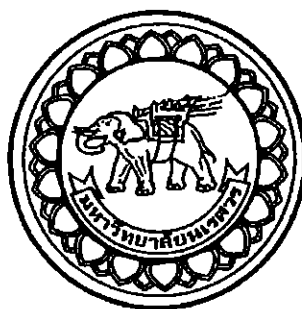




การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้
โปรแกรม Aspen Plus : กรณีศึกษาการระความร้อนของหน่วยปฏิบัติการหลัก
A SIMULATION OF BIODIESEL PRODUCTION PROCESS
FROM WASTE VEGETABLE OILS BY USING ASPEN PLUS :
CASE STADY OF HEAT DUTY MAIN UNITS

นางสาวจรินทร์ทิพย์ สายแสง

รหัส 53364673

นางสาวสุภารัตน์ นามลี

รหัส 53364932

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 25 / 11. 0. / 56
เลขทะเบียน..... 16550162
เลขเรียกหนังสือ..... 55.
มหาวิทยาลัยนเรศวร 9 / 66

๗

๕๕๕๕

**ใบรับรองปริญญาโท**

ชื่อหัวข้อโครงการ การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus กรณีศึกษาภาวความร้อนของหน่วยปฏิบัติการหลัก

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวจรินทร์ทิพย์ สายแสง รหัส 53364673

 นางสาวสุภารัตน์ นามลี รหัส 53364932

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์อาภาภรณ์ จันทรปรีกษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์อภาภรณ์ จันทรปรีกษ์)

.....กรรมการ

(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

.....การ

(ดร.ภมรรัตน์ จันทรธรรม)

วันที่ ๑๑/๑๑/๖๖กรรมการ

(ดร.นิคม กุลมเกลี้ยง)

กรรมการ

(ดร.อิศรารุช ประเสริฐสังข์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus กรณีศึกษาภาระความร้อนของหน่วยปฏิบัติการหลัก		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวจรินทร์ทิพย์	สายแสง	รหัส 53364673
	นางสาวสุภารัตน์	นามลี	รหัส 53364932
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์อภาภรณ์ จันทรปรีกษ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบ (Pilot Plant) ด้วยการจำลองกระบวนการโดยโปรแกรมจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีทั่วไปด้วยปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ิฟิเคชันใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเมทานอลเป็นสารป้อนเข้า ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สมมติ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วสารป้อนเข้าในกระบวนการจำลองเป็นไตรโอเลอิน (Triolein: $C_{57}H_{104}O_6$) ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิก (Oleic Acid: $C_{18}H_{34}O_2$) ซึ่งเป็นสารองค์ประกอบหลักในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดยเริ่มศึกษาจำลองกระบวนการสำหรับการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คอลัมน์การกลั่น มุ่งสนใจผลกระทบความแตกต่างของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันของเมทานอลส่วนเกินจากผลิตภัณฑ์จากถังปฏิกริยารวมทั้งพารามิเตอร์การดำเนินงานของคอลัมน์การกลั่น เช่น อัตราส่วนป้อนกลับ ความดันของคอลัมน์การกลั่น โดยการใช้ภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นเป็นตัวแทนค่าการใช้พลังงาน การวิเคราะห์ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า สภาวะการดำเนินงานกลั่นและพารามิเตอร์ต่างๆ มีความเป็นไปได้ของการการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องประมาณร้อยละ 95-98 ของเมทานอลส่วนเกินก่อนที่จะแยกเฟสของการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

จากนั้นศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบ แบบ 1 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ตามลำดับ ซึ่งในการจำลองกระบวนการได้มี

การปรับเปลี่ยนปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 การวิเคราะห์ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันพืชใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงให้ร้อยละผลผลิตที่ต่ำ (%Yield) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระก่อนและสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ศึกษาให้ร้อยละผลผลิตไม่แตกต่างกันมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง คือ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์อาภาภรณ์ จันทรปรีกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคปฏิบัติและภาคทฤษฎี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยมและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์นพวรรณ ไม้ทอง อาจารย์ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์นิคม กลมเกลี้ยง และอาจารย์อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ ที่กรุณาสละเวลาเป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และข้อเสนอแนะในการแก้ไขปรับปรุงโครงการนี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรและท่านอาจารย์ทุกท่านในคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้ดำเนินโครงการตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้ดำเนินโครงการที่คอยเป็นแรงบันดาลใจและเป็นกำลังใจทำให้ผู้ดำเนินโครงการมีความมุ่งมั่นในการศึกษาปริญญาตรีครั้งนี้

สุดท้ายนี้ คณะผู้ดำเนินโครงการหวังว่าโครงการวิศวกรรมเคมีฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาเรื่องการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยโปรแกรม Aspen Plus บางส่วนถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดคณะผู้ดำเนินโครงการขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้ดำเนินโครงการ

นางสาวจรินทร์ทิพย์ สายแสง

นางสาวสุภารัตน์ นามลี

ธันวาคม 2556

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	3
1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของไบโอดีเซล.....	5
2.2 โปรแกรม Aspen Plus.....	11
2.3 การเลือกปั๊ม (Pump Selection).....	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	17
3.1 อุปกรณ์.....	17
3.2 ขั้นตอนดำเนินโครงการ.....	17
บทที่ 4 ผลการจำลองกระบวนการและการวิเคราะห์.....	24
4.1 คุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	24
4.2 การศึกษาจำลองกระบวนการการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่าง ต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้หอกกลับ.....	25
4.3 ผลการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอนโดยใช้เบส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
4.4 ผลการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	36
4.5 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน.....	43
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปโครงการ.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
3.1 องค์ประกอบที่ใช้ในแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	22
3.2 แสดงรูปแบบข้อจำกัดคุณสมบัติของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ.....	23
4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบเฉลี่ยกรดไขมันของน้ำมันพืชก่อนและหลัง การใช้ประกอบอาหาร.....	24
4.2 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสน้ำของของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วย ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
4.3 แสดงผลการจำลองกระบวนการสำหรับผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระใน น้ำมันของสารป้อนเข้าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน.....	35
4.4 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสน้ำของของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	39
4.5 แสดงผลการจำลองกระบวนการสำหรับผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันของสารป้อนเข้าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน.....	42
4.6 แสดงค่าการระความร้อนของหน่วยปฏิบัติการหลักในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล แบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	44
4.7 แสดงค่าเอนทาลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ของกระบวนการผลิต ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
4.8 แสดงค่าเอนทาลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล แบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	45
4.9 แสดงสภาวะการดำเนินงานแต่ละหน่วยปฏิบัติการ.....	47
4.10 แสดงข้อมูลพื้นฐานของปั๊ม.....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์.....	7
2.2 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไตรกลีเซอไรด์ระหว่างกับแอลกอฮอล์.....	7
3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบส เป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	18
3.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและ ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	19
4.1 แสดงแบบจำลองกระบวนการการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ใน กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	25
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 10:1 และ 15:1 ที่อัตราส่วนป้อนกลับ เท่ากับ 2.....	26
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อ น้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1.....	28
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับความดันของคอลัมน์ การกลั่นที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 อัตราส่วนป้อนกลับ เท่ากับ 1 และที่ร้อยละ Methanol Recovery เท่ากับ 98.....	29
4.5 แสดงแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	32
4.6 ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วย ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	34
4.7 แสดงแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	38
4.8 ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	41
4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	43

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

FFA = กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)

FAME = กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล (Fatty Acid Methyl Ester)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะพลังงานในรูปแบบของน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งเป็นหลัก แต่ในทางกลับกันเชื้อเพลิงที่ได้มาจากน้ำมันดิบมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบไม่เพียงพอกับความต้องการ ทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้จึงต้องเร่งพัฒนาพลังงานทางเลือกมาทดแทนน้ำมันจากปิโตรเลียมที่มีปริมาณลดลงโดยการศึกษาวิจัยวัตถุดิบน้ำมันจากพืชที่มีในประเทศ หรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล (Biodiesel) ขึ้นเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่ง โดยที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (B100) เกิดขึ้นได้สมบูรณ์และให้อิเสงที่สะอาดกว่า น้ำมันดีเซลเป็นผลจากในไบโอดีเซลไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบแต่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงช่วยการเผาไหม้ได้ดีขึ้นรวมทั้งลดมลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรคาร์บอนและเขม่า [1]

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผลิตได้จากจำพวกพืชน้ำมัน ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้วก็เป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งที่ควรพัฒนาในการผลิตไบโอดีเซล [2] เนื่องจากการนำของเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์และราคาถูก อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วเมื่อปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำจะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและน้ำมันพืชใช้แล้วหากนำมาประกอบอาหารซ้ำๆ อาจจะก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้

วิธีการผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี คือ การใช้โดยตรงหรือการผสม (Direct Use and Blending) กระบวนการทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsions) กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis) และกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชโดยการนำเอาน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นสารเอสเทอร์และกลีเซอรอล เมื่อกลีเซอรอลถูกแยกออกจากน้ำมันพืชแล้ว โมเลกุลที่เหลือจะมีสมบัติ

คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม จะต่างกันที่โมเลกุลของไบโอดีเซลเป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีกำมะถันหรือองค์ประกอบที่ซับซ้อนอื่นๆ วิธีนี้นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ [3]

ดังนั้นโครงการนี้ได้จำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบโดยโปรแกรมจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป (Aspen Plus) โดยในส่วนแรกศึกษาอัตราส่วนโดยโมเลกุลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว อัตราส่วนป้อนกลับ (Reflux Ratio) และความดันของคอลัมน์การกลั่นในส่วนคอลัมน์การกลั่นต่อจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว และในส่วนที่สองศึกษาหาสภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการที่มีความเหมาะสมของโรงงานต้นแบบ พร้อมทั้งค่าร้อยละผลผลิตที่ดีที่สุด แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ได้นั้นสามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงการผลิตไบโอดีเซลให้ดียิ่งขึ้น และช่วยในการเลือกใช้แต่ละหน่วยปฏิบัติการในโรงงานต้นแบบให้มีความแม่นยำมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ออกแบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ช่วยในการออกแบบ กระณีศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน อัตราส่วนป้อนกลับ (Reflux Ratio) และความดันของคอลัมน์การกลั่น

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการกลั่น (Distillate Rate) ภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ (Reboiler Heat Duty) ภาระทางความร้อนของคอนเดนเซอร์ (Condenser Heat Duty) และร้อยละผลผลิต (%Yield) ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถออกแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยโปรแกรม Aspen Plus เพื่อนำไปใช้ประกอบการพิจารณาตัดสินใจในการสร้างโรงงานผลิตไบโอดีเซล

1.3.2 สามารถได้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1.4 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งกำหนดขอบเขตงานวิจัยไว้ดังนี้

1.4.1 ตัวแปรควบคุม

1.4.1.1 น้ำมันวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ คือ น้ำมันพืชใช้แล้ว

1.4.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์

1.4.1.3 แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการ คือ เมทานอล

1.4.2 ตัวแปรต้น

1.4.2.1 อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 10:1 และ 15:1 อัตราส่วนป้อน-กลับเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ความดันเท่ากับ 20 กิโลปาสกาล 50 กิโลปาสกาล และ 80 กิโลปาสกาล

1.4.2.2 รูปแบบการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 2 แบบ คือ การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน โดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1.4.2.3 ร้อยละปริมาณกรดไขมันอิสระ 2 4 6 8 และ 10

1.4.3 ตัวแปรตาม

1.4.3.1 ร้อยละผลผลิต (%Yield)

1.4.3.2 ภาระทางความร้อน (Heat Duty)

1.4.3.3 อัตราการกลั่น (Distillate Rate)

1.5 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.5.1 ห้องปฏิบัติการทางคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน เมษายน พ.ศ. 2556 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2556

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดเรพ (Rape Seed) น้ำมันสบู่ดำ หรือน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยน้ำมันพืชใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่นำมาผลิตไบโอดีเซลจะนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้สภาวะที่เกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนไขมันให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (Mono Alkyl Ester) ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) หรือเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl Ester) และกลีเซอริน (Glycerine) ถือเป็นผลพลอยได้ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยาเครื่องสำอางน้ำมันหล่อลื่นไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาดปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลซึ่งไบโอดีเซลมีหลายประเภทดังนี้

2.1.1 ประเภทของไบโอดีเซล สามารถแบ่งตามประเภทของน้ำมันได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1.1 ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง (Straight Vegetable Oil) ไบโอดีเซลประเภทนี้ก็คือน้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นๆ ไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน แต่ปัญหาในการใช้งานของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง ต้องมีการอุ่นน้ำมันทุกจุดที่น้ำมันผ่านให้มีอุณหภูมิอย่างน้อย 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจากสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงและระเหยตัวได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อจะใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซล แต่ก็มีข้อดีตรงที่ราคาถูกเหมาะสมสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ [4]

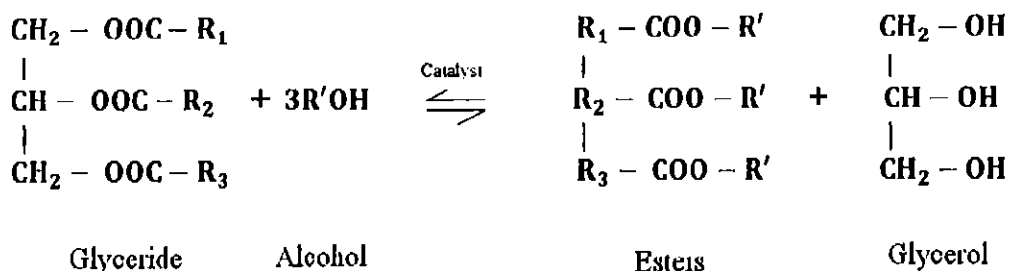
2.1.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie/Kero Mix) เป็นการผสมน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลเพื่อเป็นการลดความหนืดของน้ำมันพืชลง ให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด ซึ่งน้ำมันที่ได้เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องใช้น้ำมัน

อย่างเร่งด่วนและใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าดและน้ำมันพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นที่ใช้งาน อัตราส่วนผสมมีตั้งแต่ร้อยละ 10 ของน้ำมันก๊าดและร้อยละ 90 ของน้ำมันพืช จนถึงร้อยละ 40 ของน้ำมันก๊าดและร้อยละ 60 ของน้ำมันพืช อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 20 ของน้ำมันก๊าดและร้อยละ 80 ของน้ำมันพืช ปัจจุบันมีการนำวิธีดังกล่าวไปใช้งาน แต่เนื่องจากราคาของน้ำมันก๊าดค่อนข้างสูงทำให้ใช้ปริมาณของน้ำมันก๊าดน้อยเกินไป ทำให้น้ำมันผสมที่ได้เมื่อนำไปใช้จึงเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [5]

2.1.1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ สำหรับไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ การนำเอาน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นความหมายของไบโอดีเซลที่แท้จริงและเป็นที่ยอมรับในสากล และมีการใช้อย่างทั่วไป เช่น สหพันธรัฐเยอรมัน สหรัฐอเมริกา มีคำจำกัดความว่า เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้นสามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิด ซึ่งไบโอดีเซลชนิดนี้มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล มีค่าความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป จุดวาบไฟของไบโอดีเซล มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งสามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิด แต่การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์มีต้นทุนการผลิตที่สูงเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลประเภทอื่นๆ [4, 6]

2.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

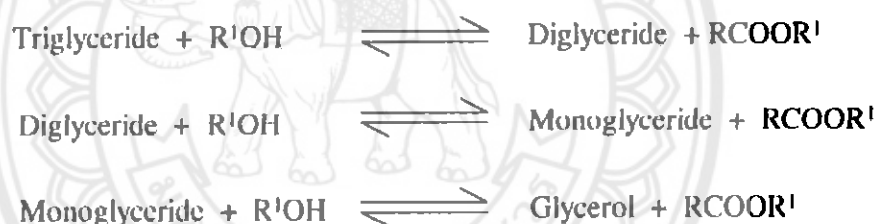
กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยา ให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น โดยเกิดการเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (Alkoxy Group, RO-) ของไตรกลีเซอไรด์ด้วยแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลเล็กกว่า ซึ่งจะแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในกระบวนการต้องมีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอม โดยส่วนมากจะนิยมใช้เมทานอลและเอทานอล กรณีการใช้เมทานอลมีข้อได้เปรียบมากกว่า คือ มีราคาถูกและเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลเล็กทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับไขมันหรือน้ำมันได้ง่าย [6-8]



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Ma, F., and Hanna, M. A. (1999)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอนย่อย นั่นคือ เริ่มจากเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์โมโนกลีเซอไรด์ตามลำดับ ซึ่งสุดท้ายจะได้เป็นผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์กับกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไตรกลีเซอไรด์ระหว่างกับแอลกอฮอล์

