EN ISO 14112	6.0	-
14. ความเป็นกรด (mg KOH/g)	DIN EN ISO 14104	-	0.5
15. เลขไอโอดีน (g iod/100 g)	DIN EN ISO 14111	-	120
16. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	DIN EN ISO 14103	-	12.0
17. เมทานอล (% m/m)	DIN EN 14110	-	0.20
18. ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ (% m/m)		-	0.020
19. ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ (% m/m)		-	0.80
20. ปริมาณไดกลีเซอไรด์ (% m/m)	DIN EN ISO 14105	-	0.20
21. ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (% m/m)		-	0.20
22. ปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด (% m/m)		-	0.25
23. ฟอสฟอรัส	DIN EN ISO 14107	-	10.0
24. โลหะ ประเภทที่ 1 (โซเดียมและ โพแทสเซียม)		-	5.0
25. โลหะ ประเภทที่ 2 (แคลเซียมและ แมกนีเซียม)	DIN EN ISO 14538	-	5.0

2.8 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล แต่ยังมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่ต่างกัน ซึ่งมีทั้งข้อได้เปรียบ และข้อเสียเปรียบ ดังนี้

2.8.1 เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้กำมะถันจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และกรดซัลฟิวริก เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด

2.8.2 ไม่มีสารประกอบประเภทอะโรมาติก (Aromatic compound) แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างร้อยละ 10-12 ทำให้ไอเสียที่เกิดขึ้นมีฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งน้ำมันดีเซลไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง แต่มีองค์ประกอบของสารอะโรมาติกร้อยละ 20-40

2.8.3 มีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

2.8.4 มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ในขณะที่น้ำมัน

2.8.5 ดีเซลไม่มีพันธะคู่ จึงทำให้ไม่มีความคงตัว เกิดออกซิเดชันได้รวดเร็ว และมีระยะเวลาเก็บรักษาหลังการผลิตน้อย

2.8.6 มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซล	น้ำมันดีเซล	วิธีทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15:15 °C	0.8830	0.8380	ASTM D1298
สี	6.0	1.0	ASTM D1500
จุดขุ่นตัว (°C)	0.0	NA	ASTM D2500
จุดไหลเท	0.0	-3.0	ASTM D97
จุดวาบไฟ	109	75.0	ASTM D93
ดัชนีหักเห	1.45	NA	-
ค่าความร้อนโดยรวม (kJ / kg)	39305	43730	ASTM D240
ความหนืดเชิงกลที่ 20 °C (cSt)	15.09	NA	ASTM D445
สารตกค้างคาร์บอน (wt%)	0.30	NA	ASTM D189
กำมะถันทั้งหมด (wt%)	0.18	0.95	ASTM D1266

2.9 ประโยชน์จากการใช้ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่ปลอดภัยและลดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าดีเซล เนื่องจากมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซล และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ในขณะที่ดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ยั่งยืน เพราะมีปริมาณความต้องการสูง จากที่กล่าวมาข้างต้นไบโอดีเซลมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

2.9.1 ทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าน้ำมัน โดยการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงต้องเสียภาษีการนำเข้า

2.9.2 ช่วยพยุงราคาผลผลิตผลการเกษตร มีส่วนช่วยผลักดันให้เศรษฐกิจของชาติฟื้นตัวได้รวดเร็ว ถ้าหากปลูกพืชที่ผลิตได้ทั้งอาหาร น้ำมันและแอลกอฮอล์ ซึ่งจะช่วยผลักดันให้มีแหล่งตลาดขนาดใหญ่สำหรับผลิตผลทางการเกษตร

2.9.3 ลดมลภาวะ เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ง่าย ลดการปล่อยก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก

2.9.4 สร้างความมั่นคงแก่ประเทศชาติ ในอนาคตหากไม่มีการลดการใช้น้ำมันดีเซล จะทำให้น้ำมันดีเซลหมดไปและมีราคาแพง หากมีการคิดค้นและพัฒนาพลังงานทดแทนเองได้ ช่วยสร้างความมั่นคงและไม่ต้องพึ่งพาความอยู่รอดจากต่างประเทศ

2.9.5 เกิดการส่งเสริมและเพิ่มพื้นที่การเพาะปลูก เป็นการเพิ่มพื้นที่การเพาะปลูกพืช เช่น มันสำปะหลัง ปาล์ม มะพร้าว ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

2.10 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

สมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆ ข้อมูลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ข้อมูลจากการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และแบบต่อเนื่อง วิธีแรกนั้นนิยมใช้กับปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อเดียว โดยทำการวัดข้อมูล เช่น ความดัน ปริมาตร หรือความเข้มข้นเป็นต้นที่เวลาต่างๆ สำหรับวิธีที่สองนั้นเป็นการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเครื่องปฏิกรณ์เคมีนั้นดำเนินงานอยู่ในสภาวะคงตัว โดยทำการวัดความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการป้อนสารตั้งต้นต่างๆกัน

2.10.1 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากข้อมูลการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะ

ข้อมูลจากการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่จำเป็นสำหรับการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การวัดความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ เช่น ความเข้มข้น ปริมาตร หรือความเข้มข้นที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ วิธีวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแบ่งได้หลายวิธีโดยในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการอินทิเกรต

วิธีการอินทิเกรต ทำโดยการสมมติอันดับของปฏิกิริยาแล้วจึงทำการอินทิเกรตสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้ และนำมาจัดรูปแบบสมการให้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จากนั้นให้นำผลการทดลองมาวาดกราฟตามความสัมพันธ์ที่ได้ เพื่อตรวจสอบดูว่าข้อมูลที่ได้อสอดคล้องกับที่สมมติหรือไม่ ถ้าไม่สอดคล้อง ให้ทำการสมมติอันดับใหม่และดำเนินการตรวจสอบด้วยวิธีเดิม วิธีนี้โดยทั่วไปเหมาะสมกับกรณีที่ทราบค่าอันดับของปฏิกิริยาอยู่แล้ว เพียงแต่ต้องการหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา เช่น ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา $A \rightarrow B$ ถ้าอันดับปฏิกิริยาเท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$\frac{dC_A}{dt} = r_A = -kC_A \quad (2.1)$$

ดังนั้น เมื่อเวลา $t = 0$; $C_A = C_{A0}$ จะได้ว่า

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (2.2)$$

ดังนั้น ถ้าอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ 1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{C_{A0}}{C_A}$ กับ t เป็นเส้นตรง

ตารางที่ 2.12 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ

อันดับ	ปฏิกิริยา	สมการ	ความสัมพันธ์
0	$A \rightarrow B$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_0$	$C_A = C_{A0} - kt$ (2.3)
1	$A \rightarrow B$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A$	$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k_1 t$ (2.2)
2	$A \rightarrow P$	$-\frac{dC_A}{dt} = k_2 C_A^2$	$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k_2 t$ (2.4)

2.10.2 วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากข้อมูลการดำเนินงานเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ที่ดำเนินงานแบบต่อเนื่อง ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) หรือเครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อไหล (Plug flow reactor, PFR) การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของสารผลิตภัณฑ์เมื่อใช้สายป้อนที่สภาวะต่าง ๆ กัน ในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์เคมีชนิดท่อไหล มักพบว่ามีความแตกต่างของ

สภาวะการดำเนินการตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น อุณหภูมิหรือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการตัดแปลง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนน้อยมาบรรจุเป็นชั้นบางๆ แทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมาก โดยเรียกว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบดิฟเฟอเรนเชียล เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นในปริมาณน้อย ทำให้สภาวะในเครื่องปฏิกรณ์ค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงสามารถสมมติว่า สภาวะการดำเนินงานเหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.5

$$-r_A = \frac{F_{A0}(X_A)}{V_{CSTR}} \quad (2.5)$$

2.11 การออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง

เป็นการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) ซึ่งรวบรวมเทคนิคทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด [24] ในทางปฏิบัติมักจะไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริง ระหว่างตัวแปรผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้น จึงต้องมีการประมาณรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าว และพบว่ามีนิยมนิยมใช้ตัวแบบกำลังสอง (Second order model) เพราะมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น ๆ ซึ่งวิธีการที่นิยมสำหรับการออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง มีดังนี้

2.11.1 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สามระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นการประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง

2.11.2 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับวิเคราะห์ในกรณีที่ต้องการสมการเส้นโค้ง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับโดยที่มีการเพิ่มการทดลองที่แนวแกน (Axial Points) ขึ้นมา ทำให้วิเคราะห์สมการกำลังสองได้ [25] สำหรับโปรแกรม Minitab จะมีฟังก์ชันสำหรับช่วยในการออกแบบแนวแกน ได้ 3 วิธี คือ

2.11.2.1 Default คือการกำหนดจุดแนวแกนออกไป มีค่าเท่ากับ $n^{1/4}$ (n คือ จำนวนการทดลองที่ไม่รวมตำแหน่งค่ากลางและการทำซ้ำ)

2.11.2.2 Face Center คือการเปลี่ยนจุดแนวแกนให้มาอยู่ที่ระดับ -1 หรือ +1 ทำให้สะดวกในการทดลอง

2.11.2.3 Custom คือ การออกแบบจุดแนวแกนตามผู้ใช้งานกำหนดเอง เพื่อความเหมาะสมในการทดลอง

2.11.3 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เป็นการออกแบบที่มีการทดลอง 3 ระดับ คือ สูง กลาง และต่ำ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่สองระดับที่มีการกำหนดตำแหน่งค่ากลาง แต่จะไม่มี การทดลองที่ตำแหน่งมุม โดยรูปแบบสมการเป็นสมการกำลังสอง [26]

2.12 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการทำให้ส่วนผสมที่เป็นของเหลวผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้หลักการในการอัดด้วยความดันสูง ทำให้ของเหลวผ่านช่องแคบ ที่เรียกว่า วาล์วโฮโมจีไนซ์ (Homogenization valve) ด้วยความเร็วสูงมาก พลังงานจากแรงดัน ทำให้เกิดแรงเฉือน (shear) แรงกระแทกและการแตกตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก (cavitation) อย่างรุนแรง ทำให้อนุภาคของเหลวมีขนาดเล็กลงและเกิดการกระจายเป็นเนื้อเดียวกัน [27, 28] ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบเชิงกล อัลตราโซนิคและแรงดัน

2.12.1 แบบเชิงกล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบโรเตอร์สเตเตอร์และแบบใบพัด

2.12.1 แบบโรเตอร์สเตเตอร์ ใช้ในการเกิดระดับของฟองอากาศ ฟองอากาศถูกสร้างขึ้นมาขณะที่ของเหลวไหลผ่านของแข็งที่มีอัตราความเร็วสูง ซึ่งโพรบจะสั่นสะเทือนในอัตราความเร็วสูง

2.12.2 แบบใบพัด มีประสิทธิภาพน้อยกว่าแบบสเตเตอร์โรเตอร์ ถูกนำมาใช้เป็นเวลาหลายปีในการผลิตเนยแข็ง สารสกัดจากพืชและสัตว์ สามารถขับเคลื่อนที่ความเร็ว 6,000 ถึง 50,000 รอบต่อนาที มีอุปกรณ์เสริม คือ แจ็คเก็ตระบายความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิและภาชนะบรรจุปิด

2.12.2 แบบอัลตราโซนิค เป็นการสร้างคลื่นอัลตราโซนิคที่รุนแรงในของเหลว ทำให้ของเหลวผสมกันในสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการก่อตัวอย่างรวดเร็วของไมโครฟอง จะก่อตัวขึ้นจนกว่าจะถึงขนาดที่คลื่นเรโซแนนซ์สั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและในที่สุดก็ยุบตัวลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าฟองอากาศ การระเบิดของฟองในเฟสไอทำให้เกิดคลื่นกระแทกที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสลายพันธะโควาเลนต์ ปัจจัยที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน รูปทรงและขนาดความจุ

2.12.3 แบบแรงดัน หลักการทำงาน คือ การบังคับให้สารแขวนลอยผ่านช่องทางแคบภายใต้ความดันขึ้น พารามิเตอร์ในการดำเนินงานให้ผลที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ

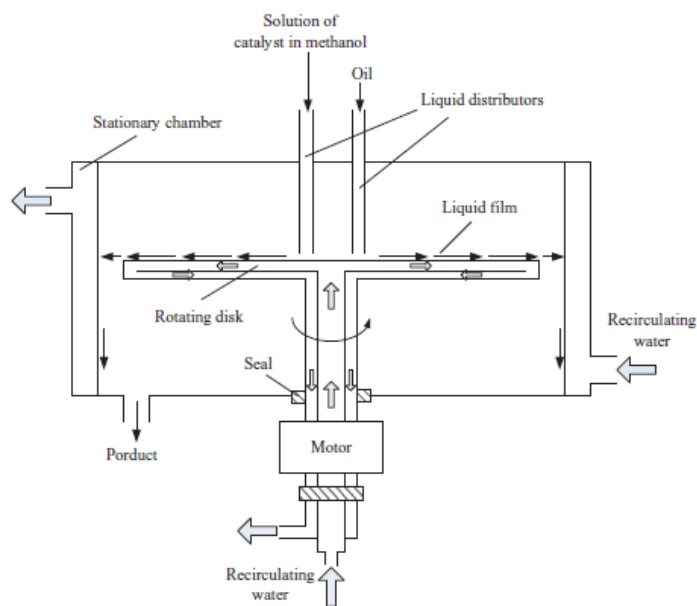
วาล์ว การออกแบบการกระแทกและอัตราการไหล นิยมใช้ในการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน หรือออกแบบ เพื่อผลิตอิมัลชันในอุตสาหกรรมอาหารและยา

