



รายงานการวิจัย

การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนตัวรองรับเซอร์โคเนีย

Two-Step Biodiesel Synthesis using Tungstated Zirconia Catalyst

ผู้วิจัย

อาจารย์ ดร. กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2255

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานการวิจัย

การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนตัวรองรับเซอร์โคเนีย

Two-Step Biodiesel Synthesis using Tungstated Zirconia Catalyst

ผู้วิจัย

อาจารย์ ดร. กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2255

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรคาพิลีน (TCp) และเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดคาพริก (HCp) แบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตดเซอร์โคเนีย (WZ) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (1) อัตราการป้อนเมทานอล 30-276 $\mu\text{L}/\text{min}$ (2) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 130-150°C (3) เวลาในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 60-90 นาที ที่ระยะเวลาทั้งหมด 120 นาที (4) ปริมาณน้ำในเมทานอล 1-20% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเมทานอลจะทำให้ผลได้ของเมทิลคาพริก (MeCp) เพิ่มขึ้นทุกค่า เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและสามารถคำนวณพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เท่ากับ 73.04 kJ/mol ในช่วงอุณหภูมิ 130-150°C ส่วนเวลาในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปริมาณน้ำในเมทานอลจะให้ผลตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสผลได้ของ MeCp จะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสปฏิกิริยาจะใกล้ถึงสมดุลที่เวลา 60 นาทีการเพิ่มเวลาจึงไม่มีผลและทำให้เวลาในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำในเมทานอลจะทำให้ผลได้ของ MeCp ลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เสื่อมสภาพมากขึ้น



ABSTRACT

This research studied the conditions for two step biodiesel synthesis through hydrolysis of tricapylin (TCp) and esterification of caprylic acid (HCp) using tungstated zirconia catalyst (WZ) in a semi-batch reactor at atmospheric pressure. Process parameters effecting on the reaction rate were (1) Methanol feed flow rate of 30-276 $\mu\text{L}/\text{min}$ (2) reaction temperature of 130-150°C (3) hydrolysis reaction time of 60-90 min at the total time of 120 min and (4) amount of water in methanol of 1-20% v/v. It was found that the increase of methanol feed flow resulted in the increasing of Methyl caprylate (MeCp) yield as well as the increase of reaction temperature. The calculation of the activation energy of hydrolysis was 73.04 kJ/mol in the temperature range of 130-150°C. For reaction time of hydrolysis and amount of water in methanol gave in the opposite effect. The MeCp yield decreased with the increasing of reaction time. It may be due to the hydrolysis reached the equilibrium at 60 min. Thus, the increase of hydrolysis reaction time might be not affected. The increasing of the amount of water in the mixture of water and methanol tended to decrease the MeCp yield because more water gave the rising of catalyst

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ผู้ให้ทุนสนับสนุนปีงบประมาณ 2555

ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ที่เป็นนักวิจัยผู้ให้คำปรึกษาในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคาตาไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี



สารบัญ

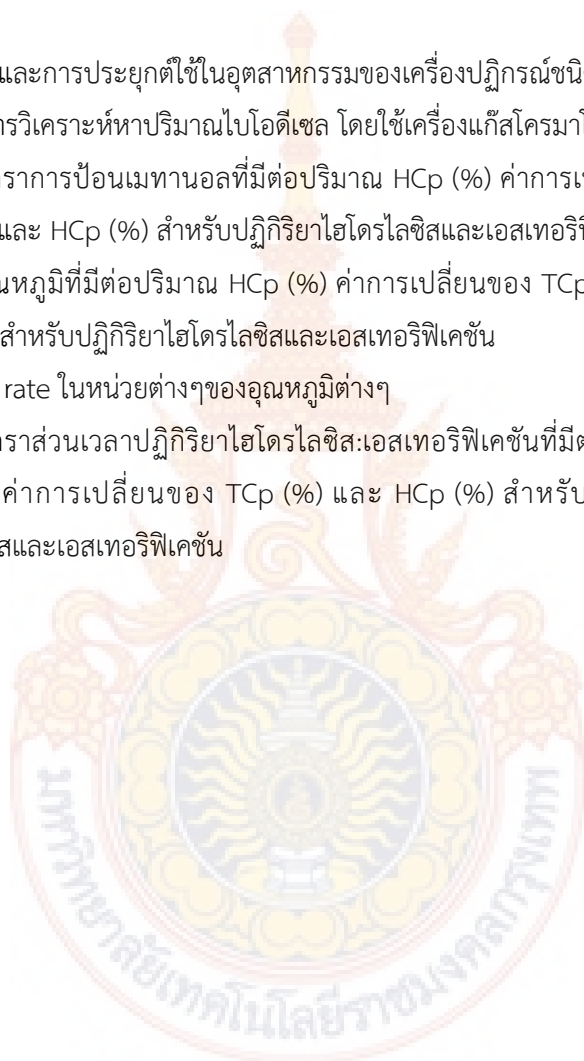
	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
รายการตาราง	ฉ
รายการรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	4
2.1 น้ำมันดีเซล	4
2.2 ไบโอดีเซล	7
2.3 น้ำมันพืชและไขมันสัตว์	17
2.4 ปฏิกิริยาเชิงเร่ง	17
2.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	18
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตเตดเซอร์โคเนีย (WO_x/ZrO_2 , WZ)	19
2.7 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์	21
2.8 งานวิจัยที่ผ่านมา	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 สารที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	33
3.4 การดำเนินการทดลอง	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซล	36
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	37
4.1 ผลของอัตราการป้อนเมทานอลที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน ในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค	37
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค	41
4.3 ผลของระยะเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค	47
4.4 ผลของปริมาณน้ำในเมทานอลที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก วิธีการหา %FFA ด้วยมาตรฐาน ASTM D 5555	61
ภาคผนวก ข ค่าการเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์ในไตรคาพิลิน	62
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐาน	64
ประวัติผู้วิจัย	67

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	8
2.2 แสดงข้อดีและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ	23
3.1 ภาพในการวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ	32
4.1 ผลของอัตราการป้อนเมทานอลที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน	41
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน	45
4.3 ค่า Initial rate ในหน่วยต่างๆของอุณหภูมิต่างๆ	45
4.4 ผลของอัตราส่วนเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอริฟิเคชันที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน	51



รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของกรดไขมันและน้ำมัน	14
2.2 ปฏิกริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ	15
2.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์	15
2.4 ปฏิกริยาการเกิดของไตรกลีเซอไรด์	17
2.5 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในช่วงเวลาต่างๆ	21
2.6 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของแบบท่อไหลและแบบถังกวน อุดมคติ	22
2.7 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเฟดแบทช์ในช่วงเวลาต่างๆ	22
2.8 โครงสร้างและระบบถ่ายเทความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน	24
2.9 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่างๆ	24
2.10 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล	25
3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง	30
3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกขนาดเล็ก (Mini-centrifuge) ยี่ห้อ Cole Parmer รุ่น C1201-230V/DW41-230	31
3.3 ชุดเครื่องมือการไทเทรต	33
4.1 HCp (%) สำหรับปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกริยาเอสเทอริฟิเคชันของ HCp ที่อัตราป้อนเมทานอลต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้ สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอริ- ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกริยาทั้งหมด 120 นาที)	38

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราป้อนเมทานอลต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp: เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)	39
4.3 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราการป้อนเมทานอลต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp: เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)	40
4.4 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp: เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)	42
4.5 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp: เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)	44

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)	44
4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่ใช้ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 150°C และ 130°C	46
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นกับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้อาร์รีเนียสพลอต ที่อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ และตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp	46
4.9 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C)	48
4.10 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C)	49
4.11 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp อัตราส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C)	50

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราการผสมน้ำต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)	52
4.13 TCp Conversion (%) และ MeCp Yield (%) ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่เวลา 2 h อัตราการผสมน้ำต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)	53
4.14 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (mol/g cat-min) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่ปริมาณน้ำในเมทานอลต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)	53
ค.1 กราฟมาตรฐานของไตรคาพิลีน (TCp)	66
ค.2 กราฟมาตรฐานของไดคาพิลีน (DCp)	66
ค.3 กราฟมาตรฐานของโมนคาพิลีน (MCp)	67
ค.4 กราฟมาตรฐานของกรดคาพริลิก (HCp)	67
ค.5 กราฟมาตรฐานของเมทิลคาพริเลท (MeCp)	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยในปัจจุบันได้รับผลกระทบมาจากเชื้อเพลิงที่ปรับสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศปีละหลายล้านบาท โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีส่วนการใช้สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องจักรและเครื่องยนต์ทั้งในภาคการผลิตและในภาคการขนส่ง การที่น้ำมันดีเซลมีราคาสูงขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศ เราจึงต้องหาแหล่งพลังงานทดแทน โดยพลังงานทดแทนที่ได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดในตอนนี้ คือ ไบโอดีเซล ซึ่งช่วยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นการกระจายรายได้ให้กับภาคการเกษตรอีกด้วย เป็นพลังงานหมุนเวียนและช่วยลดปริมาณคาร์บอนออกไซด์ที่เป็นปัญหาในปัจจุบัน

กระบวนการไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชันเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถผลิตไบโอดีเซล โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous acid catalyst) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมทั้งในแง่ความคุ้มค่าของต้นทุนการผลิตและรักษาสีสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิธพันธุ์สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบราคาถูก ที่มีปริมาณ กรดไขมันอิสระสูง จะช่วยลดขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกพ้นออกจากผลิตภัณฑ์ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Reused) นอกจากนี้ยังสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerids, TGs) และปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ (Free fatty acids, FFAs) ได้พร้อมกันในเรื่องปฏิกิริยาเดียวกันจะได้ไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ โดยมีกลีเซอรอลและน้ำเป็นผลพลอยได้ (By-product) และน้ำที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับ TGs เกิดเป็น FFAs จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดในการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีปริมาณ FFAs สูงจะประกอบไปด้วย 3 ปฏิกิริยาหลัก และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นไบโอดีเซล ซึ่งช่วยลดขั้นตอนการกำจัด FFAs ลงได้ (Suwannakarn et al. 2009:2810-2818)

การที่ตัวเร่งปฏิกิริยากรดสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ FFAs ได้เร็วกว่าการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของ TGs ดังนั้นการเปลี่ยน TGs ให้เป็น FFAs ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสก่อน หลังจากนั้นใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ FFAs กับแอลกอฮอล์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นไบโอดีเซลเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจพบว่าการเกิดปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TGs ตามด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ FFAs ในภาวะวิกฤตยวดยิ่งของน้ำและเมทานอล จะให้ผลได้ (Yield) ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่าการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของ TGs กับ

เมทานอลในภาวะยวดยิ่งเพียงปฏิกิริยาเดียว แต่อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาในภาวะยวดยิ่งต้องใช้ความดันและอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงตามมา (Minami, E. and S. Saka. 2006:2479-2483)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวีรพันธุ์ คือ ทังสเตตเตดเซอร์โคเนีย (Tungstated zirconia catalyst, WZ) ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลสามวัฏภาคแบบสองขั้นตอน เป็นแนวทางที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีราคาถูก เช่น น้ำมันพืชที่ใช้แล้วซึ่งมีปริมาณ FFAs สูงเพื่อลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล ลดขั้นตอนการกำจัด FFAs และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยขั้นตอนแรกเป็นการเปลี่ยน TGs ที่เป็นองค์ประกอบหลักในวัตถุดิบให้เป็น FFAs โดยเกิดปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หลังจากนั้นเปลี่ยน FFAs ให้เป็นไบโอดีเซลโดยเกิดปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เรียกว่าปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน สำหรับปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาคจะช่วยลดอุณหภูมิและความดันในการเกิดปฏิกิริยาโดยให้วัตถุดิบน้ำมันหรือไขมันอยู่ในวัฏภาคของเหลว ส่วนน้ำ (สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส) หรือแอลกอฮอล์ (สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน) อยู่ในวัฏภาคไอ และตัวเร่งปฏิกิริยา WZ อยู่ในวัฏภาคของแข็งโดยทำปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำหรือแอลกอฮอล์ ทั้งนี้ความรู้ที่ได้สามารถนำไปสู่องค์ความรู้ใหม่ด้านการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม ทำให้ได้ต้นทุนการผลิตที่ลดลงสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์-เอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตตเตดเซอร์โคเนียในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่ความดันบรรยากาศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ปีที่ 2.....(งบประมาณปี 2555) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนเซอร์โคเนียที่ความดันบรรยากาศ ผลที่เกิดจากตัวแปรในการเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนของสารตั้งต้น ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนศึกษาผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีต่อความว่องไวเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนเซอร์โคเนียสำหรับปฏิกิริยาสองขั้นตอนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชันที่ความดันบรรยากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้ประโยชน์จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตบบนเซอร์โคเนียในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

1.4.2 ได้รู้กระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระและเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นไบโอดีเซล

1.4.3 ได้พัฒนากระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลสามวัฏภาค (3 phase reaction system)

1.4.4 ได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-batch)

1.4.5 ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงซึ่งมีราคาถูก

1.4.6 ได้ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ (วารสารทางวิชาการและ/หรือการประชุมวิชาการ)



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์-เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตดเซอร์โคเนีย เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัย โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 น้ำมันดีเซล (Diesel fuel)

น้ำมันดีเซล คือ น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ได้จากน้ำมันดิบมากลั่นแยกส่วนในหอกลั่นบรรยากาศหรือส่วนกลั่นตรง (Crude distillation unit) โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือด ซึ่งจุดเดือดน้ำมันดีเซลอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150-360°C แต่เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้น้ำมันดีเซลมีปริมาณสูงมาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถผลิตน้ำมันที่มีคุณภาพและเพียงพอต่อความต้องการ จึงมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมันหนักให้เป็นน้ำมันที่เบาขึ้น ซึ่งกระบวนการที่ใช้โดยทั่ว ๆ ไปมีหลายแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละโรงกลั่น กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่ การแตกตัวโดยใช้ความร้อน (Thermal cracking) การแตกตัวโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydro cracking)

2.1.1 ประเภทน้ำมันดีเซล น้ำมันดีเซลแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (Automotive diesel oil) และน้ำมันดีเซลหมุนช้า (Industrial diesel oil)

2.1.1.1 น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว มีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่า น้ำมันโซล่า บางครั้งอาจเรียกว่า น้ำมันดีซ่า หรือในกิจการเดินเรือเรียกว่า มารีนแก๊สออยล์ (Marine gas oil, MGO) เป็นน้ำมันที่ทางรัฐบาลไทยกำหนดให้มีค่าซีเทนอย่างต่ำ 47 น้ำมันดีเซลหมุนเร็วโดยทั่วไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่มีความเร็วเกิน 1,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป ซึ่งได้แก่ รถยนต์เครื่องยนต์ดีเซล รถบรรทุกเล็ก รถบรรทุกใหญ่ รถแทรกเตอร์ เรือประมง เรือโดยสาร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเรือเดินสมุทร เป็นต้น

2.1.1.2 น้ำมันดีเซลหมุนช้า น้ำมันดีเซลหมุนช้า มีชื่ออีกอย่างหนึ่งคือ น้ำมันซีดี หรือในกิจการเดินเรือเรียกว่า มารีนดีเซลออยล์ (Marine diesel oil, MDO) เป็นน้ำมันที่รัฐบาลไทยกำหนดให้มีค่าซีเทนอย่างต่ำ 45 ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนปานกลางและหมุนช้า โดยทั่วไปจะต่ำกว่า 1,000 รอบต่อนาที เช่น เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ที่ใช้กับเรือประมง เรือโดยสาร และเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เป็นต้น

2.1.2 สมบัติมาตรฐานของน้ำมันดีเซล น้ำมันดีเซลสำหรับการใช้งานต้องมีสมบัติ ดังนี้

2.1.2.1 ค่าซีเทน (Cetane number) หรือดัชนีซีเทน (Cetane index) ค่าซีเทนเป็นสมบัติที่สำคัญในการวัดคุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition quality) ของน้ำมันดีเซลที่จุดติดได้เร็วหรือมีระยะเวลาความล่าช้าในการจุดติดไฟสั้นจะมีค่าซีเทนสูง ซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดได้ง่ายในอุณหภูมิอากาศต่ำๆ เครื่องยนต์ร้อนได้เร็วโดยไม่เกิดการสะดุดเพราะไม่ติดไฟ (Misfiring) หรือเกิดควันขาว ช่วยลดการเกิดคราบยางเหนียว (Varnish) และคราบเขม่าในเครื่องยนต์ ขจัดปัญหาการทำงานสะดุดในเครื่องยนต์อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าน้ำมันมีค่าซีเทนสูงมากเกินไป อาจทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเกิดควันที่ท้อไอเสียด้วย น้ำมันดีเซลในตลาดมีซีเทนนับเบอร์ไม่ต่ำกว่า 47 ส่วนน้ำมันที่จุดติดไฟได้ช้า จะมีระยะเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดยาว จะมีค่าซีเทนต่ำ ทำให้โอกาสเกิดการสะดุดในเครื่องยนต์ได้ง่าย

2.1.2.2 ความหนืดหรือความข้นใส (Viscosity) ปัมดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซล (Injection pump) จะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อน้ำมันดีเซลมีความหนืดที่ถูกต้องพอเหมาะไม่ใสเกินไป ซึ่งจะทำให้การหล่อลื่นไม่ดีต่อชิ้นส่วนภายในปั๊มดีเซล เกิดการสึกหรอมากหรือไม่ข้นเกินไป ซึ่งจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เครื่องยนต์เสียกำลัง และสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลมาก

2.1.2.3 ค่าความถ่วง (API gravity) ความถ่วงจำเพาะเป็นการวัดความหนักเบาของน้ำมัน ความถ่วงจำเพาะยิ่งต่ำก็ยิ่งประหยัดน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถลดความถ่วงจำเพาะได้ต่ำมาก เพราะจะทำให้ค่าซีเทน ลดตามด้วย

2.1.2.4 กากคาร์บอน (Carbon residue) กากคาร์บอนคือ ปริมาณของสารที่เหลือตกค้างอยู่หลังจากน้ำมันดีเซลได้ระเหยออกไปหมดแล้วอุณหภูมิสูง ๆ ถ้าน้ำมันมีค่าของกากคาร์บอนสูงเกินไปก็จะเป็นไปได้ที่จะเกิดคราบเขม่าสะสมในห้องเผาไหม้ได้มาก และไอเสียมีควันดำมากด้วย