ที่มา: Meher, L. C., Vidya Sagar D., and Naik, S.N. (2006)

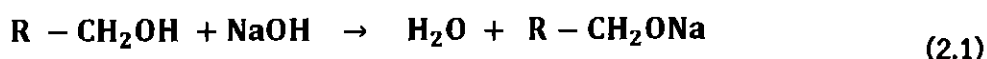
ซึ่งตามทฤษฎีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์เป็น 3:1 แต่ว่าเนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ในทางปฏิบัติจึงต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไป เพื่อเป็นการผลักดันสมดุลของปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เอสเทอร์ที่สูงที่สุดและช่วยให้ไตรกลีเซอไรด์ถูกทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ [3]

2.1.2.1 แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอลแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้น (Short Chain Alcohol) เมทานอลมักจะนิยมใช้มากกว่าเนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไขมันหรือน้ำมันพืชได้ง่ายกว่าและมีราคาถูก ถึงแม้การใช้เอทานอลจะ

ช่วยลดการพึ่งพาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมได้ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตร แต่เมทานอลมีราคาถูกกว่าเอทานอลมาก อีกทั้งยังสามารถแยกกลับมาใช้ได้ใหม่ได้ง่ายกว่าเพราะไม่มีจุดอะซิโโทปเหมือนกับเอทานอล ดังนั้นการใช้เมทานอลเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการใช้เอทานอลในทางทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์จะต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 เป็นค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันไปเป็นไบโอดีเซล [8-10]

2.1.2.2 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ก. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมเมธีออกไซด์ (NaOCH₃) โซเดียมเอธีออกไซด์ (NaOC₂H₅) โพตัสเซียมเมธีออกไซด์ (KOCH₃) โซเดียมเอไมด์ (NaNH₂) และโพตัสเซียมเอไมด์ (PNH₂) เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ก่อนที่ทำการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะต้องเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปเบส (NaOH, KOH) ไปอยู่ในรูปของสารประกอบแอลคอกซี (Alkoxy) ก่อน เช่น เปลี่ยนโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้เป็นโซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium Methoxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้กันมีความว่องไวมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายในเมทานอลส่วนหนึ่งเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเมทานอลทำให้น้ำเกิดขึ้น $\text{CH}_3\text{O}^- \text{Na}^+ + \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งจะปลดความว่องไวของเมทอกไซด์ไอออน $\text{CH}_3\text{O}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$ ในการเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [11] โดยมีการเตรียมเป็นไปตามปฏิกิริยาเคมี ดังสมการที่ 2.1



ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจากเบสให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ ให้ผลที่อุณหภูมิต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและเอสเทอร์ และกลีเซอรอลที่ได้สามารถแยกจากกันได้ง่ายเนื่องจากมีความหนาแน่นต่างกันและสภาพขั้วที่แตกต่างกัน โดยกลีเซอรอลจะมีความหนาแน่นสูงกว่าเอสเทอร์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหมาะสำหรับไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อย การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องใช้แอลกอฮอล์และน้ำมัน หรือไขมันที่นำมาใช้นั้นไม่มีน้ำเพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยา

การเกิดสบู่ (Saponification) การเกิดสบู่จะทำให้ได้ปริมาณของเอสเทอร์ลดลงและยังทำให้ขั้นตอนการแยกและล้างเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น [10, 12, 13]

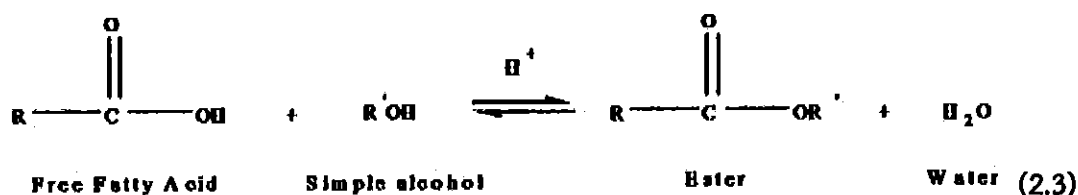
ข. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้สำหรับไตรกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระมาก เนื่องจากจะไม่ทำปฏิกิริยาการเกิดสบู่ แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้ามาก [10, 12]

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.1.3.1 ผลของความชื้นสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหากมีความชื้นปะปนอยู่ในน้ำมันหรือแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในกระบวนการจะทำให้เกิดสบู่ เพราะความชื้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ขึ้น แล้วสบู่จะปะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรินที่ได้ ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลนั้นสูงขึ้น อีกทั้งทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจลส่งผลให้การแยกกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลทำได้ยากมากยิ่งขึ้น วิธีป้องกันการเกิดสบู่ คือ น้ำมันและแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในกระบวนการไม่ควรมีความชื้นปะปนอยู่เพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์ [3]



2.1.3.2 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) คือ กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ ซึ่งในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น น้ำมันวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการไม่ควรจะมีกรดไขมันอิสระสูงเกินไป เนื่องจากกรดไขมันอิสระในน้ำมันจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสบู่ ดังสมการที่ 2.2 ทำให้ได้ไบโอดีเซลน้อยลง ซึ่งในน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบควรมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 2 แต่สำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง จะต้องนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำการลดค่าความเป็นกรดก่อน ด้วยการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.3 แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ [15]



2.1.3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายชนิดสามารถแบ่งได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด หรือเอนไซม์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วและใช้อุณหภูมิในการดำเนินการต่ำกว่าที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิสระสูงและมีน้ำผสมอยู่ด้วยนั้นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่า แต่การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ภาชนะที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ต้องสูง อุณหภูมิสูง และใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา [3]

2.1.3.4 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือสูงเกินไปนั้น จะทำให้ได้ปริมาณของไบโอดีเซลที่ต่ำ พบว่าเมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะอยู่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้ได้ร้อยละผลผลิตเท่ากับ 94-99 และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสนั้นไม่ได้เป็นการช่วยทำให้ได้ไบโอดีเซลมากขึ้น แต่กลับเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาเบสออก [16]

2.1.3.5 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการเกิดไบโอดีเซลนั้นจะแปรผันโดยตรงกับเวลา นั่นคือ ถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากขึ้น พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น และในการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมง [3]

2.1.3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้จะทำให้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ [3]

2.1.3.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 แต่ว่าเนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ เพราะฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้นซึ่งก็จะทำให้ได้เอสเทอร์มากขึ้น ดังนั้นยังใช้อัตราส่วนมากเท่าไรก็จะทำให้ได้เอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้นเท่านั้นและภายในเวลาที่สั้นลง อัตราส่วน 6:1 เป็นค่าที่ถูกใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม พบว่าได้เมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 98 [3]

2.1.3.8 ผลของอัตราส่วนการผสม การผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากน้ำมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ได้ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน พบว่าผลของอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมนั้นส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นแต่ถ้ามากเกินไปจะส่งผลให้ผลผลิตลดลง [4]

2.1.4 ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักไบโอดีเซลที่ผลิตได้}}{\text{น้ำหนักน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ป้อน}} \times 100 \quad (2.4)$$

2.2 โปรแกรม Aspen Plus [17, 30, 31]

การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้โปรแกรม Aspen Plus โดยเป็นการใช้ความสัมพันธ์วิศวกรรมพื้นฐาน เช่น สมดุลมวลและสมดุลพลังงานในการประเมินพฤติกรรมของกระบวนการทางเคมี การจำลองด้วยการใช้โปรแกรม Aspen Plus ช่วยให้จำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและทดสอบกระบวนการทางเคมีได้ในระยะเวลาสั้นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่แตกต่างกันของกระบวนการทางเคมี โดยการใช้ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกและสถานะของกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงได้ รวมทั้งยังมีการจำลองกระบวนการที่ช่วยให้สามารถพัฒนากระบวนการให้ดีขึ้น โดยการใช้เครื่องมือที่มีในโปรแกรม Aspen Plus คำนวณผลลัพธ์จากเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วยได้ สามารถหาสถานะที่มีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้ การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้โปรแกรม Aspen Plus สามารถนำมาใช้โดยขั้นตอนต่อไปดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แต่ละหน่วย กำหนดกระแสการป้อนสารในกระบวนการในหน้ารูปแบบ (Flow Sheet) กำหนดชื่อในแต่ละกระแสทั้งขาเข้าและขาออก และเชื่อมต่อเครื่องปฏิกรณ์แต่ละเครื่องปฏิกรณ์ด้วยกระแส

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดองค์ประกอบทางเคมีจากข้อมูลในโปรแกรม Aspen Plus

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดรูปแบบทางเทอร์โมไดนามิกในโปรแกรม Aspen Plus และประมาณค่าสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบสารผสมในกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกและกำหนดองค์ประกอบของอัตราการไหลขาเข้า

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดสภาวะการดำเนินงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

2.3 การเลือกปั๊ม (Pump Selection)

เนื่องจากมีปั๊มมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้ได้ การเลือกใช้ปั๊มจึงเป็นเรื่องที่ควรที่จะเริ่มต้นทำอย่างมีพื้นฐานสนับสนุนที่ถูกต้อง ข้อมูลที่ควรพิจารณา ได้แก่ การวิเคราะห์ระบบงานเพื่อทราบค่าเฮดรวม (Total Discharge Head) ทราบคุณสมบัติของไหลที่จะสูบว่าหนืดมากน้อย ไสหรือข้น มีอนุภาคของแข็งปนอยู่หรือไม่ ร้อนหรือเย็น เป็นกรดหรือเป็นกลาง ความดันที่ทางจ่ายเป็นเท่าใด สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนช่วยในการเลือกชนิดของปั๊ม การกำหนดขนาดของปั๊ม กำหนดโดยความดันที่ต้องทำได้ และอัตราการไหลที่ต้องการ การเลือกวัสดุที่สร้างปั๊ม ต้องการข้อมูล คุณสมบัติ และสภาวะของของไหล

2.3.1 Net Positive Suction Head (NPSH)

พบว่าของเหลวจะเดือดและกลายเป็นไอถ้าอุณหภูมิสูงพอ แต่ในความเป็นจริงแล้วของเหลวอาจเดือดกลายเป็นไอที่อุณหภูมิไม่สูงนักก็ได้ ถ้าหากความดันบนผิวของของเหลวลดลงมากพอการทำงานของปั๊มโดยทั่วๆ ไปจะเป็นการลดความดันในห้องสุบลึงให้ต่ำกว่าความดันของบรรยากาศก่อนที่จะเพิ่มพลังงานให้กับของเหลว ดังนั้นถ้าของเหลวอยู่ระดับเดียวกันกับศูนย์กลางของปั๊มแรงที่ขับเคลื่อนให้ของเหลวไหลเข้าไปสู่ห้องสูบก็จะมีแต่ความกดดันของบรรยากาศเพียงอย่างเดียว หรือถ้าระดับของของเหลวอยู่สูงกว่าก็จะมีแรงดันจากของเหลวมาช่วยด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากของเหลวอยู่ต่ำกว่าปั๊มแรงขับเคลื่อนก็จะลดลง เนื่องจากเราไม่ต้องการให้ของเหลวกลายเป็นไอ ความกดดันให้ของเหลวไหลเข้าไปในห้องสูบที่เป็นประโยชน์อย่างแท้จริง คือ ความกดดันที่หน้าห้องสุบเฉพาะส่วนที่มากกว่าความดันไอของของเหลว นั่น NPSH คือ ความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure) หรือเฮดที่หน้าห้องสูบทั้งหมด โดยบอกเป็นค่าความดันเท่ากับแท่งความสูงของของเหลว ที่ก่อให้เกิดการไหลของของเหลวเข้าไปในห้องสูบของปั๊มลบด้วยความดันไอของของเหลว นั่น

หลักการของ NPSH ใช้ได้กับปั๊มทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นแบบเซนตริฟูกอล โรตารี หรือแบบลูกสูบชัก ค่า NPSH มีความสำคัญต่อการทำงานของปั๊มมากเพราะว่าถ้าค่านี้ไม่มากพอของเหลวในท้องสูบจะกลายเป็นไอซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงมาก ปั๊มจะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง อาจเกิดการกร่อนเนื้อโลหะของใบพัดหรือท้องสูบและทำความเสียหายให้แก่ปั๊มได้ การกัดกร่อนเนื้อโลหะเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวนี้ เรียกว่า คาวิเทชัน (Cavitation) NPSH มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ NPSH ที่ต้องการ (Required NPSH, NPSHr) และ NPSH ที่มีอยู่ (Available NPSH, NPSHa) สำหรับค่าแรกเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบปั๊มซึ่งจะเปลี่ยนไปตามลักษณะอัตราการสูบ ความเร็ว ฯลฯ ค่าดังกล่าวนี้บริษัทผู้ผลิตจะบอกมาพร้อมกับรายละเอียดอย่างอื่นของปั๊ม ส่วน NPSHa ขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานที่ปั๊มนั้นติดตั้งอยู่ กล่าวคือ เป็นเสตที่มีอยู่จริงตามลักษณะการติดตั้ง ถ้าหากจะให้ปั๊มทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว NPSH ที่มีอยู่จริงจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ต้องการสำหรับปั๊มนั้น การคำนวณเกี่ยวกับ NPSH อาจพิจารณาได้โดยถือว่าความดันสูงสุดที่ก่อให้เกิดการไหลเข้าไปสู่ศูนย์กลางของใบพัดมีค่าไม่เกินความจริงบนผิวของของเหลวหรือความดันของบรรยากาศ เมื่อผิวของของเหลวเปิดสู่บรรยากาศ (ประมาณ 101.325 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร หรือคิดเป็นความสูงของแท่งน้ำ 10.33 เมตร ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง) เมื่อมีการไหลในท่อดูดของปั๊มก็จะมี การสูญเสียพลังงานในท่อซึ่งจะต้องนำเอามาหักออก และเนื่องจากเราไม่ต้องการให้ของของเหลวกลายเป็นไอดังนั้น เพื่อความปลอดภัยจะต้องนำเอาความดันไอของของเหลวมาหักออกไว้เสียก่อน เหลือเท่าใดจึงเป็นความดันที่เหลืออยู่ที่หน้าท้องสูบ (NPSHa) ในกรณีที่ระดับของของเหลวเท่ากับระดับศูนย์กลางของใบพัด แต่ถ้าของเหลวมีระดับต่ำกว่าก็จะต้องนำเอาความต่างระดับนั้นมาหักออกอีกเหลือเท่าไรจึงเป็น NPSHa ในทางตรงกันข้าม ถ้าของเหลวอยู่สูงกว่าศูนย์กลางของใบพัดก็ต้องเอาความต่างระดับนั้นมาบวกจึงจะได้เป็น NPSHa ในกรณีที่เป็นการติดตั้งที่ทราบ NPSHr ความแตกต่างระหว่างความดันของบรรยากาศกับผลรวมของการสูญเสียพลังงานทางท่อดูด (Head Losses) NPSHr และความดันไอจะเป็นสิ่งบอกให้ทราบว่าสามารถติดตั้งปั๊มให้อยู่สูงกว่าระดับของเหลวได้มากที่สุดเท่าใด

2.3.2 คาวิเทชัน (Cavitation)

คาวิเทชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการกัดกร่อนเนื้อโลหะของใบพัดหรือท้องสูบโดยมีสาเหตุมาจากการที่ NPSH ที่มีอยู่จริงมีค่าต่ำกว่า NPSH ที่ต้องการสำหรับปั๊มนั้น ในปั๊มแบบเซนตริฟูกอลขณะที่ของเหลวไหลผ่านท่อดูดเข้าไปยังศูนย์กลางของใบพัด ความเร็วของการไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากพลังงานที่ก่อให้เกิดการไหลดังกล่าวมีค่าคงที่ การเพิ่มความเร็วจะเป็นผลให้

ความดันลดลงถ้าความดันลดลงต่ำกว่าความดันไอที่อุณหภูมิของของเหลวนั้น ของเหลวก็จะกลายเป็นไอและเกิดเป็นฟองสุญญากาศที่มีความดันภายในเท่ากับความดันไอและไหลปนรวมไปกับของเหลว นั้น ในขณะที่ช่องทางไหลในใบพัดเพิ่มขนาดขึ้นความเร็วของการไหลจะลดลงพร้อมๆ กับเพิ่มความดันขึ้น ด้วยความดันที่เพิ่มขึ้นและที่ได้รับจากแรงกระทำของครีบบใบพัด ฟองของไอซึ่งมีความดันต่ำมากก็จะแตกตัวทำให้เกิดเสียงหรืออาการสั่นขึ้น นอกจากนั้นการแตกตัวของฟองสุญญากาศทำให้เกิดแรงกระทำอย่างรุนแรง ผิวหน้าโลหะของใบพัดซึ่งอยู่ติดกับฟองดังกล่าวก็จะเกิดการกัดกร่อนไปด้วย โดยแท้จริงแล้วควิเตชันจะไม่เกิดขึ้น ถ้าหากปั๊มนั้นได้รับการออกแบบติดตั้งให้มี NPSH สูงกว่าที่ต้องการ แต่ถ้าเกิดขึ้นแล้วผลที่ตามมาอย่างแน่นอน คือ ประสิทธิภาพของปั๊มจะลดลง การกัดกร่อนขึ้นส่วนของใบพัดอาจเกิดขึ้น หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าควิเตชันนั้นรุนแรงมาก หรือน้อยและเกิดติดต่อกันเป็นเวลานานเท่าใด