2.13 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

ข้อจำกัดของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือความต้านทานการถ่ายโอนมวลระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เนื่องจากสาร 2 ชนิดนี้ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ดังนั้นจะใช้เวลาในการทำ ปฏิกริยาเป็นเวลานาน ข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้ โดยใช้วิธีการผสมชั้นรุนแรงหรือพัฒนาเทคโนโลยีให้มี ประสิทธิภาพในการผสมสูง และเกิดการถ่ายโอนมวลได้ดี [5, 7]

ในการนำไปใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ และค่าพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมในการทำงาน เช่น อัตราส่วนของสารที่ป้อนเข้า ซึ่งมีผลต่อความรุนแรง ของปฏิกริยา ประเภทและปริมาณของตัวเร่งปฏิกริยา เพื่อให้เกิดปฏิกริยาได้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิของ ปฏิกริยา อัตราการไหลรวมสารป้อน ความเร็วรอบของการหมุน ความหนืดของสาร เป็นต้น

ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้เวลาในการทำปฏิกริยาอย่างรวดเร็ว และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ผลผลิต โครงสร้างของ เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน แสดงดังรูปที่ 2.4 ภายในประกอบด้วยจานหมุน จานหมุนนี้จะถูก ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เมื่อของเหลวไหลเข้าสู่บริเวณจุดศูนย์กลางของจานหมุน จะใช้แรงเหวี่ยงหนี ศูนย์กลางโดยการหมุนของแผ่นดิสก์ ทำให้ของเหลวที่อยู่บนศูนย์กลางจานหมุนกระจายออกไปด้านนอก ภายใต้อิทธิพลของแรงเหวี่ยงอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเหลวมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆอยู่บนจานหมุน [8] ส่งผลให้เพิ่ม ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น [29] ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไป ประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ เช่นผลิตไบโอดีเซล [8, 30] การสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโน [10] การตกผลึก [12] การสังเคราะห์พอลิเมอร์สไตรีน [14] เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน [8]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.14.1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป

Madhu Agarwal และคณะ [31] ทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ KOH และ KOH/Alumina สำหรับใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับเมทานอล ผลการทดลองพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 98.2 และเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Alumina ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:9 ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้ 96.8 จากนั้นทดสอบการนำ KOH/Alumina มาใช้ซ้ำ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ได้ 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 3 ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 83.0

Abdullah และคณะ [32] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกากตะกอนของน้ำมันปาล์ม (palm oil sludge) กับเมทานอล ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ใช้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:20 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 6.0 โดย

น้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที และอัตราการกวนผสม 300 รอบต่อนาที และสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ถึง 2.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และอัตราการกวนผสม 300 รอบต่อนาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ได้ 93.00 ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่ามีความหนาแน่น 0.864 กรัมต่อมิลลิลิตร และความหนืดเชิงกล 12.8 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

Dian Celante และคณะ [33] ทำการศึกษาผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองกับไดเมทิลคาร์บอเนต ใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อไดเมทิลคาร์บอเนต และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อไดเมทิลคาร์บอเนตต่อเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 15 นาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 99.0

2.14.2 เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่นำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น เครื่องอัลตราโซนิค ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้เครื่องไมโครเวฟยังได้รับความนิยม เนื่องจากเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที แต่ข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดคือ มีค่าใช้จ่ายเรื่องการลงทุนที่สูงมาก เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.5

Dipak D. Pukale และคณะ [3] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยคลื่นอัลตราโซนิค เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด ดังนี้ K_3PO_4 , Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 และ KH_2PO_4 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา K_3PO_4 ร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ใช้ความถี่คงที่ คือ 11 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 92.0

M. Maghami และคณะ [34] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตทอดปลาและใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลของเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกกำลัง 400 วัตต์ กับวิธีทั่วไป ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ความเข้มข้นของเอนไซม์ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 55 อนุภาคเซลล์เชื้อเพลิง เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 79.6 และที่สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยใช้วิธีการผลิตแบบวิธีทั่วไป ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 78.0 จะเห็นว่าการใช้กำลังอัลตราโซนิกช่วยเพิ่มร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์

Guanyi Chen และคณะ [35] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เตรียมจากเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก พบว่าเกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึง 92.7 ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ กำลังอัลตราโซนิก 60% (120 วัตต์) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:9 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ทำการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 8 ครั้ง

Kang-Shin Chen และคณะ [36] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนแบบธรรมดา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ CH_3OH และ NaOH สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ใช้ CH_3OH และ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 กำลังของไมโครเวฟ 750 วัตต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 97.9 และ 96.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ทางเลือกที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

เครื่องปฏิกรณ์	ไตรกลีเซอไรด์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์	อ้างอิง
เครื่องอัลตราโซนิค ความถี่ 11 กิโลเฮิร์ตซ์	น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	3% wt K_3PO_4	60	90	92.00	D.D. Pukale และคณะ [3]
เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิค ความถี่ 28, 40 และ 70 กิโลเฮิร์ตซ์	น้ำมันปาล์ม	1.0% wt KOH	60	15	93.00	S. Manickam และคณะ [37]
เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ 750 วัตต์	น้ำมันปาล์ม	0.75 %wt CH_3OH	60	3	99.50	Y.-C. Lin และคณะ [16]
เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ	น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	0.75 %wt CH_3OH	60	5	98.87	N. Azcan และคณะ [6]
เครื่องโฮโมจิไนเซออร์	น้ำมันถั่วเหลือง	3.0% wt CaO	50	5	84.00	S. Joshi และคณะ [5]
เครื่องโฮโมจิไนเซออร์	น้ำมันที่ใช้แล้ว	3.0% wt KOH	50	120	92.3	A.V. Mohod และคณะ [27]

2.14.3 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

Kai-Jie Chen และคณะ [8] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล และผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ แปรผันตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง และแปรผันตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์ร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิในการปฏิกิริยาเท่ากับ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส อัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 300 ถึง 1200 มิลลิลิตรต่อนาที และความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 250 ถึง 2500 รอบต่อนาที สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษา คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหลรวมสารป้อน 773 มิลลิลิตรต่อนาทีและความเร็วรอบของจานหมุน 2400 รอบต่อนาที สามารถผลิตร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ได้ 96.9 โดยใช้เวลา 2 ถึง 3 วินาที และมีอัตราการผลิต 1.86 โมลต่อนาที

Z. Qiu และคณะ [25] ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันคาโนลากับเมทานอล และใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนที่มีจานหมุน 2 แผ่น ตั้งอยู่คู่และขนานกันซึ่งมีช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างแผ่น จานหมุนด้านบนตั้งอยู่บนเพลลาหมุนในเครื่องปฏิกรณ์ขณะที่แผ่นล่างอยู่นิ่ง สารตั้งต้นผสมกันระหว่างจุดศูนย์กลางของช่องว่างระหว่างจานหมุนทั้งสอง ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบของจานหมุน 1000 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันคาโนลา ช่องว่างระหว่างจานหมุนทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 80.0 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส

2.14.4 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนกับกระบวนการอื่นๆ

Somaieh Mohammadi และคณะ [10] ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ผ่านกระบวนการโซลเจล ศึกษาผลของความเร็วยรอบของจานหมุน อัตราส่วนของน้ำต่อไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$) พื้นผิวของจานหมุน 2 ชนิด คือพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ และระยะห่างของการป้อนสารตั้งต้น ผลการทดลองพบว่าการใช้ความเร็วรอบของจานหมุน อัตราการไหล และอัตราส่วนของน้ำต่อไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ที่สูง ทำให้เกิดผลผลิตจำนวนมาก อนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ การใช้จานหมุนที่มีพื้นผิวขรุขระอนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากกว่าการใช้จานหมุนที่มีพื้นผิวเรียบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamics) ทำให้ฟิล์มมีขนาดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการป้อนสารตั้งต้นที่

จุดศูนย์กลาง ให้อนุภาค TiO_2 มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดแรงเฉือนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสามารถผลิตอนุภาคขนาดนาโนที่มีอนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอได้จำนวนมาก

L. M. Cafiero และคณะ [12] ทำการตกตะกอนแบบเตรียมซิลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยพื้นผิวจานหมุนมีลักษณะเรียบ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เมตร ใช้สารละลายแบบเตรียมซิลเฟตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 200 ถึง 1000 รอบต่อนาที อนุภาคของแบบเตรียมซิลเฟตมีขนาดลดลง จาก 3.0 ไมโครเมตร เหลือเพียง 0.7 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่า ใช้ความเร็วรอบของจานหมุน 1000 รอบต่อนาที อนุภาคมีขนาด 0.5 ถึง 1.0 ไมโครเมตร



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH AR grade ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0)

3.1.1.2 น้ำมันปาล์ม

3.1.1.3 เมทานอลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ (CH₃OH AR grade ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0)

3.1.1.4 เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต (C₁₈H₃₆O₂ AR grade ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.7)

3.1.1.5 เฮปเทน (C₇H₁₆ AR-grade ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5)

3.1.1.6 น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

3.1.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง ยี่ห้อ IKA

3.1.2.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Auto System XL Gas Chromatograph

3.1.2.4 เครื่องแก้วสำหรับเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล ได้แก่ ขวดก้นกลมแบบ 3 คอ (3-Neck Round Bottom Flask) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อ่างน้ำมัน (Oil bath)

3.1.2.5 ปีกเกอร์ (Beaker)

3.1.2.6 ปิเปต (Pipet)

3.1.2.7 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

3.1.2.8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

3.1.2.9 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifugal)

3.1.2.10 ปัมป์สุบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic Pump)

3.1.2.11 เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate Stirred)

3.1.2.12 ขวดเก็บตัวอย่าง (Vial)

3.1.2.13 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)

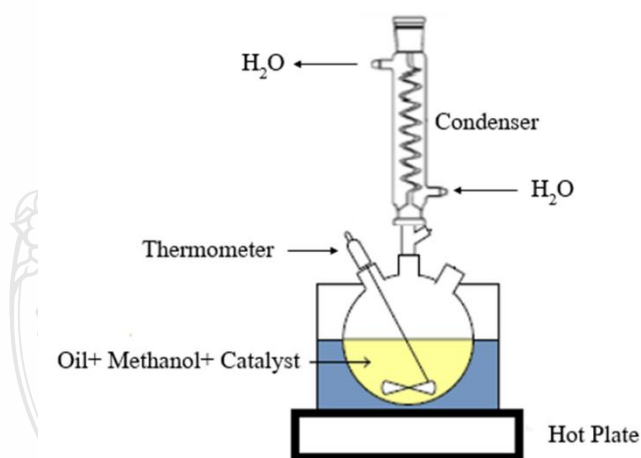
3.1.2.14 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์ม

3.2.1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

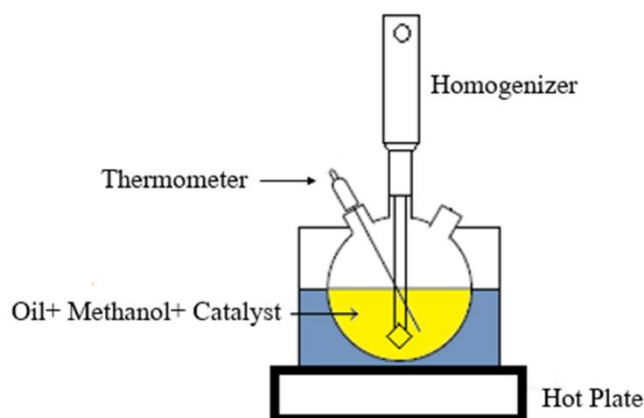
ในการทดลองนี้ใช้ขวดก้นกลมแบบ 3 คอ ขนาด 125 มิลลิลิตรต่อกับคอนเดนเซอร์ ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดลอง นำขวดก้นกลมวางลงบนเครื่องให้ความร้อนซึ่งมีอ่างน้ำมันรองรับซิลิโคนออยล์ (Silicone oil) แสดงดังภาพที่ 3.1 เตรียมสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มกับเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ละลายในเมทานอล อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 3 5 10 20 30 40 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ ทำการลดอุณหภูมิในอ่างน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกกลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์ วิเคราะห์หาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN14103 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกลสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