2.1.2.5 กำมะถัน (Sulphur) กำมะถันในน้ำมันดีเซลเมื่อเผาไหม้กับอากาศ จะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นกลายเป็นกรดกำมะถัน กัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอเร็วกว่าปกติ การสึกหรอนี้จะไม่มีมาก ถ้าเครื่องยนต์ทำงานเต็มกำลังความเร็วคงที่ และอุณหภูมิการทำงาน of เครื่องยนต์สูง ๆ เช่น เครื่องยนต์เรือเดินทะเลหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงาน เครื่องยนต์ประเภทนี้สามารถใช้น้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันสูงๆ ได้ นอกจากนี้ ในน้ำมันดีเซลยังมีสิ่งสกปรกบางอย่าง เช่น เถ้า น้ำ และสิ่งสกปรก ซึ่งอาจทำให้ระบบน้ำมันดีเซลเกิดการสึกหรอได้ ฉะนั้นจึงต้องมีไส้กรองน้ำมันดีเซลที่สะอาดเพื่อกรองสิ่งสกปรกต่างๆ

2.1.2.6 อัตราการระเหยของน้ำมันดีเซล (Volatility) น้ำมันดีเซลจะมีทั้งองค์ประกอบที่ระเหยไวปานกลาง และช้ารวมอยู่ด้วยกัน แต่โดยส่วนรวมน้ำมันดีเซลจัดเป็นน้ำมันประเภทระเหยช้าเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซิน โดยทั่วไปการวัดอัตราการระเหยจะวัดค่าอุณหภูมิที่

น้ำมันระเหยเป็นไอแล้วกลั่นตัวกลับเป็นของเหลว ส่วนที่ระเหยไวช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดได้ดีในตอนเช้าอากาศเย็น ส่วนที่ระเหยปานกลางช่วยให้เครื่องร้อนเร็ว และส่วนที่ระเหยช้าเป็นส่วนที่ทำให้กำลังและประหยัดน้ำมันดีเซล แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดควันดำได้ง่ายขณะเครื่องยนต์ทำงานหนัก และมีคราบเข้ตะกอนสะสมในห้องเผาไหม้มาก

2.1.2.7 เวลาถ่วงติดไฟ (Ignition delay period) เมื่อน้ำมันดีเซลพ่นฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ การลุกติดไฟจะยังไม่เกิดขึ้นในทันที แต่จะเกิดขึ้นหลังจากช่วงเวลาหนึ่งที่เรียกว่าระยะเวลาถ่วงติดไฟ ซึ่งช่วงระยะเวลานี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องยนต์ และองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซล โดยคุณภาพการจุดติดไฟของน้ำมันดีเซล สามารถแสดงได้ด้วยค่าซีเทน ถ้าค่าซีเทนต่ำแสดงว่าจุดระเบิดได้ช้า (Long delay period) แต่ถ้ามีค่าซีเทนสูงแสดงว่าจุดระเบิดได้เร็ว (Short delay period) ซึ่งมีผลทำให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่าย ลดควันดำและยืดอายุเครื่องยนต์

2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันดีเซล มีดังนี้

2.1.3.1 การเพิ่มคุณภาพในน้ำมันดีเซล น้ำมันดีเซลที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ และนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ สารเพิ่มคุณภาพที่เติมลงไปได้แก่สารชะล้างทำความสะอาด สารป้องกันการรวมตัวกับอากาศ สารป้องกันสนิมและการกัดกร่อน และสารลดการเกิดฟอง เป็นต้น

2.1.3.2 สารเติมแต่งในน้ำมันดีเซล สารเติมแต่งในน้ำมันดีเซลมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน การที่จะใช้สารเติมแต่งชนิดใดบ้างผสมในน้ำมันดีเซล ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำมันดีเซลที่ผลิตได้ และสมบัติที่ต้องการเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จากกระบวนการในการผลิตสามารถผลิตน้ำมันที่มีค่าซีเทนเพียง 52 แต่รถยนต์ที่ใช้งานต้องการน้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงถึง 55 จึงต้องมีการผสมสารเพิ่มคุณภาพ (Cetane improver) เพื่อเพิ่มค่าซีเทนจาก 52 เป็น 55

2.1.3.3 ความสึกหรอในระบบน้ำมันดีเซล ในระบบน้ำมันดีเซลประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่สำคัญคือปั๊มดีเซล ทำหน้าที่เพิ่มความดันและน้ำมันดีเซลเพื่ออัดส่งไปยังหัวฉีด ให้ฉีดน้ำมันเป็นฝอยละเอียดภายในห้องเผาไหม้ ภายในปั๊มดีเซลไม่มีสารหล่อลื่นอื่นใดนอกจากใช้น้ำมันดีเซลเป็นตัวหล่อลื่นระบบภายในปั๊มดีเซลเอง ความหนืดของน้ำมันดีเซลจึงต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มิฉะนั้นปั๊มดีเซลและหัวฉีด หากน้ำมันดีเซลมีความหนืดสูงเกินไป ฝอยน้ำมันดีเซลจะไม่ละเอียดเผาไหม้ยาก เกิดปัญหาเขม่าและควันดำ

2.1.3.4 สีของน้ำมันดีเซลโดยธรรมชาติน้ำมันดีเซลมีสีขุ่น แต่บางครั้งสีอาจเปลี่ยนไปบ้าง เนื่องจากการเลือกใช้น้ำมันดิบจากแหล่งต่างกัน ในกระบวนการกลั่น ซึ่งอาจให้น้ำมันดีเซลมีสีอ่อนหรือเข้มไปบ้าง แต่สมบัติในการเผาไหม้ยังคงเดิม ในกรณีที่สีของน้ำมันดีเซลเปลี่ยนแปลง

ไปมาก เช่น เป็นสีเขียวหรือสีดำคล้ำ ควรสงสัยการปลอมปนโดยน้ำมันก๊าด (สีน้ำเงิน) หรือน้ำมันเตา หรือน้ำมันเครื่องใช้แล้ว (สีดำ)

2.2 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ โดยไบโอดีเซลมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable) และไม่มีพิษ (Nontoxic) ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์

2.2.1 ประเภทของไบโอดีเซล แบ่งเป็น 3 ประเภท

2.2.1.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลยโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่น ๆ หรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำมันอีก (ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์. 2550: 33)

2.2.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

2.2.1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ ไบโอดีเซลประเภทนี้มีกระบวนการที่ยุ่งยากมาก ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์

ไบโอดีเซลเอสเทอร์มีสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ สามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้ แต่ปัญหาคือต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างแพง

2.2.2 มาตรฐานไบโอดีเซล

จากประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องการกำหนดกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.๒๕๕๒ มีรายละเอียดซึ่งกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl ester, %wt)	ไม่ต่ำกว่า 96.50	EN 14103
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15°C kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40°C เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40°C cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 ไม่สูงกว่า 5	ASTM D 445
จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur %wt)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon residue on 10% Distillation residue %wt)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530

ตารางที่ 2.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ต่อ)

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
จำนวนซีเทน (Cetane number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated ash %wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water %wt)	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D 2709
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total contaminate %wt)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452
การกัดกร่อนทองแดง (Copper strip corrosion)	ไม่สูงกว่า หมายเลข1	ASTM D 130
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C (Oxidation stability at 110°C)	ไม่ต่ำกว่า 10	EN 14112
ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid value mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100กรัม (Iodine value g iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
กรดลิโนเลอิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linoleic acid methyl %wt)	ไม่สูงกว่า 12	EN 14103
เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol %wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
โมโนกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride %wt)	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105

ตารางที่ 2.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ต่อ)

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
กลีเซอรอลอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerol %wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
กลีเซอรอลทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Glycerol %wt)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K) mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108 และ EN 14109
โลหะกลุ่มที่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	prEN 14538
ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus %wt)	ไม่สูงกว่า 0.0010	prEN 14538
สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน. 2552

2.2.3 คุณภาพของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์

2.2.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงสมบัติของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่า 96.5% โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ชีบอกถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

2.2.3.2 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

2.2.3.3 ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

2.2.3.4 จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้ค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120°C ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2% ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100°C

2.2.3.5 กำมะถัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.3.6 กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ชีบอกลังยังคงมีสารต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนั้นยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

2.2.3.7 แก๊สซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณแก๊สซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

2.2.3.8 ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

2.2.3.9 สารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่นปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ

2.2.3.10 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

2.2.3.11 ค่าของกรดแสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืช และปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

2.2.3.12 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

2.2.3.13 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C การเปลี่ยนแปลงสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์ (Peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะเช่นทองแดง และตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (Oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นกับประเภทและสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้วยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมง ที่ 110°C

2.2.3.14 ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

2.2.3.15 เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130°C เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

2.2.3.16 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

2.2.3.17 ปริมาณกลีเซอรอลที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรอลไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรอลในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรอลมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

2.2.3.18 กลีเซอรอลทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรอลอิสระ และปริมาณกลีเซอรอลในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

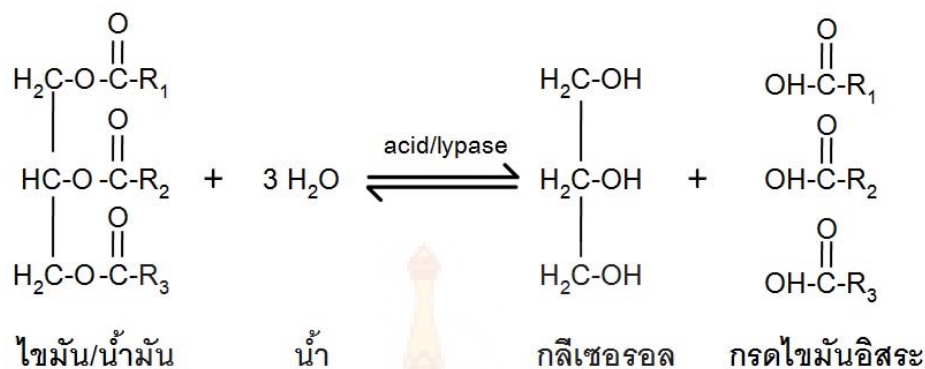
2.2.3.19 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม) เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้น้ำในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรซ์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 mg/kg

2.2.3.20 ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้ความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษ จากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

2.2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลมีดังนี้

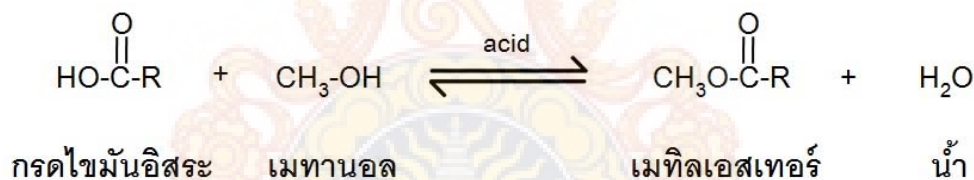
2.2.4.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันและน้ำมันเกิดได้ทั้งในภาวะกรดและเบส เมื่อทำการไฮโดรไลซิสไขมันหรือน้ำมันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้กลีเซอรอลและกรดไขมัน 3 โมเลกุล ในการย่อยอาหารพวกไขมันก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเช่นเดียวกันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของกรดไขมันและน้ำมัน

ที่มา: Food Network Solution. 2548: ออนไลน์

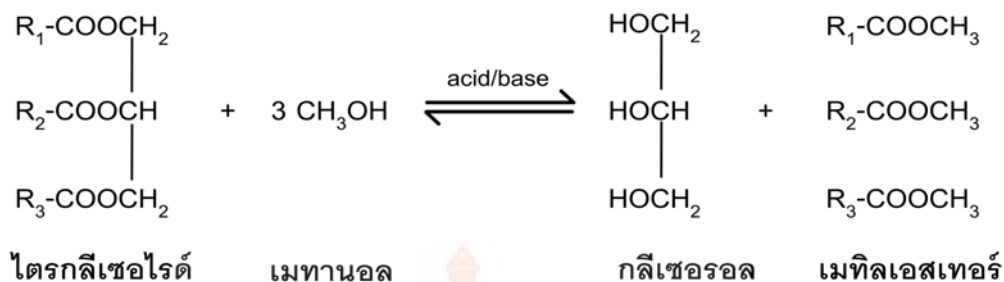
2.2.4.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและน้ำมันจะทำปฏิกริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาชนิดกรด ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจะได้เอสเทอร์และน้ำดังสมการรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

ที่มา: โยธิน พรหมบุญแก้ว. 2550:7

2.2.4.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ประกอบด้วย ปฏิกริยา 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก น้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์ (TGs) ทำปฏิกริยากับเมทานอล (MeOH) เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ME) หรือไบโอดีเซลกับไดกลีเซอไรด์ (DGs) จากนั้นไดกลีเซอไรด์ (DG) ทำปฏิกริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับโมนอกลิเซอไรด์ ในขั้นตอนสุดท้าย โมนอกลิเซอไรด์ (MGs) ทำปฏิกริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Ma and Hanna. 1999

2.2.5 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล

2.2.5.1 ด้านสิ่งแวดล้อม การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National biodiesel) และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (US Environment protection agency) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำวิจัยและทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลสูตรต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซล และได้รายงานว่ไบโอดีเซลสูตร B100 และ B20 สามารถลดมลพิษลดปล่อยจากการเผาไหม้ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในกรณีอยู่ทหารเรือ กองทัพเรือ ก็ได้รายงานผลการทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 145 แรงม้า ว่าสามารถลดควันดำได้มากกว่า 40%

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เพราะผลิตจากพืช การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำ และยังช่วยป้องกันมิให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (ซึ่งมีสารไดออกซินที่เป็นสารก่อมะเร็ง) ไปผลิตเป็นอาหารสัตว์

2.2.5.2 ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์ การผสมไบโอดีเซลในระดับ 1-2% สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พบว่าการเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าว ประมาณ 0.5% สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณ 10% ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดีจึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10% แต่ข้อด้อยนี้ไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน เพราะการใช้ไบโอดีเซลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น จึงทำให้กำลังเครื่องยนต์ไม่ลดลง

2.2.5.3 ด้านเศรษฐศาสตร์ การใช้ไบโอดีเซลช่วยสร้างงานในชนบทด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค การใช้ไบโอดีเซลสามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อการนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

2.2.5.4 ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก ตลาดน้ำมันดีเซลในประเทศไทยมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลของการผลิตของโรงกลั่นได้ การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วน 1-2% สามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

2.2.5.5 ด้านความมั่นคง การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศถือเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพทางด้านพลังงานของประเทศ

2.3 น้ำมันพืชและไขมันสัตว์

2.3.1 กรดไขมัน (Fatty acids)

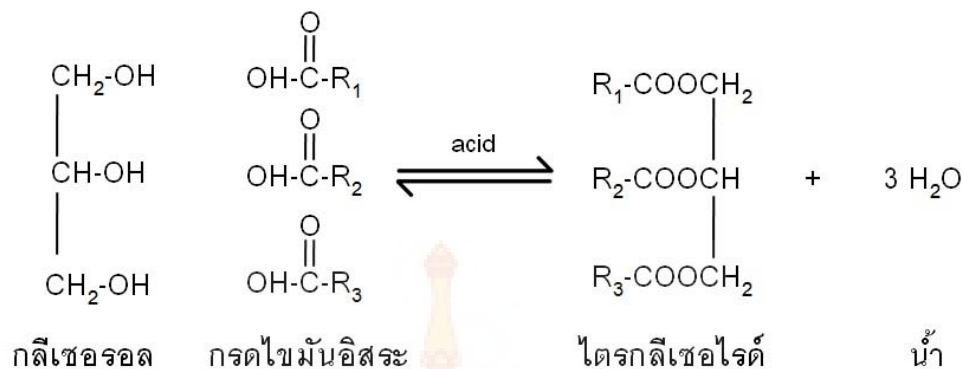
กรดไขมัน คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมเกาะกันเป็นเส้นตรง กรดไขมันที่พบโดยทั่วไปจะมีจำนวนของคาร์บอนเป็นเลขคู่ กรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids)

2.3.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอลคือผลพลอยได้ของการผลิตไบโอดีเซล มีสมบัติทางกายภาพเป็นของเหลวใสคล้ายน้ำมัน ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนืดสูง สามารถละลายในน้ำและเอทานอลได้ดี

2.3.3 ไขมันและน้ำมัน (Lipid)

ไขมันและน้ำมันเรียกรวมกันว่า ลิพิด เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรอล ไขมันและน้ำมันมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกัน ประกอบด้วยกลีเซอรอล 1 โมเลกุล และกรดไขมัน 3 โมเลกุล ซึ่งอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ส่วน R ในกรดไขมันคือ หมู่อัลคิล (Alkyl group) เป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอน แสดงดังสมการรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Food Network Solution. 2548: ออนไลน์

2.4 ปฏิกิริยาเชิงเร่ง (Catalysis reaction)

ปฏิกิริยาบางปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้ามากที่ภาวะปกติ แต่ถ้ามีการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ลงไป จะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้น เราจึงให้ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยาว่า สารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นโดยที่สารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ส่วนใหญ่มักเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน แต่มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ มีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง

2.4.3 ตัวหน่วงปฏิกิริยา (Inhibitor) หมายถึง สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าลง หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้กลับมาเท่าเดิม

2.4.4 ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Support) ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่ง (สามารถแบ่งองค์ประกอบเป็นสองส่วนใหญ่ ส่วนแรกคือ

ส่วนของสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยมากมักเป็นเม็ดโลหะ และส่วนที่สองคือ ส่วนของสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ) สารที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยากระจายตัว ซึ่งมีหน้าที่เปรียบเหมือนฐานรองรับให้โลหะกระจายตัวอยู่ การกระจาย (Dispersion) ของโลหะมีผลทำให้พื้นที่ผิวของโลหะที่สามารถสัมผัสกับวัฏภาคแก๊ส (Gas phase) ได้เพิ่มมากขึ้น สามารถแบ่งชนิดของตัวรองรับได้ 2 ชนิดด้วยกัน คือ ตัวรองรับที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Porous support) และตัวรองรับที่มีโครงสร้างไม่เป็นรูพรุน (Nonporous support)

2.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Rate of chemical reaction) หมายถึง อัตราการเกิดที่ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาลดลงหรือ สารผลิตภัณฑ์ใดผลิตภัณฑ์หนึ่งเพิ่มขึ้นกับเวลาที่ผ่านไป

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.5.1.1 ธรรมชาติของสารตั้งต้น (Reactant) กล่าวคือ ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสาร เช่น โดยทั่วไปสารที่ทำปฏิกิริยาเป็นสารไอออนิกทั้งคู่จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าสารที่เป็นโควาเลนต์ สารที่ทำปฏิกิริยาเป็นแก๊สทั้งคู่จะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปฏิกิริยาที่สารอยู่ในสถานะต่างกัน