2.3.3 วอเตอร์แฮมเมอร์ (Water Hammer)

เป็นปรากฏการณ์ที่ความดันในท่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงและฉับพลัน โดยมีความดันเพิ่มขึ้นและลดลงจากความดันเดิมในลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงสลับกันไปเป็นอนุกรม

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ คือ มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในท่ออย่างกะทันหัน เป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในลักษณะดังกล่าว โมเมนตัมของของเหลวจะถูกเปลี่ยนไปกลายเป็นแรงกระทำบนประตุน้ำและผนังของท่อ แรงกระทำที่เกิดขึ้นถ้าหากมากเกินไปความสามารถของท่อจะรับไว้ได้ก็จะทำให้ท่อระเบิดหรือทำให้ระบบท่อและอุปกรณ์เสียหายอย่างรุนแรงขึ้นได้ ระดับความเสียหายเนื่องจากวอเตอร์แฮมเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรง ความยืดหยุ่น (Elasticity) ของท่อ ความเร็วของการไหล และอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล ลักษณะการยึดท่อให้อยู่กับที่ และระบบป้องกันวอเตอร์แฮมเมอร์ที่ติดตั้งไว้ เป็นต้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sérgio Morais และคณะ [18] ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยมีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอลและใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ศึกษากระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยพิจารณาเป็นสองกรณี คือ มีการบำบัด (Pre-Treatment) ของกรดไขมันอิสระและไม่มีการบำบัด (Pre-Treatment) ของกรดไขมันอิสระ โดยมีการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยการใช้โปรแกรม Aspen Plus ซึ่งโปรแกรม

Aspen Plus จะเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองและพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทำการประเมินผลกระทบที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและทำการประเมินเบื้องต้นทางเศรษฐศาสตร์ จากการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระ และไม่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระ พบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ไม่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระร้อยละ 25 และการประเมินเบื้องต้นทางเศรษฐศาสตร์ พบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระจะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) สูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ไม่มีการบำบัดของกรดไขมันอิสระ 1.8 เท่า

Anton A. Kiss และคณะ [19] ศึกษาไบโอดีเซลที่เป็นเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันเมทิลเอสเตอร์ โดยมีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของกลีเซอไรด์ (Glycerides) กับเมทานอลกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในกระบวนการสุดท้ายที่เกี่ยวข้องกับการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ก็เช่นเดียวกับการแยกเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้อีกครั้งซึ่งกลีเซอรอลและน้ำเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ (จากขั้นตอนการล้างและการบำบัด (Pre-Treatment)) ในกระบวนการแยกเมทานอล น้ำ และกลีเซอรอลที่ผสมกันอยู่ โดยทั่วไปจะใช้คอลัมน์การกลั่นในการแยกสองตัวซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูงทำให้สิ้นเปลืองงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการแยกเมทานอล น้ำ และกลีเซอรอลที่ผสมกันอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยการใช้ผนังที่ใช้แยกห่อกลั่นเป็นห้องๆ (Dividing-Wall Column: DWC) ที่สามารถที่จะแยกผลิตภัณฑ์ทั้งหมดให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ในหน่วยปฏิกรณ์เพียงอันเดียว และนำโปรแกรม Aspen Plus มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการจำลองกระบวนการในสถานะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยก ซึ่ง DWC เป็นทางเลือกใหม่ที่เป็นอุปกรณ์ในการแยก จากผลการศึกษา พบว่าการใช้ DWC ช่วยลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 27 และลดค่าใช้จ่ายการลงทุนร้อยละ 12 ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ DWC จึงมีราคาไม่แพง

Alex H. West และคณะ [20] ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ได้ด้วยโปรแกรม Aspen Plus โดยผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระอยู่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วป้อนเข้าไปที่ Fixed-Bed Reactor ซึ่งจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด คือ ซัลเฟต-เซอร์โคเนีย (Sulfated-Zirconia) ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ (Sized Unit) วัสดุและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจะนำมาประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์หาค่าเงินลงทุนของโครงการ (Total Capital Investment) ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด (Total Manufacturing Cost) และอัตราผลตอบแทนหลังจากหักค่าใช้จ่าย (After Tax Rate Of Return: ATROR) บนพื้นฐานของการค้ำทุทุนทางเศรษฐ-

ศาสตร์มากที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่มีปริมาณ 8,000 ตันต่อปี จากผลการศึกษา พบว่าเมื่อตรวจสอบก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดชนิดของแข็งและกระบวนการสามารถเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งการผลิตไบโอดีเซลที่ได้ก็เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ที่มีการกำหนดมาตรฐานของความความบริสุทธิ์ไว้

Huimin Yun และคณะ [21] ศึกษาไบโอดีเซลที่เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกและพลังงานทดแทนที่มีการศึกษาและพัฒนาในปีที่ผ่านมาอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหาร โดยมีปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันและใช้เอมไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหารมีปริมาณการใช้ 6,482 ตันต่อปี โดยจะจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากโปรแกรม Aspen Plus ทำการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซล 5 กระบวนการโดยมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการในการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ที่แตกต่างกัน ผลจากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ที่แตกต่างกัน พบว่ากระบวนการที่ 5 เป็นกระบวนการที่นำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดและได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูงมากกว่าร้อยละ 98.5

Bipro Ranjan Dhar และคณะ [22] ศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้โปรแกรม Aspen Plus โดยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้คอลัมน์การกลั่น วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ ไตรโอเลอินที่มีกรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก) ร้อยละ 15 พร้อมทั้งศึกษาอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการกลั่นที่มีการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาในการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่าอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันสามารถนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ได้ร้อยละ 95-98 ก่อนที่จะแยกเฟสจากไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันก็จะไม่สามารถได้เมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ได้มากเกินไปกว่าร้อยละ 95-98 และจะทำให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วและเมทานอล โดยใช้ซอฟต์แวร์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยโปรแกรม Aspen Plus ซึ่งการศึกษารวบรวมข้อมูลจะเป็นการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งหมดโดยแหล่งข้อมูลจะได้จากงานวิจัยและปริญญานิพนธ์อื่นๆ เป็นหลัก

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในโครงการต้องมีหน่วยความจำไม่ต่ำกว่า (RAM) 1 จิกะไบต์ สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows XP และที่มีหน่วยความจำไม่ต่ำกว่า 2 จิกะไบต์ สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows 7 มีฮาร์ดดิสก์ไม่ต่ำกว่า 40 จิกะไบต์

3.1.2 โปรแกรม Aspen Plus 7.0 โปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตทางวิศวกรรมจะสามารถทำให้การออกแบบกระบวนการมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

3.2 ขั้นตอนดำเนินการ

3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับใช้ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Aspen Plus

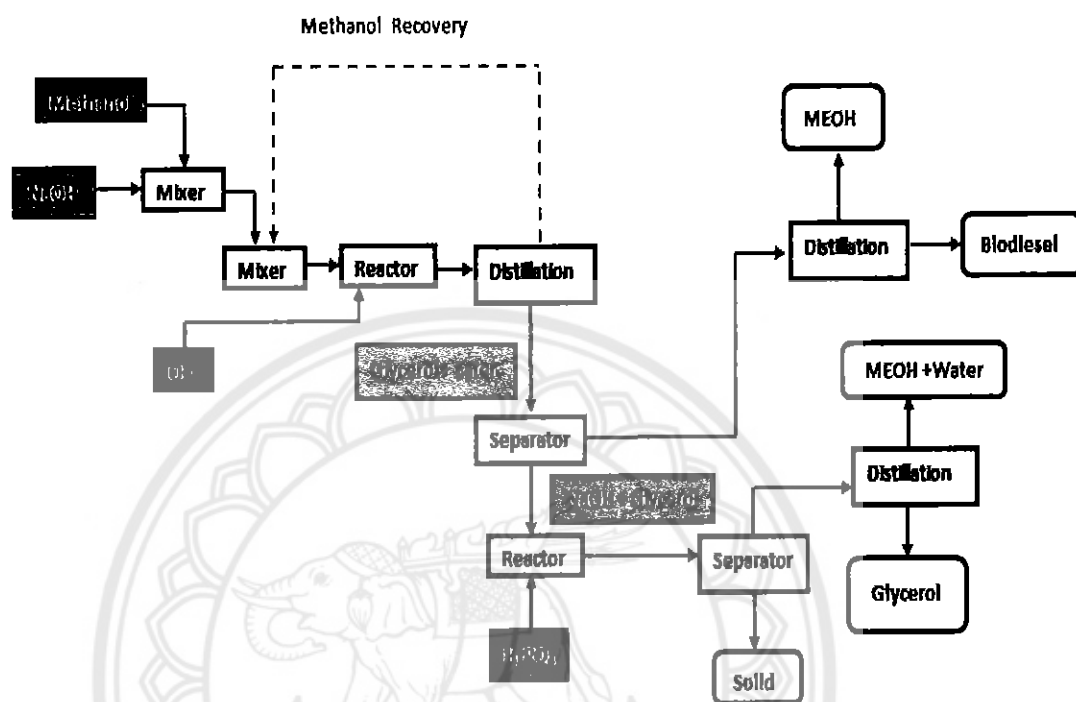
3.2.2 ศึกษาจำลองกระบวนการสำหรับการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คอลัมน์การกลั่น

3.2.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 6:1 10:1 และ 15:1

3.2.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนป้อนกลับ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนป้อนกลับเป็น 1 2 3 และ 4

3.2.2.3 ผลกระทบของความดันของคอลัมน์การกลั่น (Distillation Column Pressure) โดยปรับเปลี่ยนความดันเป็น 20 กิโลปาสกาล 50 กิโลปาสกาล และ 80 กิโลปาสกาล

3.2.3 ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งจะปรับเปลี่ยนค่ากรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.3.1 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการผลิตไบโอดีเซล [23]

ก. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

ข. กระบวนการนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ (Methanol Recovery) ซึ่งเป็นกระบวนการดึงเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเริ่มต้น โดยใช้การกลั่นที่สภาวะสูญญากาศแล้วควบแน่นไอน้ำเมทานอลให้อยู่ในสถานะของเหลวแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

ค. กระบวนการแยก เป็นกระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลและตัวเร่งปฏิกิริยา

ง. กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (FAME Purification) เป็นการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์โดยการแยกให้ไบโอดีเซลออกจากเมทานอล

จ. กระบวนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Removal) เป็นการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกค้างในกลีเซอรอล

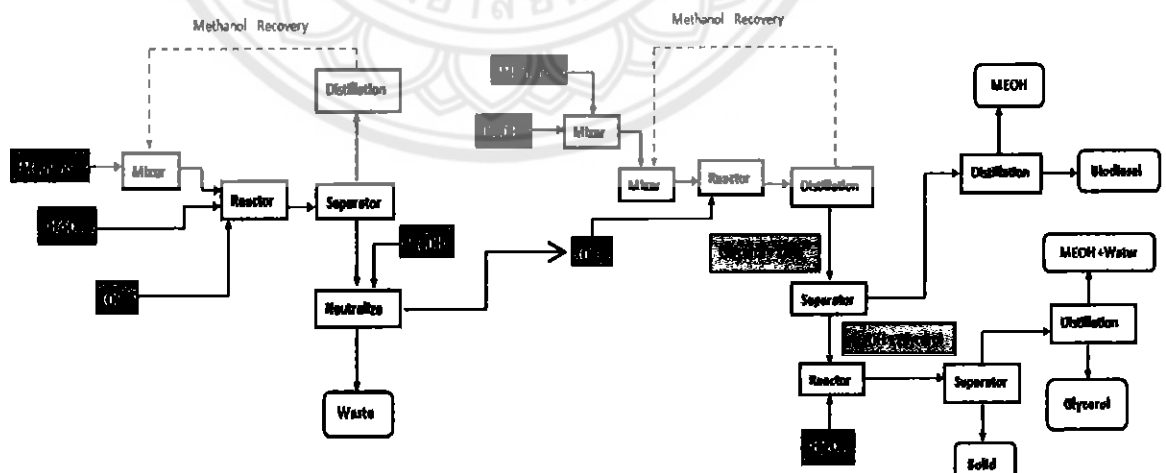
ข. กระบวนการทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Glycerol Purification) เป็นการทำให้กลีเซอรอลมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นโดยทำการแยกน้ำและเมทานอลออกจากกลีเซอรอล

ในส่วน of หน่วยปฏิบัติการหลักมีรายละเอียดและขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ก.1 ถึงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) จะเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีการกำหนดให้มีการป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ป้อน ใช้อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 6:1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล และกำหนดให้ค่าการเปลี่ยนของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นร้อยละ 98

ข.1 คอลัมน์การกลั่น สำหรับการกลั่นแยกเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ นำค่าเบื้องต้น ได้แก่ จำนวนชั้นและอัตราป้อนกลับไปเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus [24] จากนั้นจึงทำการปรับค่าระหว่างส่วนกลั่นกับกระแสป้อนเข้าเพื่อให้ได้เมทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

3.2.4 ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามลำดับ โดยจะปรับเปลี่ยนค่ากรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามลำดับ

ซึ่งกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน จะมีกระบวนการที่เกิดขึ้น คือ โดยในขั้นตอนแรกจะทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้

3.2.4.1 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการผลิตไบโอดีเซล

ก. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นไบโอดีเซลและน้ำ

ข. กระบวนการนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ (Methanol Recovery) เป็นกระบวนการดึงเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเริ่มต้น โดยใช้การกลั่นที่สถานะสูญญากาศแล้วควบแน่นไอเมทานอลให้อยู่ในสถานะของเหลวแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

ค. กระบวนการแยกน้ำ เป็นกระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา

ง. กระบวนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (FAME Purification) เป็นการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์โดยการแยกให้ไบโอดีเซลออกจากน้ำและเมทานอล

ในส่วน of หน่วยปฏิบัติการหลักมีรายละเอียดและขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ก.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีการกำหนดให้มีการป้อนกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเมทานอลที่ป้อน ใช้อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 6:1 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล และกำหนดให้ค่าการเปลี่ยนของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 0.97

ข.2 คอลัมน์การกลั่น สำหรับการกลั่นแยกเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ นำค่าเบื้องต้น ได้แก่ จำนวนชั้นและอัตราป้อนกลับไปเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus [24] จากนั้นจึงทำการปรับค่าระหว่างส่วนกลั่นกับกระแสน้ำเข้าเพื่อให้ได้เมทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

แล้วนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังกระบวนการในข้อ 3.2.3.1

3.2.5 ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามลำดับ โดยมีปริมาณค่ากรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 2 4 6 8 และ 10

3.2.5.1 ศึกษาร้อยละผลผลิต

3.2.5.2 ศึกษาสถานะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

3.2.6 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของปั๊มที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการเลือกปั๊ม เช่น ความดันที่ต้องทำได้ ค่า Net Positive Suction Head (NPSH) อัตราการไหลที่ต้องการและค่าเฮดรวม (Total Discharge Head)

3.2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ [23]

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)



ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)



การกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Removal)



3.2.8 องค์ประกอบที่ใช้ในแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [23]

สำหรับโปรแกรม Aspen Plus ใน Library ของโปรแกรมจะมีข้อมูลทางด้านกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารต่างๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไปแต่สำหรับสารที่ไม่มีในฐานข้อมูลในโปรแกรมก็สามารถใส่ข้อมูลเบื้องต้นของสารได้ เช่น สูตรโครงสร้าง จุดเดือด ความหนาแน่น เพื่อให้โปรแกรมทำการประมาณข้อมูลทางด้านกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้นของสารเพื่อที่จะนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบที่ใช้ในแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [23]

ชื่อ	ชนิด	ชื่อ	สูตร
METHANOL	CONV	METHANOL	CH_4O
OIL	CONV	TRIOLEIN	$\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$
FFA	CONV	OLEIC ACID	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$
FAME	CONV	METHYL-OLEATE	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$
GLYCEROL	CONV	GLYCEROL	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
NAOH	CONV	SODIUM HYDROXIDE	NaOH
WATER	CONV	WATER	H_2O
H_3PO_4	CONV	PHOSPHORIC ACID	H_3PO_4
Na_3PO_4	CONV	SODIUM PHOSPHATE	Na_3PO_4