3.2.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

ในการทดลองนี้ใช้ขวดก้นกลมแบบ 3 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตรต่อกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดลอง นำขวดก้นกลมวางลงบนเครื่องให้ความร้อนซึ่งมีอ่างน้ำมันรอนรับซิลิโคนออยล์ แสดงดังรูปที่ 3.2 เตรียมสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มกับเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ละลายในเมทานอล อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 3 5 10 20 30 40 และ 60 นาที ตามลำดับ ทำการลดอุณหภูมิในอ่างน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกกลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์ วิเคราะห์หาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN14103 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

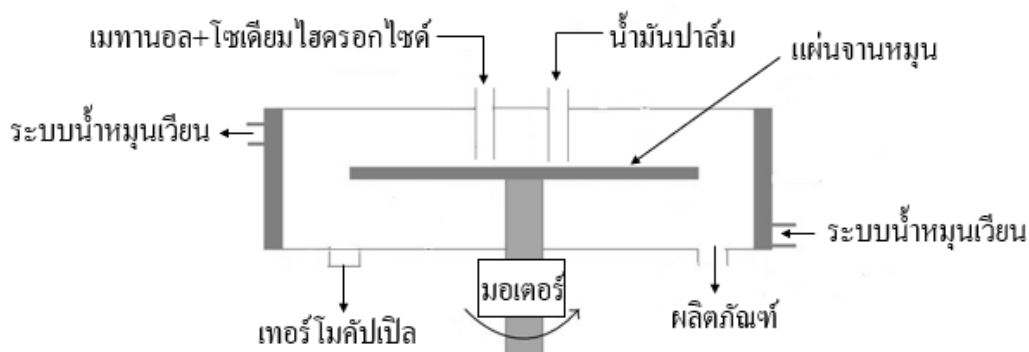


รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูงสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

3.2.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบการงานหมุน

ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุนสำหรับการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 ป้อนสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มกับเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน โดยใช้ปั๊มสุบจ่ายของเหลวแบบรีดท้อ แปรผันปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของงานหมุนเท่ากับ 500 ถึง 1000 รอบต่อนาที และอัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 130 ถึง 390 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 10 นาที ทำการลดอุณหภูมิในอ่างน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำตัวอย่างที่เก็บไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกกลีเซอรอล

กับเมทิลเอสเทอร์ ทำการล้างตัวอย่าง ด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 0.5:1 จำนวน 3 ครั้ง นำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกเมทิลเอสเทอร์กับน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN14103 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสำหรับใช้ผลิตไบโอดีเซล

3.2.3 การออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม MINITAB เวอร์ชัน 18 โดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ทำการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 1.0 และ 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบจานหมุน 750 1000 และ 1250 รอบต่อนาที และอัตราการไหลรวมสารป้อน 130 260 และ 390 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ผลกระทบบของปัจจัย โดยใช้สมการกำลังสอง โดยรูปแบบของสมการแสดงดังต่อไปนี้ [38]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon_i \quad (3.1)$$

เมื่อ Y คือ ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์

β_i คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงของตัวแปร

e คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับในการทดลอง		
		-1	0	1
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์	X_1	0.75	1	1.25
ความเร็วรอบจานหมุน (รอบต่อนาที)	X_2	750	1000	1250
อัตราการไหลสารป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)	X_3	130	260	390

3.2.4 วิธีวิเคราะห์หาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์

การหาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 เตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่างและสารมาตรฐาน

- (1) ชั่งเมทิลเฮปตะเดคาโนเอตน้ำหนัก 0.05XX กรัม ใส่ในขวดเตรียมตัวอย่าง
- (2) ชั่งน้ำมันไบโอดีเซล น้ำหนัก 0.25XX กรัม ลงในขวดเตรียมตัวอย่าง จากข้อที่ 1
- (3) เติมเฮปแทน 5 มิลลิลิตรลงในสารผสมที่ได้จากข้อ 1 และ 2 คนให้สารละลาย
- (4) เทสารละลายลงในขวดเก็บตัวอย่าง ปิดฝาให้เรียบร้อย

3.2.4.2 นำตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้สภาวะของเครื่องดังนี้

- (1) Column: คาร์ปิลลารี ZB5-HT ขนาด 0.25 มิลลิเมตร × 30 เมตร
- (2) Detector: อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
- (3) Injector: อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
- (4) Carries gas: แก๊สฮีเลียม
- (5) Over Temperature Ramp: ตั้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที

3.2.4.3 การคำนวณหาร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์

$$\text{ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\Sigma A) - AEI}{AEI} \times \frac{CEI \times VEI}{m} \times 100$$

เมื่อ

ΣA คือ ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟโดยคิดจาก $C_{14:0}$ ถึง $C_{24:1}$

AEI คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $C_{17:0}$

CEI คือ ความเข้มข้นของ $C_{17:0}$ หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL)

VEI คือ ปริมาตรสารเมทิลเฮปตะเดคาโนเอตหน่วย มิลลิลิตร (mL)

m คือ น้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ หน่วย มิลลิกรัม (mg)



บทที่ 4

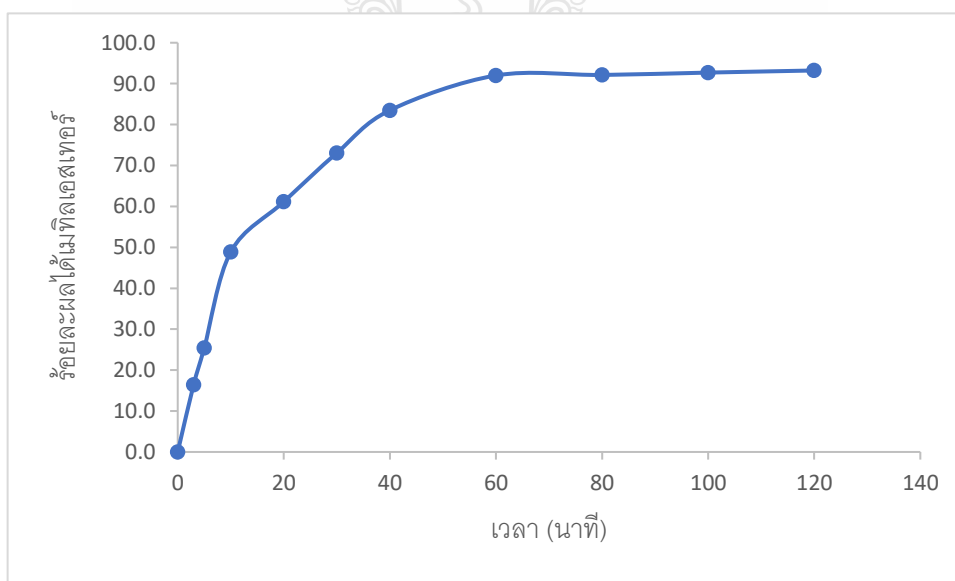
ผลการทดลอง

4.1 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์ม

4.1.1 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม และควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้สารตั้งต้นมีเวลาในการทำปฏิกิริยากันมาก ส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 60 นาที โดยร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เกิดขึ้น เท่ากับ 92.0 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

4.1



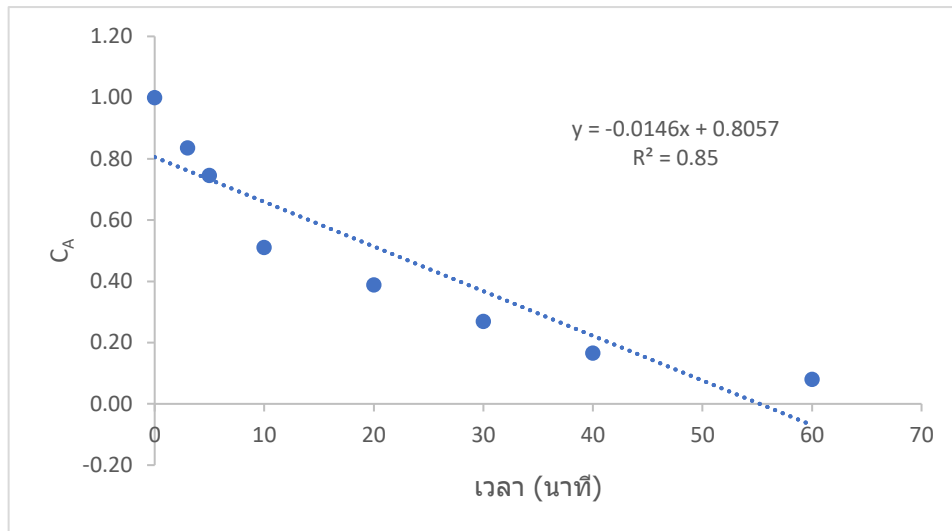
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์กับเวลาของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน กำหนดให้ปฏิกิริยาเป็นแบบขั้นตอนเดียวไม่ผันกลับ (Irreversible reaction) แสดงได้ดังสมการที่ 4.1

จากสมการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

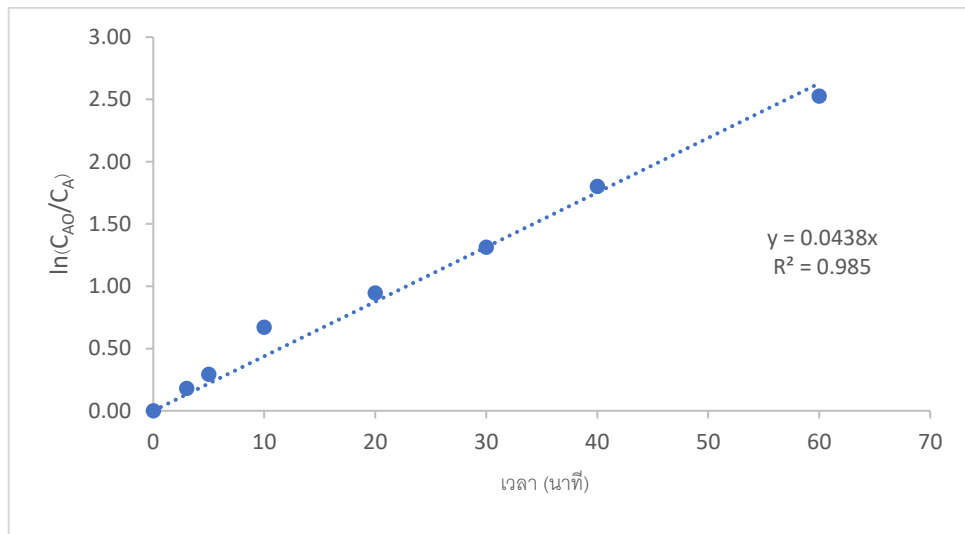


ทำการหาอันดับปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการอินทิเกรต ใช้ความสัมพันธ์จากตารางที่ 2.5 ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำการหาค่าอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ อันดับ 0 อันดับ 1 และ อันดับ 2 ซึ่งแสดงดังกราฟที่ 4.2 ถึง 4.4



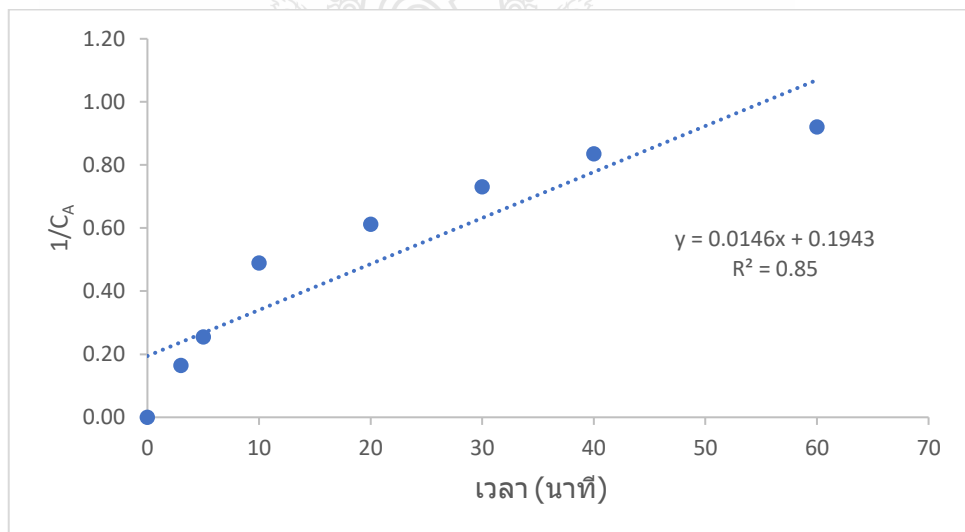
รูปที่ 4.2 จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล แสดงดัง รูปที่ 4.2 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (นาที) กับ C_A สามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0146 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.850



รูปที่ 4.3 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล แสดงดัง รูปที่ 4.3 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา(นาที) กับ $\ln(C_{A0}/C_A)$ สามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0438 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.950