2.5.1.2 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เราวัดปริมาณของสารในสารละลายได้จากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากัน ดังนั้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นของสาร จึงเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วหรือช้า

2.5.1.3 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยามีอัตราเร็วขึ้นที่ผิวของวัฏภาค ดังนั้น ยิ่งเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวทำปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาก็ยิ่งเกิดขึ้นเร็ว

2.5.1.4 อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อนุภาคของสารทำให้อนุภาคของสารเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น จึงช่วยเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคมามากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มพลังงานให้แก่สารจะช่วยทำให้สารมีพลังงานภายในมากกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นได้

2.5.1.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารซึ่งเพิ่มอัตราของปฏิกิริยาโดยตัวเองไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยเมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา

2.5.1.6 ความดัน ความดันจะมีผลต่อปฏิกิริยาในกรณีปฏิกิริยาที่เกี่ยวกับแก๊ส กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดันในโมเลกุลของแก๊สจะมีการชนกันมากขึ้นปฏิกิริยาจะมีอัตราการเกิดเร็วขึ้น

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตตเซอร์โคเนีย (WO_x/ZrO_2 , WZ)

ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตตเซอร์โคเนีย ได้รับความสนใจเมื่อไม่นานมานี้ เนื่องจากมีสมบัติเป็นกรด และสามารถเร่งได้ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการผลิตไบโอดีเซล มีรายงานว่าน้ำมันถั่วเหลืองสามารถเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้ที่อุณหภูมิ 250°C โดยใช้ทั้งสเตเตตเซอร์โคเนียอะลูมินา (WZA) เหนือที่ 800°C อะลูมินาทำให้เกิดเสถียรภาพของเฟสเทตระโกนอล (Tetragonal phase) ของตัวรองรับเซอร์โคเนีย (t-ZrO_2) และป้องกันการเจริญเติบโตของอนุภาคทั้งสเตเตตเซอร์โคเนีย WZA ยังเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดออกทานอิก (n-octanoic) แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพต่ำ การศึกษาโดยการตรวจสอบปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดปาล์มมิกกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยน (Conversion) ของกรดปาล์มมิก ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา WZ (วัดโดย $\text{NH}_3\text{-TPD}$) และปริมาณของเฟสเทตระโกนอล ของตัวรองรับเซอร์โคเนีย (t-ZrO_2) เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีรายงานอ้างถึงค่าอัตราการผันเวียน (Turn over frequency, TOF) ของ WZ ว่ามีความว่องไวในการกระตุ้นเทียบเท่ากรดซัลฟิวริกสำหรับการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ข้อดีของ WZ คือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่า การศึกษาก่อนหน้านี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดสำหรับปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้งการนำอัลเคน (Alkane) ไปทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาดีไฮเดชัน (Dehydration) ของแอลกอฮอล์ การศึกษาขั้นพื้นฐานเพิ่มเติมของตัวเร่งปฏิกิริยา WZ มีการตรวจสอบลักษณะตำแหน่งว่องไวที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาของวัสดุที่สังเคราะห์ได้

Hino และ Arata เป็นคนแรกที่รายงานการก่อตัวของสิ่งที่เรียกว่า ซูเปอร์แอซิด (Superacid) ซึ่งเป็นกรดที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนแก่สารอื่นได้มาก ($H_0 = -14.52$) บนตัวเร่งปฏิกิริยา WZ (13% โดยน้ำหนัก) สำหรับปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของบิวเทน และเพนเทน รวมทั้งการอัลคิเลชัน (Acylation) ของ Friedel Craft ซึ่งเป็นการเตรียมภาวะ และอุณหภูมิการเผา ผู้เขียนเหล่านี้พบว่า การให้ความร้อนร่วมกันของทั้งสเตเตตและเซอร์โคเนียจะทำให้เกิดเฟสเทตระโกนอลของเซอร์โคเนีย นำไปสู่การเกิดตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีความว่องไวสูงกว่า ดังนั้นมามีความพยายามที่จะอธิบายลักษณะการใช้งานของตำแหน่งว่องไวที่เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา WZ

Iglesia และเพื่อนร่วมงานศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ WZ กับการเผา และเพิ่มปริมาณทั้งสเตเตต และผู้เขียนเหล่านี้แสดงให้เห็นค่าอัตราการผันเวียน (สำหรับปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซ-

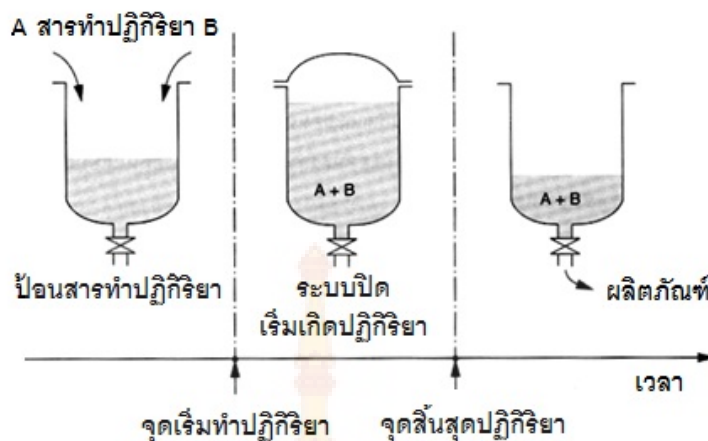
ชั้นของซิลีน และปฏิกิริยาดีไฮโดรชันของแอลกอฮอล์) ความหนาแน่นของพื้นที่ผิวของทั้งสแตนมีการเปลี่ยนแปลงกับการเพิ่มปริมาณทั้งสแตน และอุณหภูมิการเผา แม้จะมีงานจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับสมบัติของพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา WZ แต่ยังไม่มีย่อสรุปเกี่ยวกับการสร้างตำแหน่งว่องไวที่แน่นอน อย่างไรก็ตามจะสังเกตว่าการก่อตัวของพื้นผิวพอลิเมอร์ชนิดทั้งสแตน (WO_x) มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เรียกตำแหน่งว่องไวนี้ว่า เฮเทอโรพอลิออกไซด์ทั้งสแตน (Heteropolyoxotungstated) นอกจากนี้อุณหภูมิการเผามีผลต่อความว่องไวของการเร่งปฏิกิริยาทั้งสองนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่มีความว่องไวมากก็มักจะมี ความหนาแน่น WO_x ที่พื้นที่ผิว 6.6 W-atoms/nm² ถ้าสูงกว่านี้จำเป็นต้องรักษาความอึดตัว (5-6 W-atoms/nm²) ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเกิด WO_x มีระยะเทตระโกนอล สำหรับตัวรองรับเซอร์โคเนียความว่องไวในการเร่งจะลดลงเมื่อ WO_x มีความหนาแน่นต่อพื้นที่ผิวสูง (>6.6 W-atoms /nm²) เกิดการสูญเสียตำแหน่งว่องไว การทดลองพบว่าที่ตำแหน่งกรดบรอนสเตดมีส่วนสำคัญที่สุดในความว่องไว อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา WZ มีความเหมือนกันสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Dora et al. 2007: 43)

2.7 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

ในอุตสาหกรรมเคมีมีเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการทำงานและรูปแบบเครื่องปฏิกรณ์

2.7.1 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์

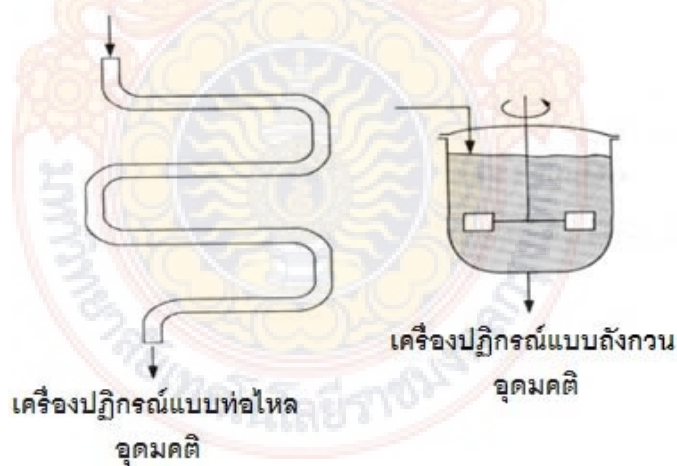
2.7.1.1 การทำงานแบบกะ (Batch operation) สารตั้งต้นทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ แล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด จึงนำของผสม (สารตั้งต้นที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์) ออกจากถังปฏิกรณ์



รูปที่ 2.5 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในช่วงเวลาต่างๆ

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 30

2.7.1.2 การทำงานแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operation) สารทำปฏิกิริยา ป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก ลักษณะของ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งรูปแบบถังกวนและแบบท่อไหล

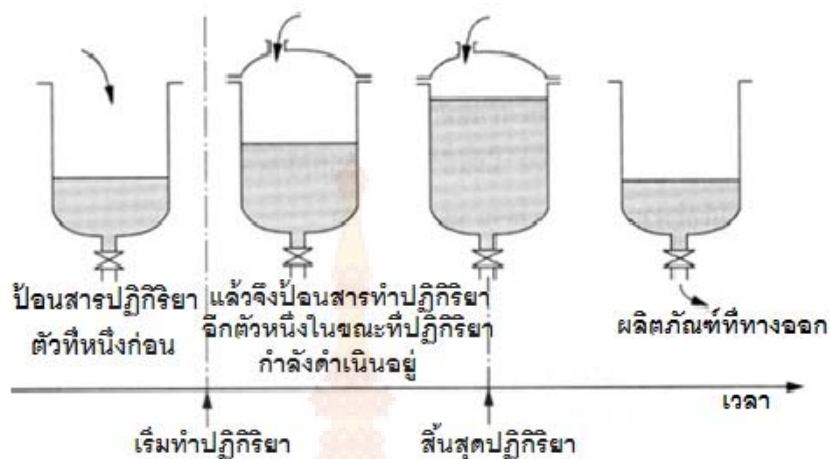


รูปที่ 2.6 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของแบบท่อไหลและแบบถังกวนจุดมคต

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 30

2.7.1.3 การทำงานแบบเฟดแบทช์ (Fed-batch operation) หรือเซมิแบทช์ (Semi-batch) มีลักษณะการทำงานก้ำกึ่งระหว่างแบบกะกับแบบไหลต่อเนื่อง กล่าวคือ สารทำ

ปฏิกิริยาตัวหนึ่งป้อนให้เข้าไปอยู่ในถังปฏิกรณ์ก่อน แล้วจึงป้อนสารทำปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่ง เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง หรือป้อนเป็นระยะๆ



รูปที่ 2.7 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเฟดแบทช์ในช่วงเวลาต่างๆ

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 31

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ

การทำงาน (Operation)	ข้อดีและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
แบบกะ (Batch)	- มีโครงสร้างง่ายๆ - กำลังการผลิตต่ำ - เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น การหมัก อุตสาหกรรมผสมสี - ได้ผลผลิตอย่างต่อเนื่อง
แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous)	- กำลังการผลิตสูง - เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การผลิตพลาสติก
แบบเฟดแบทช์ (Fed-batch or semi-batch)	- ควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ง่าย - รักษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวหนึ่งให้มีค่าสูงตลอดเวลาทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น

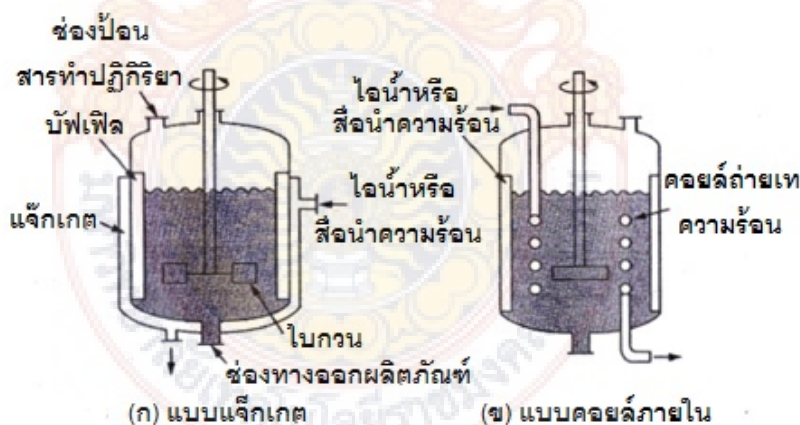
ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544

2.7.2 รูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์

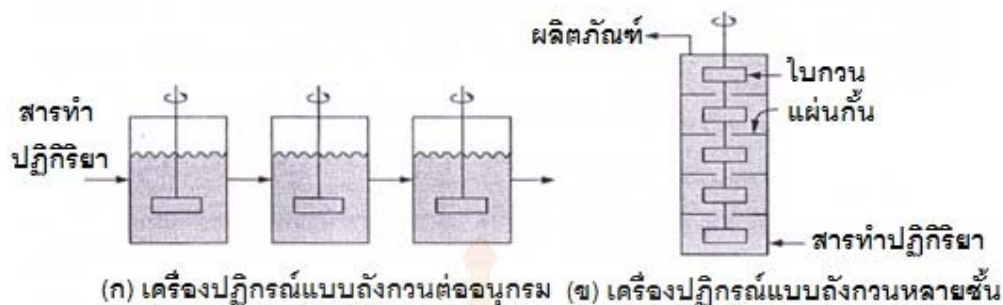
2.7.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stirred tank reactor) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด การถ่ายเทความร้อนทำได้โดยการติดตั้งแจ็กเก็ตบริเวณรอบถังหรือใช้คอยล์ติดตั้งภายในถัง แล้วทำการส่งไอน้ำหรือน้ำหล่อเย็นเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนเข้าไปในแจ็กเก็ตหรือคอยล์ เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนนอกจากใช้ในปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์วัฏภาคของเหลวแล้ว ยังใช้ในปฏิกิริยาวิวิพันธุ์วัฏภาคแก๊ส-ของเหลว วัฏภาคแก๊ส-ของเหลว-ของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และวัฏภาคของเหลว-ของเหลวอีกด้วย

ใบกวนมีหน้าที่นอกจากทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อเดียวกันแล้ว ยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน และในกรณีที่สารทำปฏิกิริยามีความหนืดสูง เช่น ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ต้องระวังเรื่องลักษณะของใบกวน เพราะถ้าใช้ใบกวนที่ไม่เหมาะสม การกวนจะไม่ได้ผลเต็มที่

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนในลักษณะการทำงานแบบกะเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) แต่ถ้าเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR)



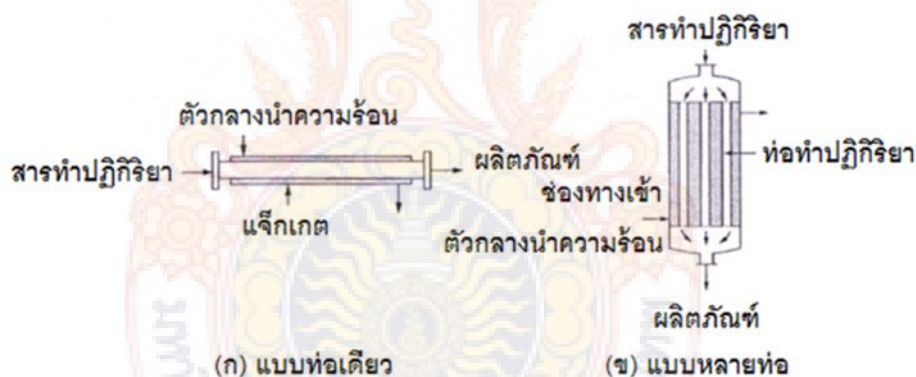
รูปที่ 2.8 โครงสร้างและระบบถ่ายเทความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน
ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 32



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่างๆ

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 33

2.7.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor) รูปที่ 2.10 (ก) แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลเดี่ยว รูปที่ 2.10 (ข) แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลขนานหลายท่อ ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

ที่มา: วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544.: 33

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล ความเข้มข้นจากสารทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ยากแก่การควบคุมอุณหภูมิภายในท่อให้เท่ากันตลอดแนวยาว จึงมักเกิดการกระจายอุณหภูมิตามแนวยาว

2.8 งานวิจัยที่ผ่านมา

Holliday et al. (1997: 932) ทดลองการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พบว่าน้ำที่ภาวะเหนือวิกฤตสามารถใช้เป็นทั้งตัวทำละลายและสารตั้งต้นในการไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ในการศึกษา น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว สามารถไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระด้วยน้ำที่ความดัน 0.7 kPa และอุณหภูมิ 260-280°C ภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาที่ดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว ด้วยค่าการเปลี่ยน มากกว่า 97% หลังจาก 15-20 นาที จะพบว่ากรดลิโนเลนิก (Linolenic acid) จะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C ปฏิกิริยาจะดำเนินที่อุณหภูมิและความดันสูง จนถึงจุดวิกฤตของน้ำ

King et al. (1999: 261) ศึกษาว่าน้ำที่ภาวะวิกฤตสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับสารอินทรีย์ ในการศึกษา การไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันถั่วเหลืองไปเป็นกรดไขมันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหล ซึ่งสามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้สำเร็จโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าที่ใช้ในระบบคงที่เพื่อให้ค่าการเปลี่ยนมากกว่า 97% การใช้ความดันสูงเป็นตัวช่วยในการทำปฏิกิริยา พบว่าน้ำมันผสมเข้ากันได้กับน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงเป็นกรดไขมันอิสระสูง อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำมัน 2.5:1-5:1 พบว่าที่เวลา 10-15 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล จะผลิตกรดไขมันอิสระได้ 96-98%

Baba et al. (2005: 243) ศึกษาและรวบรวมการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรโอเลอีนกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส ซึ่งเป็นกลุ่มโลหะของเกลือแอลคาไลน์ คือ K_2CO_3 KF $LiNO_3$ $NaOH$ KOH KNO_3 $NaNO_3$ และ $RbNO_3$ บนตัวรองรับ Al_2O_3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 34% K_2CO_3/Al_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาได้สูงสุดให้ผลได้ของไตรโอเลอีน 94% โดยที่ภาวะในการทดลองที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและไตรโอเลอีนเป็น 25 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60°C ในเวลา 1 ชั่วโมง และเติมตัวทำละลายร่วม คือ ไตรเอตเธอร์ไฮโดรฟูแลน (THF) เพื่อให้ไตรโอเลอีน เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีวิธการต่างกันละลายได้ดีขึ้น