น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหารนั้นมีส่วนประกอบของน้ำมันและไขมันอยู่หลายชนิด สำหรับในแบบจำลองนี้จะสมมติให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหารเป็นไตรโอเลอิน (Triolein: $\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$) และมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิก (Oleic Acid: $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) FAME ที่ได้ให้เป็นเมทิลโอเลเอต (Methyl Oleate) คือ ไบโอดีเซลที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักและได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวตั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ [23]

3.2.8.1 คุณสมบัติของ Triolein

Triolein ถูกนำมาใช้ใน Aspen Plus ซึ่งมีมวลโมเลกุล (884 กรัมต่อโมล) จุดเดือด 846.85 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤต 470 กิโลปาสกาล อุณหภูมิวิกฤต 1367 องศาเซลเซียส Volumetric Critical 3.09 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล โครงสร้างในการประมาณการที่สำคัญและคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ของไตรโอเลอิน อุณหภูมิขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ เช่น Vapour Enthalpy Vapour Pressure และ Gibbs Free Energy ถูกใช้ในการประมาณค่าไตรโอเลอินที่สร้างขึ้นใน Aspen Plus Library [25]

3.2.9.2 รูปแบบข้อกำหนดคุณสมบัติ (Property Specification From) ของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

รูปแบบข้อกำหนดคุณสมบัติของแต่ละหน่วยปฏิบัติการในการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนี้ใช้แบบจำลองทางคุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Properties Models) ที่เลือกใช้ดังตารางที่ 3.2 [12, 17, 18, 25]

ตารางที่ 3.2 แสดงรูปแบบข้อกำหนดคุณสมบัติของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

กระบวนการ	หน่วยปฏิบัติการ		คุณสมบัติ
Esterification	Reactor	R-100	NRTL
	Distillation	T-100	NRTL
Transesterification	Reactor	R-200	NRTL
	Distillation	T-300	NRTL
	Distillation	T-500	UNIF-DMD
	Distillation	T-600	NRTL



บทที่ 4

ผลการจำลองกระบวนการและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้ว

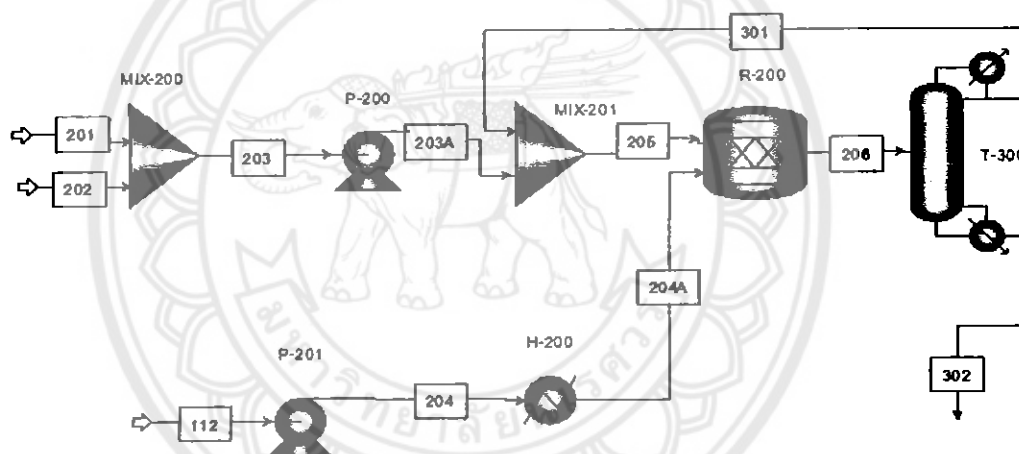
จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้วจากการประกอบอาหาร ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ส่วนประกอบของน้ำมันและไขมันอยู่หลายชนิด สำหรับในแบบจำลองนี้จะสมมติให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว จากการประกอบอาหารเป็นไตรโอเลอินและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักใช้เป็นสารป้อนเข้าในกระบวนการจำลองในโปรแกรม Aspen Plus

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติ องค์ประกอบเฉลี่ยกรดไขมันของน้ำมันพืชก่อนและหลังการใช้ประกอบอาหาร [2, 32]

ชนิดของกรดไขมัน	ชื่อของกรดไขมัน	ร้อยละกรดไขมันอิสระ	
		ก่อนประกอบอาหาร	หลังประกอบอาหาร
C12:0	กรดลอริก (Lauric Acid)	0.45	0.32
C14:0	กรดไมริสติก (Myristic Acid)	0.38	0.93
C16:0	กรดปาล์มิติก (Palmitic Acid)	34.13	38.37
C18:0	กรดสเตียริก (Stearic Acid)	4.58	4.00
C20:0	กรดอราซิดิก (Arachidic Acid)	0.34	0.34
รวมกรดไขมันอิ่มตัว		40.38	43.97
C16:1	กรดปาล์มิโตเลอิก (Palmitoleic Acid)	1.51	0.25
C18:1	กรดโอเลอิก (Oleic Acid)	42.89	45.59
C18:2	กรดลิโนเลอิก (Linoleic Acid)	14.60	10.03
C18:3	กรดลิโนเลนิก (Linolenic Acid)	0.62	0.16
รวมกรดไขมันไม่อิ่มตัว		59.62	56.03
ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide Value)	มิลลิอีควิวาเลนต์ของเปอร์ออกไซด์ต่อกิโลกรัม	2.98	28.08

4.2 การศึกษาจำลองกระบวนการการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คอลัมน์การกลั่น

แบบจำลองกระบวนการป้อนสารเข้าสู่นักปฏิบัติการดังผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสและเมทานอล จากนั้นป้อนเข้าสู่ถังผสมกับเมทานอลส่วนเกินนำกลับมาใช้ใหม่แล้วนำเข้าสู่หน่วยปฏิบัติการดังปฏิกิริยาเพื่อเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล โดยมีอีกกระแสเข้าเป็นน้ำมันที่ประกอบด้วยไตรโอเลอินและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิก จากนั้นกลั่นเมทานอลส่วนเกินนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอรอล แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.1



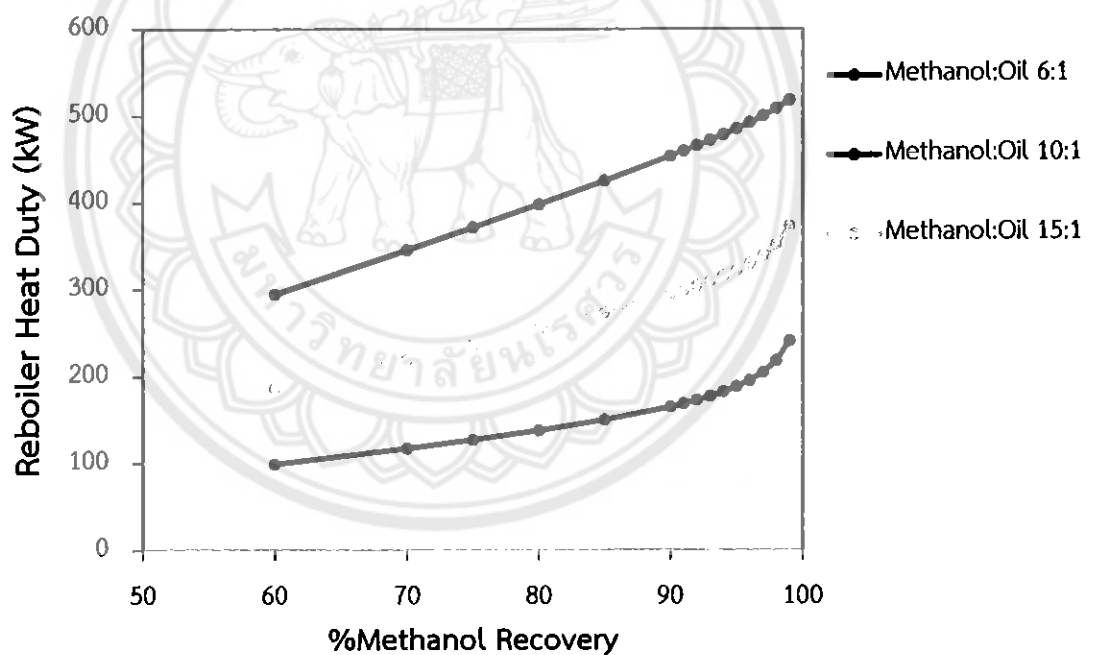
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองกระบวนการการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในการผลิตไบโอดีเซล

จากรูปที่ 4.1 ป้อนสารเข้าด้วยน้ำมันและเมทานอลบริสุทธิ์ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาป้อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล (FAME) กลีเซอรอล ตัวเร่งปฏิกิริยา และเมทานอลส่วนเกิน จากนั้นกลั่นแยกเมทานอลส่วนเกินด้วยคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศนำกลับไปทำปฏิกิริยาใหม่โดยคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศมีจำนวนชั้นเป็น 5 ชั้น ป้อนกระแสเข้าที่ชั้น 2 อัตราป้อนกลับที่ 1 ความดันของคอลัมน์การกลั่น 20 กิโลปาสกาล จากแบบจำลองกระบวนการดังกล่าวได้ทำการปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นคอลัมน์การกลั่นตั้งแต่ 5-10 ชั้น พบว่าค่าความบริสุทธิ์ของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 99.97 ของทุกคอลัมน์การกลั่นที่ปรับเปลี่ยนจำนวนชั้น แสดงว่าจำนวนชั้นไม่มีผลต่อค่าความ

บริสุทธิ์ของกระแสส่วนบนของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ ดังนั้นแบบจำลองกระบวนการนี้จึงเลือกใช้คอลัมน์การกลั่นสุญญากาศที่มีจำนวนชั้น 5 ชั้น ป้อนกระแสขาเข้าที่ชั้น 2

4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว

จากกระบวนการจำลองการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดังรูปที่ 4.1 งานวิจัยนี้มุ่งสนใจผลกระทบของความแตกต่างของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 6:1 10:1 และ 15:1 และพารามิเตอร์ดำเนินงานต่างๆ ของคอลัมน์การกลั่นจากปริมาณร้อยละเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่จากผลิตภัณฑ์ของถังปฏิกรณ์ที่คอลัมน์การกลั่น โดยการใช้ภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นเป็นตัวแทนค่าการใช้พลังงาน (Energy Consumption) แสดงดังรูปที่ 4.2



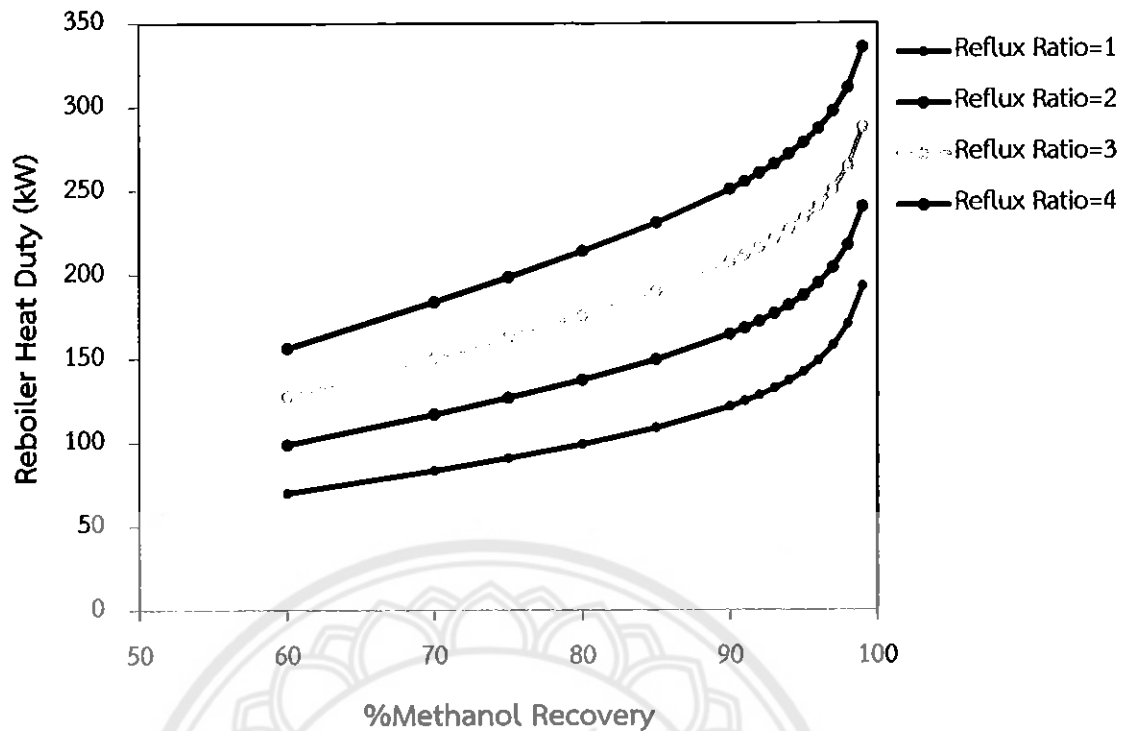
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 10:1 และ 15:1 ที่อัตราส่วนป้อนกลับ เท่ากับ 2

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 6:1 10:1 และ 15:1

โดยมีร้อยละ Methanol Recovery ที่ร้อยละ 60 70 75 80 85 90 91 92 93 94 95 96 97 98 และ 99 จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 15:1 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงสุด รองลงมา คือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 10:1 และ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 ตามลำดับ พร้อมทั้งสามอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วมีแนวโน้มของภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ผลการจำลองเห็นว่า สภาวะการดำเนินงานการกลั่น (Distillation Operating Condition) ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์น้อยสุด และมีความเป็นไปได้ของการการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องประมาณร้อยละ 94-98 ของเมทานอลส่วนเกินจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันก่อนที่จะแยกเฟสของการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนป้อนกลับ (Reflux Ratio)

จากกระบวนการจำลองการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดังรูปที่ 4.1 งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความแตกต่างของอัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 จากปริมาณร้อยละเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่จากผลิตภัณฑ์ของถังปฏิกิริยาที่คอลัมน์การกลั่น โดยการใช้ภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นเป็นตัวแทนค่าการใช้พลังงาน แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อน ของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับร้อยละ Methanol Recovery ที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 2 3 และ 4 โดยมีร้อยละ Methanol Recovery ที่ร้อยละ 60 70 75 80 85 90 91 92 93 94 95 96 97 98 และ 99 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 4 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงที่สุด รองลงมา คือ อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 3 อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 2 และ อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 ตามลำดับตามลำดับ รวมทั้งทุกอัตราส่วนการป้อนกลับมีแนวโน้มของภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ผลการจำลองเห็นว่าสภาวะการดำเนินงานการกลั่นที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 มีความต้องการการใช้พลังงานของรีบอยเลอร์ต่ำสุดและมีความเป็นไปได้ของการการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องประมาณร้อยละ 94-98 ของเมทานอลส่วนเกินจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันก่อนที่จะแยกเฟสของการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

4.2.3 ผลกระทบของความดันของคอลัมน์การกลั่น (Distillation Column Pressure)

จากกระบวนการจำลองการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ในการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลดัง รูปที่ 4.1 งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความแตกต่างของความดันของคอลัมน์การกลั่นเท่ากับ 20 50 และ 80 กิโลปาสกาล อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 และร้อยละ Methanol Recovery เท่ากับ 98 โดยการใช้ภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นเป็นตัวแทนค่าการใช้พลังงาน แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับความดันของคอลัมน์การกลั่น ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 และที่ร้อยละ Methanol Recovery เท่ากับ 98