รูปที่ 4.4 จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล แสดงดัง รูปที่ 4.4 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (นาที) กับ $1/C_A$

สามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0438 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.950

ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล แสดงดังตารางที่ 4.1

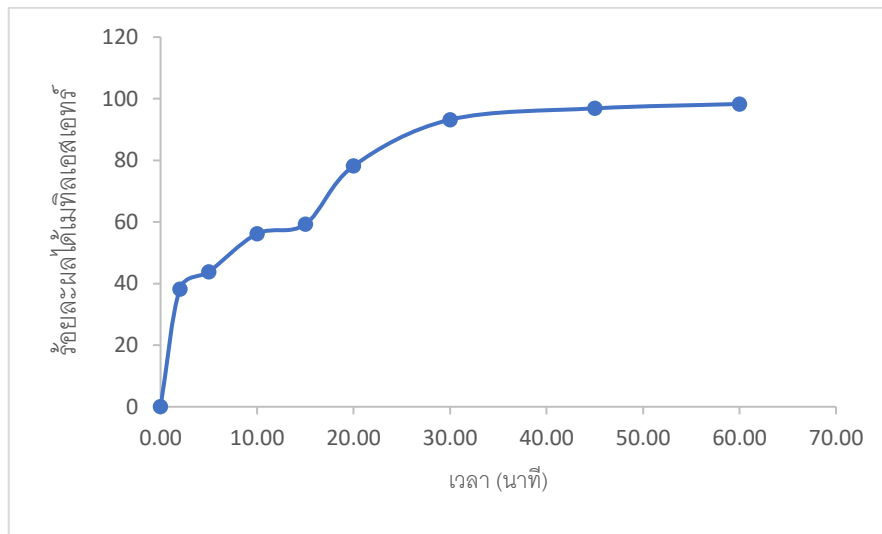
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล

อันดับ	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (ต่อนาที)	R^2
0	0.0146	0.850
1	0.0438	0.985
2	0.0146	0.850

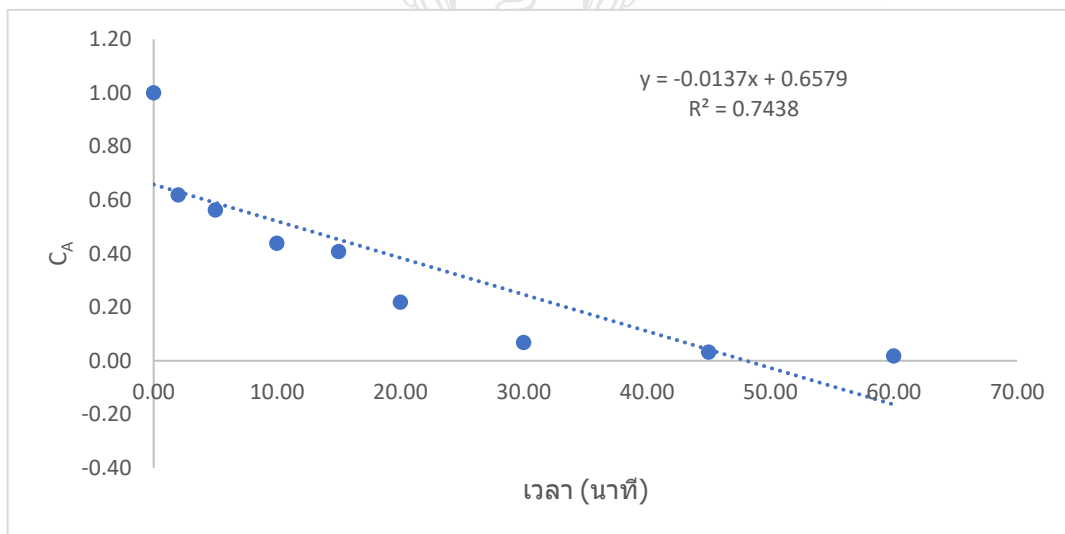
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.850 0.950 และ 0.850 สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 0 อันดับ 1 และ อันดับ 2 ตามลำดับ ซึ่งค่า R^2 ของอันดับ 1 ให้ค่าสูงสุดที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกลจึงมีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 มากที่สุด

4.1.2 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

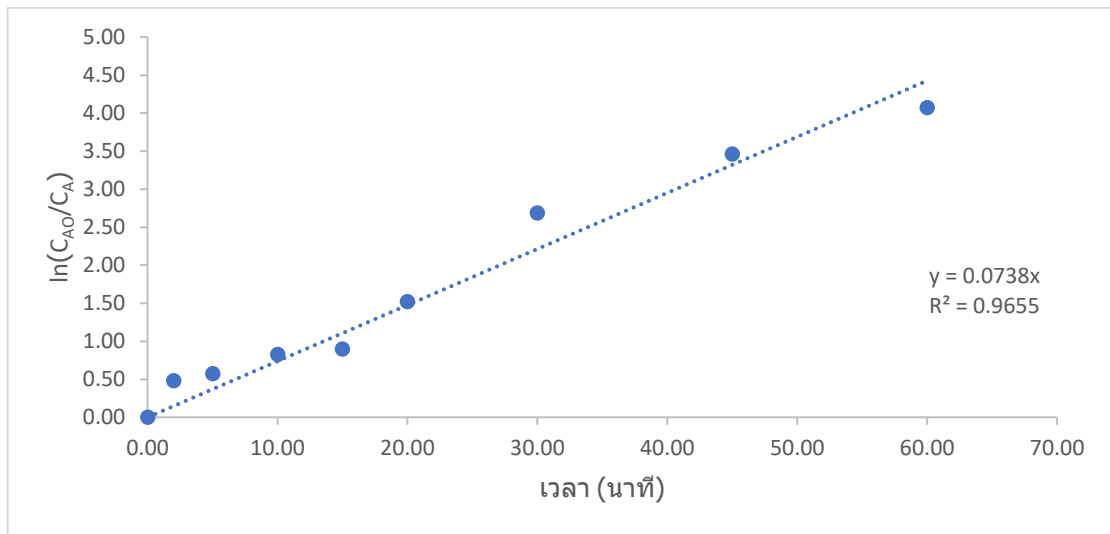
การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้เมทิลเอสเตอร์กับเวลาของการผลิตไปโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง
ทำการหาอันดับปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการอินทิเกรต โดยใช้ความสัมพันธ์จากตารางที่ 2.5 ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยทำการทำนายอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ อันดับ 0 อันดับ 1 และ อันดับ 2 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.8

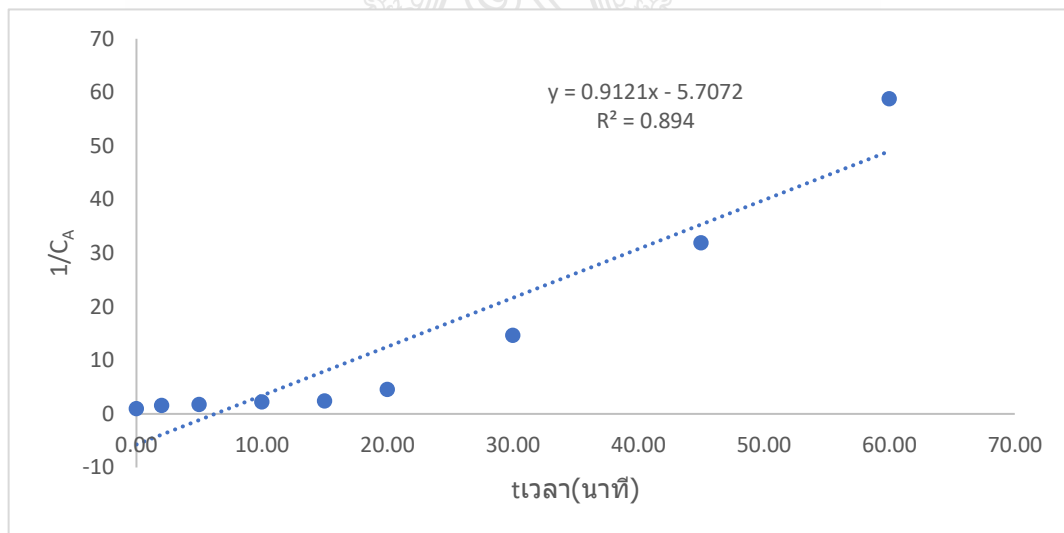


รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง
จลนพลศาสตร์อันดับ 0 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แรงเฉือนสูงแสดงดัง รูปที่ 4.6 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (นาที) กับ C_A สามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0137 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7438



รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง แสดงดัง รูปที่ 4.7 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (นาที) กับ $\ln(C_{A0}/C_A)$ สามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0738 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9655



รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

จลนพลศาสตร์อันดับ 2 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง แสดงดัง รูปที่ 4.8 โดยทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (นาที) กับ $1/C_A$ สามารถ

คำนวณหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาได้จากของความชันของกราฟ พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.9121 ต่อนาที และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.894 ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูงแสดงดังตารางที่ 4.2

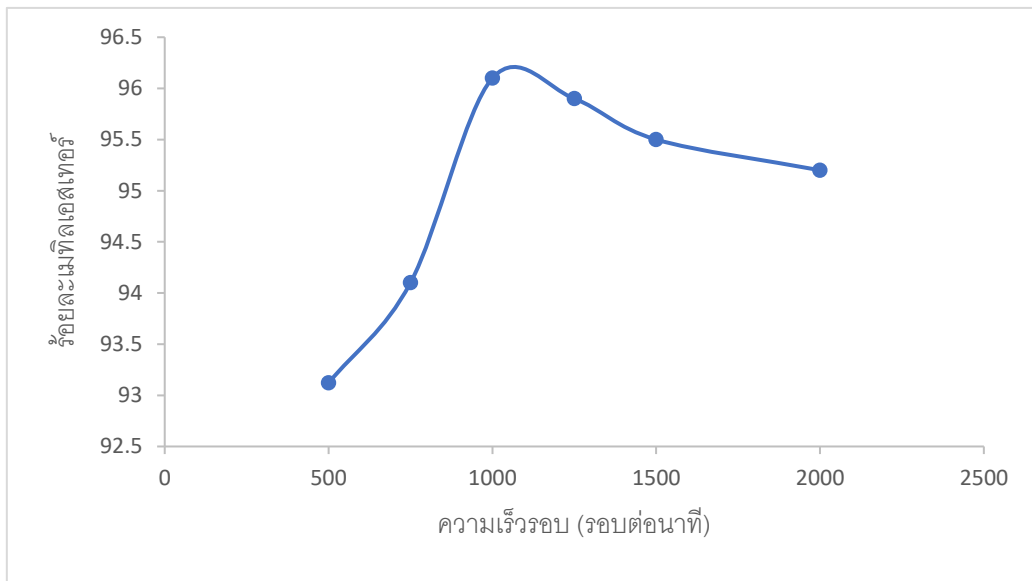
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและค่า R^2 ที่อันดับต่างๆ ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

อันดับ	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (ต่อนาที)	R^2
0	-0.0137	0.7380
1	0.0738	0.9655
2	0.9121	0.894

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.738 0.9655 และ 0.894 สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 0 อันดับ 1 และ อันดับ 2 ตามลำดับ ซึ่งค่า R^2 ของอันดับ 1 ให้ค่าสูงสุดที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แรงเฉือนสูงจึงมีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 มากที่สุด

4.1.3 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนสถานะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุน 500 ถึง 2000 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อน 260 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าหาร้อยละผลได้เมทิลเอสเตอร์สูงสุด คือ 96.1 โดยใช้ความเร็วรอบของจานหมุน 1000 รอบต่อนาที ทำการหาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยกำหนดให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากในการทดลองใช้ปริมาณเมทานอลที่มากเกินไป จึงไม่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา ปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า [39] จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 4.1

$$-r_{TG} = kC_{TG} \quad (4.1)$$

กำหนดให้ C_{TG} คือความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ หน่วยโมลต่อลิตร

r_{TG} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ หน่วยโมลต่อลิตรต่อนาที

k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา หน่วย ต่อนาที

จากสมการสมดุลมวล แสดงดังสมการที่ 4.1

$$F_{TG0} - F_{TG} + V(r_{TG}) = 0 \quad (4.2)$$

กำหนดให้ F_{TG0} คืออัตราการไหลเชิงโมลเริ่มต้นของไตรกลีเซอไรด์ หน่วยโมลต่อนาที

F_{TG} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของไตรกลีเซอไรด์ หน่วยโมลต่อนาที