Jair et al. (2006: 85) เสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับการใช้น้ำที่ภาวะเหนือวิกฤตเป็นทั้งตัวทำละลายและสารตั้งต้นในการไฮโดรไลซิสของน้ำมันข้าวโพดโดยไม่ใช้กรดหรือด่างที่อุณหภูมิ 150-280°C การไฮโดรไลซิสของน้ำมันข้าวโพดทำให้เกิดกรดไขมันเหมือนกับวิธีที่ใช้ดั้งเดิม

Lopez et al. (2007: 43) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ และศึกษาการกระตุ้นการเร่งปฏิกิริยาของทังสเตนบนตัวรองรับเซอร์โคเนีย (Tungstated zirconia, WZ) ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันของกรดแอสติค (ทั้ง 2 สถานะ แก๊ส และของเหลว) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรคาพิลีน (ไตรกลีเซอไรด์บริสุทธิ์ในวิธ-ภาคเหลว) กับเมทานอล กรดแอสติค และไตรอะซิติก จะใช้กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids, FFAs) และไตรกลีเซอ-

ไรต์บริสุทธิ์แทน สารเชิงซ้อนของ FFAs และไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไบโอดีเซล จะพบในน้ำมันพืช และไขมันสัตว์ ผลของการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่อุณหภูมิ 400-900°C เพื่อหาอุณหภูมิที่ดีที่สุด และเพิ่มตำแหน่งที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และอธิบายคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) สเปกโทรสโกปีรามาน (Raman spectroscopy) TGA วิเคราะห์องค์ประกอบ (Elemental analysis) และหาพื้นที่ผิวด้วย เทคนิค BET Ion exchange/titration และ NH_3 -TPD ใช้หาความเป็นกรด และความแข็งแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (อ้างอิงกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา) จะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว WO_x ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1.9 และ 6.6 W-atoms/nm² และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อความหนาแน่นมากกว่า 6.6 W-atoms/nm² การเพิ่มของ WO_x จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดลง จะสอดคล้องกับการลดลงของตำแหน่งที่ว่าง และพบว่า ตำแหน่งว่าง เป็นชนิดกรดบรอนสเตด สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิ 800°C เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดใน การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา

Ngaosuwan et al. (2009:4757) การสังเคราะห์กรดไขมันอิสระ (FFAs) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดของแข็ง คือ ทังสเตตเตตระโคโคเนีย (WZ) และ SAC-13 สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบสามวัฏภาค โดยใช้ไตรคาพิลีน (TCp) เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (TG) ซึ่ง FFAs สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน (ไฮโดรไลซิส-เอสเทอร์ฟิเคชัน) ศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาช่วง 110-150°C อัตราป้อนน้ำอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่ำ การนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมาใช้ซ้ำพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการสูญเสียความว่าง การฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการล้างด้วยเมทานอล ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองพบว่าความว่างเพิ่มขึ้นแต่ไม่เท่าตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ การฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาสามารถทำได้กับตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เท่านั้น เนื่องจาก SAC-13 ไม่สามารถเผาที่อุณหภูมิสูงได้เพราะจะเกิดการหลอมละลาย การฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่างเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่

Chenet al. (2010: 228) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical carbon dioxide, SC-CO₂) จากผงเมล็ดสบู่ดำในภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต แล้วตามด้วยปฏิกิริยาเมทิลเลชันในภาวะวิกฤตยิ่งยวดจากน้ำมันที่สกัดได้จาก SC-CO₂ ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 98.5% ทดสอบผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนตัวทำละลาย จะได้ผลผลิตจากปฏิกิริยาเมทิลเลชันเท่ากับ 99% พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาเมทิลเลชัน เท่ากับ 68.5 และ 45.2 kJ/mol ตามลำดับ การศึกษา

นี้บ่งชี้ว่าการทำเมทิลเลชันในภาวะวิกฤตยวดยิ่ง จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในภาวะที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตของน้ำมัน SC-CO₂ เป็นกระบวนการแบบสองขั้นตอนที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากผงเมล็ดสบู่ดำ

Qing et al. (2010: 2589) ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาซัลโฟเนชันของน้ำมันพืชชั้นหนึ่งผ่านการทำให้เป็นถ่านคาร์บอนซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ใช้เร่งปฏิกิริยาพร้อมกันทั้งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลเมื่อใช้น้ำมันพืชใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระปริมาณมาก (FFAs) เป็นวัตถุดิบ ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ตรวจสอบได้จากหลายวิธี ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ เปลี่ยนแปลงไปได้สูงสุดถึง 80.5% โดยน้ำหนัก และ 94.8% โดยน้ำหนัก หลังจาก 4.5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 220°C เมื่อใช้อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 16.8 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน 0.2%โดยน้ำหนัก ความว่องไวของการเร่งปฏิกิริยาสูง และความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับ ความหนาแน่นของบริเวณกรดสูง (-OH บริเวณกรดตามทฤษฎีของบรอนสเตด) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำขัดขวางไม่ให้เกิดการไฮโดรชันของรูปแบบ -OH กลุ่มฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (-SO₃H) ส่งผลให้เมทานอลเข้าไปทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระปริมาณมากได้ดี และความกว้างของรูพรุนทำให้บริเวณกรดสูงสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

Satyarthi et al. (2010: 427) ศึกษาการใช้สารประกอบเชิงซ้อนของเกลือไฮยาไนด์ของกรด 2 ชนิด คือ เหล็กกับสังกะสี (Fe-Zn double-metal cyanide หรือ DMC) ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ชนิดที่กินได้และกินไม่ได้ ซึ่งมีความว่องไวสูงในปฏิกิริยาแบบกะ พบว่าค่าการเปลี่ยนของน้ำมันพืช หรือ ไตรกลีเซอไรด์ในการเลือกเกิดเป็นกรดไขมันมีมากกว่า 73% ภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 463K ที่ความดันในปฏิกิริยา (Autogeneous pressure) ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5% ของสารตั้งต้น ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือไฮยาไนด์ของกรด 2 ชนิด คือ เหล็ก กับ สังกะสี จะดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Amberlyst™ 70 SAPO-11 H- HY MoO₃/Al₂O₃ และตัวเร่งปฏิกิริยาซัลเฟตเตตระโคโรเนีย อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีตัวทำละลาย (เตตระ-ไฮโดรฟูแรน หรือ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์) ปัจจัยหลักที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีความว่องไวสูง ได้แก่สารที่ทำให้วัฏภาคเปลี่ยน (เตตระโพพิล แอมโมเนียมโบรไมด์) และผลิตภัณฑ์ (ผลรวมของโมโนไดกลีเซอไรด์และกรดไขมัน) หรือกรดไขมันที่ใส่เพิ่มขึ้น สมบัติความไม่ชอบน้ำ (Surface hydrophobicity) ที่ปกคลุมบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และการกระตุ้นของไตรกลีเซอไรด์บนตำแหน่งว่องไว ตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา DMC ที่นำกลับมาใช้ใหม่

Petchmala et al. (2010: 2387) ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซัลเฟตเตตระโคโรเนีย (SO₄-ZrO₂) โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากปริมาณกำมะถันและอุณหภูมิเผาที่แตกต่างกัน ทดสอบ

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม (PPO) และเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันปาล์ม (PFA) พบว่าปริมาณกำมะถัน 1.8% และอุณหภูมิเผา 500°C มีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุด $\text{SO}_4\text{-ZrO}_2$ ช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ลดปริมาณเมทานอล และลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ค่าการเปลี่ยนสูงสุด 90% และ 75% สำหรับ PPO และ PFA ที่ภาวะอุณหภูมิ 250°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 10 นาที ของ PPO ที่อัตราส่วนโดยโมล เมทานอล:PPO 25:1 ภายในเวลา 1 นาทีของ PFA ที่อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอล:PFA 6:1 นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดการเปลี่ยนสูงสุดเร็วกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 10 เท่า



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์-เอสเทอร์พิกะของกรดไขมันอิสระ แบบสองขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตตเซอร์โคเนีย (WZ) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่ความดันบรรยากาศ โดยเริ่มจากกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทดสอบภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล แล้ววิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน ASTM D 5555

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

3.1.1.1 ไตรคาพิลิน (Glyceryl trioctnoate, tricaplin, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตตเซอร์โคเนีย (Tungstated zirconia catalyst, WZ) บริษัท MEI Chemicals Ltd.

3.1.1.3 เมทานอล (Methanol) เกรด HPLC บริษัท Fisher Scientific US Ltd.

3.1.1.4 น้ำกลั่น (Distillation water)

3.1.1.5 ซิลิโคน ออยล์ (Silicone oil) บริษัท Ajax Finechem Ltd.

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

3.1.1.1 ไตรคาพิลิน (Glyceryl trioctnoate, tricaplin, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.2.2 ไดรคาพิลิน (2-Octanoyl-rac-glycerol, dicaplin, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.2.3 โมโนคาพิลิน (1-Octanoyl-rac-glycerol, monocaplin, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.2.4 กรดคาพริลิก (Octanoic acid, caprylic acid, 98%) บริษัท Sigma-aldrich Inc.

3.1.2.5 เมทิลคาพริเลท (Methyl caprylate, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.2.6 ไอโซโพรพานอล (2-propanol, 99.7%) เกรด AR บริษัท Rightchem Sdn Bhd.

3.1.2.7 เมทิลวาเลอเรท (Methyl valerate, 99%) บริษัท Sigma-aldrich co.

3.1.3 สารที่ใช้ในการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระตาม มาตรฐาน ASTM D 5555

3.1.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH เข้มข้น 0.1N) เกรด AR บริษัท BDH Chemicals Ltd

3.1.3.2 เอทานอล (Ethanol 99.5 %) เกรด AR บริษัท Mallinckrodt Baker Inc.

3.1.3.3 ฟีนอล์ฟทาเลอินเข้มข้น 1% (Phenolphthalein) บริษัท Mat & Baker Ltd.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

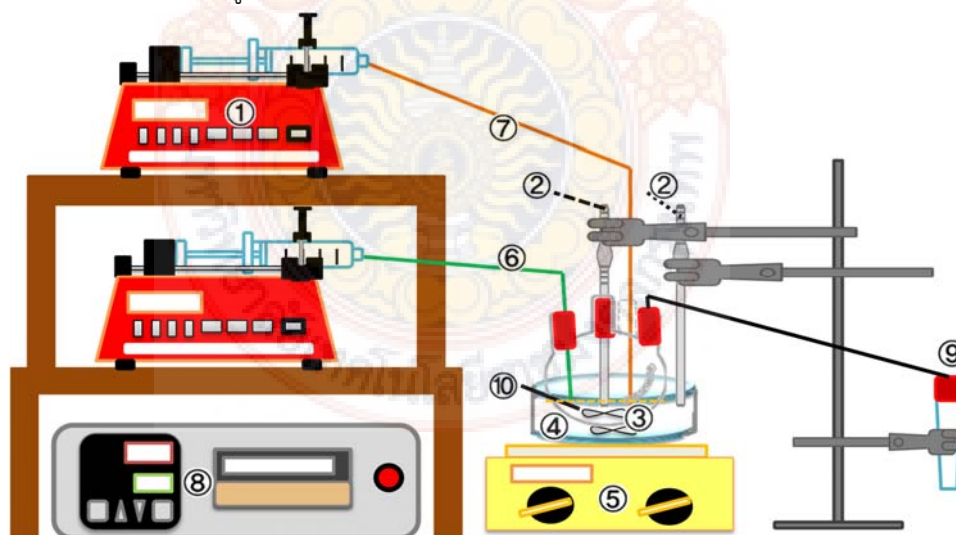
3.2.1 เครื่องมือในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ประกอบด้วย ถ้วยกระเบื้อง ขนาด 100 mL ซ้อนตักสารเคมี และแท่งแก้ว

3.2.1.2 เตาเผา Carbolite รุ่น Control 2416

3.2.2 เครื่องมือการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนสามวัฏภาค

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (Semi-batch reactor) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

- (1) ชุดเครื่องปั๊มสาร (Syringe pump)
- (2) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

- (3) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- (4) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath)
- (5) เครื่องให้ความร้อน (Heater)
- (6) สารป้อนน้ำ (Feed water)
- (7) สารป้อนเมทานอล (Feed methanol)
- (8) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)
- (9) ชุดอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser)
- (10) สารทำปฏิกิริยา (Reaction mixture)

3.2.3 เครื่องมือในการแยกสาร

3.2.3.1 เครื่องเหวี่ยงแยก ทำหน้าที่แยกตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งออกจากสารทำปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว และไม่โครทิวบ์สำหรับใส่สารตัวอย่างจากการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกขนาดเล็ก (Mini-centrifuge) ยี่ห้อ Cole Parmer รุ่น C1201-230V/DW41-230

3.2.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ไบโอดีเซล

3.2.4.2 อุปกรณ์ในการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อหาปริมาณไบโอดีเซลประกอบด้วย เข็มดูดสารตัวอย่างขนาด 10 μL และ 100 μL ปีเปตแบบอัตโนมัติขนาด 100-1000 μL ขวดปรับปริมาตรขนาด 5 mL และ 10 mL

3.2.4.3 วิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ รุ่น GC-8000 ยี่ห้อ CARLO ERBA INSUMENTS โดยใช้ Capillary column รุ่น DB-5 จากบริษัท Agilent Technologies Inc ขนาด 0.25 mm ยาว 30 m ซึ่งใช้ Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 μm เป็นวัฏภาคนิ่ง (Stationary phase) โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด FID โดยภาวะในการวิเคราะห์สำหรับการหาปริมาณไบโอดีเซล แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

Condition	Value
Make Up Gas (He) Pressure	100 kPa
Hydrogen Pressure (for FID)	40 kPa
Air Pressure (for FID)	105
Detector Temperature (FID)	280°C
Split Ratio	2.4
Injection Port Temperature	250°C
Inject Volume	1 μL
Column Initial Temperature	40°C
Ramp Rate	เพิ่มอุณหภูมิ 10°C / นาที
Zone 1	อุณหภูมิ 40 °C นาน 3 นาที
Zone 2	อุณหภูมิ 180 °C นาน 3 นาที
Zone 3	อุณหภูมิ 290 °C นาน 13 นาที
Column Final Temperature	290°C

3.2.5 ชุดเครื่องมือการไทเทรตวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ ตามมาตรฐาน ASTM D 5555



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือการไพโรไลซิส

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ติดตั้งชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ไบโอดีเซลสามวัฏภาคแบบสองขั้นตอน ดังรูปที่ 3.1

3.3.1.1 นำซิลิโคนออยล์ใส่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath) ซึ่งวางอยู่บนเครื่องให้ความร้อน (Heater)

3.3.1.2 นำขวดสามคอใส่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยวางให้ขวดสามคออยู่ตรงกลาง มีระยะห่างจากด้านล่างขวดถึงก้นอ่างประมาณ 1 cm

3.3.1.3 ติดตั้งท่อเข้ากับไซริงค์ปั๊ม เพื่อป้อนน้ำและเมทานอลเข้าไปในขวดสามคอ

3.3.1.4 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบแน่น เพื่อควบแน่นน้ำและเมทานอลที่ไม่ทำปฏิกิริยา

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา WZ

3.4.1.1 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 15 g ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง

3.4.1.2 กระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา WZ โดยการเผา WZ ในเตาเผาภายใต้สุญญากาศหนึ่ง โดยเริ่มจากอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนได้อุณหภูมิ 800°C และควบคุม

อุณหภูมิให้คงที่ 3 ชั่วโมงแล้วลดอุณหภูมิโดยการปิดเครื่องให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 30°C เก็บตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่กระตุ้นได้ในขวดปัดฟาสนิท

3.4.2 ทดลองผลของอัตราส่วนเชิงโมลเมทานอล:กรดคาพริลิก ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

3.4.2.1 กำหนดอัตราส่วนเชิงโมลเมทานอล:กรดคาพริลิกเป็น 1:1 3:1 5:1 7:1 และ 9:1 ที่อุณหภูมิ 130°C โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนเมทานอลเป็น 30 92 153 215 และ 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ ตามลำดับ

3.4.2.2 กำหนดอัตราการป้อนน้ำ 10 mL/min อุณหภูมิ 130°C ปริมาณไตรคาพิลิน 18 g และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของไตรคาพิลิน

3.4.2.3 ชั่งไตรคาพิลินลงในขวดสามคอ แล้วนำแท่งกวนแม่เหล็กใส่ลงในขวดสามคอและในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3.4.2.4 นำขวดสามคอไปติดตั้งในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3.4.2.5 ควบคุมอุณหภูมิไตรคาพิลินในขวดสามคอให้ได้ 130°C ภายใน 30 นาที

3.4.2.6 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ปริมาณ 1.8 g ลงในขวดสามคอพร้อมกับเริ่มการทดลองโดยการป้อนน้ำจากไซริงค์ปั๊มเข้าไปในขวดสามคอ เป็นเวลา 60 นาที แล้วตามด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดคาพริลิกเป็นเวลา 60 นาที รวมทั้งหมดเป็นเวลา 120 นาที

3.4.2.7 จับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ($t=0$) และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 15 30 60 65 75 90 และ 120 นาที

3.4.2.8 ดูดสารตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ใส่ในไมโครทิวบ์ปริมาณ 150 μL เติม 2-propanol ลงในไมโครทิวบ์ปริมาณ 400 μL นำไปแยกตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ออกจากสารทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยก

3.4.2.9 นำตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณโบโอดีเซลด้วยเครื่อง GC

3.4.3 ทดลองผลของอัตราส่วนเมทานอล:กรดคาพริลิก ที่มีเหมาะสมจากข้อ 3.4.2 โดยทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.2 แต่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C

3.4.4 ทดลองผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กำหนดอัตราส่วนเป็น 1:1 3:1 5:1 และ 3:1

3.4.4.1 กำหนดอัตราส่วนเมทานอล:กรดคาพริลิก และอุณหภูมิที่เหมาะสม จากข้อ 3.5.2

3.4.4.2 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.4.2.2 ถึง 3.4.2.4

3.5.4.3 ควบคุมอุณหภูมิไตรคาฟิลินในขวดสามคอให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมภายใน 30 นาที

3.5.4.4 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ปริมาณ 1.8 g ลงในขวดสามคอพร้อมกับการทดลองในอัตราส่วน 1:1 โดยการป้อนน้ำจากไซริงค์เข้าไปในขวดสามคอ เป็นเวลา 60 นาที แล้วตามด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดคาพริกเป็นเวลา 60 นาที รวมทั้งหมดเป็นเวลา 120 นาที