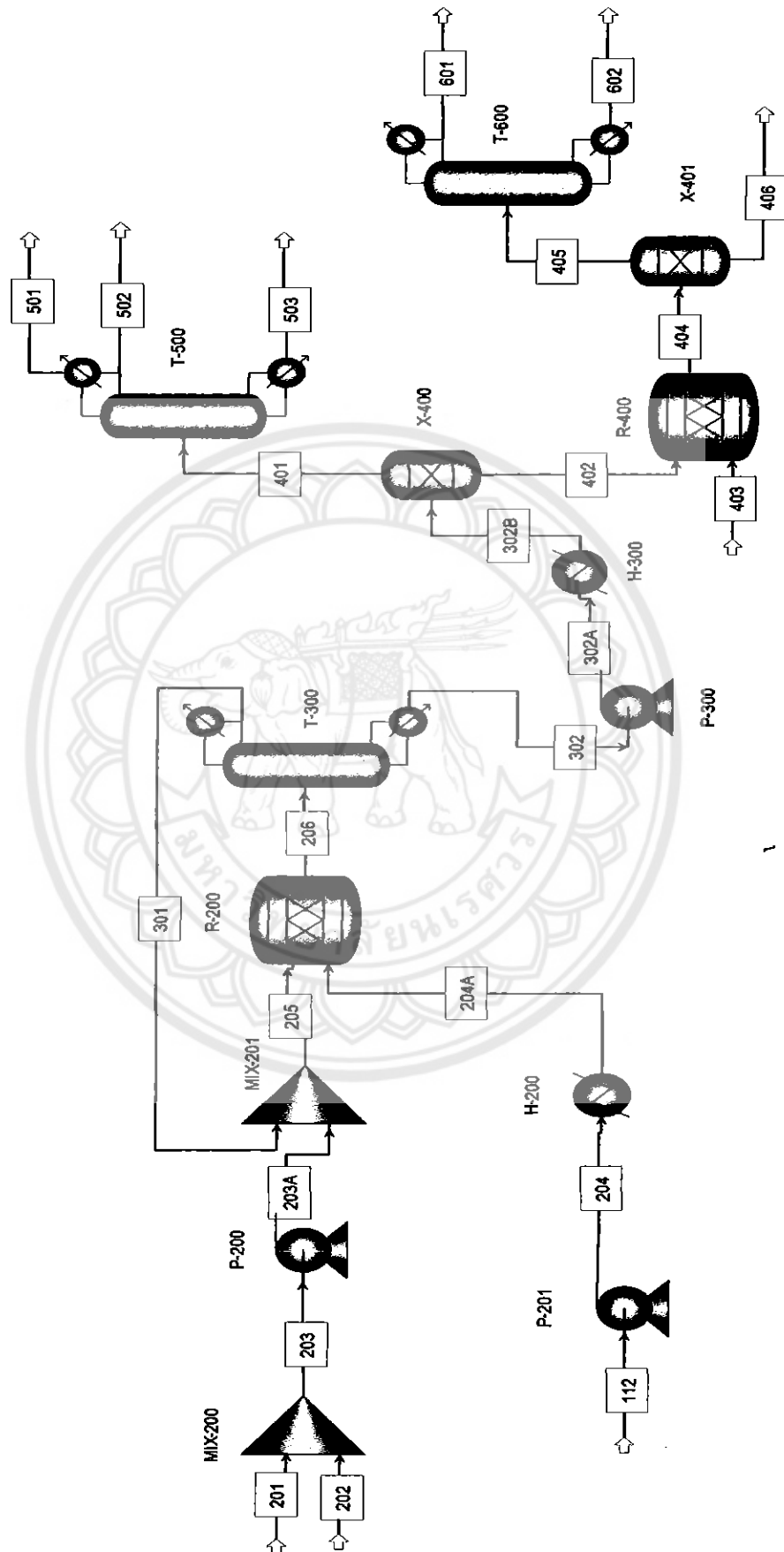
จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์กับความดันของคอลัมน์การกลั่นที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 และที่ร้อยละ Methanol Recovery เดียวกันเท่ากับ 98 จะเห็นได้ว่าความดันของคอลัมน์การกลั่น เท่ากับ 80 กิโลปาสกาล มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงสุด รองลงมา คือ 50 กิโลปาสกาลและ 20 กิโลปาสกาล ตามลำดับ การวิเคราะห์ผลการจำลองเห็นว่าสภาวะการ

ดำเนินการที่ความดันของคอลัมน์การกลั่นเท่ากับ 20 กิโลปาสกาล มีค่าภาระทางความร้อนของ รีบอยเลอร์น้อยสุด ในการจำลองกระบวนการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ พบว่าการดำเนินการของ คอลัมน์การกลั่นที่สภาวะต่ำกว่าบรรยากาศ หรือสุญญากาศนั้นส่งผลกระทบต่อทางด้านการ ได้รับความร้อนของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนเฟสของสารเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ รวมทั้งการกลั่น ที่สภาวะสุญญากาศของคอลัมน์การกลั่นสามารถรักษาระดับอุณหภูมิที่กระแสขาออกส่วนบน (Distillate Stream) และส่วนล่าง (Bottom Stream) ของคอลัมน์การกลั่นมีความแตกต่างกัน เล็กน้อย พร้อมทั้งป้องกันการสลายตัวของกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

4.3 ผลการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอนโดยการใช้เบสเป็นตัว เร่งปฏิกิริยา

จากการจำลองกระบวนการเชิงโรงงานต้นแบบโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ของกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วจากการประกอบอาหารกับ เมทานอลโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียว ดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 ด้วย อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเป็น 6:1 จากการกระบวนการจำลองการนำเม-ทานอลส่วนเกินไปใช้กลับใหม่อีกทั้งอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็นค่าสัดส่วนที่ถูกใช้ใน กระบวนการอุตสาหกรรมซึ่งได้เมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 98 [26] และงานวิจัยนี้สมมติสารที่ ป้อนเข้าเป็นไตรโอเลอินและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิกแทนน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งเป็นองค์ ประกอบหลักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.1 โดยการป้อนกระแสขาเข้าถึงปฏิกิริยา R-200 ที่ อัตราการไหล 1050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (Stream 204) มีปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 6 โดย น้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ผ่านการให้ความร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกระแสป้อน เข้าอื่นให้อุณหภูมิขาเข้าถึงปฏิกิริยา 25 องศาเซลเซียส กระแสขาเข้าของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสโดยใช้ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ป้อน [28] โดยมีอัตราการไหลเป็น 10.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (202) และเมทานอลใหม่ที่มีอัตราการไหลเป็น 117.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (201) ซึ่ง เข้าผสมกันกับกระแสป้อนเข้าของเมทานอลที่ได้จากการนำกลับมาใช้ใหม่ (301) และตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถึงปฏิกิริยา (R-200) เพื่อเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันและเม-ทานอล งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจึงไม่สามารถพารามิเตอร์ของการเกิดปฏิกิริยาได้ เช่น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (K) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอใช้หน่วยปฏิบัติการ

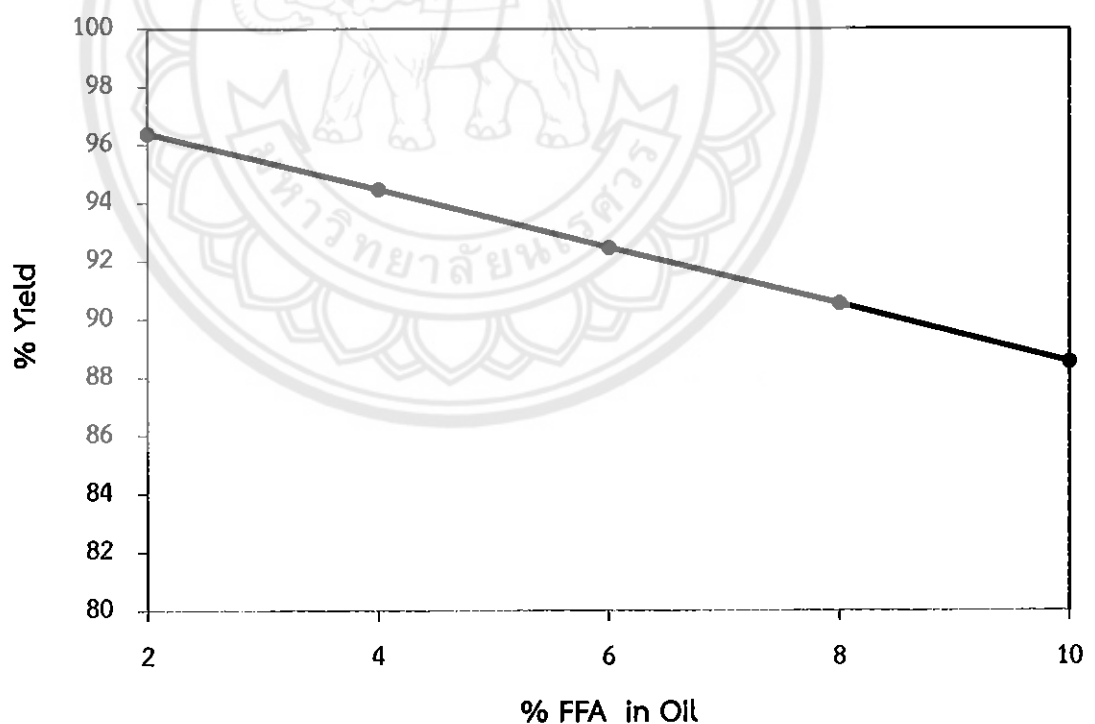
RStoic (RStoic Model) เนื่องจากเป็นหน่วยปฏิบัติการที่ต้องการค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา (Conversion of Reaction) งานวิจัยนี้กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเป็น 0.98 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากการทบทวนงานวิจัยที่ทำการทดลองของ Alcantara, R. et al [27] ความดัน 400 กิโลปาสกาล และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล กลีเซอรอลและเมทานอลส่วนเกิน (206) และผลิตภัณฑ์ได้ออกจากถังปฏิกิริยา R-200 จะถูกป้อนเข้าคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-300) เป็นคอลัมน์การกลั่นแยกเมทานอลเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (301) โดยจำนวนของคอลัมน์การกลั่นเป็น 5 ชั้น ป้อนกระแสเข้าที่ชั้น 2 อัตราป้อนกลับที่ 1 ความดันของคอลัมน์การกลั่น 20 กิโลปาสกาล และร้อยละการป้อนกลับใหม่ของเมทานอลส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาซึ่งเป็นสภาวะการดำเนินการของคอลัมน์การกลั่นที่เหมาะสมจากการจำลองข้างต้น และกระแสขาออกส่วนล่างของคอลัมน์การกลั่นได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล (302) จากนั้นกระแสผลิตภัณฑ์ (302) ถูกส่งต่อไปยังหน่วยการแยกไบโอดีเซล (X-400) ซึ่งแยกไบโอดีเซลออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรอล [29] โดยกระแสส่วนบนของ X-400 มีปริมาณไบโอดีเซล และน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นส่วนใหญ่ซึ่งนำไปกลั่นแยกไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยด้วยคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-500) ซึ่งเป็นหน่วยปฏิบัติการนี้แยกไบโอดีเซลออกจาก เมทานอล และน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกจากคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-500) คือ เมทานอล (501) น้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยา (503) และไบโอดีเซล (502) ที่มีอัตราการไหล 970.902 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับกระแสขาออกส่วนล่างจาก X-400 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล (402) และถูกป้อนเข้าถังปฏิกิริยา (R-400) เพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออก โดยการป้อนกรดฟอสฟอริกที่มีอัตราการไหล 8.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (403) เพื่อให้ปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ เป็นเกลือ (Na_3PO_4) และน้ำ จากนั้นผลิตภัณฑ์ (404) ที่ออกจากถังปฏิกิริยา (R-400) ถูกป้อนเข้าหน่วยแยก (X-401) เพื่อแยกเกลือออก ซึ่งถูกแยกออกโดยแรงโน้มถ่วง ได้ผลิตภัณฑ์ด้านล่างเป็นเกลือ (406) สำหรับด้านบนได้ผลิตภัณฑ์เป็น กลีเซอรอล (405) และถูกส่งต่อไปยังคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-600) โดยจะแยกเมทานอลและน้ำออก (601) เพื่อให้กลีเซอรอล (602) มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการไหล 100.586 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลดังที่กล่าวข้างต้น ด้วยสภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุดจากสมมูลมวลและสมดุลพลังงานของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ จะได้ค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 92.466 และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 99.826 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 96.5



รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 ผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วของกระบวนการจำลองผลิตไบโอดีเซลแบบขั้นตอนเดียว

จากกระบวนการจำลองการผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบด้วยปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันแบบขั้นตอนเดียวโดยป้อนสารเข้าน้ำมันด้วยอัตราการใช้กรดไขมัน 1,050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมทานอลบริสุทธิ์ด้วยอัตราการใช้กรดไขมัน 10.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4.5 และสถานะการดำเนินงานของหน่วยปฏิบัติการต่างๆ ที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.2 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลกระทบของความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วที่ร้อยละกรดไขมันอิสระเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล แสดงผลได้จากกระบวนการจำลองของการผลิตไบโอดีเซลเป็นร้อยละผลผลิตและค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (FAME Purification) พร้อมทั้งอัตราการใช้กรดไขมันของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการจำลองกระบวนการสำหรับผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันของสารป้อนเข้าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน

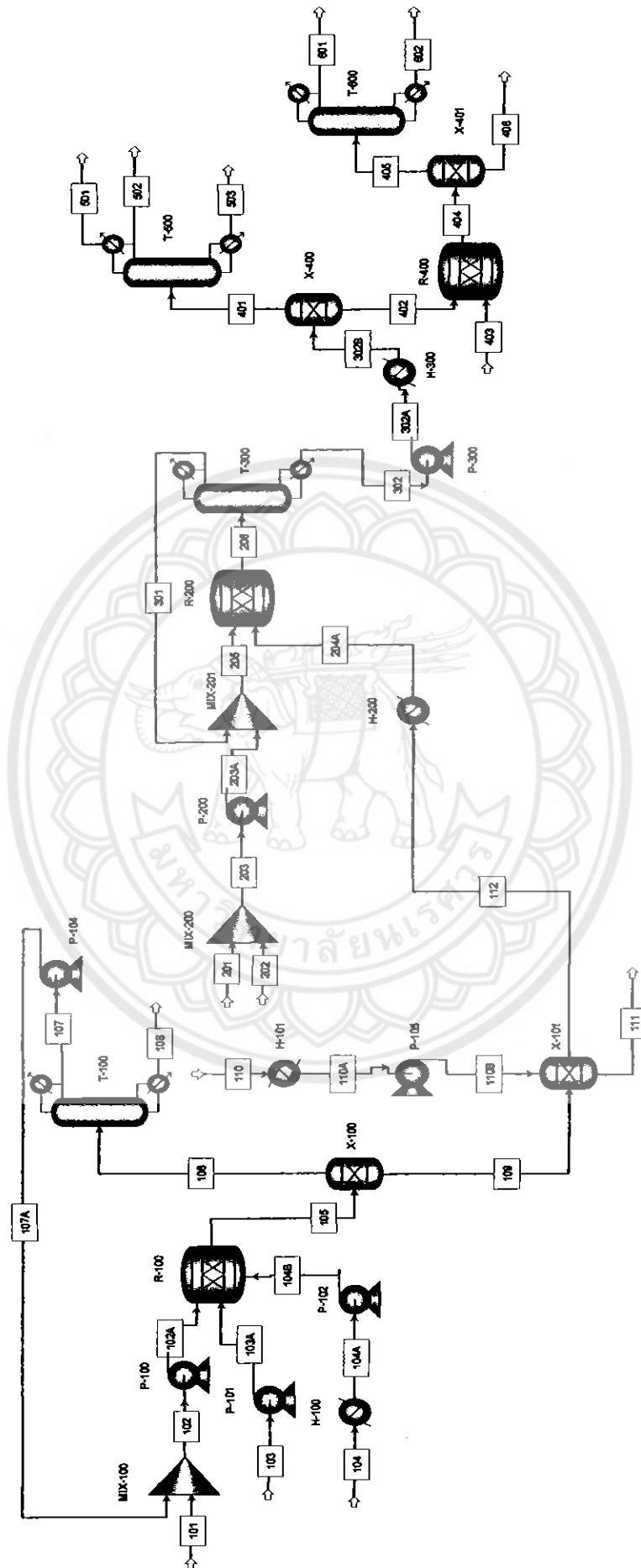
Process	%FFA	Distillate Rate (kg/hr)	Reoiler Heat Duty (kW)	Condenser Heat Duty (kW)	%Yield
1 Step	2	1016	595.97907	-583.85173	96.39403
	4	997	588.524866	-576.35951	94.47806
	6	977	580.677123	-568.30253	92.46686
	8	958	573.217334	-560.80825	90.5509
	10	938	565.3714	-552.7498	88.53969

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 แสดงถึงผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน จะเห็นได้ว่า ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 2 มีร้อยละผลผลิตสูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.394 รองลงมาเป็นกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละ 94.478 กรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 6 มีค่าเท่ากับร้อยละ 92.466 กรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 8 มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.551 และร้อยละผลผลิตของน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระร้อยละ 10 มีค่าน้อยถึง 88.539 เนื่องจากปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล (FAME) จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันกับเมทานอลเกิดจากปริมาณไตรโอเลอินที่มีอยู่ในน้ำมัน เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นและปริมาณไตรโอเลอินลดลง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดสภาวะการดำเนินการกลั่น ดังตารางที่ 4.6 ให้มีอัตราการกลั่นที่คอลัมน์การกลั่นสุญญากาศจำนวนชั้น 5 ชั้น และป้อนสารขาเข้าที่ชั้นที่ 2 ในกระบวนการการกลั่นผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ให้มีอัตราการกลั่นสูงสุดที่สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของทุกปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระ เนื่องจากต้องการทราบภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์และภาระความร้อนของคอนเดนเซอร์ของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศเมื่อร้อยละผลได้ของการกลั่นให้ผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงสุด พบว่าทุกปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ใกล้เคียงกันที่ 565-585 กิโลวัตต์ และภาระทางความร้อนของคอนเดนเซอร์ของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศใกล้เคียงกันที่ 552-583 กิโลวัตต์