V คือ ปริมาตรของปฏิกิริยาผสม

นำสมการที่ 4.2 ลงในสมการ 4.1 จะได้สมการที่ 4.3

$$QC_{TG0} - QC_{TG} + V(r_{TG}) = 0 \quad (4.3)$$

นำสมการที่ 4.1 แทนลงในสมการ 4.3 จะได้สมการที่ 4.4

$$QC_{TG0} - QC_{TG} + V(-kC_{TG}) = 0 \quad (4.4)$$

$$Q(C_{TG0} - C_{TG}) = V(kC_{TG}) \quad (4.5)$$

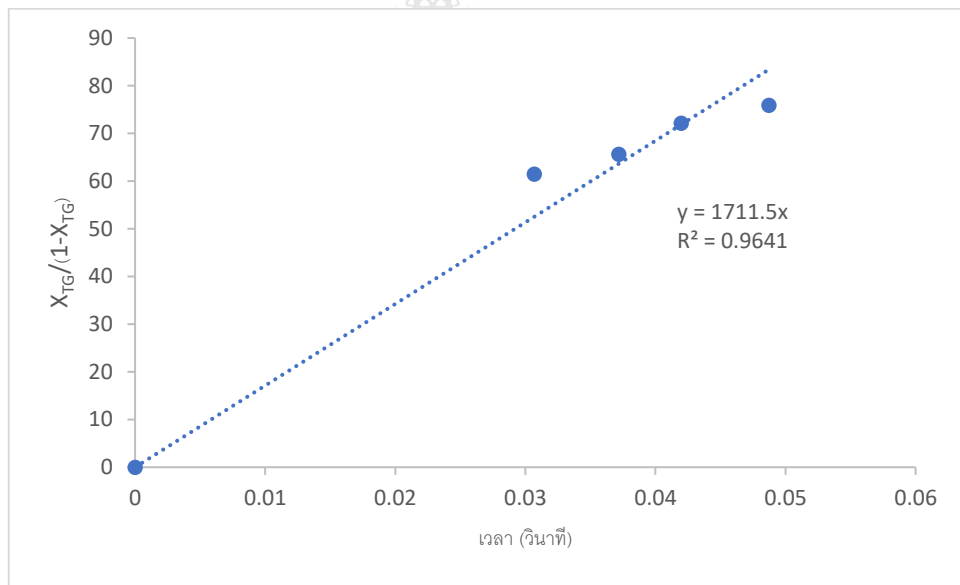
แทนค่า $C_{TG} = C_{TG0}(1 - X_{TG})$ ลงในสมการที่ 4.5

$$\frac{V}{Q} = T = \frac{X_{TG}}{k(1-X_{TG})} \quad (4.6)$$

ใช้สมการที่ 4.6 ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา

เมื่อ X_{TG} คือ คอนเวอร์ชันของไตรกลีเซอไรด์

T คือ เวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (วินาที)



รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวลา (วินาที) กับ $\frac{X_{TG}}{k(1-X_{TG})}$ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน กำหนดให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่า ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยามีค่า 1711.5 ต่อนาที ซึ่งมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล และแบบแรงเฉือนสูง และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9641 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 จากการทดลองการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน สภาวะการดำเนินงานที่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของงานหมุน 500 ถึง 2000 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อน 260 มิลลิลิตร

ต่อหน้าที่ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ 96.1 ซึ่งยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานของ EN14103 [2] ดังนั้นจึงทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ซึ่งเป็นวิธีการที่ลดจำนวนการทดลองและใช้ทรัพยากรในการทดลองน้อยลงอย่างมาก

4.2 ผลของการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

4.2.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยโปรแกรม MINITAB Version 18 โดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ทำการศึกษาตัวแปร 3 ปัจจัย คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.75 1.0 และ 1.25 ความเร็วรอบของจานหมุน 750 1000 และ 1250 รอบต่อนาที และอัตราการไหลรวมสารป้อน 130 260 และ 390 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 20 การทดลอง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวแปร ระดับในการทดลองและผลได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์

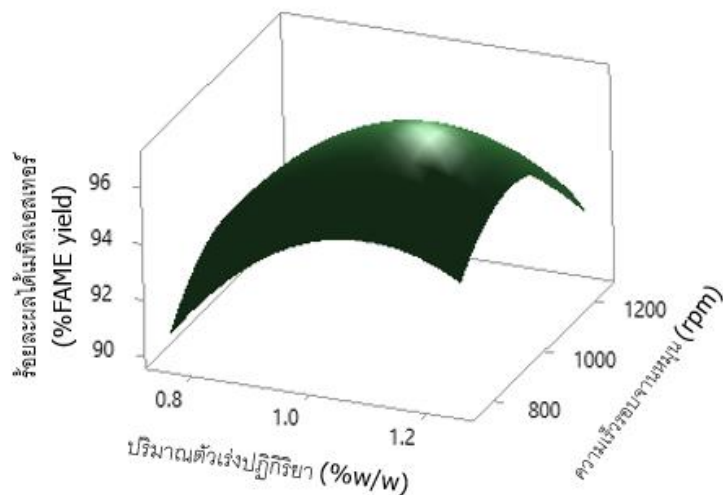
ลำดับ การ ทดลอง	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละ)	ความเร็วรอบ ของจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหล รวมสารป้อน (มิลลิลิตรต่อ นาที)	ร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์ (จากการ ทดลอง)	ร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์ (จากการ ทำนาย)
1	1.00	1000	260	96.10	96.91
2	0.75	1250	390	88.99	89.81
3	1.25	1000	260	95.80	95.93
4	1.25	750	130	94.10	94.31
5	1.00	1250	260	95.60	93.86
6	1.00	1000	130	96.40	93.34
7	0.75	750	390	94.94	94.20
8	1.00	1000	260	96.12	96.91
9	0.75	750	130	78.61	79.71
10	1.00	1000	260	96.10	96.91
11	1.00	1000	260	96.10	96.91

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวแปร ระดับในการทดลองและผลได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ (ต่อ)

ลำดับ การ ทดลอง	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละ)	ความเร็วรอบ ของจานหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการไหล รวมสารป้อน (มิลลิลิตรต่อ นาที)	ร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์ (จากการ ทดลอง)	ร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์ (จากการ ทำนาย)
12	0.75	1250	130	81.88	83.24
13	1.00	1000	390	90.62	92.78
14	1.25	1250	390	80.95	80.88
15	1.00	750	260	94.10	94.96
16	0.75	1000	260	94.12	93.09
17	1.25	1250	130	94.80	96.50
18	1.25	750	390	87.00	86.62
19	1.00	1000	260	96.12	96.91
20	1.00	1000	260	96.10	96.91

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

เมื่อได้สมการถดถอยสำหรับทำนายร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ จึงทำการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ซึ่งแสดงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเร็วรอบของจานหมุน และอัตราการไหลรวมสารป้อน ในการทดลองนี้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วรอบของจานหมุนส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ มีแนวโน้มลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความเร็วรอบของจานหมุน แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟพื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเร็วรอบของจานหมุน

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพังก์ชนิดเบส เพราะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด และให้ผลได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สูง จึงได้ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 0.75 1.0 และ 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 500 750 1000 1250 1500 และ 2000 รอบต่อนาทีตามลำดับ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลรวมสารป้อน 130 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 10 นาที

พบว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มทำให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 จนถึง 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ได้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 94.12 เป็น 95.80 จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น มีจำนวนมากเพียงพอที่สามารถทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ [40]

ความเร็วรอบของจานหมุนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ เมื่อปฏิกิริยาได้ดำเนินสู่สภาวะสมดุล คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารตั้งต้นและเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาสมบูรณ์ ซึ่ง

ความเร็วรอบจะสัมพันธ์กับเวลาที่สารทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ การเพิ่มความเร็วรอบทำให้สารที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ดังสมการที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ให้อัตราผลผลิตเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วรอบอื่น ๆ การเพิ่มความเร็วรอบทำให้เวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนน้อยลง เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ การสัมผัสกันระหว่างน้ำมันปาล์มกับเมทานอลสัมผัสไม่ดี จึงทำให้อัตราผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ลดลง การคำนวณเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน [8] แสดงดังสมการที่ 4.8

$$\tau = \frac{3}{4} \left(\frac{12\pi^2 \mu}{\rho Q^2 \omega^2} \right)^{1/3} (r_o^{4/3} - r_i^{4/3}) \quad (4.8)$$

Q คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (m^3/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

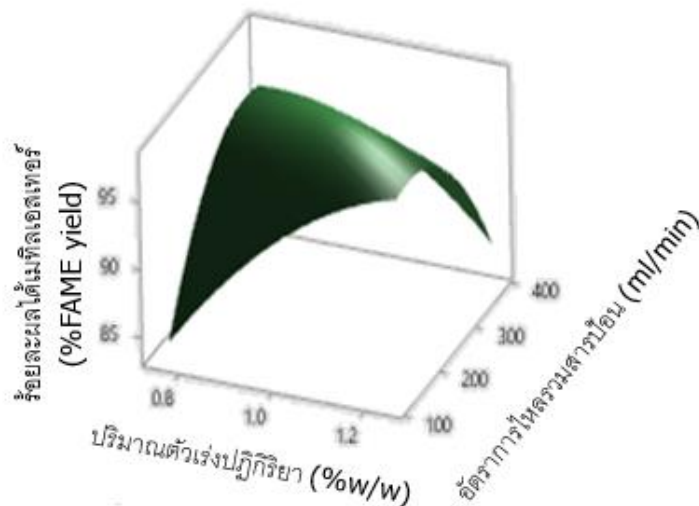
μ คือ ความหนืดของของเหลว (Pa.s)

ω คือ ความเร็วรอบของการหมุน (rad/s)

r_o คือ รัศมีของแผ่นจานหมุน (m)

r_i คือ รัศมีของระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ป้อน (m)

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของอัตราผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ระหว่างปริมาณตัวเร่งและอัตราการไหลรวมสารป้อน แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวตอบสนองของอัตราผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลรวมของสารป้อน

เมื่ออัตราการไหลรวมสูงขึ้นทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นบนจานหมุนมีความหนาเพิ่มขึ้น [41] สมการที่ใช้คำนวณความหนาของฟิล์มบนจานหมุน [39] แสดงดังสมการที่ 4.9

$$h = \left(\frac{3\mu Q}{2\pi\rho r^2\omega^2} \right)^{1/3} \quad (4.9)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (m^3/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg / m^3)

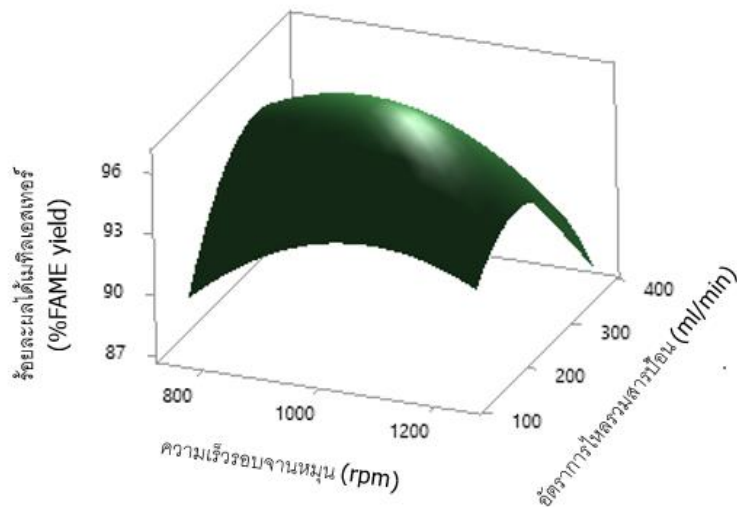
μ คือ ความหนืดของของเหลว (Pa.s)

ω คือ ความเร็วรอบของการหมุน (rad/s)

r คือ รัศมีของแผ่นจานหมุน (m)

h คือ ความหนาของฟิล์มบนจานหมุน

จากสมการที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมสารป้อน ส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นบนจานหมุนมีความหนาเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อลดอัตราการไหลรวมสารป้อน ส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นบนจานหมุนบางลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kai-Jie Chen และคณะ พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบของจานหมุน 1800 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 276 มิลลิลิตรต่อนาที เกิดร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 90.7 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 1145 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือเพียง 89.4 [8]



รูปที่ 4.13 กราฟพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ระหว่างความเร็วรอบของจานหมุนและอัตราการไหลรวมของสารป้อน

จากสมการที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของจานหมุนและอัตราการไหลรวมสารป้อนมีผลต่อร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของจานหมุน ความหนาของฟิล์มบนจานหมุนและเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของจานหมุน ความหนาของฟิล์มบนจานหมุนและเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

ความเร็วรอบของจานหมุน (รอบต่อนาที)	ความหนาฟิล์ม (ไมครอน)	เวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (วินาที)
500	248.32	3.50
750	189.50	2.85
1000	113.9	2.19
1250	134.81	1.89
1500	119.38	1.60
2000	98.55	1.38

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่า ความเร็วรอบของจานหมุนมีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มและเวลาที่สารทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของจานหมุนจะเกิดแรงเหวี่ยงจากจานหมุน ทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะบางตามแรงการเหวี่ยงของจานหมุน ระหว่างนั้นเกิดการผสมและทำปฏิกิริยา จะช่วยให้เพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำมันกับเมทานอลมากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทมวลได้ดีส่งผล

ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในระยะเวลาที่สั้น [8]

4.2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการถดถอย โดยใช้รูปแบบสมการกำลังสองที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จะได้สมการ ดังสมการที่ 4.7

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์} = & -65.4 + 132.2 A + 0.0990 B + 0.3481 C - 38.4 A^2 - 0.000040 B^2 \\ & - 0.000228 C^2 - 0.00534 AB - 0.1707 AC - 0.000061 BC \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)

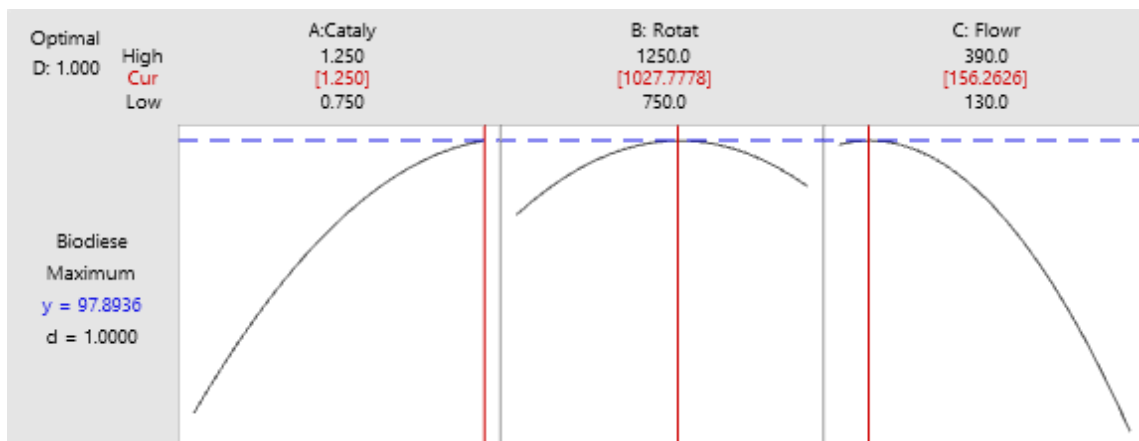
B คือ ความเร็วรอบของจานหมุน (รอบต่อนาที)

C คือ อัตราการไหลรวมสารป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

A^2 , B^2 , และ C^2 คือ รูปแบบเทอมยกกำลังสอง

AB, AC และ BC คือ ค่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการทดลอง

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง จะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 1028 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อน เท่ากับ 156.3 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ 97.90 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1.00 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนโดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง แสดงดังรูปที่ 4.14 และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติ ANOVA แสดงดังตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ห้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติ ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	588.402	65.378	23.28	0.000
Linear	3	25.256	8.419	3.00	0.082
A	1	19.909	19.909	7.09	0.024
B	1	4.264	4.264	1.52	0.246
C	1	1.082	1.082	0.39	0.549
AA	1	15.846	15.846	5.64	0.039
BB	1	17.332	17.332	6.17	0.032
CC	1	40.772	40.772	14.52	0.003
AB:	1	0.891	0.891	0.32	0.586
AC	1	246.309	246.309	87.71	0.000
BC	1	31.88	31.88	11.35	0.007

ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของค่า P-value และ F-Test แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตัวแปรที่มีผลต่อการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่า F-Test เท่ากับ 7.09 ความเร็วรอบของจานหมุน มีค่า F-Test เท่ากับ 1.52 และอัตราการใช้ไทล มีค่า F-Test เท่ากับ 0.39

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล แบบแรงเหวี่ยงสูง และแบบจานหมุน จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลได้ (Yield Efficiency) โดยเปรียบเทียบที่สภาวะ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ดังแสดงตารางที่ 4.7 พบว่าพลังงานที่ใช้ของเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล แบบแรงเหวี่ยงสูง และแบบจานหมุน มีค่าเท่ากับ 108.36 263.52 และ 10,947.85 กิโลจูล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพผลได้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพผลได้ 1.4451×10^{-1} กรัมใช้พลังงานเพียง 1 จูล

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องของปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ

เครื่องปฏิกรณ์	พลังงานที่ใช้ (กิโลจูล)	ประสิทธิภาพผลได้ (กรัมต่อจูล)	อ้างอิง
การกวนเชิงกล	108.36	2.2015×10^{-5}	งานวิจัยนี้
แรงเหวี่ยงสูง	263.52	7.3383×10^{-3}	งานวิจัยนี้
จานหมุน	10,947.85	1.4451×10^{-1}	งานวิจัยนี้
การกวนเชิงกล	-	1.5×10^{-4}	V.L. Gole และคณะ [42]
ไมโครเวฟ	-	2.6×10^{-3}	T.M. Barnard และคณะ [43]
ไฮโดรไดนามิกส์คาวิทേഷัน	-	12.5×10^{-4}	L.F. Chuah และคณะ [44]
อัลตราโซนิก	-	3.78×10^{-3}	Ji, Ji และคณะ [45]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ กวนเชิงกล แรงเฉือนสูงและแบบจานหมุน ที่สภาวะการดำเนินงานคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมัน ปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของ น้ำมันปาล์ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคงที่อัตราเร็วของการ เกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล แบบแรงเฉือนสูง และแบบจานหมุน เท่ากับ 0.0438 0.0738 และ 1711.5 ต่อนาทีตามลำดับ

5.1.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน โดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของจานหมุนเท่ากับ 1028 รอบต่อนาที และอัตราการไหลรวมสารป้อนเท่ากับ 156.3 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.9 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN14103

5.1.3 ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์การกวนเชิงกล แรงเฉือนสูงและ แบบจานหมุน พบว่า ประสิทธิภาพผลผลิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนให้ประสิทธิภาพผลผลิต ได้ดีที่สุดในแง่ของการผลิตไบโอดีเซล 1.4451×10^{-1} กรัม ใช้พลังงานเพียง 1 จูล

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน นอกเหนือจากปัจจัยที่ศึกษาในครั้งนี้อาจยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ เมทิลเอสเทอร์ เช่น อุณหภูมิ พื้นผิวของจานหมุน ตำแหน่งการป้อนสารตั้งต้นที่เข้าสู่กระบวนการผลิต เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยดังกล่าวเพิ่มเติม

5.2.2 สำหรับการศึกษาค่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตจึงควรมีการ พัฒนาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

บรรณานุกรม

- [1] M. Mofijur, M.G. Rasul, J. Hyde, A.K. Azad, R. Mamat, M.M.K. Bhuiya, Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (2016) 265-278.
- [2] G. Knothe, L.F. Razon, Biodiesel fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 58 (2017) 36-59.
- [3] D.D. Pukale, G.L. Maddikeri, P.R. Gogate, A.B. Pandit, A.P. Pratap, Ultrasound assisted transesterification of waste cooking oil using heterogeneous solid catalyst, *Ultrasonics Sonochemistry*, 22 (2015) 278-286.
- [4] D.Y.C. Leung, X. Wu, M.K.H. Leung, A review on biodiesel production using catalyzed transesterification, *Applied Energy*, 87 (2010) 1083-1095.
- [5] S. Joshi, P.R. Gogate, P.F. Moreira, R. Giudici, Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer, *Ultrasonics Sonochemistry*, 39 (2017) 645-653.
- [6] N. Azcan, O. Yilmaz, Microwave assisted transesterification of waste frying oil and concentrate methyl ester content of biodiesel by molecular distillation, *Fuel*, 104 (2013) 614-619.
- [7] L.F. Chuah, J.J. Klemeš, S. Yusup, A. Bokhari, M.M. Akbar, A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production, *Journal of Cleaner Production*, 146 (2017) 181-193.
- [8] K.-J. Chen, Y.-S. Chen, Intensified production of biodiesel using a spinning disk reactor, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 78 (2014) 67-72.
- [9] H.J. Yang, G.W. Chu, Y. Xiang, J.F. Chen, Characterization of micromixing efficiency in rotating packed beds by chemical methods, *Chemical Engineering Journal*, 121 (2006) 147-152.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] S. Mohammadi, A. Harvey, K.V.K. Boodhoo, Synthesis of TiO₂ nanoparticles in a spinning disc reactor, *Chemical Engineering Journal*, 258 (2014) 171-184.
- [11] C.Y. Tai, Y.H. Wang, Y.W. Kuo, M.H. Chang, H.S. Liu, Synthesis of silver particles below 10nm using spinning disk reactor, *Chemical Engineering Science*, 64 (2009) 3112-3119.
- [12] G.B. L. M. Cafiero, † A. Chianese,* † and R. J. J. Jachuck, Process Intensification: Precipitation of Barium Sulfate Using a Spinning Disk Reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41 (2002) 5240-5246.
- [13] A.J. Expósito, D.A. Patterson, W.S.W. Mansor, J.M. Monteagudo, E. Emanuelsson, I. Sanmartín, A. Durán, Antipyrine removal by TiO₂ photocatalysis based on spinning disc reactor technology, *Journal of Environmental Management*, 187 (2017) 504-512.
- [14] Y. Mohammadi, A.S. Pakdel, M.R. Saeb, K. Boodhoo, Monte Carlo simulation of free radical polymerization of styrene in a spinning disc reactor, *Chemical Engineering Journal*, 247 (2014) 231-240.
- [15] K.V.K. Boodhoo, R.J. Jachuck, Process intensification: spinning disk reactor for styrene polymerisation, *Applied Thermal Engineering*, 20 (2000) 1127-1146.
- [16] Y.-C. Lin, K.-H. Hsu, J.-F. Lin, Rapid palm-biodiesel production assisted by a microwave system and sodium methoxide catalyst, *Fuel*, 115 (2014) 306-311.
- [17] R. Sawangkeaw, S. Teeravitud, K. Bunyakiat, S. Ngamprasertsith, Biofuel production from palm oil with supercritical alcohols: Effects of the alcohol to oil molar ratios on the biofuel chemical composition and properties, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 10704-10710.
- [18] E.M. Shahid, Y. Jamal, Production of biodiesel: A technical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 4732-4745.
- [19] A. Banerjee, R. Chakraborty, Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review, *Resources, Conservation and Recycling*, 53 (2009) 490-497.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] I.A. Musa, The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process, *Egyptian Journal of Petroleum*, 25 (2016) 21-31.
- [21] C.D. Mandolesi de Araújo, C.C. de Andrade, E. de Souza e Silva, F.A. Dupas, Biodiesel production from used cooking oil: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27 (2013) 445-452.
- [22] H. Pourzolfaghar, F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua, A review of the enzymatic hydroesterification process for biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61 (2016) 245-257.
- [23] P.P. Oh, H.L.N. Lau, J. Chen, M.F. Chong, Y.M. Choo, A review on conventional technologies and emerging process intensification (PI) methods for biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 5131-5145.
- [24] M. Mostafaei, B. Ghobadian, M. Barzegar, A. Banakar, Optimization of ultrasonic assisted continuous production of biodiesel using response surface methodology, *Ultrasonics Sonochemistry*, 27 (2015) 54-61.
- [25] A.R. Gupta, V.K. Rathod, Calcium diglyceroxide catalyzed biodiesel production from waste cooking oil in the presence of microwave: Optimization and kinetic studies, *Renewable Energy*, 121 (2018) 757-767.
- [26] M. Anwar, M.G. Rasul, N. Ashwath, Production optimization and quality assessment of papaya (*Carica papaya*) biodiesel with response surface methodology, *Energy Conversion and Management*, 156 (2018) 103-112.
- [27] A.V. Mohod, P.R. Gogate, G. Viel, P. Firmino, R. Giudici, Intensification of biodiesel production using hydrodynamic cavitation based on high speed homogenizer, *Chemical Engineering Journal*, 316 (2017) 751-757.
- [28] K.Y. Wong, J.-H. Ng, C.T. Chong, S.S. Lam, W.T. Chong, Biodiesel process intensification through catalytic enhancement and emerging reactor designs: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116 (2019) 109399.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] S. Bangerth, R. Tiwari, A. Shooshtari, M. Ohadi, Heat/mass transfer enhancement of an exothermic absorption utilizing a spinning disk reactor, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129 (2019) 326-341.
- [30] Z. Qiu, J. Petera, L.R. Weatherley, Biodiesel synthesis in an intensified spinning disk reactor, *Chemical Engineering Journal*, 210 (2012) 597-609.
- [31] M. Agarwal, G. Chauhan, S.P. Chaurasia, K. Singh, Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43 (2012) 89-94.
- [32] Abdullah, R.N. Rahmawati Sianipar, D. Ariyani, I.F. Nata, Conversion of palm oil sludge to biodiesel using alum and KOH as catalysts, *Sustainable Environment Research*, 27 (2017) 291-295.
- [33] D. Celante, J.V.D. Schenkel, F. de Castilhos, Biodiesel production from soybean oil and dimethyl carbonate catalyzed by potassium methoxide, *Fuel*, 212 (2018) 101-107.
- [34] M. Maghami, S.M. Sadrameli, B. Ghobadian, Production of biodiesel from fishmeal plant waste oil using ultrasonic and conventional methods, *Applied Thermal Engineering*, 75 (2015) 575-579.
- [35] G. Chen, R. Shan, J. Shi, B. Yan, Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts, *Bioresource Technology*, 171 (2014) 428-432.
- [36] K.-S. Chen, Y.-C. Lin, K.-H. Hsu, H.-K. Wang, Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system, *Energy*, 38 (2012) 151-156.
- [37] S. Manickam, V.N.D. Arigela, P.R. Gogate, Intensification of synthesis of biodiesel from palm oil using multiple frequency ultrasonic flow cell, *Fuel Processing Technology*, 128 (2014) 388-393.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [38] Y.H. Tan, M.O. Abdullah, J. Kansedo, N.M. Mubarak, Y.S. Chan, C. Nolasco-Hipolito, Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst derived from calcined fusion waste chicken and fish bones, *Renewable Energy*, 139 (2019) 696-706.
- [39] W. Appamana, P. Sukjarern, K. Ngaosuwan, S. Assabumrungrat, Intensification of Continuous Biodiesel Production Using a Spinning Disc Reactor, *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, 52 (2019) 545-553.
- [40] T. Eryilmaz, F. Aksoy, L. Aksoy, H. Bayrakçeken, F. Aysal, S. Şahin, M. Kadir Yeşilyut, Process optimization for biodiesel production from neutralized waste cooking oil and the effect of this biodiesel on engine performance, 2018.
- [41] D. Ghiasy, K.V.K. Boodhoo, M.T. Tham, Thermographic analysis of thin liquid films on a rotating disc: Approach and challenges, *Applied Thermal Engineering*, 44 (2012) 39-49.
- [42] V.L. Gole, K.R. Naveen, P.R. Gogate, Hydrodynamic cavitation as an efficient approach for intensification of synthesis of methyl esters from sustainable feedstock, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 71 (2013) 70-76.
- [43] T.M. Barnard, N.E. Leadbeater, M.B. Boucher, L.M. Stencil, B.A. Wilhite, Continuous-Flow Preparation of Biodiesel Using Microwave Heating, *Energy & Fuels*, 21 (2007) 1777-1781.
- [44] L.F. Chuah, S. Yusup, A.R. Abd Aziz, A. Bokhari, J.J. Klemeš, M.Z. Abdullah, Intensification of biodiesel synthesis from waste cooking oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of operating parameters on methyl ester conversion, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95 (2015) 235-240.
- [45] J. Ji, J. Wang, Y. Li, Y. Yu, Z. Xu, Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation, *Ultrasonics*, 44 (2006) e411-e414.



ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ



1. ตัวอย่างคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม

ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม = 890.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นของเมทานอล = 792 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

มวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม = 815.074 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของเมทานอล = 32.04 กรัมต่อโมล

วิธีทำ

น้ำมัน = 1 โมล

เมทานอล = 6 โมล

จาก $g = n \times m$

น้ำมันปาล์ม : เมทานอล

815.074 g : 192.24 g

0.815 Kg : 0.19224 Kg

จาก $V = m/\rho$

915.71 ml : 242.72 ml (รวม 1158.43 ml)

นำ 0.2244 คูณ ทั้ง 2 ฝั่ง ; 205.52 ml : 54.47 ml

อัตราการไหลรวม = 260 มิลลิลิตรต่อนาที

$$m = \frac{890.1 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 205.52 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$m = 182.93 \text{ g}$$

คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 %โดยน้ำหนัก

$$\text{NaOH 1.0 \%โดยน้ำหนัก} = \frac{1.0\% \times 182.93 \text{ g}}{100\%} = 1.8293 \text{ g}$$

2. การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ตามมาตรฐาน EN14103

$$\text{ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\Sigma A) - AEI}{AEI} \times \frac{CEI \times VEI}{m} \times 100$$

เมื่อ

ΣA คือ ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟโดยคิดจาก $C_{14:0}$ ถึง $C_{24:1}$

AEI คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $C_{17:0}$

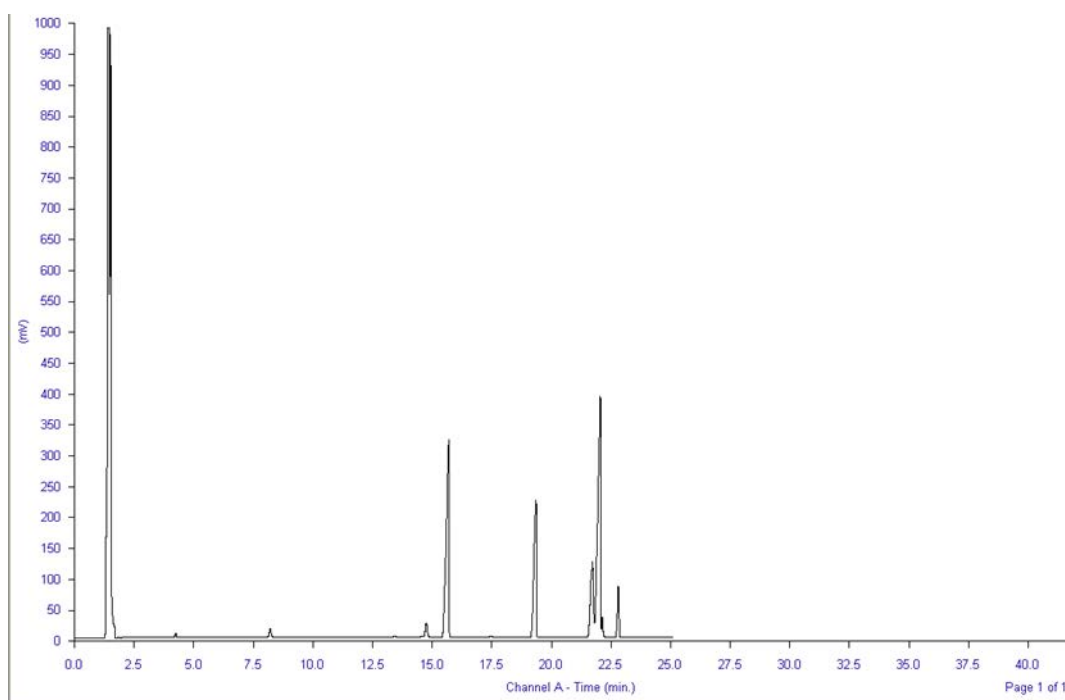
CEI คือ ความเข้มข้นของ $C_{17:0}$ หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL)

VEI คือ ปริมาตรสารเมทิลเฮปตะเดคาโนเอตหน่วย มิลลิลิตร (mL)

m คือ น้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ หน่วย มิลลิกรัม (mg)

ตัวอย่างการคำนวณ

สภาวะการทำงาน : ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุนที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.0โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1: 6 และอัตราการใช้รวมสารป้อนเท่ากับ 260 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงปริมาณร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์ที่ฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ก.1 ผลจากการวิเคราะห์สารตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

สาร	Retention time (นาที)	พื้นที่
C _{14:0}	15.04	25379.88
C _{16:0}	16.03	3566487.86
C _{17:0}	19.65	1988061.80
C _{18:0}	22.00	951795.38
C _{18:1,2}	22.33	4624967.56
C _{18:3}	23.11	382274.47

น้ำหนักเมทิลเฮปตะเดคาโนเอต = 51.1 กรัม

น้ำหนักของสารตัวอย่างผลิตภัณฑ์ = 253.2 กรัม

พื้นที่ใต้กราฟของสารเมทิลเฮปตะเดคาโนเอต = 1988061.80

พื้นที่รวมของพื้นที่ใต้กราฟ $\sum A = 25379.88 + 3566487.86 + 1988061.80 + 951795.38 + 4624967.56 + 382274.47 = 11538966.95$

$$\text{ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์} = \frac{11538966.95 - 1988061.80}{1988061.80} \times \frac{51.1}{253.2} \times 100 = 96.9$$

3. การคำนวณเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Residence time)

สมการ Residence time

$$\tau = \frac{3}{4} \left(\frac{12\pi^2 \mu}{\rho Q^2 \omega^2} \right)^{1/3} (r_o^{4/3} - r_i^{4/3})$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (m^3/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดของของเหลว (Pa.s)

ω คือ ความเร็วรอบของการหมุน (rad/s)

r_o คือ รัศมีของแผ่นจานหมุน (m)

r_i คือ รัศมีของระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ป้อน (m)

ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

อัตราการไหลรวม = 260 (ml/min)

ความหนืดของน้ำมันปาล์ม = 88.6×10^{-3} Pa.s

ความหนืดของน้ำมันปาล์ม = 44.7×10^{-3} Pa.s

ความหนาแน่นของของเหลว = 890.1 (kg/m^3)

รัศมีของแผ่นจานหมุน = 0.07 m

ระยะห่างระหว่างของเหลวที่ป้อน 2 ตำแหน่ง = 0 m

ความเร็วรอบ = 500 (rad/min)

$$\text{แปลงหน่วยอัตราการไหล} = \frac{260 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 4.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{แทนค่า } \tau = \frac{3}{4} \left(\frac{12\pi^2 (88.6 \times 10^{-3})}{890.1 \times (4.33 \times 10^{-6})^2 \left(\frac{500}{60}\right)^2} \right)^{1/3} \times (0.07^{4/3} - 0^{4/3})$$

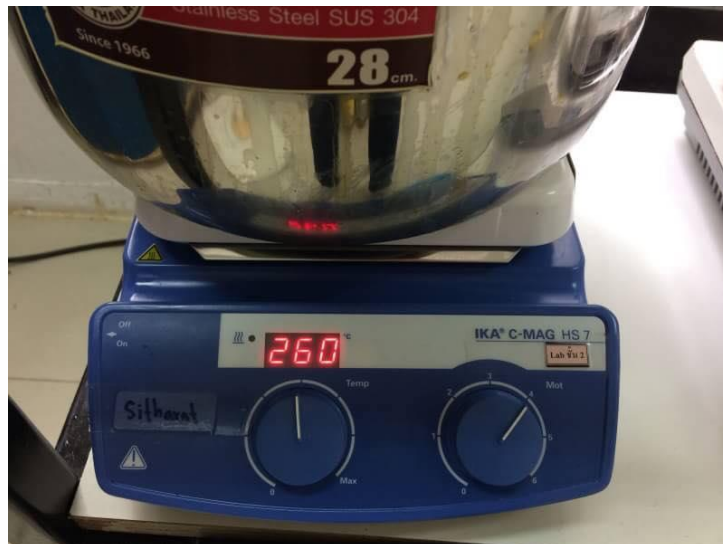
$$\tau = 4.5 \text{ s}$$

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน



1. ให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มจนมีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.1 การอุ่นน้ำมัน

2. ทำการชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามทีคำนวณไว้ในแต่ละครั้ง



รูปที่ ข.2 การชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์

3. จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายกับเมทานอลโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารในการละลายสารให้ผสมกัน



รูปที่ ข.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์และเมทานอล



ภาคผนวก ค
การคำนวณประสิทธิภาพผลได้



1. กำลังของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

1.1. เครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงกำลังของอุปกรณ์ต่างๆสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบการกวนเชิงกล

อุปกรณ์	กำลังที่วัดได้ (W หรือ J/s)
เครื่องให้ความร้อน 140 องศาเซลเซียส+ เครื่องกวน No.6	21.6
ปั๊มออกซิเจน	8.5

1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงกำลังของอุปกรณ์ต่างๆสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

อุปกรณ์	กำลังที่วัดได้ (W หรือ J/s)
เครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง 10000 รอบต่อนาที	61.8
เครื่องให้ความร้อน 140 องศาเซลเซียส	3.0
ปั๊มออกซิเจน	8.4

1.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงกำลังของอุปกรณ์ต่างๆสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน

อุปกรณ์	กำลังที่วัดได้ (W หรือ J/s)
อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	2624
เครื่องให้ความร้อน 300 องศาเซลเซียส+ เครื่องกวน No.6	922.0
เครื่องกวนเมทานอล No.6	26.5
ปั๊มสุบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (น้ำมัน)	6.6
ปั๊มสุบจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (เมทานอล)	23.2
เครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน 1000 รอบนาที	96.3