3.5.4.5 ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นอัตราส่วน 1.5:1 ซึ่งจะป้อนน้ำเป็นเวลา 72 นาที ตามด้วยป้อนเมทานอลเป็นเวลา 48 นาที และทดลองที่อัตราส่วน 3:1 จะป้อนน้ำเป็นเวลา 90 นาที ตามด้วยป้อนเมทานอลเป็นเวลา 30 นาที ทั้งสองอัตราส่วนใช้เวลารวมทั้งหมด 120 นาที

3.5.4.6 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.4.2.7 ถึง 3.4.2.9

3.4.5 ทดลองผลของปริมาณน้ำในเมทานอลที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

3.4.5.1 กำหนดปริมาณน้ำในเมทานอลเป็น 1 5 และ 20% โดยปริมาตร อัตราการป้อนทั้งหมด 30.75 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม

3.4.5.2 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.4.2.2 ถึง 3.4.2.4

3.4.5.3 ควบคุมอุณหภูมิไตรคาฟิลินในขวดสามคอให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมภายใน 30 นาที

3.4.5.4 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ปริมาณ 1.8 g ลงในขวดสามคอพร้อมกับการทดลองโดยการป้อนน้ำร่วมกับเมทานอล เป็นเวลาทั้งหมด 120 นาที

3.4.5.5 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.4.2.7 ถึง 3.4.2.9

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) ซึ่งมีภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

3.5.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของไบโอดีเซลด้วย Internal standardization method เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณของสารได้แม่นยำ โดยสารที่จะใช้เป็น Internal standard คือ เมทิลวาลิเอต และใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย ในการหาปริมาณไบโอดีเซล

3.5.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานจากไบโอดีเซลมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยละลายในไอโซโพรพานอล จากนั้นนำพื้นที่พีค และความเข้มข้นมาเขียนกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) เพื่อใช้หาปริมาณไบโอดีเซล

3.5.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการทำให้เจือจางโดยใช้น้ำหนักของตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนละลายในไอโซโพรพานอล จากนั้นฉีดสารตัวอย่างเข้าเครื่อง GC ปริมาณ 1 μL โดยต้องเตรียมตัวอย่างให้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงของกราฟมาตรฐาน

3.5.4 การพิจารณาผลการฉีดตัวอย่าง

ไบโอดีเซลทราบได้โดยเปรียบเทียบเวลาและพื้นที่ใต้กราฟของไบโอดีเซลแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์กับไบโอดีเซลมาตรฐาน โดยหาปริมาณไบโอดีเซลจากการนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการประมวลผลของเครื่อง GC เทียบกับกราฟมาตรฐานของไบโอดีเซลแต่ละชนิด

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ทำการไทเทรตตามมาตรฐาน ASTM D 5555 (รายละเอียดในภาคผนวก ก)



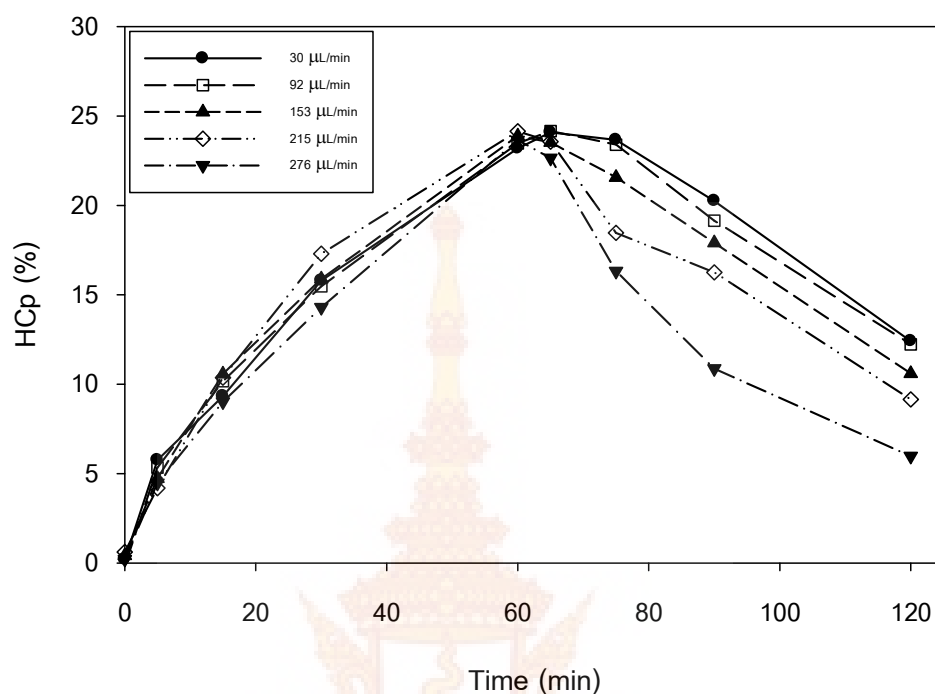
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน ในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาคที่ความดันบรรยากาศประกอบไปด้วยไตรคาพิลินและน้ำหรือ เมทานอลเป็นสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคของของเหลว และวัฏภาคของแก๊สตามลำดับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตเตเตอร์โคเนียอยู่ในวัฏภาคของแข็ง โดยบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลซึ่งมีปัจจัยดังนี้ อัตราการป้อนเมทานอล อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราการผสมระหว่างน้ำกับเมทานอล

4.1 ผลของอัตราการป้อนเมทานอลที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค

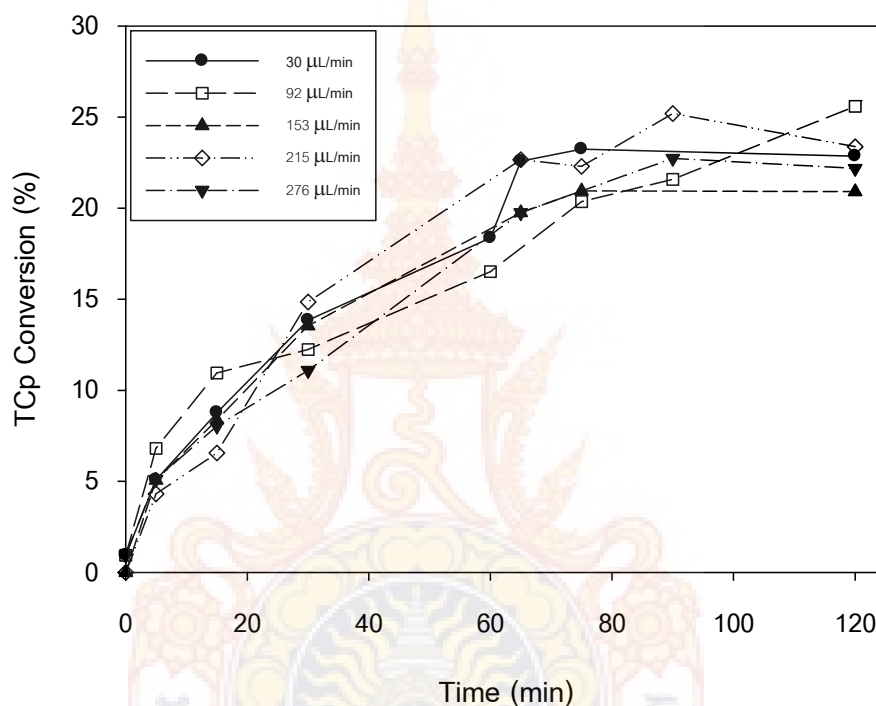
ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเกิดจากเมทานอล 1 โมล ทำปฏิกิริยากับกรดคาพริก (HCp) 1 โมล ได้เป็นผลิตภัณฑ์คือ เมทิลคาพริเลทหรือไบโอดีเซล 1 โมล ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปจะนิยมใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อให้สมดุลปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า (Shift equilibrium) อย่างไรก็ตามการใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซล ในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาผลของอัตราป้อนเมทานอลดังนี้ 30, 92, 153, 215 และ 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนเชิงโมล MeOH:HCp เท่ากับ 1:1, 3:1, 5:1, 7:1 และ 9:1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C และใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอริฟิเคชันของHCp เป็น 1:1 กำหนดให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที แล้ววิเคราะห์ปริมาณ MeCp ด้วยเครื่อง GC และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (HCp) ตามมาตรฐาน ASTM D 5555



รูปที่ 4.1 HCP (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCP ที่อัตราป้อนเมทานอลต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L/min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCP เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)

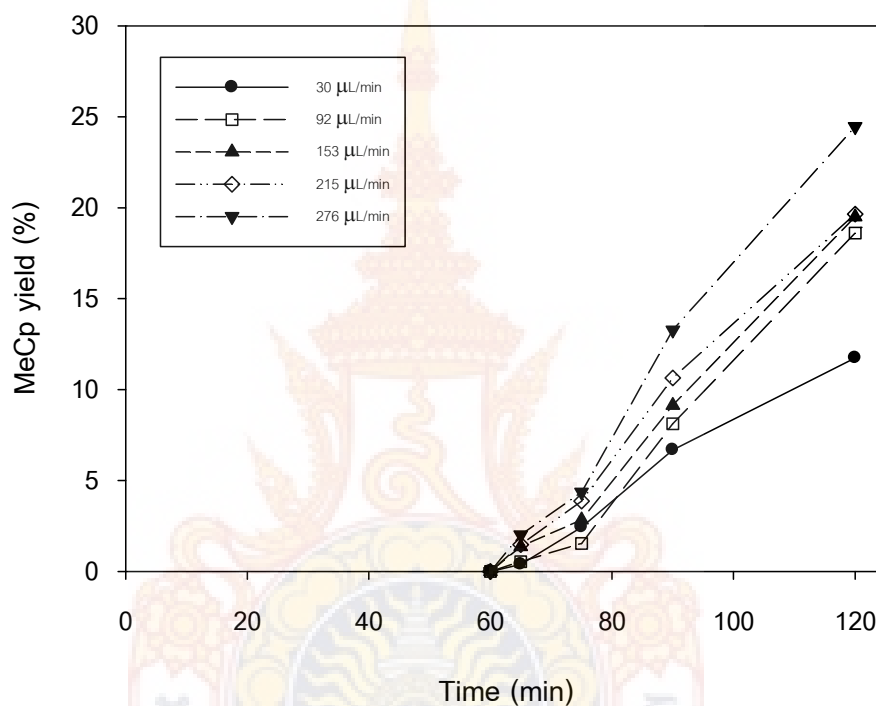
จากกราฟรูปที่ 4.1 เป็นการดำเนินปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ที่อุณหภูมิ 130°C ใช้อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L/min}$ ตั้งแต่เวลา 0-60 นาที โดยมีผลได้ HCP เป็นผลิตภัณฑ์ จะเห็นได้ว่าปริมาณ HCP (%) จะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนถึง 60 นาที มีผลได้ของ HCP (%) ประมาณ 27% ซึ่งเป็นช่วงที่ควบคุมให้มีการดำเนินการภายใต้ภาวะเดียวกันสอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) ได้ค่าสูงสุดประมาณ 16% ที่เวลา 60 นาที (รูปที่ 4.2) แต่หลังจาก 60 นาที จะเริ่มดำเนินการป้อนเมทานอลแทนน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCP ที่อัตราป้อนเมทานอลตั้งแต่ 30 – 276 $\mu\text{L/min}$ พบว่าปริมาณ HCP ในสารทำปฏิกิริยา (Reaction mixture) จะลดลงเมื่ออัตราการป้อนเมทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจาก HCP กลายเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน นอกจากนี้เมทานอลสามารถทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับ TCp ที่เหลืออยู่ได้ ทำให้

เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชันพร้อมกัน แต่อย่างไรก็ตามการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้เร็วกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 10 เท่า (Suwannakarn et al. 2009:2810-2818) จึงคาดว่าเมทานอลที่ใส่ลงไปจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่าสามารถสังเกตได้จากค่าการเปลี่ยนของ TCp ที่ 2 h จะมีค่าเกือบคงที่สำหรับอัตราการป้อนเมทานอลที่เวลา 60 นาทีทุกค่า (รูป 4.2)



รูปที่ 4.2 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราป้อนเมทานอลต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L/min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)

การป้อนเมทานอลที่อัตราการป้อนสูงจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้ามากขึ้น (Lotero et al. 2005:5353-5363) ดังรูปที่ 4.3 พบว่าอัตราการป้อนเมทานอลเท่ากับ 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ (MeOH:HCp 9:1) จะให้ค่าผลได้ของ MeCp เท่ากับ 24.5% ในขณะที่อัตราการป้อนเมทานอลเท่ากับ 30 $\mu\text{L}/\text{min}$ (MeOH:HCp 3:1) ซึ่งเป็นสัดส่วนเชิงโมลตามทฤษฎีจะให้ผลได้ของ MeCp เพียง 12%



รูปที่ 4.3 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราการป้อนเมทานอลต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)

ตารางที่ 4.1 ผลของอัตราการป้อนเมทานอลที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน

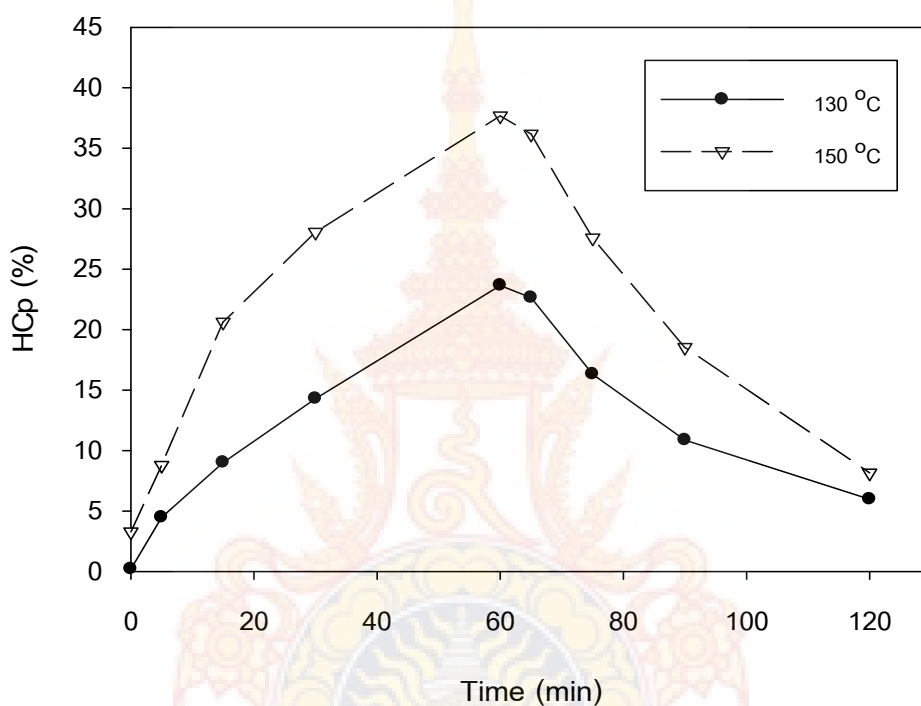
Methanol feed flow rate ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Hydrolysis		Esterification	
	TCp Conversion at 1 h (%)	HCp at 1 h (%)	HCp Conversion at 2 h (%)	HCp at 2 h (%)
30	18.3	23.1	48.4	12.4
92	16.5	23.5	49.4	12.2
153	17.7	23.9	54.9	10.6
215	19.2	23.6	62.1	9.15
276	18.1	23.7	74.7	6.0

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของอัตราการป้อนเมทานอลที่มีต่อค่าการเปลี่ยนของ TCp ปริมาณ HCp ที่เวลา 1 h สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปริมาณ HCp และค่าการเปลี่ยน HCp ที่เวลา 2 h สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน พบว่าภายใต้ภาวะการดำเนินปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะให้ค่าการเปลี่ยนของ TCp ประมาณ 17% และปริมาณ HCp ประมาณ 23% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเริ่มป้อนเมทานอลจากเวลา 60 นาที เป็นต้นไป จะส่งผลต่อการเปลี่ยนของ HCp พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเมทานอลจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของ HCp จะเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการป้อนเมทานอลสูงสุดที่ 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ จะให้ค่าการเปลี่ยนของ HCp สูงสุดที่ 74.7% เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ทำให้เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น

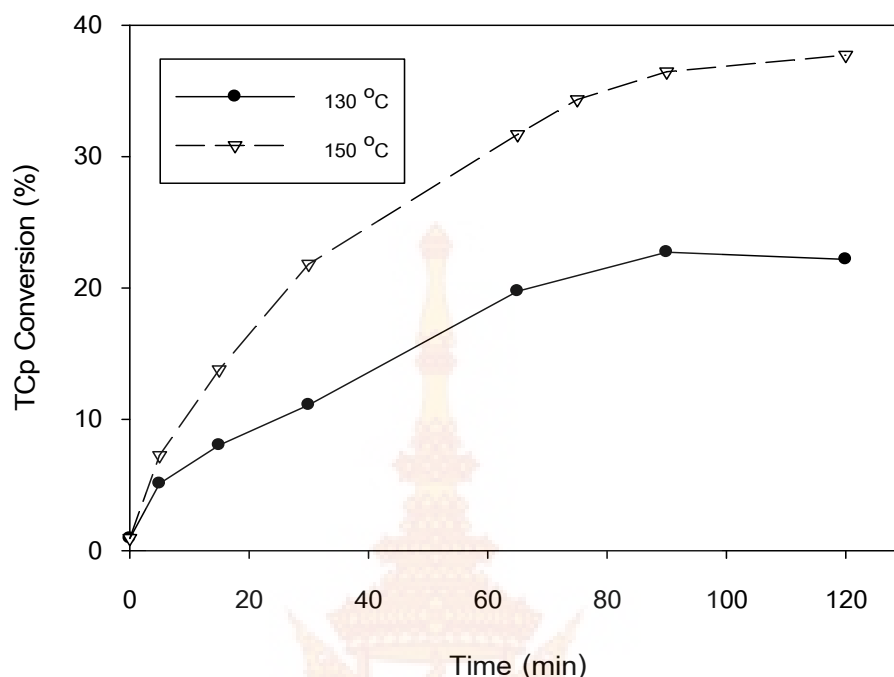
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งวิธีการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านมาใช้ความดันและอุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิต ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์จะต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ทนต่อภาวะดังกล่าวได้ ซึ่งมีราคาแพงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานที่ใช้และต้นทุนในการผลิตสูง โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็คจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมียังช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของน้ำหรือเมทานอลใน TCp แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาอุณหภูมิใน

การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 130°C และ 150°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที แล้ววิเคราะห์ปริมาณ MeCp ด้วยเครื่อง GC และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (HCp) ตามมาตรฐาน ASTM D 5555



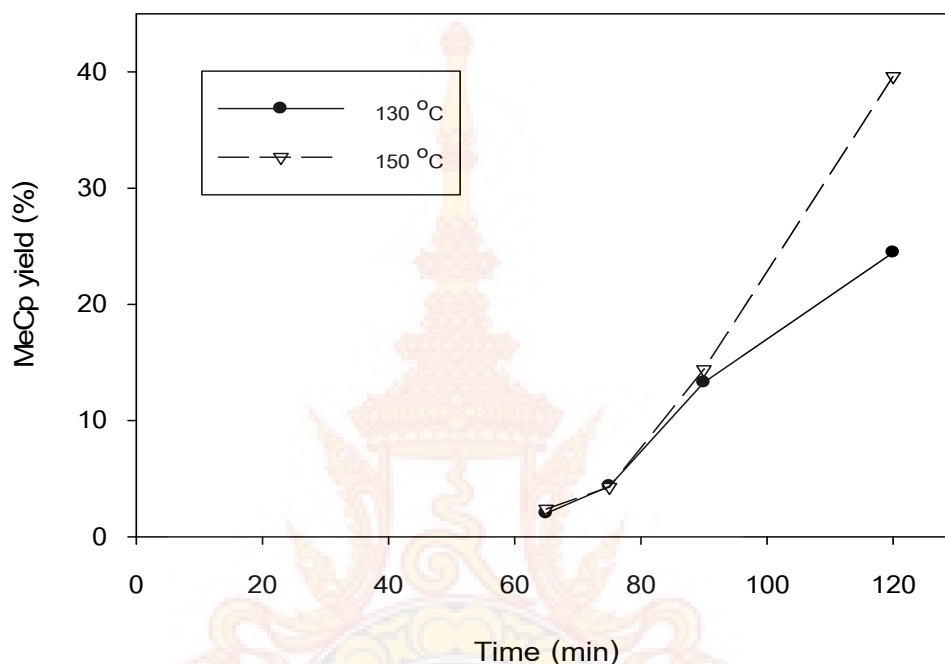
รูปที่ 4.4 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)



รูปที่ 4.5 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณ HCp ที่เวลา 0-60 นาที ปริมาณ HCp จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่ที่เวลา 65-120 นาที ปริมาณ HCp จะลดลง เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน จากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณ HCp ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (เวลา 0-60 นาที) ที่อุณหภูมิ 150°C จะสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130°C ส่วนค่าการเปลี่ยนของ TCp จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกค่า (รูปที่ 4.5) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ จะสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp กับน้ำและยังสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ TCp กับเมทานอลได้อีกด้วย ทำให้ค่าการเปลี่ยนของ TCp เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากเวลา 60 นาที เป็นต้นไป การเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามกฎของอาร์เรเนียส นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิยังมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของน้ำและเมทานอลในน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายเข้ากันระหว่างน้ำหรือเมทานอล

ในน้ำมันจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็คจะเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 150°C จะให้ค่าการเปลี่ยนของ TCp คือ 38% และในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิ 110°C จะให้ค่าการเปลี่ยนของ TCp ต่ำที่สุด (22%) แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยา (Reaction rate constant, k) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ngaosuwan et. al.(2009: 4761)



รูปที่ 4.6 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อุณหภูมิต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยใช้สัดส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที)

จากรูป 4.6 สังเกตได้ว่าผลได้ของ MeCp จะเริ่มที่เวลา 65 นาที คือเมื่อมีการป้อนเมทานอลจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ TCp ไปพร้อมกันซึ่งที่อุณหภูมิ 150°C ให้ผลได้ MeCp สูงสุดถึง 40%

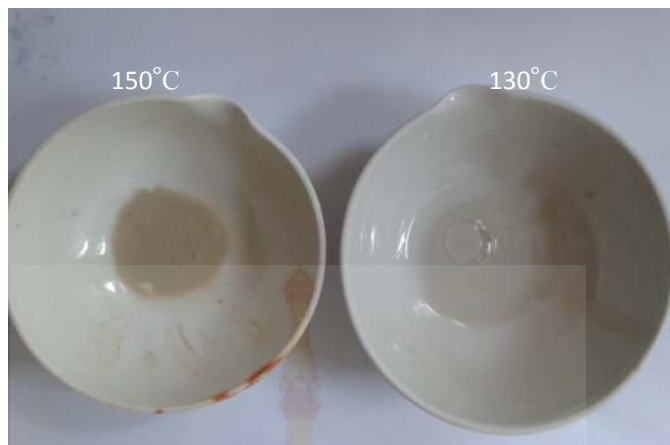
ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน

Temperature (°C)	Hydrolysis		Esterification	
	TCp Conversion at 1 h (%)	HCp at 1 h (%)	HCp Conversion at 2 h (%)	HCp at 2 h (%)
130	18.1	23.7	74.7	6
150	31.7	37.6	78.4	8.1

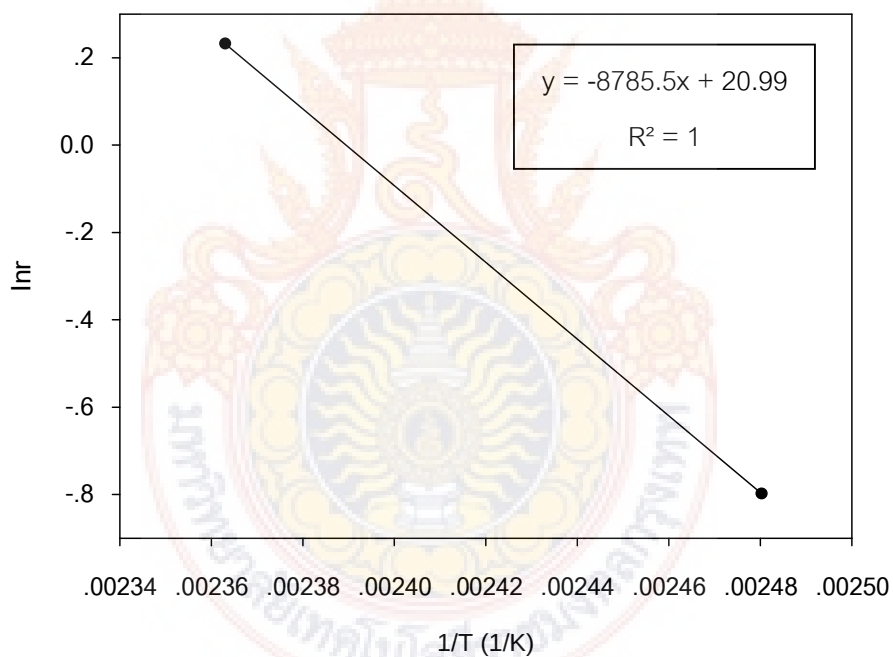
ตารางที่ 4.3 ค่า Initial rate ในหน่วยต่างๆของอุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Initial rate (mol/L-min)	Initial rate (mol/g•cat-min)
130	0.4467	4.7×10^{-3}
150	0.8269	8.7×10^{-3}

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อปริมาณ HCp และค่าการเปลี่ยนของ TCp ที่เวลา 1 h สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปริมาณ HCp และค่าการเปลี่ยนของ HCp ที่เวลา 2 h สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน พบว่าปริมาณ HCp และค่าการเปลี่ยนของ TCp ที่อุณหภูมิ 150°C ให้ค่าสูงสุด 37.6 และ 31.7 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (Initial rate) ที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.7×10^{-3} mol/g•cat-min (ตารางที่ 4.3) แต่ที่เวลา 2 h พบว่าปริมาณ HCp และค่าการเปลี่ยนของ HCp ให้ค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแต่สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน อุณหภูมิ 130°C ก็เพียงพอสำหรับการดำเนินปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจมีผลเชิงลบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์อีกด้วย เช่น ถ้าอุณหภูมิสูงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By-product) จากปฏิกิริยาการสลายตัวของ TCp (TCp decomposition) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ลดลง และอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ จากการใช้อุณหภูมิสูงทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง (Ngaosuwan et al. 2009: 4759) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ พบว่าการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เสื่อมสภาพ ดังรูปที่ 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่อุณหภูมิ 150°C อาจเกิดการสะสมของคาร์บอน (Carbon deposit) จึงทำให้มีสีดำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่อุณหภูมิ 130°C



รูปที่ 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ที่ใช้ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 150°C และ 130°C



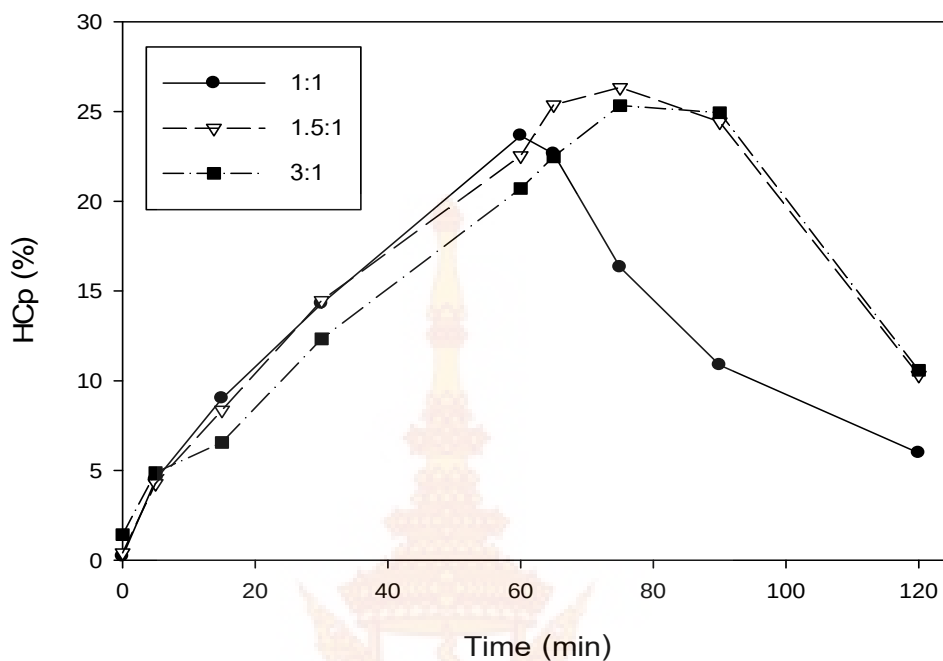
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นกับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้แอร์เนียสพลอต ที่อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ และตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp

ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาเคมี โดยที่ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นสูงจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดยากขึ้น เนื่องจากในการที่จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าค่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมีการหาค่าพลังงาน

กระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค ที่ความดันบรรยากาศโดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 130°C และ 150°C อัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็กอากาที่มของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (Initial rate) กับ $1/T$ ซึ่งใช้ในการหาค่าของพลังงานกระตุ้นตามกฎของอาร์เรเนียส พบว่า การที่จุดทุกจุดในกราฟอยู่บนเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงภาวะที่ใช้ในการทดลองถูกควบคุมด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยา (Kinictically control) ทำให้ไม่มีผลของข้อจำกัดเรื่องการแพร่ (Diffusion limitation) และการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา WZ และค่า E_a ที่ได้มีค่าเท่ากับ 73.04 kJ/mol ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการทดลองของ Ngaosuwan et al. (2009: 4762) มีค่าเท่ากับ 70.6 แต่ในรายงานของ ปรีชา และวัชรพล (2010: 41) ได้ค่า E_a เท่ากับ 43.1 kJ/mol ในรายงานได้ค่าต่ำกว่าอาจเป็นเพราะในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ซึ่งมีกรดไขมันอิสระประมาณ 12% ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเองได้ (Auto catalysis reaction)

4.3 ผลของระยะเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค

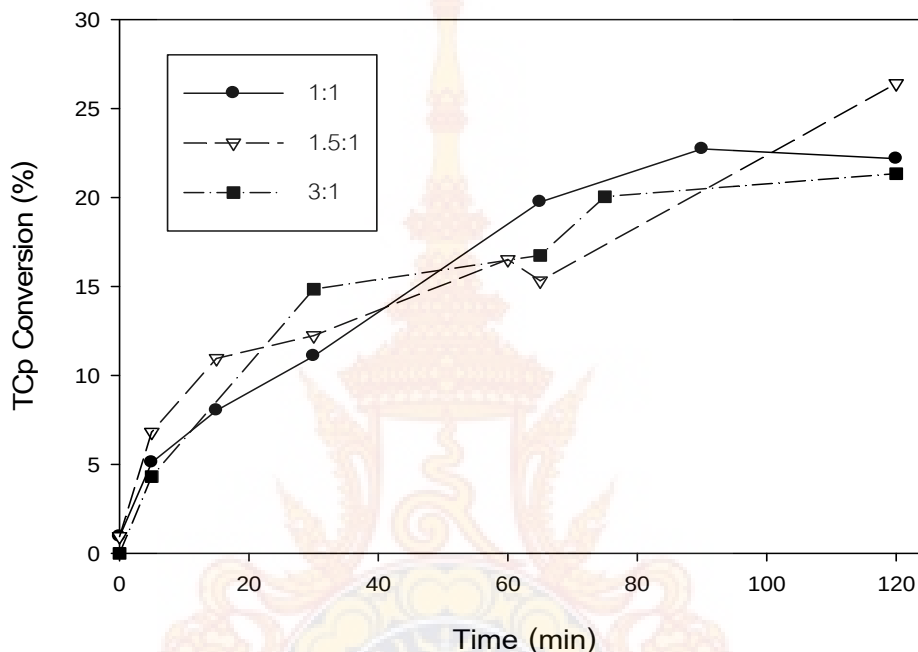
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจจะเป็นปฏิกิริยากำหนดผลได้ของไบโอดีเซล เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา WZ จะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ช้ากว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน การที่เวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาระยะเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:เอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp เป็น 1:1 1.5:1 และ 3:1 โดยกำหนดอัตราการป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp เวลาในการทำปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที แล้ววิเคราะห์ปริมาณ MeCp ด้วยเครื่อง GC วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (HCp) ตามมาตรฐาน ASTM D 5555



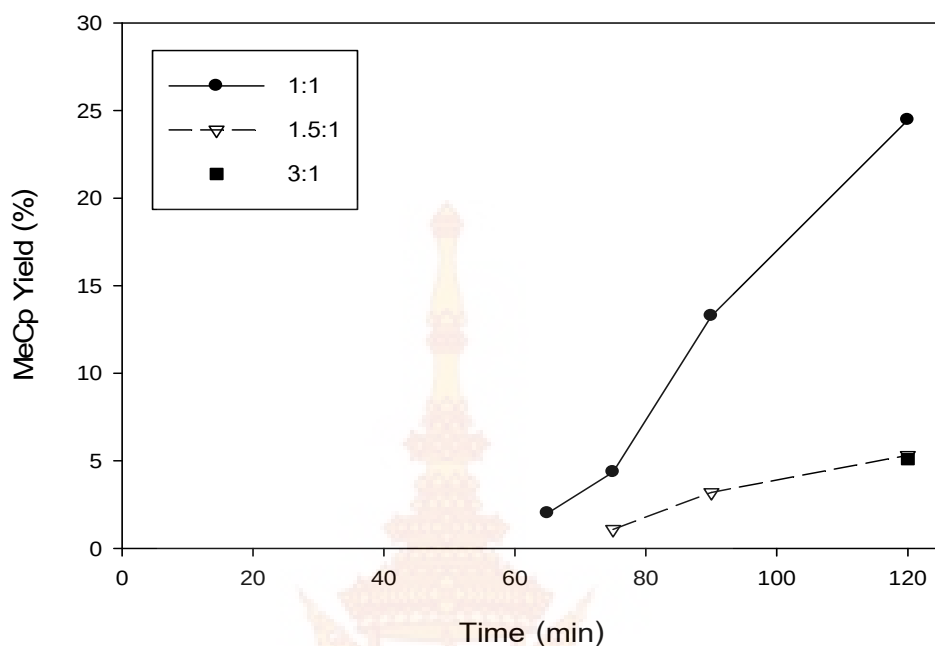
รูปที่ 4.9 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราส่วนเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ(โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130 $^{\circ}\text{C}$)

จากรูป 4.9 ผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp:ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่มีต่อปริมาณ HCp พบว่าการให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 60 นาที เป็น 90 นาที จะทำให้ปริมาณ HCp เพิ่มขึ้นจาก 23.6 เป็น 28.9% หลังจากถึงเวลาที่กำหนดจะป้อนเมทานอลเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแทนปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้ทราบว่า การให้ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันนาน 60 นาทีจะมีแนวโน้มการนำ HCp ไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น สังเกตจากการลดลงของ ปริมาณ HCp ที่ระยะเวลา 1:1 (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 60 นาที และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 60 นาที) มีค่าเท่ากับ 6% ในขณะที่ ระยะเวลา 3:1 (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 90 นาทีและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 30 นาที) มีค่าเท่ากับ 14.5% แสดงว่าที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 60 นาที น่าจะเข้าใกล้สมดุล (Equilibrium) ทำให้เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น ปริมาณ HCp จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ระยะเวลาตั้งแต่ 60-90 นาที จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนของ TCp เนื่องจาก TCp สามารถเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ทำปฏิกิริยา

กับน้ำ) และทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ทำปฏิกิริยากับเมทานอล) สังเกตได้จากรูปที่ 4.10 เมื่อเพิ่มระยะเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสผลได้ของ MeCp จะแปรผกผันกับเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจากรูปที่ 4.11 พบว่าระยะเวลา 1:1 ให้ค่าผลได้ MeCp มากที่สุด 24.4% ซึ่งในขณะที่ระยะเวลา 3:1 ให้ผลได้ MeCp ต่ำสุดเพียง 5%



รูปที่ 4.10 TCp Conversion (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่อัตราส่วนเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C)



รูปที่ 4.11 MeCp Yield (%) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp อัตราส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp ที่อัตราป้อนน้ำ 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ อุณหภูมิ 130°C)

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีต่อปริมาณ HCp (%) ค่าการเปลี่ยนของ TCp (%) และ HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอร์ฟิเคชัน