4.4 ผลการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วจากการประกอบอาหารกับเมทานอลโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วจากการประกอบอาหารกับเมทานอลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็น 6:1 เป็นค่าที่ถูกใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งได้เมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 97 และร้อยละ 98 และงานวิจัยนี้สมมติสารที่ป้อนเข้าเป็นไตรโอเลอินและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิกแทนน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.1 โดยการป้อนกระแสเข้าถึงปฏิกิริยา R-100 ที่อัตราการไหล 1,050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (Stream 104) มีปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ผ่านการให้ความร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกระแสป้อนเข้าอื่นให้อุณหภูมิเข้าถึงปฏิกิริยา 25 องศาเซลเซียส กระแสเข้าของกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรดโดยใช้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเมทานอล [18] โดยมีอัตราการไหลเป็น 12.8632 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (103) และเมทานอลใหม่ที่มีอัตราการไหลเป็น 128.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (101) ซึ่งเข้าผสมกันกับกระแสของเมทานอลที่ได้จากการนำกลับมาใช้ใหม่ (107A) และตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกที่ถึงปฏิกิริยา (R-100) โดยใช้หน่วยปฏิบัติการ RStoic (RStoic Model) เป็นถึงในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันและเมทานอล โดยกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเป็น 0.97 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล [12] และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล น้ำ กรดไขมันอิสระที่ไม่ทำปฏิกิริยาและเมทานอลส่วนเกิน (105) และผลิตภัณฑ์ได้ออกจากถังปฏิกิริยา R-100 จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยแยก (X-100) เพื่อแยกเมทานอลและกรดซัลฟิวริกออกจากไบโอดีเซล ซึ่งผลิตภัณฑ์ด้านบนที่ได้ คือ เมทานอลและกรดซัลฟิวริก (106) และจะถูกป้อนคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-100) ซึ่งเป็นกระบวนการแยกเมทานอลเพื่อกลับไปใช้ใหม่ซึ่งด้านบนของคอลัมน์การกลั่นได้ผลิตภัณฑ์ คือ เมทานอล (107A) สำหรับด้านล่างของคอลัมน์การกลั่นได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดซัลฟิวริก (108) สำหรับผลิตภัณฑ์ด้านล่างที่ออกจาก X-100 คือ ไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระ (109) ถูกนำไปทำให้เป็นกลางที่ X-101 เพื่อกำจัดกรดที่เหลือออก โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ป้อนเข้า (110) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการการบำบัดกรดไขมันอิสระ คือ ไบโอดีเซลและไตรโอเลอิน (112) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำให้เป็นกลางยังคงมีไตรโอเลอินเหลืออยู่ ถูกนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในถังปฏิกิริยาที่ R-200 ผ่านการให้ความร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกระแสป้อนเข้าอื่นให้อุณหภูมิเข้าถึงเป็น 25 องศาเซลเซียส กระแสเข้าของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสโดยใช้ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ป้อนเข้า โดยมีอัตราการไหลเป็น 9.87 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (202) และเมทานอลใหม่ที่มีอัตราการไหลเป็น 117.2

กิโกรัมต่อชั่วโมง (201) ซึ่งเข้าผสมกันกับกระแสของเมทานอลที่ได้จากการนำกลับมาใช้ใหม่ (301) และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถึงปฏิกิริยา (R-200) โดยการใช้หน่วยปฏิบัติการ RStoic (RStoic Model) เป็นถึงในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันและเมทานอล โดยกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเป็น 0.98 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [25] ความดัน 400 กิโลปาสกาล และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล กลีเซอรอล และเมทานอลส่วนเกิน (206) และผลิตภัณฑ์ได้ออกจากถังปฏิกิริยา R-200 จะถูกป้อนเข้าคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-300) เป็นคอลัมน์การกลั่นแยกเมทานอลเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (301) และกระแสของส่วนล่างของคอลัมน์การกลั่นได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล (302) จากนั้นกระแสผลิตภัณฑ์ (302) ถูกส่งต่อไปยังหน่วยการแยกไบโอดีเซล (X-400) ซึ่งแยกไบโอดีเซลออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรอล [29] โดยกระแสส่วนบนของ X-400 มีปริมาณไบโอดีเซลและน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นส่วนใหญ่ซึ่งนำไปกลั่นแยกไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยด้วยคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-500) ซึ่งเป็นหน่วยปฏิบัติการนี้แยกไบโอดีเซลออกจากเมทานอลและน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกจากคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ (T-500) คือ เมทานอล (501) น้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยา (503) และไบโอดีเซล (502) ที่มีอัตราการไหล 1034.902 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับกระแสของส่วนล่างจาก X-400 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล (402) และถูกป้อนเข้าถังปฏิกิริยา (R-400) เพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออก โดยการป้อนกรดฟอสฟอริกที่มีอัตราการไหล 8.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (403) เพื่อให้ปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือ (Na_3PO_4) และน้ำ จากนั้นผลิตภัณฑ์ (404) ที่ออกจากถังปฏิกิริยา (R-400) ถูกป้อนเข้าหน่วยแยก (X-401) เพื่อแยกเกลือออก ซึ่งถูกแยกออกโดยแรงโน้มถ่วง ได้ผลิตภัณฑ์ด้านล่างเป็นเกลือ (406) สำหรับด้านบนได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล (405) และถูกส่งต่อไปยังคอลัมน์การกลั่น (T-600) โดยจะแยกเมทานอลและน้ำออก (601) เพื่อให้กลีเซอรอล (602) มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการไหล 96.319 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลดังที่กล่าวข้างต้น ด้วยสภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุด จะได้ค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 98.562 และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 99.826 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 96.5 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันกับเมทานอลโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียวที่สภาวะการดำเนินการของหน่วยปฏิบัติการทั้งโรงงานต้นแบบเดียวกันของส่วนปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าได้ค่าร้อยละผลได้มากกว่า เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนได้มีการลดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล



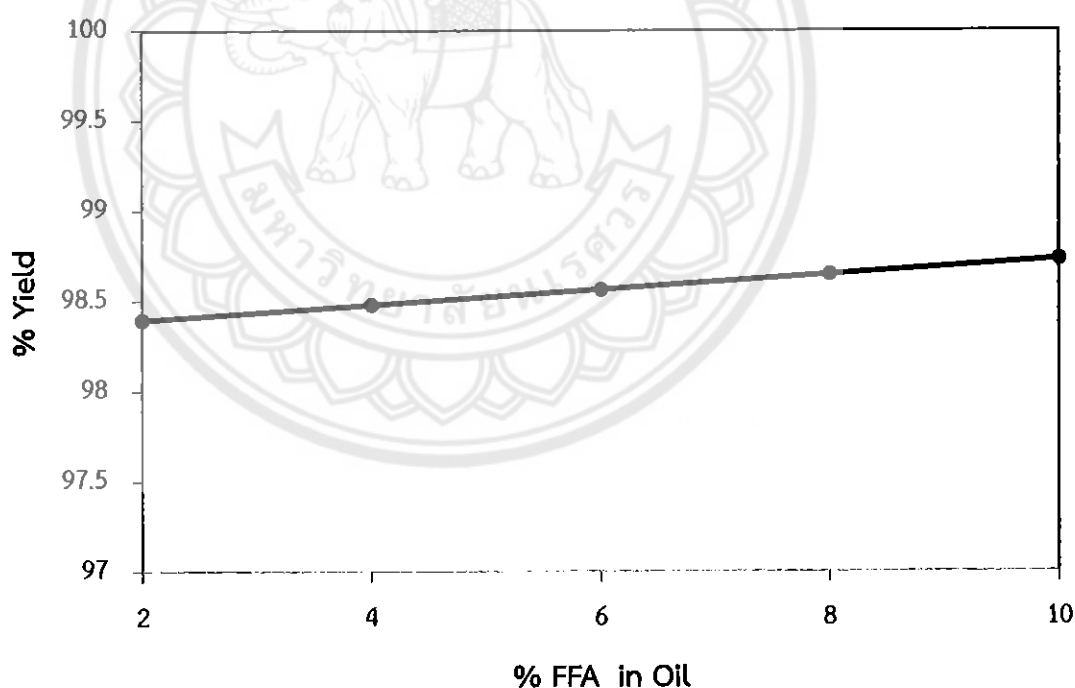
รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรของแต่กระแสดงของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิคชัน

Stream Name	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	3.033	5.235	3.706	1.529	0.084	0.134	3.547	0.025	0.434	1.095
Total Flow (kg/hr)	97.171	1178.214	1061.645	111.145	13.624	4.295	1036.705	20.645	10.500	100.645
Total Flow (L/min)	2.053	23.052	21.211	1.523	0.194	654.765	20.759	0.485	0.211	1.561
Temperature (K)	301.491	363.591	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	622.302	325.287	525.451
Pressure (atm)	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395
Component Mass Fraction										
Trilein	0.000	0.017	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.956	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.010	0.006	0.055	0.000	1.000	0.002	0.000	0.581	0.000
NaOH	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.418	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.085	0.000	0.905	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.879	0.976	0.000	0.000	0.000	0.998	0.044	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.4.1 ผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ของกระบวนการจำลองผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน

จากการจำลองการผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยป้อนสารขาเข้าน้ำมันด้วยอัตราการใช้ไฮโดรเจน 1,050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมทานอลบริสุทธิ์ด้วยอัตราการใช้ไฮโดรเจน 128.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 และสภาวะการดำเนินงานของหน่วยปฏิบัติการต่างๆ ที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.6 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลกระทบของความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วที่ร้อยละกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล แสดงผลได้จากกระบวนการจำลองของการผลิตไบโอดีเซลเป็นร้อยละผลผลิตและค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ของคอลัมน์การกลั่นในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พร้อมทั้งอัตราการใช้ไฮโดรเจนของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศ แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามลำดับ

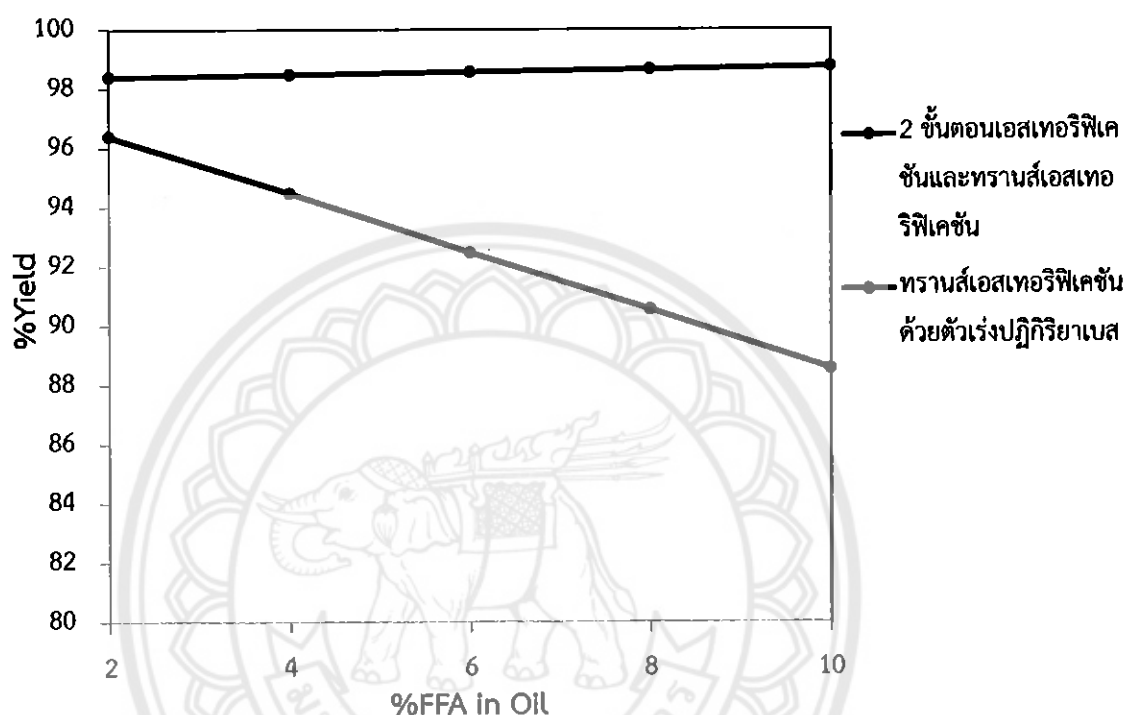
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการจำลองกระบวนการสำหรับผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันของสารป้อนเข้าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน

Process	%FFA	Distillate Rate (kg/hr)	Reoller Heat Duty (kW)	Condenser Heat Duty (kW)	%Yield
2 Steps	2	1037	608.100845	-595.68849	98.39403
	4	1039	612.778681	-600.03332	98.47807
	6	1041	617.455094	-604.37731	98.56211
	8	1043	622.130435	-608.72089	98.64614
	10	1045	626.803939	-613.06367	98.73018

ในกระบวนการการจำลองผลิตไบโอดีเซลเชิงโรงงานต้นแบบแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 แสดงผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ 2 4 6 8 และ 10 มีผลต่อร้อยละผลผลิต จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 10 ได้ร้อยละผลผลิตสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.730 รองลงมา คือ ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 8 มีค่าเท่ากับร้อยละผลผลิต 98.646 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 6 มีค่าเท่ากับร้อยละผลผลิต 98.562 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละผลผลิต 98.478 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 2 มีค่าเท่ากับร้อยละผลผลิต 98.394 จากผลการจำลองดังกล่าวพบว่าผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนมีการบำบัดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซลเสมือนกับการใช้น้ำมันที่มีไตรโอเลอินบริสุทธิ์เป็นสารป้อนเข้ากระบวนการจำลอง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการกำหนดสภาวะการดำเนินงานการกลั่น ดังตารางที่ 4.6 ให้มีอัตราการกลั่นที่คอลัมน์การกลั่นสุญญากาศจำนวนชั้น 5 ชั้นและป้อนสารขาเข้าที่ชั้นที่ 2 ในกระบวนการการกลั่นผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ให้มีอัตราการกลั่นสูงสุดที่สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของทุกปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง 1,037-1,045 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากต้องการทราบภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์และภาระทางความร้อนของคอนเดนเซอร์ของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศเมื่อร้อยละผลได้ของการกลั่นให้ผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สูงสุด พบว่าทุกปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ใกล้เคียงกันช่วง 608-628 กิโลวัตต์ และภาระทางความร้อนของคอนเดนเซอร์ของคอลัมน์การกลั่นสุญญากาศใกล้เคียงกันช่วง 595-613 กิโลวัตต์

4.5 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน

4.5.1 ร้อยละผลผลิต



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันด้วยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต ในกระบวนการจำลองการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนกับกระบวนการจำลองการผลิตไบโอดีเซลแบบขั้นตอนเดียว พบว่าเมื่อนำกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้งสองกระบวนการมาเปรียบเทียบกันนั้น กระบวนการจำลองแบบ 2 ขั้นตอนได้ร้อยละผลผลิตที่มากกว่ากระบวนการจำลองการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน โดยที่กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอนมีร้อยละผลผลิตแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบขั้นตอนเดียวมีร้อยละผลผลิตที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 2 มีร้อยละผลผลิตสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 4 ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 6 ที่ปริมาณ

กรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 8 ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 10 ซึ่งกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอนได้ป้อนข้อมูลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในโปรแกรม Aspen Plus น้ำมันที่มีร้อยละปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เมื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้เป็นเอสเทอร์กับน้ำ โดยวิธี 2 ขั้นตอนเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้เนื่องจากการที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระปริมาณมาก ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นถ้าในน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะต้องนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำการลดปริมาณของกรดไขมันอิสระก่อน ซึ่งจะใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ผู้ทำวิจัยจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าภาระทางความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าภาระความร้อนของหน่วยปฏิบัติการหลักในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

Unit	Heat duty (kW)
R-100	14.7788
X-100	0.0673
T-100	72.6838
X-101	1.21E-06
R-200	55.2862
T-300	81.2005
X-400	0.0047
T-500	617.4550
R-400	7.8321
X-401	0.0109
T-600	23.7553
Total	873.0746

จากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่า T-500 ใช้พลังงานมากที่สุด คือ 617.455 กิโลวัตต์

รองลงมา คือ T-300 ใช้พลังงาน 81.2005 กิโลวัตต์ T-100 ใช้พลังงาน 72.6838 กิโลวัตต์ R-200 ใช้พลังงาน 55.2862 กิโลวัตต์ T-600 ใช้พลังงาน 23.7553 กิโลวัตต์ R-100 ใช้พลังงาน 14.7788 กิโลวัตต์ R-400 ใช้พลังงาน 7.8321 กิโลวัตต์ X-100 ใช้พลังงาน 0.0673 กิโลวัตต์ X-401 ใช้พลังงาน 0.0109 กิโลวัตต์ X-400 ใช้พลังงาน 0.0047 กิโลวัตต์ X-101 ใช้พลังงาน 1.21E-06 กิโลวัตต์ ตามลำดับ โดยทั้งกระบวนการใช้พลังงานประมาณ 873.0746 กิโลวัตต์ ซึ่งจะเสียค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1,993,867 บาทต่อเดือน