2. การคำนวณพลังงาน

2.1 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานที่ใช้ของเครื่องเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล
จากสมการ

$$W = P \times t$$

$$W = (21.6 + 8.5) \text{ จูลต่อวินาที} \times 60 \text{ วินาที} \times 60 \text{ นาที}$$

$$W = 108.36 \text{ กิโลจูล}$$

2.2 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานที่ใช้ของเครื่องเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเหวี่ยงสูง
จากสมการ

$$W = P \times t$$

$$W = (61.8+3.0+8.4) \text{ จูลต่อวินาที} \times 60 \text{ วินาที} \times 60 \text{ นาที}$$

$$W = 263.52 \text{ กิโลจูล}$$

2.3 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานที่ใช้ของเครื่องเครื่องปฏิกรณ์แบบจานหมุน
จากสมการ

$$W = P \times t$$

$$W = (2624+922+26.5+6.6+23.2+96.3) \text{ จูลต่อวินาที} \times 2.96 \text{ วินาที}$$

$$W = 10947.85 \text{ กิโลจูล}$$

3. การคำนวณน้ำหนักไบโอดีเซล

ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม คือ 92.93

น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม คือ 178.9 กรัม

$$\text{ปริมาณร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักไบโอดีเซล}}{\text{น้ำหนักน้ำมันปาล์ม}} \times 100$$

$$\text{น้ำหนักไบโอดีเซล} = \frac{92.93\% \times 178.9 \text{ กรัม}}{100\%}$$

$$\text{น้ำหนักไบโอดีเซล} = 166.25 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นน้ำหนักไบโอดีเซลของน้ำมันปาล์ม คือ 166.25 กรัม

4. การคำนวณประสิทธิภาพผลได้ (Yield efficiency)

$$\text{ประสิทธิภาพผลได้} = \frac{\text{ปริมาณไบโอดีเซล (กรัม)}}{\text{กำลัง (จูลต่อวินาที)} \times \text{เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพผลได้} = \frac{1620.69 \text{ กรัม}}{4166.1 \text{ จูลต่อวินาที} \times 2.92 \text{ วินาที}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพผลได้} = 0.13 \text{ กรัม/จูล}$$



ภาคผนวก ง

การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์สำหรับวิเคราะห์

ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1. ชั่งเมทิลเฮปตะเดคาโนเอตน้ำหนัก 0.05XX กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง



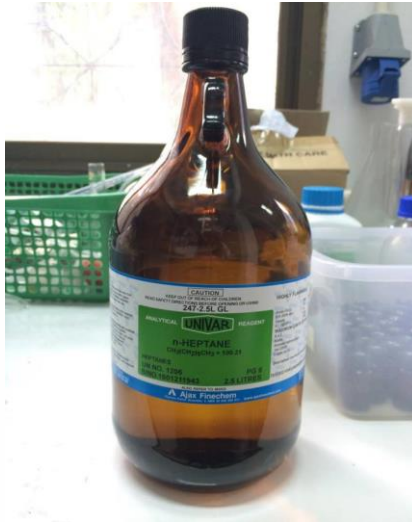
รูปที่ ง.1 เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต

2. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 0.25XX กรัม โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง



รูปที่ ง.2 ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

3. เติมเฮปเทนจำนวน 5 มิลลิลิตรลงไปผสมสารที่ได้จากข้อ 1 และ 2 รวมเข้าด้วยกัน



รูปที่ ง.3 เฮปเทน

4. นำสารละลายที่เตรียมได้ใส่ขวด Vial สำหรับเตรียมฉีควิเคราะห์เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



รูปที่ ง.4 ขวด Vial สำหรับเตรียมฉีควิเคราะห์เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



ภาคผนวก จ

การศึกษาจลนพลศาสตร์

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์กวน
เชิงกล

ตารางที่ จ.1 แสดงผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์กวนเชิงกล

Time (min)	%FAME	Weight of Biodiesel
0	0.0	0.00
3	16.4	58.51
5	25.4	90.41
10	48.9	174.06
20	61.2	217.62
30	73.1	260.08
40	83.5	297.14
60	92.0	327.43

หมายเหตุ : %FAME = (Weight of Biodiesel/Weight of Palm Oil) *100



ตารางที่ จ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างไตรกลีเซอไรด์ที่เริ่มต้นทำปฏิกิริยาและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือ
หลังทำปฏิกิริยา

Time (min)	%FAME	3FAME	ใช้ TG (mol)	เหลือ TG (C _A)
0	0.0	0.00	0.00	1.00
3	16.4	0.49	0.16	0.84
5	25.4	0.76	0.25	0.75
10	48.9	1.47	0.49	0.51
20	61.2	1.83	0.61	0.39
30	73.1	2.19	0.73	0.27
40	83.5	2.50	0.83	0.17
60	92.0	2.76	0.92	0.08

วิธีการหาสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยวิธีการอินทิเกรต

1. วิเคราะห์เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

$$\text{สมการการออกแบบ} \quad -r_A = -\frac{dC_A}{dt} \quad (1)$$

$$\text{สมการอัตรา} \quad -r_A = kC_A^n \quad (2)$$

$$\text{นำ (1) = (2)} \quad -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad (3)$$

2. คาดเคาอันดับปฏิกิริยา

$$n=0 \quad -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^0 = k \quad (4)$$

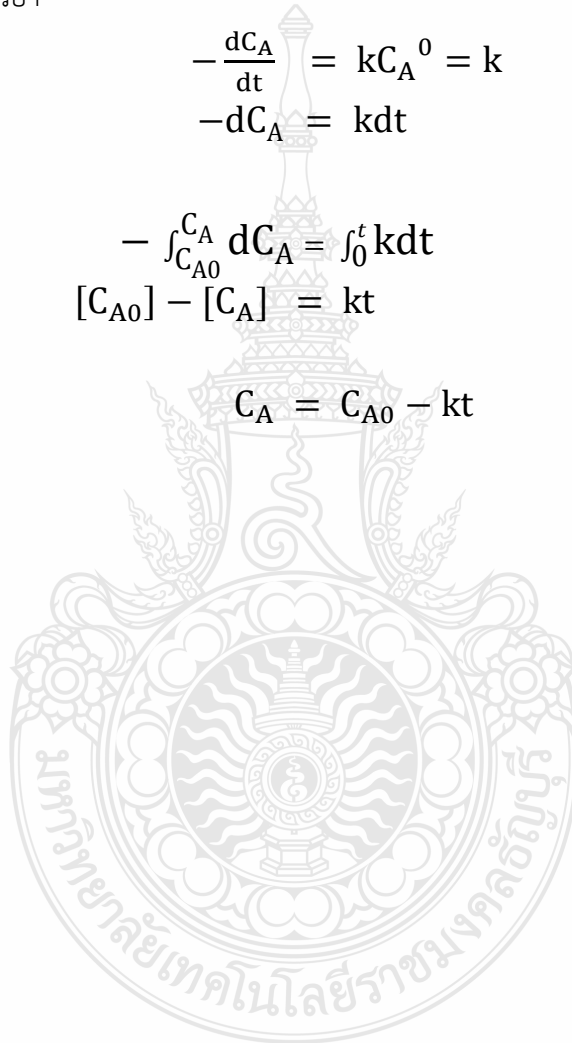
3. จัดรูปแบบสมการ

$$-dC_A = kdt$$

4. อินทิเกรต

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A = \int_0^t kdt$$
$$[C_{A0}] - [C_A] = kt$$

$$C_A = C_{A0} - kt \quad (5)$$



1. วิเคราะห์เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

$$\text{สมการการออกแบบ} \quad -r_A = -\frac{dC_A}{dt} \quad (1)$$

$$\text{สมการอัตรา} \quad -r_A = kC_A^n \quad (2)$$

$$\text{นำ (1) = (2)} \quad -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad (3)$$

2. คาดเดาอันดับปฏิกิริยา

$$n=1 \quad -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^1 \quad (6)$$

3. จัดรูปแบบสมการ

$$-\frac{1}{C_A} dC_A = k dt \quad ; \quad k \neq f(t)$$

4. อินทิเกรต

$$\begin{aligned} \int_{C_{A0}}^{C_A} -\frac{1}{C_A} dC_A &= \int_0^t k dt \\ -\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{1}{C_A} dC_A &= k \int_0^t dt \\ -[\ln C_A]_{C_{A0}}^{C_A} &= k [t]_0^t \\ -[\ln C_A - \ln C_{A0}] &= k [t - 0] \\ -\ln C_A + \ln C_{A0} &= kt \\ \ln \frac{C_{A0}}{C_A} &= kt \end{aligned} \quad (7)$$



1. วิเคราะห์เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

สมการการออกแบบ
$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} \quad (1)$$

สมการอัตรา
$$-r_A = kC_A^n \quad (2)$$

นำ (1) = (2)
$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n \quad (3)$$

2. คาดเดาอันดับปฏิกิริยา

$n=2$
$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad (8)$$

3. จัดรูปแบบสมการ

$$-\frac{1}{C_A^2} dC_A = k dt$$

4. อินทิเกรต

$$\begin{aligned} -\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{1}{C_A^2} dC_A &= \int_0^t k dt \\ \frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} &= kt \\ \frac{1}{C_A} &= \frac{1}{C_{A0}} + kt \end{aligned} \quad (9)$$



ตารางที่ จ.3 แสดงจลนพลศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 0 1 และ 2 ตามลำดับ

เวลา (นาที)	อันดับปฏิกิริยา		
	0	1	2
	C_A	$\ln (C_{A0}/C_A)$	$1/C_A$
0	1.00	0.00	0.00
3	0.84	0.18	0.16
5	0.75	0.29	0.25
10	0.51	0.67	0.49
20	0.39	0.95	0.61
30	0.27	1.31	0.73
40	0.17	1.80	0.83
60	0.08	2.53	0.92

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

ตารางที่ จ.4 แสดงผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแรงเฉือนสูง

Time (min)	%FAME	Weight of Biodiesel
0	0.00	0.00
2	38.15	135.77
5	43.79	155.84
10	56.17	199.90
15	59.26	210.89
20	78.17	278.19
30	93.20	331.68
45	96.87	344.74
60	98.30	349.83

ตารางที่ จ.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างไตรกลีเซอไรด์ที่เริ่มต้นทำปฏิกิริยาและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือ
หลังทำปฏิกิริยา

Time (min)	%FAME	3FAME	ใช้ TG (mol)	เหลือ TG (C_A)
0	0.00	0.00	0.00	1.00
2	38.15	1.14	0.38	0.62
5	43.79	1.31	0.44	0.56
10	56.17	1.69	0.56	0.44
15	59.26	1.78	0.60	0.41
20	78.17	2.35	0.78	0.22
30	93.2	2.80	0.93	0.07
45	96.87	2.91	0.97	0.03
60	98.30	2.95	0.98	0.02

ตารางที่ จ.6 แสดงจลนพลศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 0 1 และ 2 ตามลำดับ

เวลา (นาที)	อันดับปฏิกิริยา		
	0	1	2
	C_A	$\ln(C_{A0}/C_A)$	$1/C_A$
0	1.00	0.00	1.00
2	0.62	0.48	1.62
5	0.56	0.58	1.78
10	0.44	0.82	2.28
15	0.41	0.90	2.45
20	0.22	1.52	4.58
30	0.07	2.69	14.71
45	0.03	3.46	31.95
60	0.02	4.07	58.82

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ความเร็วรอบของงานหมุน 1000 ถึง 2000 รอบต่อนาที อัตราการไหลรวมสารป้อน 260 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ จ.7 ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน

ความเร็วรอบของงานหมุน (รอบต่อนาที)	ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์
1000	96.10
1250	95.90
1500	95.50
2000	95.20

อัตราการไหลของน้ำมัน = 205.52 มิลลิลิตรต่อนาที

น้ำหนักของอัตราการไหล = 182.93 กรัมต่อนาที

TG = 0.22 โมลต่อนาที

3FAME = 0.67 โมลต่อนาที

ทำการหาจลนพลศาสตร์การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน โดยกำหนดให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 4 ข้อมูลการหาจลนพลศาสตร์แสดงดังตารางที่ จ. 8

ตารางที่ จ.8 แสดงข้อมูลการหาจลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบงานหมุน

Rotation (rpm)	F_{a0} (mol)	F_a ที่ต้องใช้ (mol)	F_{a0} จริง (mol)	F_a ที่ใช้จริง (mol)	F_a ที่เหลือ (mol)	$x = \frac{F_{a0} - F_a}{F_{a0}}$
1000	0.6733	0.2244	0.6471	0.2157	0.0088	0.9870
1250	0.6733	0.2244	0.6457	0.2152	0.0092	0.9863
1500	0.6733	0.2244	0.6430	0.2143	0.0101	0.9850
2000	0.6733	0.2244	0.6410	0.2137	0.0108	0.9840

จากนั้นทำการพลอตกราฟระหว่าง เวลา กับ $\frac{X_{TG}}{k(1-X_{TG})}$ ตามสมการที่ 4.6 ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 4 ตารางที่ จ.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ $\frac{X_{TG}}{k(1-X_{TG})}$

T (s)	$\frac{X_{TG}}{(1-X_{TG})}$
0.0487	75.9231
0.0420	72.1707
0.0372	65.6667
0.0307	61.5000



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวอัจฉราพร มีมงคล
วัน เดือน ปีเกิด 26 มีนาคม 2535
ที่อยู่ 10 หมู่ 6 ตำบลวังน้อย อำเภอลำลูกกา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
การศึกษา ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน บริษัท เทอราโกร เพอร์ติไลเซอร์ จำกัด
เบอร์โทรศัพท์ 090-0019431
อีเมล Autcharaporn153@gmail.com