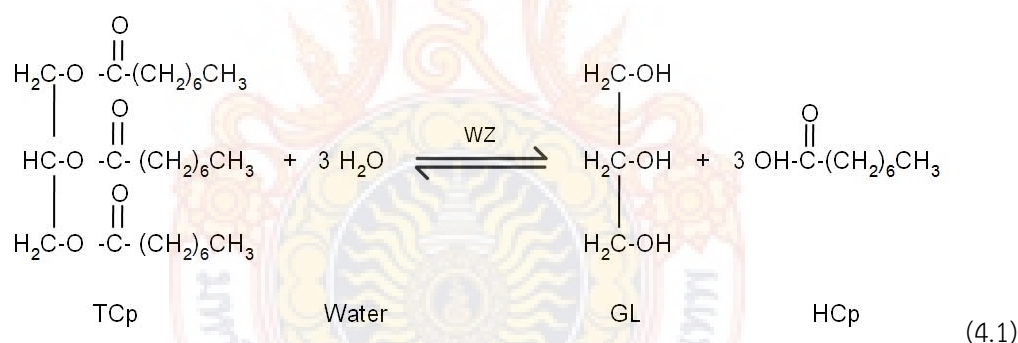
Reaction time ratio	Hydrolysis		Esterification	
	TCp Conversion (%)	HCp (%)	HCp Conversion at 2 h (%)	HCp at 2 h (%)
1:1	18.1	23.6	74.7	6
1.5:1	17.5	26.3	53.1	14.1
3:1	19.0	28.9	50.1	14.5

จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่ระยะเวลา 1:1 (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 60 นาทีและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 60 นาที) ให้ค่าการเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 74.7% ซึ่งที่เวลา 3:1 (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 90 นาทีและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 30 นาที) ให้ค่าการเปลี่ยน HCp เพียง 50.1% เนื่องจากที่ระยะเวลา 1:1 มีเวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากกว่า การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะไปลดเวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพราะที่เวลา 60 นาที เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ปฏิกิริยาดำเนินเข้าใกล้สมดุล)

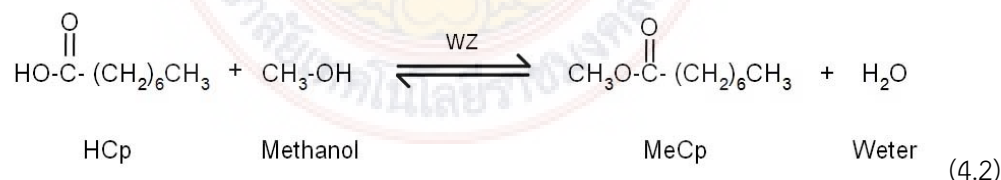
4.4 ผลของปริมาณน้ำในเมทานอลที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค

การป้อนน้ำกับเมทานอลไปพร้อมกันทำให้เกิดปฏิกิริยาทั้งสองพร้อมกันคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ซึ่งอาจจะลดขั้นตอนในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากสมการการปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

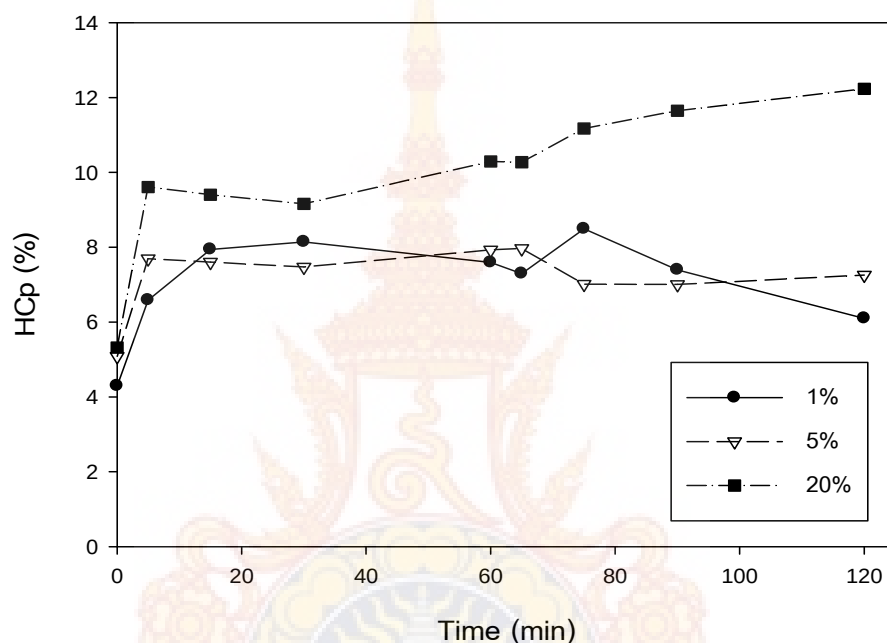


ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



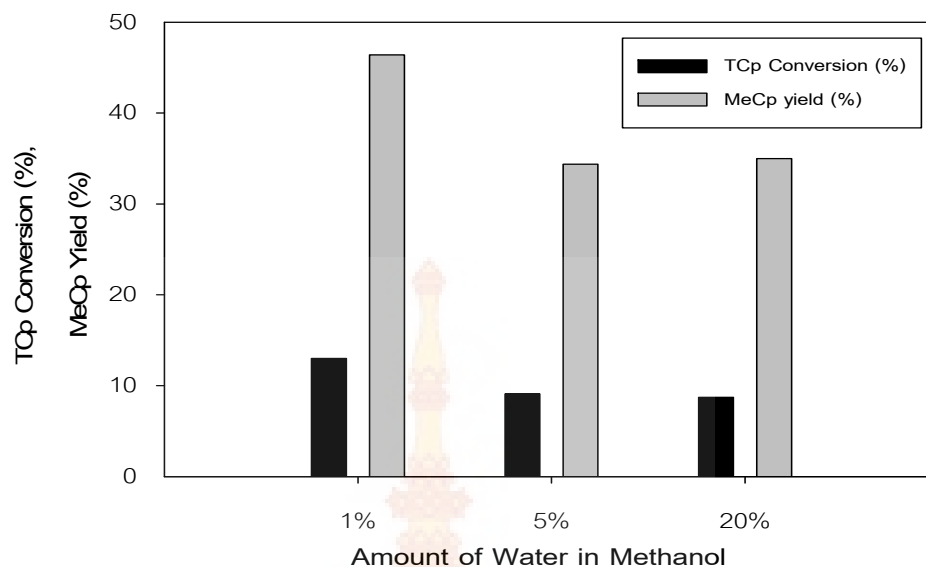
จากสมการที่ 4.1 TCp 1 โมล ทำปฏิกิริยากับ น้ำ 3 โมล เกิดเป็น HCp 3 โมลและGL 1 โมล จากนั้นในสมการที่ 4.2 HCp 1 โมล ทำปฏิกิริยากับเมทานอล 1 โมล เกิดเป็น MeCp 1 โมลและน้ำ 1 โมล สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อป้อนน้ำกับเมทานอลพร้อมกัน HCp ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แล้วเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน HCp ใช้ผลิตไบโอดีเซลทำให้

เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงทำให้สมดุลไปข้างหน้ามากขึ้นงานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการป้อน 30.75 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยมีปริมาณน้ำในเมทานอล 1 5 และ 20% โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยาทั้งหมด 120 นาที แล้ววิเคราะห์ปริมาณ MeCp ด้วยเครื่อง GC วิเคราะห์ปริมาณ HCp ตามมาตรฐาน ASTM D 5555

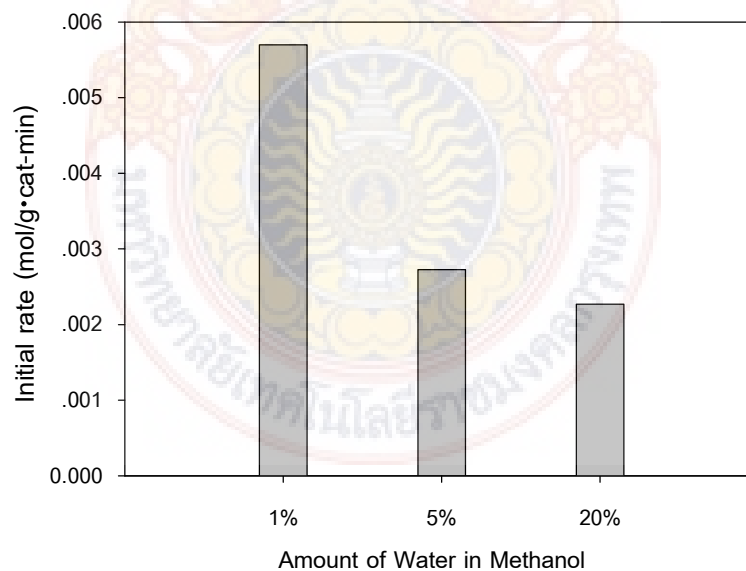


รูปที่ 4.12 HCp (%) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่ปริมาณน้ำในเมทานอลต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)

จากรูปที่ 4.12 ผลได้ของ HCp ที่เวลาต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการป้อนน้ำกับเมทานอลพร้อมกันทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp พร้อมกันจะทำให้ HCp ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล (MeCp) ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 4.13 TCp Conversion (%) และ MeCp Yield (%) ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่เวลา 2 h ที่ปริมาณน้ำในเมทานอลต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)



รูปที่ 4.14 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (mol/g·cat·min) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ HCp ที่ปริมาณน้ำในเมทานอลต่างๆ (โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา WZ 10% โดยน้ำหนักของ TCp อุณหภูมิ 130°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที)

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในเมทานอลกับค่าการเปลี่ยนของ TCp และ ผลได้ของ MeCp ที่เวลา 2 h พบว่าที่ปริมาณน้ำในเมทานอล 1% โดยปริมาตร ให้ค่าการเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 13% และผลได้ของ MeCp สูงสุดถึง 46.4% เนื่องจากการใส่ปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะไปทำให้ความแรงของกรดบรอนสเตดลดลงโดยการเกิดไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ สูญเสียตำแหน่งว่องไว และเนื่องจากบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา WZ มีตำแหน่งของกรดบรอนสเตดมากกว่ากรดลิวอิส (Ngaosuwan et al. 2009: 4761) จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในเมทานอลที่สูงมากจะลดค่าการเปลี่ยนของ TCp ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น พบว่าที่ปริมาณน้ำในเมทานอล 1% โดยปริมาตร จะให้ค่าการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงสุดเท่ากับ $5.7 \times 10^{-3} \text{ mol/g}\cdot\text{cat}\cdot\text{min}$ และที่ปริมาณน้ำในเมทานอล 5-20% โดยปริมาตร จะให้ค่าการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเท่ากับ $2.3 \times 10^{-3} \text{ mol/g}\cdot\text{cat}\cdot\text{min}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสามารถหาได้ในช่วงที่ค่าการเปลี่ยนของ TCp ซึ่งเป็นช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา (ที่ค่าการเปลี่ยนของ TCp น้อยกว่า 10%) จึงทำให้โอกาสที่น้ำจะไปทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพมีน้อยกว่านอกจากนี้ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้มีน้ำมีโอกาสเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เพื่อเปลี่ยนพื้นผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในส่วนที่เป็นกรดชนิดลิวอิสให้เป็นกรดชนิดบรอนสเตดซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำในเมทานอล 1% โดยปริมาตร เป็นค่าที่เหมาะสม เนื่องจากให้ค่าการเปลี่ยน ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น และค่าผลได้ของ MeCp สูงสุด ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำในเมทานอลจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ เสื่อมสภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การสังเคราะห์ไบโอดีเซล (MeCp) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค สามารถสรุปผลการทดลองและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาผลของอัตราการป้อนเมทานอลต่อปริมาณ MeCp ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และเอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ในระบบการเกิดแบบสามวัฏภาค พบว่าผลได้ของไบโอดีเซลจะแปรตามอัตราการป้อนเมทานอลจึงทำให้อัตราการป้อนเมทานอล 276 $\mu\text{L}/\text{min}$ (อัตราการป้อนเมทานอลสูงที่สุดในการทดลองนี้) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนเชิงโมลเมทานอล : กรดคาพริก 9:1 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเริ่มต้นเท่ากับ $4.7 \times 10^{-3} \text{ mol/g} \cdot \text{cat} \cdot \text{min}$ และมีผลได้ของ MeCp 25%

5.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณ MeCp ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และเอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ในระบบการเกิดแบบสามวัฏภาค ผลได้ของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จะแปรผันตามอุณหภูมิ จึงทำให้อุณหภูมิ 150°C (อุณหภูมิสูงที่สุดในการทดลองนี้) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงที่สุดเท่ากับ $8.7 \times 10^{-3} \text{ mol/g} \cdot \text{cat} \cdot \text{min}$ และผลได้ของ MeCp 39% แต่การใช้อุณหภูมิ 150°C ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดคาร์บอนสะสมทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยา คือ 130°C

5.1.3 การศึกษาผลของเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp : เอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ต่อปริมาณ MeCp ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และเอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ในระบบการเกิดแบบสามวัฏภาค พบว่าอัตราส่วนของเวลาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส : เอสเทอร์ิฟิเคชัน 1:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมให้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด 25% เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเข้าใกล้สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที การเพิ่มเวลาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไปจึงทำให้ผลได้ของ MeCp ลดลงเนื่องจากลดเวลาในปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันน้อยลง

5.1.4 การศึกษาผลของปริมาณน้ำในเมทานอลต่อปริมาณ MeCp ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp และเอสเทอร์ิฟิเคชันของ HCp ในระบบการเกิดแบบสามวัฏภาค พบว่าปริมาณน้ำในเมทานอล 1% โดยปริมาตร ให้ผลได้ของ MeCp สูงสุด

เท่ากับ 46.4% การเพิ่มปริมาณน้ำในเมทานอลมากขึ้นทำให้มีความเข้มข้นของน้ำในระบบสูงจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา WZ ไปดูดซับโมเลกุลของน้ำทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลง ปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ความแรงของกรดบรอนสเตดลดลงโดยการเกิดไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WZ สูญเสียตำแหน่งว่างไวแบบเป็นพิษ (Poisoning) จึงไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชันได้ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงด้วย

5.1.5 เมื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์ MeCp ด้วยวิธีป้อนน้ำก่อนแล้วตามด้วยเมทานอลกับการป้อนน้ำและเมทานอลพร้อมกัน พบว่าให้ผลได้ของ MeCp เท่ากับ 25% และ 46.4% ตามลำดับ เนื่องจากการป้อนน้ำและเมทานอลพร้อมกันจะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้สามปฏิกิริยาพร้อมกัน คือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TCp ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ HCp และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของ TCp จึงทำให้วิธีนี้ให้ผลได้ของ MeCp มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองเปลี่ยนสารตั้งต้นจาก TCp เป็นไตรกลีเซอไรด์ชนิดอื่นหรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อผลได้ของไบโอดีเซล

5.2.2 ทดลองแบบสามวัฏภาคในระบบนําร่อง (Pilot scale) เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไบโอดีเซลโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อผลได้ไบโอดีเซล

บรรณานุกรม

คมสัน หุตะแพทย์, สุทัศน์า กำเนิดทอง, กำพล กาหลง และณัฐภูมิ สุดแก้ว. 2549. **ทำไบโอดีเซล
ใช้เอง. พิมพ์ครั้งที่ 1.** กรุงเทพฯ: เกษตรกรรมธรรมชาติ.

ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. 2552. “เทคโนโลยีและการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซล”[ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก: <http://www.vcharkarn.com/varticle/37458>. (วันที่สืบค้น 19 มกราคม
2555)

ประเสริฐ เทียนนิมิต ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และปานเพชร ชินินทร. 2542. **เชื้อเพลิงและสาร
หล่อลื่น.** กรุงเทพฯ: เม็ดทรายพรินต์.

ปรีชา แก้วพิกุล และวัชรพล พรชัยสุนทร. 2553. **การสังเคราะห์กรดไขมันอิสระจากน้ำมันมะพร้าว
ในระบบการเกิดปฏิกิริยาแบบสามวัฏภาค. โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลกรุงเทพ.**

พนัส งามกนกวรรณ. 2549. **เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม.** กรุงเทพฯ: กรม
โรงงานอุตสาหกรรม.

ภัทร อุณยะวงษ์. 2548. “ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมัน” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
<http://www.room601.ob.tc/index.html>. (วันที่สืบค้น 14 มกราคม 2555)

วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. พิมพ์ครั้งที่
1.** กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ศิดา เบ็ญจพรกุลพงศ์. 2548. **การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบวิวิธพันธ์ของน้ำมันเมล็ด
ในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว. โครงการงานวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.**

สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. 2550. **ไบโอดีเซลชุมชนคนรักแก้ว**. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สมชัย อัครทิวา. 2546. **ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ท็อป

Petchmala A., N Laosiripojana, B Jongsomjit, M Goto, J Panpranot, A Shotipruk and O Mekasuwandumrong. 2010. "Transesterification of palm oil and esterification of palm fatty acid in near- and super-critical methanol with $\text{SO}_4\text{-ZrO}_2$ catalysts." **The Journal of Fule**. 89(6): 2387-2392.

Ching-Hung Chen, Wei-Heng Chen, Chieh-Ming J.Chang, Shih-Ming Lai and Chien-Hsiun Tu. 2010. "Biodiesel production from supercritical carbon dioxide extracted Jatropha oil using subcritical hydrolysis and supercritical methylation" **The Journal of Supercritical Fluids**. 52: 228-234.

Lopez Dora E., Kaewta Suwannakarn, David A. Bruce, James G. Goodwin Jr. 2007. "Esterification and transesterification on tungstated zirconia: Effect of calcinations temperature" **Journal of catalyst**. 247: 43-50.

Food Network Solution. 2548. "ปฏิกิริยาการเกิดของไตรกลีเซอไรด์" [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/triglyceride>. (วันที่สืบค้น 19 มกราคม 2555)

Jair sebastiao, S.Pinto and Fernando M.Lanqas. 2006. "Hydrolysis of corn oil using subcritical water" **The Journal of the Brazilian Chemical Society**. 17: 85-89.

Jerry W.King, Russell L.Holliday and Gary R.List. 1999. "Hydrolysis of soybean oil in a subcritical water flow reactor" **The Royal Society of Chemistry**.: 261-264.

Lotero Edgar, Yijun Liu, Dora E. Lopez, Keawta Suwannakarn, David A. Bruce and Jame G. Goodwin,Jr. 2005. "Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis" **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 14, 44: 5353-5363

Satyarthi J.K., D. Srinivas and P. Ratnasamy. 2011 "Hydrolysis of vegetable oils and fats to fatty acids over solid acid catalysts" **Applied Catalysis A: General**. 391 (1-2): 427-435

Minami, E. and S. Saka. 2006. "Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process." **The Journal of Fuel**. 85(17-18): 2479-2483.