นอกจากนี้ผู้ทำวิจัยยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ค่าทางเทอร์โมไดนามิก เช่น ค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันซึ่งแสดง ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเอนทัลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Stream name	206	404
Enthalpy (cal/sec)	-294220.75	-76007.66

จากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้ถังปฏิกรณ์ทั้งหมด 2 ถัง และกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ คือ กระแส 206 และกระแส 404 เมื่อตรวจสอบค่าเอนทัลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ทั้งสองพบว่ามีความเท่ากับ -294220.75 แคลอรีต่อวินาที และ -76007.66 แคลอรีต่อวินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเอนทัลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

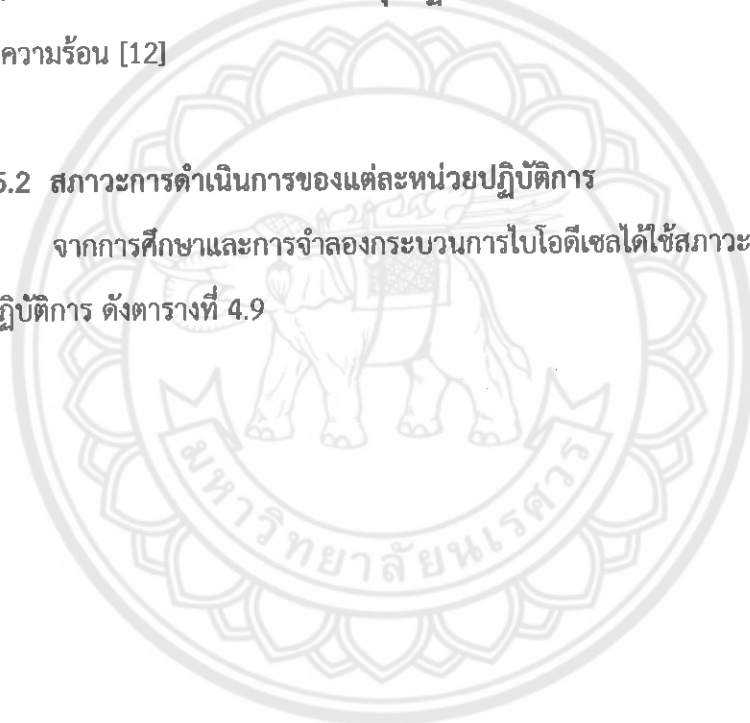
Stream name	105	206	404
Enthalpy (cal/sec)	-281000.53	-271411.7	-63431.16

จากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งต้องตั้งปฏิกรณ์ทั้งหมด 3 ถัง และกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ คือ กระแส 105 กระแส 206 และกระแส 404 เมื่อตรวจสอบค่าเอนทาลปีของกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ทั้งสอง พบว่ามีค่าเท่ากับ -281000.535 แคลอรีต่อวินาที -271411.7 แคลอรีต่อวินาที และ -63431.16 แคลอรีต่อวินาที ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 สำหรับกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ที่ค่าเอนทาลปีมีค่าเป็นบวก แสดงถึง ปฏิกิริยาการดูดความร้อน สำหรับกระแสขาออกที่มีค่าเอนทาลปีมีค่าเป็นลบ แสดงถึง ปฏิกิริยาการคายความร้อน จะเห็นได้ว่า ทุกกระแสขาออกของถังปฏิกรณ์ของทั้งสองกระบวนการมีค่าเอนทาลปีเป็นลบ ดังนั้นทุกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของทั้งสองกระบวนการเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน [12]

4.5.2 สภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

จากการศึกษาและการจำลองกระบวนการไบโอดีเซลได้ใช้สภาวะการดำเนินงานของหน่วยปฏิบัติการ ดังตารางที่ 4.9



ตารางที่ 4.9 แสดงสถานะการดำเนินงานแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

	Biodiesel 2 steps	Biodiesel 1 step
Reaction	Esterification and Transesterification	Transesterification
Catalyst	H ₂ SO ₄ /NaOH	NaOH
Temperature (°C)	70/60	60
Pressure (kPa)	400/400	400
Alcohol-to-oil ratio	6:1/6:1	6:1
Conversion (%)	97/98	98
Methanol recovery		
Reflux ratio	2/1	1
Number of stages	5/5	5
Feed stage	2/2	2
>>Biodiesel Purification		
Reflux ratio	2/2	2
Number of stages	5/5	5
Feed stage	2/2	2

4.5.3 ข้อมูลพื้นฐานของปั๊มที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

จากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนเชิงโรงงานต้นแบบประกอบด้วยหลายหน่วยปฏิบัติการ โดยมีปั๊มเป็นหน่วยปฏิบัติการที่สำคัญหนึ่งในโรงงานต้นแบบ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลข้อมูลพื้นฐานของปั๊มที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ โดยปั๊มน้ำมันเป็นสารขาเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 1,050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมทานอลบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 128 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 9.87 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกรดฟอสเฟอริกด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 8.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลการจำลองกระบวนการผลิตด้วยอัตราการป้อนเชิงมวลดังข้างต้นได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 4.7 ที่แสดงค่าอัตราการไหลผ่านปั๊ม (Volumetric Flow Rate (ลิตรต่อนาที)) ค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure Change (บรรยากาศ)) ค่า NPSH Available (เมตร) และค่า Pump Efficiency Used (%)

ตารางที่ 4.10 แสดงข้อมูลพื้นฐานของปั๊ม

Pump Result	P-100	P-101	P-102
Volumetric flow rate (l/min)	5.371312	0.116892	21.95606
Pressure change (atm)	1.96077	2.96077	2.947693
Head developed (m)	25.37897	16.67964	38.21154
NPSH available (m)	24.02802	5.559881	12.9632
Pupm efficiency defined	-	-	-
Electricity (kW)	0.060157	0.001977	0.369669
Pupm efficiency used	0.295658	0.295658	0.295658
Pupm efficiency defined	0.75	0.75	0.75
Electricity (kW)	0.023709	0.000779	0.145727

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) แสดงข้อมูลพื้นฐานของปั๊ม

Pump Result	P-105	P-200
Volumetric flow rate (l/min)	0.971239	2.318498
Pressure change (atm)	2.947693	2.96077
Head developed (m)	16.2828	33.49004
NPSH available (m)	5.523359	9.403661
Pupm efficiency defined	-	-
Electricity (kW)	0.016353	0.039209
Pupm efficiency used	0.295658	0.295658
Pupm efficiency defined	0.75	0.75
Electricity (kW)	0.006446	0.015457

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอหน่วยปฏิบัติการปั๊ม (Pump) 5 หน่วยปฏิบัติการของกระแสน้ำวนขาเข้าของการจำลองกระบวนการ ดังนี้ P-100 P-101 P-102 P-105 และ P-200 โดยงานวิจัยได้ใช้ปั๊มเหล่านี้เพื่อเพิ่มพลังงานให้กับของไหล (Fluid) ช่วยการเคลื่อนที่และเอาชนะต่อการสูญเสียพลังงานจากความเสียดหรือเพิ่มพลังงานที่ปั๊มให้เพิ่มความเร็ว ความดัน และความสูงให้แก่ของไหลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการโดยไม่ให้ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ในกระแสน้ำวนขาเข้า จากการจำลอง

กระบวนการผลิตด้วยอัตราการป้อนเชิงมวลดังข้างต้นได้ผลการจำลองของปั๊ม ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงข้อมูลพื้นฐานของปั๊มแต่ละหน่วยปฏิบัติการในกระบวนการเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการเลือกและการทำงานของปั๊ม สำหรับค่าอัตราการไหลผ่านปั๊ม ค่าการเปลี่ยนแปลงความดันและค่า Pump Efficiency Used (%) สามารถนำไปเป็นข้อมูลพิจารณาการเลือกใช้ปั๊ม นอกจากนั้นค่า Head Developed (เมตร) และค่า NPSH Available (เมตร) เป็นข้อมูลสำคัญต่อการทำงานของปั๊ม เพื่อป้องกันการเกิดคาวิเตชันกับห้องสุบของปั๊มซึ่งจะเป็นสาเหตุความเสียหายของปั๊ม

ยกตัวอย่างผลการจำลองของปั๊ม P-100 ที่ใช้ในการเพิ่มแรงดันของกระแสเมทานอลที่ป้อนด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 128.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อป้อนเข้าถังปฏิกิริยาให้มีความดัน 4 บรรยากาศ ผลจากการจำลองได้ค่าอัตราการไหลผ่านปั๊ม (Volumetric Flow Rate) เท่ากับ 5.371312 ลิตรต่อนาที และค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure Change) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างความดันของส่วนที่ปล่อยออกหรือความดันที่ต้องทำได้เท่ากับ 1.96077 บรรยากาศ โดยค่าทั้งสองเป็นพารามิเตอร์กำหนดขนาดของปั๊ม สำหรับค่า Pump Efficiency Used (%) เท่ากับ 0.295658 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของปั๊มที่ใช้เมื่อต้องการแรงดันกระแสขาออกเท่ากับ 4 บรรยากาศ พร้อมทั้งทราบปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (Electricity) ของปั๊มเท่ากับ 0.060157 กิโลวัตต์ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้กำหนดประสิทธิภาพของปั๊ม (Pump Efficiency) เป็น 0.75 เพื่อต้องการทราบปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (Electricity) ของปั๊มเท่ากับ 0.023709 กิโลวัตต์ ในกระบวนการเชิงโรงงานต้นแบบและค่า NPSH Available (เมตร) เท่ากับ 24.02802 เมตร เป็นเฮดที่มีอยู่จริงของส่วนหน้าปั๊ม (Net Positive Suction Head) โดยค่านี้ถ้ามีค่าไม่มากพอของไหลในห้องสุบจะกลายเป็นไอหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจะต้องไม่น้อยกว่าค่า NPSHr ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการทำงานลดลงและป้องกันการเกิดคาวิเตชันกับห้องสุบ ดังนั้นจำเป็นต้องทราบค่านี้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปโครงงาน

จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม Aspen Plus โดยศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อนำไปเป็นสารป้อนเข้าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลศึกษาจำลองกระบวนการสำหรับการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คอลัมน์การกลั่น โดยศึกษาอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันอัตราส่วนป้อนกลับ ความดันของคอลัมน์การกลั่นที่มีผลต่อภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ และปริมาณร้อยละเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอนโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยทั้งสองกระบวนการได้ศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วที่แตกต่างกันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้ว

จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิดซึ่งประกอบกรดโอเลอิกเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นในการกำหนดสารที่ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Aspen Plus จะสมมติสารที่ป้อนเข้าเป็นไตรโอเลอีนและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิกแทนน้ำมันพืชใช้แล้ว

5.1.2 การจำลองกระบวนการสำหรับการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คอลัมน์การกลั่น

5.1.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน

จากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 15:1 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงสุด รองลงมาคือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 10:1 และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 6:1 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์น้อยสุดและมีความเป็นไปได้ของการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่าง

ต่อเนื่องประมาณร้อยละ 94-98 ของเมทานอลส่วนเกินจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ก่อนที่จะแยกเฟสของการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

5.1.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนป้อนกลับ

จากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนป้อนกลับ พบว่าที่อัตราส่วนป้อนกลับ เท่ากับ 4 มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงสุด รองลงมา คือ อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 3 อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 2 และอัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 ตามลำดับ ซึ่งสภาวะการดำเนินการ การกลั่นที่อัตราส่วนป้อนกลับเท่ากับ 1 มีภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์ต่ำสุดและมีความเป็นไปได้ของการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องประมาณร้อยละ 94-98 ของเมทานอลส่วนเกินจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันก่อนที่จะแยกเฟสของการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

5.1.2.3 ผลกระทบของความดันของคอลัมน์การกลั่น

จากการศึกษาผลกระทบของความดันของคอลัมน์การกลั่น พบว่าที่ความดันของ คอลัมน์การกลั่นเท่ากับ 80 กิโลปาสกาล มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์สูงสุด รองลงมา คือ 50 กิโลปาสกาล และ 20 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งที่ความดันของคอลัมน์การกลั่นเท่ากับ 20 กิโลปาสกาล มีค่าภาระทางความร้อนของรีบอยเลอร์น้อยสุดในการจำลองกระบวนการนำเมทานอล กลับมาใช้ใหม่ พบว่าการดำเนินการของคอลัมน์การกลั่นที่สภาวะต่ำกว่าบรรยากาศหรือสุญญากาศ นั้นส่งผลกระทบทางด้านความไวต่อการได้รับความร้อนของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนเฟสของสารเมื่อ เทียบที่ความดันบรรยากาศ รวมทั้งการกลั่นที่สภาวะสุญญากาศของคอลัมน์การกลั่นสามารถรักษา ระดับอุณหภูมิที่กระแสน้ำออกส่วนบนและส่วนล่างของคอลัมน์การกลั่นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย พร้อมทั้งป้องกันการสลายตัวของกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

5.1.3 การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบขั้นตอนเดียวโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเมื่อสมมติสารที่ป้อนเข้าเป็นไตรโอ- เลอินและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิกแทนน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยสภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุดจากสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ จะได้ค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ

92.466 และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 99.826 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 96.5

5.1.3.1 ผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วของกระบวนการจำลองผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน

จากการศึกษาความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วที่ร้อยละกรดไขมันอิสระเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 พบว่าที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 2 มีร้อยละผลผลิตสูงสุด รองลงมาเป็นกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 4 กรดไขมันอิสระร้อยละ 6 กรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 8 และกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 10 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันกับเมทานอล เกิดจากปริมาณไตรโอเลอีนที่มีอยู่ในน้ำมัน เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นและปริมาณไตรโอเลอีนลดลง จึงทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลน้อยลง

5.1.4 การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเมื่อสมมติสารที่ป้อนเข้าเป็นไตรโอเลอีนและมีกรดไขมันอิสระเป็นกรดโอเลอิกแทนน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยสภาวะการดำเนินการของแต่ละหน่วยปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุด จะได้ค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 98.562 และค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 99.826 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลร้อยละ 96.5

5.1.4.1 ผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ของกระบวนการจำลองผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน

จากการศึกษาความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วที่ร้อยละกรดไขมันอิสระเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 เห็นได้ว่าที่ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 10 ได้ร้อยละผลผลิตสูงสุด รองลงมา คือ ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 8 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 6 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 4 ปริมาณกรดไขมันที่ร้อยละ 2 ตามลำดับ จากผลการจำลองดังกล่าว พบว่าผลกระทบของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนมีการบำบัดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันก่อนทำ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซลเสมือนกับการใช้น้ำมันที่มีไตรโกลีอินบริสุทธิ์เป็นสารป้อนเข้ากระบวนการจำลอง

5.1.5 การเปรียบเทียบการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอนโดยการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เมื่อนำกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้งสองกระบวนการมาเปรียบเทียบกันนั้น พบว่ากระบวนการจำลองแบบ 2 ขั้นตอนได้ร้อยละผลผลิตที่มากกว่ากระบวนการจำลองการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอน โดยที่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 1 ขั้นตอนมีร้อยละผลผลิตที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 2 มีร้อยละผลผลิตสูงสุด รองลงมา คือ ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 4 ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 6 ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 8 ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ร้อยละ 10 ตามลำดับ สำหรับกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน มีร้อยละผลผลิตแตกต่างกันมากกันเล็กน้อย โดยการวิธี 2 ขั้นตอนเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้ เนื่องจากการที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระปริมาณมาก ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นถ้าในน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะต้องนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำการลดปริมาณของกรดไขมันอิสระก่อน ซึ่งจะใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โดยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนใช้พลังงานประมาณ 873.0746 กิโลวัตต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล คณะผู้ดำเนินการศึกษาได้พบข้อควรปรับปรุงและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus ดังนี้

5.2.1 ในการผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมจะผลิตด้วยวิธีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแต่ถ้าดำเนินการในระดับอุตสาหกรรมจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นจึงมีการใช้โปรแกรมเพื่อจำลองกระบวนการผลิตก่อนการดำเนินการจริงเพื่อเป็นการลดการเสี่ยงในการผลิตและช่วยลดต้นทุนในการผลิตเบื้องต้นได้แต่ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมอาจไม่สามารถนำไปใช้กับกระบวนการได้จริงอย่างแม่นยำแต่ก็ถือว่าเป็นการคาดการณ์และสามารถนำค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตจริงได้

5.2.2 ในแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอาจใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดอื่นได้ เช่น ถึงปฏิกิริยา RCSTR ช่วยในการออกแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้

5.2.3 ควรศึกษาความเป็นไปได้ของตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

5.2.4 ควรมีการศึกษาต้นทุนในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ เช่น ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ



เอกสารอ้างอิง

- [1] Fukuda, H., Kondo, A., and Noda, H. (2001). Biodiesel Fuel Production by Trans-esterification of Oil. *Journal of Bioscience and Bioengineering.*, Vol. 92, No. 5, pp. 405-416.
- [2] ไชยยันต์ ไชยยะ. (2551). การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพั่นธุ์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [3] Ma, F., and Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology.*, Vol. 70, pp. 1-15.
- [4] Meher, L. C., Vidya Sagar D., and Naik, S.N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by Transesterification-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, Vol. 10, pp. 248-268.
- [5] Yilmaz, N. (2011). Temperature-dependent viscosity correlations of vegetable oils and biofuel-ediesel mixtures. *biomass and bioenergy.*, Vol. 35, pp. 2936-2938.
- [6] Yusuf, N. N. A. N., Kamarudin, S . K., and Yaakub, Z. (2011). Overview on the current trends in biodiesel production. *Energy Conversion and Management.*, Vol. 52, pp. 2741-2751.
- [7] Khan, A. K. (2002). **Research Into Biodiesel Kinetics and Catalyst Development.** Department of Chemical Engineering In partial fulfillment of the requirement For an Individual Inquiry Topic at The University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia.
- [8] Demirbas, A. (2005). Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress In Energy and Combustion Science.*, Vol. 31, pp. 466-487.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Borges, M. E., and Diaz, L. (2012). Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, Vol. 16, pp. 2839-2849.
- [10] Yaakob, Z. et al. (2013). Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, Vol. 18, pp. 184-193.
- [11] Sharma, Y. C., Singh B., and Upadhyay, S. N. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. **Fuel.**, Vol. 87, pp. 2355-2373.
- [12] Zhang, Y., Dube, M. A., McLean, D. D., and Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology.**, Vol. 89, pp. 1-16.
- [13] Tariq, M., Ali, S., and Khalid, N. (2012). Activity of homogeneous and heterogeneous catalysts, spectroscopic and Chromatographic characterization of biodiesel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, Vol. 16, pp. 6303-6316.
- [14] Guan, G. et al. (2009). Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether. **Fuel.**, Vol. 88, pp. 81-86.
- [15] Ramadhas, A. S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C. (2005). Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel.**, Vol. 84, pp. 335-340.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science.**, Vol. 33, pp. 233-271.
- [17] Nguyen, N. T. (2012). **Optimization of Biodiesel Production Plants.** Chemical & Biomolecular Engineering Theses, Dissertations, & Student Research., Paper 15.
- [18] Morais, S. et al. (2010). **Designing Eco-Efficient Biodiesel Production Processes from Waste Vegetable Oils.** European Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE20.
- [19] Kiss, A. A., and Ignat, R. M. (2012). Enhanced methanol recovery and glycerol separation in biodiesel production-DWC makes it happen. **Applied Energy.**, Vol. 99, pp. 146-153.
- [20] West, A. H., Posarac, D. and Ellis, N. (2007). Simulation, Case Studies and Optimization of a Biodiesel Process with a Solid Acid Catalyst. **International Journal of Chemical Reactor Engineering.**, Vol. 5, Article A37.
- [21] Yun, H. et al. (2013). Process simulation and energy optimization of the enzyme-catalyzed biodiesel production . **Energy.**, Vol. 54, pp. 84-96.
- [22] Dhar, B. R., and Kirtania, K. (2009). Excess Methanol Recovery in Biodiesel Production Process Using A Distillation Column: A Simulation Study. **Chemical Engineering Research Bulletin.**, Vol. 13, pp. 55-60.
- [23] Aspen Technology, Inc. (2008). **Aspen Plus Biodiesel Model.** 200 Wheeler Road Burlington, MA 01803-5501 USA.
- [24] Labège (2009). **Biofuel Production Plant from Pure Vegetable OIL With An Alkaline Catalyst.** France - All rights reserved.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Manuel ,G.et al (2010). Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends. *Bioresource Technology.*, Vol. 101, pp. 4431–4439.
- [26] Agarwal, A.K. (2006). **Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines.** Progress in Energy and Combustion Science thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur., Kanpur-208 016, India.
- [27] Alcantara, R.et al (2000). Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow. *Biomass and Bioenergy.*, Vol. 18, pp. 515-527.
- [28] Tomasevic, A.V. et al.(2003). Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology*, Vol. 81, pp. 1–6.
- [29] Jamshidbeigi, E. et al.(2012). Simulation of Biodiesel Production Unit. *Canadian Journal on Chemical Engineering & Technology*, Vol. 3 No. 1.
- [30] RALPH, S. Teach Yourself the Basics of Aspen Plus™. Chemical Engineering and Materials Science Department Stevens Institute of Technology.
- [31] Amiya, K. (2009). **Process Simulation and Control Using Aspens Plus™**. New Delhi-110015.
- [32] Luis , F.B.et al. (2009). Optimisation of FAME production from waste cooking oil for biodiesel use. *biomass and bioenergy*, Vol. 33, pp. 862–872.
- [33] Soojin, L.et al. (2011). Process simulation and economic analysis of biodiesel production processes using fresh and waste vegetable oil and supercritical methanol. *chemical engineering research and design*, Vol. 89, pp. 2626–2642.
- [34] ผศ.ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. (2551). **กลศาสตร์ของไหลประยุกต์ (Applied Fluid Mechanics).** กรุงเทพฯ: บริษัท ทริปปเบิล กรุ๊ป จำกัด.



ตารางที่ ก.1 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละส่วนของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิคเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 2

Stream name	201	202	204A	205	206	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	3.658	0.263	1.236	7.684	8.920	3.764	5.157	3.560	1.522	0.162	0.066	3.469	0.026	0.378	1.144
Total Flow(kg/hr)	117.200	10.500	1050.000	248.291	1298.291	120.591	1177.700	1037.453	113.476	35.371	2.100	1013.900	21.453	8.500	104.976
Total Flow (l/min)	2.463	0.092	20.416	4.769	25.040	2.548	23.233	20.745	1.542	0.633	320.095	20.302	0.501	0.166	1.626
Temperature (K)	298.150	298.150	333.150	299.902	333.150	301.491	377.293	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	625.910	328.258	523.530
Pressure (atm)	0.987	0.987	3.948	0.197	3.948	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395
Component mass fraction															
Triolein	0.000	0.000	0.980	0.000	0.016	0.000	0.017	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.959	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.000	0.000	0.958	0.099	1.000	0.007	0.004	0.034	0.000	1.000	0.002	0.000	0.454	0.000
NaOH	0.000	1.000	0.000	0.042	0.008	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.545	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	0.000	0.089	0.000	0.924	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.406	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.780	0.000	0.860	0.976	0.000	0.000	0.000	0.998	0.041	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.020	0.000	0.016	0.000	0.018	0.000	0.000	0.594	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 8

Stream name	201	202	204A	205	206	301	302	401	405	406	501	502	503	501	502	503	602
Total Flow (kmol/hr)	3.658	0.263	1.388	8.595	9.984	4.675	5.309	3.454	1.557	0.385	0.173	3.258	0.023	0.485	1.072	0.000	1.072
Total Flow (kg/hr)	117.200	10.500	1050.000	277.501	1327.501	149.801	1177.700	977.524	110.406	98.371	5.560	952.440	19.524	11.900	98.506	0.000	98.506
Total Flow (l/min)	2.463	0.092	22.612	5.372	25.680	3.165	22.869	19.549	1.521	1.870	847.476	19.071	0.438	0.240	1.528	0.000	1.528
Temperature (K)	298.150	298.150	333.150	300.074	333.150	301.491	359.074	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	712.403	324.723	525.461	0.000	525.461
Pressure (atm)	0.987	0.987	3.948	0.197	3.948	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395	0.000	0.395
Component mass fraction																	
Triolein	0.000	0.000	0.920	0.000	0.015	0.000	0.016	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.990	0.000	0.000	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.000	0.000	0.962	0.124	1.000	0.012	0.007	0.065	0.000	1.000	0.002	0.000	0.606	0.000	0.000	0.000
NaOH	0.000	1.000	0.000	0.038	0.008	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.393	0.001	0.001	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.000	0.000	0.000	0.074	0.000	0.084	0.000	0.892	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999	0.000	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.146	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.716	0.000	0.807	0.973	0.000	0.000	0.000	0.998	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.080	0.000	0.063	0.000	0.071	0.000	0.000	0.854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.6 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิคชันและ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 2

Stream name	101	103	104B	105	106	107	108	109	111	201	202	204A	205	206
Total Flow (kmol/hr)	3.998	0.121	1.236	8.779	7.47	3.423	4.047	1.309	2.8	3.658	3.998	0.121	1.236	8.779
Total Flow (kg/hr)	128.1	11.89	1050	1299.681	247.37	109.691	137.679	1052.311	110.929	117.2	128.1	11.89	1050	1299.681
Total Flow (l/min)	2.693	0.108	20.69	41.133	5.445	2.273	2.732	21.361	1.016	2.463	2.693	0.108	20.69	41.133
Temperature (K)	298.15	298.15	366.239	343.15	343.15	288.588	289.127	343.15	351.018	298.15	298.15	298.15	366.239	343.15
Pressure (atm)	1.987	0.987	3.948	3.948	3.948	0.099	0.099	3.948	3.948	0.987	1.987	0.987	3.948	3.948
Component mass fraction														
Triolein	0.000	0.000	0.980	0.792	0.000	0.000	0.000	0.978	0.000	0.000	0.000	0.000	0.980	0.792
Methanol	1.000	0.000	0.000	0.181	0.952	1.000	0.914	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.181
NaOH	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.983	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na ₂ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
Oleic acid	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	1.000	0.000	0.009	0.048	0.000	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.009

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสน้ำของไฮโดรที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 2

Stream name	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	3.317	5.149	3.633	1.517	0.087	0.064	3.541	0.027	0.372	1.145
Total Flow (kg/hr)	106.293	1177.871	1058.835	113.381	14.155	2.063	1034.937	21.835	8.400	104.981
Total Flow (l/min)	2.245	23.264	21.167	1.540	0.201	314.513	20.723	0.525	0.164	1.625
Temperature (K)	301.491	377.243	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	609.693	328.123	523.308
Pressure (atm)	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395
Component mass fraction										
Triolein	0.000	0.017	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.943	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.007	0.004	0.034	0.000	1.000	0.002	0.000	0.460	0.000
NaOH	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.041	0.000	0.000	0.000	0.000	0.539	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.089	0.000	0.925	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.993	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.978	0.977	0.000	0.000	0.000	0.998	0.057	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิคเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิคเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 4

Stream name	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	3.175	5.192	3.669	1.523	0.085	0.099	3.544	0.026	0.401	1.122
Total Flow(kg/hr)	101.732	1178.043	1060.240	112.263	13.840	3.179	1035.821	21.240	9.400	102.863
Total Flow (l/min)	2.149	23.140	21.189	1.532	0.196	484.644	20.741	0.505	0.187	1.591
Temperature (K)	301.491	369.476	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	615.269	326.450	522.279
Pressure (atm)	3.175	5.192	3.669	1.523	0.085	0.099	3.544	0.026	0.401	1.122
Component mass fraction										
Triolein	0.000	0.017	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.949	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.008	0.005	0.044	0.000	1.000	0.002	0.000	0.530	0.000
NaOH	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.470	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.087	0.000	0.915	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.995	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.879	0.976	0.000	0.000	0.000	0.998	0.051	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสน้ำของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 6

Stream name	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	3.033	5.235	3.706	1.529	0.084	0.134	3.547	0.025	0.434	1.095
Total Flow(kg/hr)	97.171	1178.214	1061.645	111.145	13.624	4.295	1036.705	20.645	10.500	100.645
Total Flow (l/min)	2.053	23.052	21.231	1.523	0.194	654.765	20.759	0.485	0.211	1.561
Temperature (K)	301.491	363.591	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	622.302	325.287	525.451
Pressure (atm)	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395
Component mass fraction										
Triolein	0.000	0.017	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.956	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.010	0.006	0.055	0.000	1.000	0.002	0.000	0.581	0.000
NaOH	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.418	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.085	0.000	0.905	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.879	0.976	0.000	0.000	0.000	0.998	0.044	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.10 แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิคชันและ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 10

Stream name	101	103	1048	105	106	107	108	109	111	201	202	204A	205	206
Total Flow (kmol/hr)	3.998	0.141	1.439	10.217	8.417	4.639	3.778	1.800	3.097	3.658	0.236	1.428	6.642	8.070
Total Flow (kg/hr)	128.100	13.837	1050.000	1340.575	279.022	148.638	130.383	1061.554	118.646	117.200	9.450	1051.908	214.699	1266.607
Total Flow (l/min)	2.693	0.126	23.282	41.998	6.136	3.080	2.561	26.136	1.193	2.463	0.083	23.209	4.111	24.443
Temperature (K)	298.150	298.150	340.117	343.150	343.150	288.588	289.263	343.150	346.906	298.150	298.150	333.150	299.657	333.150
Pressure (atm)	0.987	0.987	3.948	3.948	3.948	0.099	0.099	3.948	3.948	0.987	0.987	3.948	0.197	3.948
Component mass fraction														
Triolein	1.000	0.000	0.000	0.198	0.950	1.000	0.894	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.956	0.083
Methanol	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.919	0.000	1.000	0.000	0.044	0.007
NaOH	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.006	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.076
Glycerol	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na ₂ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	0.000	0.101	0.000	0.000	0.000	0.102	0.000	0.819
FAME (biodiesel)	0.000	0.000	0.100	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	1.000	0.000	0.010	0.050	0.000	0.106	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	1.000	0.000	0.000	0.198	0.950	1.000	0.894	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.956	0.083

ตารางที่ ก.10 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรของแต่ละกระแสน้ำของไหลที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ปริมาณ FFA ร้อยละ 10

Stream name	301	302	401	405	406	501	502	503	601	602
Total Flow (kmol/hr)	2.748	5.322	3.780	1.542	0.084	0.204	3.553	0.023	0.491	1.051
Total Flow(kg/hr)	88.049	1178.558	1064.455	108.909	13.394	6.528	1038.472	19.455	12.500	96.409
Total Flow (l/min)	1.860	22.938	21.255	1.507	0.194	995.026	20.794	0.445	0.256	1.493
Temperature (K)	301.491	355.023	333.150	333.150	333.150	353.150	353.150	644.547	323.414	523.531
Pressure (atm)	0.197	0.197	1.974	1.086	1.086	0.099	0.099	0.099	0.395	0.395
Component mass fraction										
Triolein	0.000	0.016	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.971	0.000	0.000
Methanol	1.000	0.014	0.008	0.076	0.000	1.000	0.002	0.000	0.666	0.000
NaOH	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.333	0.001
H ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glycerol	0.000	0.082	0.000	0.884	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.999
Na ₃ PO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.964	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FAME (biodiesel)	0.000	0.880	0.974	0.000	0.000	0.000	0.998	0.029	0.000	0.000
Oleic acid	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H ₂ SO ₄	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



การคำนวณค่าไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 ค่าไฟอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate: TOU) ที่แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์

ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
Peak	Peak	Off Peak	
132.93	2.6950	1.1914	228.17

Peak: วันจันทร์-ศุกร์ 09.00 น. - 22.00 น.

Off Peak: วันจันทร์-ศุกร์ 22.00 น. - 09.00 น. และวันเสาร์ วันอาทิตย์ วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย) ทั้งวัน

สมมติให้โรงงานใช้ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่ 873.0746 กิโลวัตต์ ตลอด 24 ชั่วโมง รวม 628,613.712 กิโลวัตต์

จันทร์-ศุกร์ (9.00-22.00) Peak = $13 \times 22 \times 873.0746 = 249,699.3$ กิโลวัตต์

จันทร์-ศุกร์ (22.00-9.00) Off Peak = $11 \times 22 \times 873.0746 = 211,284.0532$ กิโลวัตต์

เสาร์-อาทิตย์ (00.00-24.00) Off Peak = $24 \times 8 \times 873.0746 = 167,630.3232$ กิโลวัตต์

ตารางที่ ข.2 การคำนวณค่าไฟฟ้า

No.	ค่าไฟฟ้า	บาท/หน่วย	หน่วย	บาท
1.	ความต้องการพลังงานไฟฟ้า Peak	132.93	873.0746	116,057
2.	ค่าไฟฟ้า On Peak	2.6950	249,699.3	672,939
	ค่าไฟฟ้า Off Peak	1.1914	211,284.0532	251,723
	ค่าไฟฟ้า Off Peak (Sat,Sun)	1.1914	167,630.3232	199,714
3.	ค่า F_T	0.9907	628,613.712	622,767
4.	ค่าบริการ			288.17
5.	ค่าไฟฟ้า			1,863,428
6.	VAT 7%			130,439
รวม				1,993,867