Ngaosuwan Kanokwan, Edgar Lotero, Kaewta Suwannakarn, James G. Goodwin, Jr. and Piyasan praserthdam. 2009. "Hydrolysis of triglycerides using solid acid catalysts" **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 48: 4757-4767.

Patil T.a Butala, D.N Raghunathan, T.S Shankar, H.S. 1988 "Thermal hydrolysis of vegetable oil and fats 1. Reaction-Kinetic" **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 27: 727-735.

Russell L.Holliday, Jerry W.King and Gary R.List. 1997. "Hydrolysis of vegetable oil in a suband subcritical water" **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 36: 932-935.

Suwannakarn Kaewta, Edgar Lotero, Kanokwan Ngaosuwan and James G. Goodwin Jr. 2009. "Simultaneous free fatty acid esterification and triglyceride transesterification using a solid acid catalyst with in situ removal of water and unreacted methanol". **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 48(6): 2810-2818.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

วิธีการหา %FFA ด้วยมาตรฐาน ASTM D 5555

การคำนวณหาค่าของกรดไขมันอิสระในน้ำมันคำนวณได้จาก

$$\%FFA = \frac{\text{mL of NaOH} \times N \times 14.4}{\text{Weight of sample}}$$

%FFA	=	%กรดไขมันที่สังเคราะห์ได้
mL of NaOH	=	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต
N	=	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มอลิตี
Weight of sample	=	น้ำหนักสารตัวอย่าง
Molecular weight of caprylic acid	=	144.21

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าของกรดไขมันตามมาตรฐาน ASTM D 5555 โดยการชั่งสารทำปฏิกิริยา 0.7 g ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเอทานอล 75 mL จากนั้นเติมฟีนอล์ฟทาเลอินความเข้มข้น 1 % จำนวน 2 mL แล้วนำมาไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1N จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ได้ 3 mL คำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระจากตัวอย่างการคำนวณ

$$\%FFA = \frac{3 \times 0.1 \times 14.4}{0.70}$$

$$\%FFA = 6.17 \%$$

ภาคผนวก ข

ค่าการเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์ในไตรคาพิลิน (%TCp conversion)

ตัวอย่างการคำนวณ (จากผลไทเทรต)

$$\text{ความเข้มข้นที่ HCp} = 4.0922\%$$

$$\text{ไตรคาพิลิน (TCp) 100 g มี HCp} = 4.0922 \text{ g}$$

$$\text{ไตรคาพิลิน 18 g มี HCp} = \frac{4.0922 \times 18}{100}$$

$$\text{FFA} = 0.7380 \text{ g}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณหาโมลของ HCp

$$\text{HCp} = \frac{0.7380 \text{ g}}{144.2100 \text{ g/mol}}$$

$$\text{HCp} = 0.0050 \text{ mol}$$

หาปริมาตรของ TCp 18 g

$$V = \frac{18.0049 \text{ g}}{0.9500 \text{ g/mL}}$$

$$V = 18.9500 \text{ mL}$$

หาความเข้มข้นของ [HCp] ในหน่วย mol/mL

$$[\text{HCp}] = \frac{0.0050 \text{ mol}}{18.9500 \text{ mL}}$$

$$[\text{HCp}] = 0.0003 \text{ mol/mL}$$

หาโมลของ TCp ที่ 18 g มวลโมเลกุลของ TCp = 470.682 g/mol

$$TCp = \frac{18.0049 \text{ g}}{470.682 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$TCp = 0.0380 \text{ mol}$$

หาความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น

$$[TCp] = \frac{0.0380 \text{ mol}}{18.9500 \text{ mL}}$$

$$[TCp] = 0.0020 \text{ mol/mL}$$

หาความเข้มข้นของ TCp ที่เวลา 5 นาที

$$[TCp]_5 = [TCp]_{in} - \frac{[HCp]_5}{3}$$

$$[TCp]_5 = 0.002 - \frac{0.0005}{3}$$

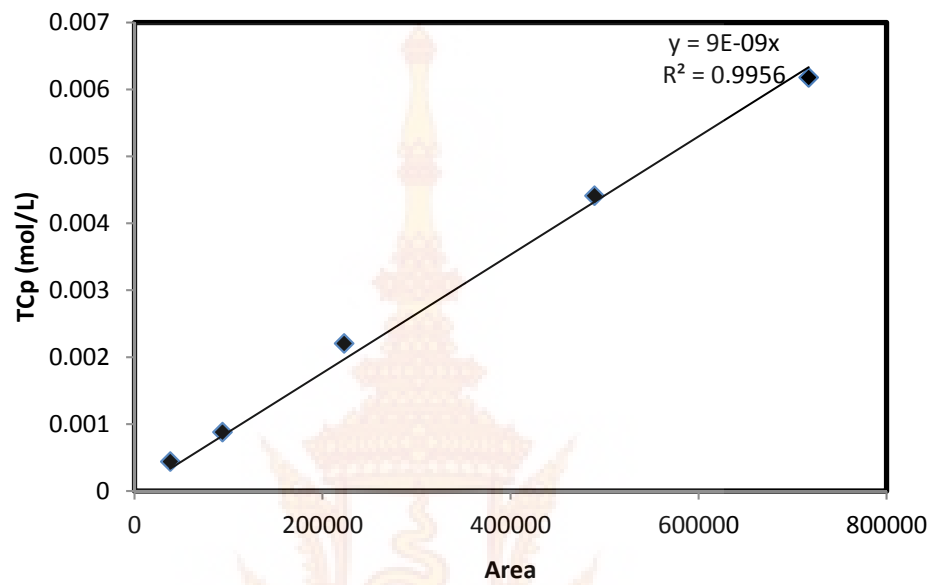
$$[TCp]_5 = 0.0018 \text{ mol/mL}$$

การคำนวณหา % Conversion

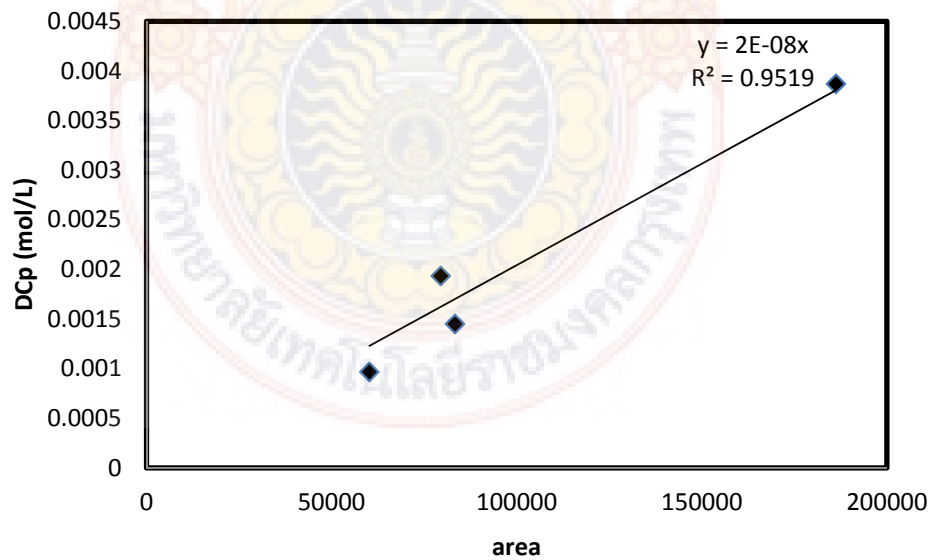
$$\%TCp_5 = \frac{[TCp]_{in} - [TCp]_5}{[TCp]_{in}} \times 100 \quad \%TCp_5 = 9$$

ภาคผนวก ค

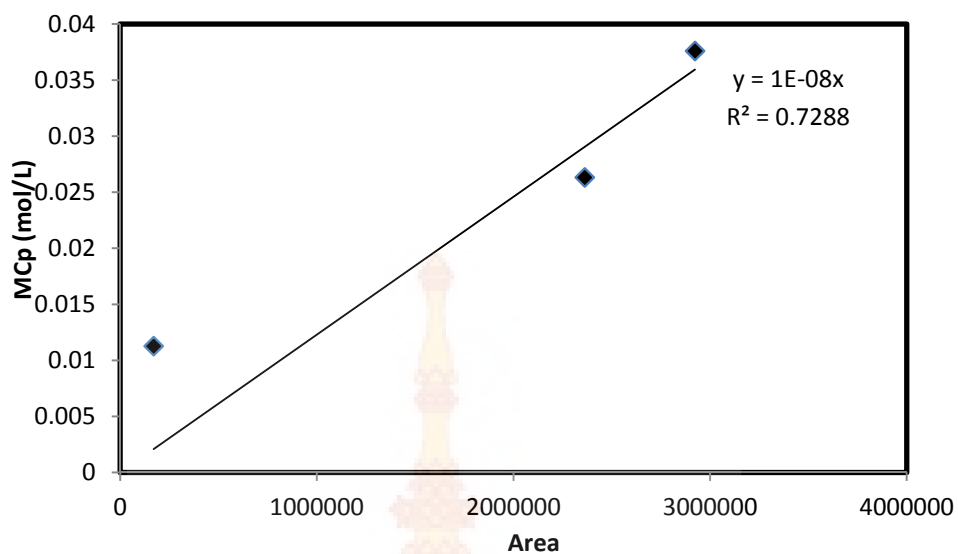
กราฟมาตรฐาน



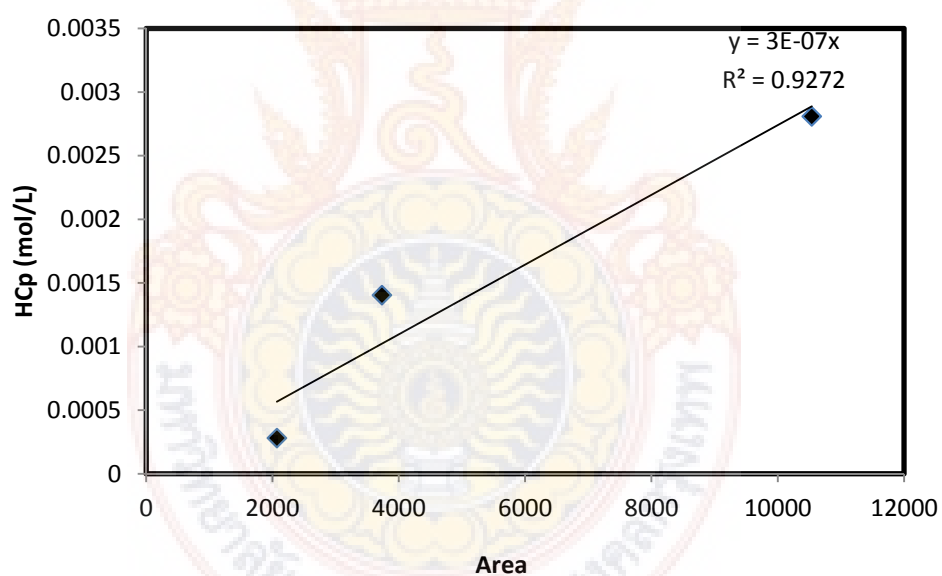
รูปที่ ง.1 กราฟมาตรฐานของไตรคาพิลีน (TCp)



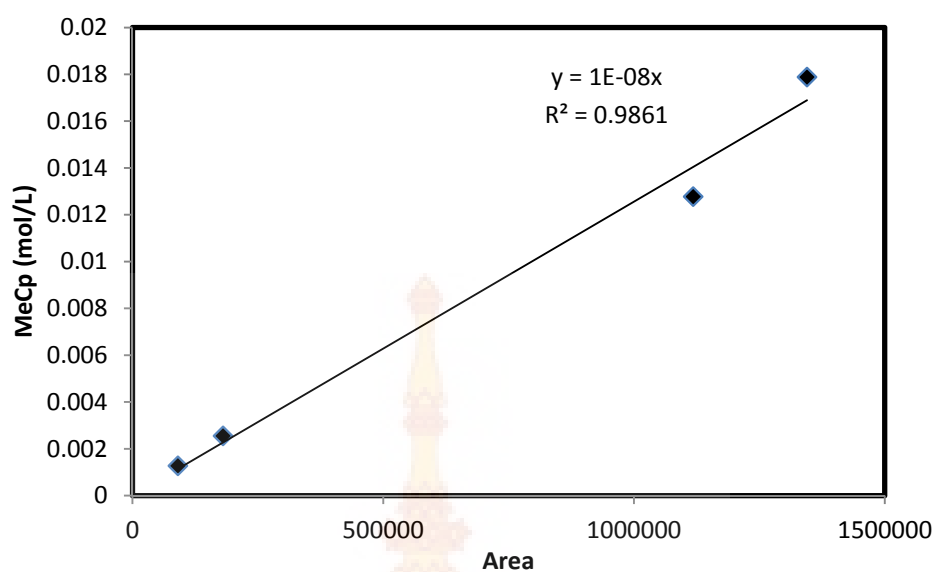
รูปที่ ง.2 กราฟมาตรฐานของไดคาพิลีน (DCp)



รูปที่ ง.3 กราฟมาตรฐานของโมนาคาพิลีน (MCp)



รูปที่ ง.4 กราฟมาตรฐานของกรดคาพริลิก (HCp)



รูปที่ ง.5 กราฟมาตรฐานของเมทิลคาพริเลท (MeCp)

ประวัตินักวิจัย



1. ชื่อ นางสาวกนกวรรณ จ้าวสุวรรณ
MISS KANOKWAN NGAOSUWAN

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2287 9734 และ 0 2287 9628 ต่อ 1195, 1201, 1210
โทรสาร 0 2287 9734
e-mail: kanokwanng@gmail.com . kanokwan.n@rmutk.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ การศึกษา	ระดับ ปริญญา	อักษรย่อปริญญา และชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2553	เอก	วศ.ด. วิศวกรรมศาสตร ดุขฎฐิบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	ไทย
2544	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์	ไทย
2541	ตรี	วศ.บ. วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี สุรนารี	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมตัวเร่งปฏิกิริยา

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย

—

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

- 1) การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนบนตัวรองรับเซอร์โคเนีย
- 2) ซัลโฟเนตบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ: ตัวเร่งปฏิกิริยากรดของแข็งชนิดใหม่สำหรับการผลิตไบโอดีเซล

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

- 1) Mathematical modeling and simulation for gas-liquid reactors, 2005, *Computers and Chemical Engineering*, 2461–2473, ทุน CHE-ADB, ผู้ร่วมวิจัย
- 2) การสังเคราะห์พอลิ (เมทิลเมทาคริเลต) ที่กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โฟแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549, ผู้ร่วมวิจัย
- 3) Hydrolysis of Triglycerides using Solid Acid Catalysts, 7th Annual Symposium of the Southeastern Catalysis Society, 2009, North Carolina, USA ทุน Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้วิจัย
- 4) Simultaneous Free Fatty Acid Esterification and Triglyceride Transesterification Using a Solid Acid Catalyst with in Situ Removal of Water and Unreacted Methanol, 2009, *Ind. Eng. Chem. Res.*, page 2810–2818, ทุน Animal Co-

Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้ร่วมวิจัย

5) Hydrolysis of Triglycerides Using Solid Acid Catalysts , 2009, *Ind. Eng. Chem. Res.*, page 2810–2818, พัฒนาอาจารย์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ.) ร่วมกับ Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้วิจัย

6) Kanokwan Ngaosuwan, 3-Phase Hydrolysis of Triglycerides using Solid Acid Catalysts, Chemcongress 3, 2009, Pataya, Thailand พัฒนาอาจารย์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ.)

7) Reaction kinetics and mechanisms for hydrolysis and transesterification of triglycerides on tungstated zirconia, 2010, *Topic in Catalysis*, page 53,783–794., พัฒนาอาจารย์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ.) ร่วมกับ Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้วิจัย

8) The role of zirconia surface on catalytic activity of tungstated zirconia via two-phase esterification of acetic acid and 1-heptanol, 2010, *Catalysis Letters*, page 134 – 140. พัฒนาอาจารย์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ.), ผู้วิจัย

9) Effect of solvent on hydrolysis and transesterification reactions on tungstated zirconia, 2010, *Applied Catalysis A: General*, 380 page 81–86. ได้รับทุนสนับสนุนจาก Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้วิจัย

10) Lauric Oils Synthesis in a Semi-Batch Reactor using Tungstated Zirconia as a Solid Acid Catalyst, The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment (ACSEE) 2011, Osaka, Japan, ทุนกระทรวงพลังงาน, ผู้วิจัย

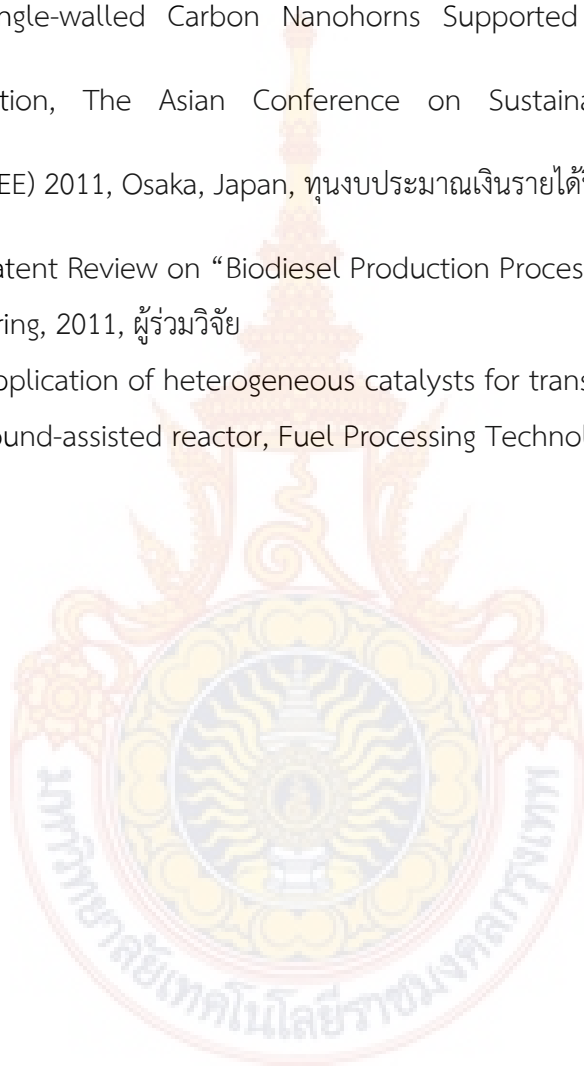
11) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตคาร์บอนนาโนฮอว์นแบบผนังชั้นเดียวสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ มทร. กรุงเทพฯ ปี 2554 เป็นผู้ร่วมวิจัย

12) โครงการการผลิตแบบบูรณาการเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากเมล็ดยางพารา
โครงการวิจัยย่อยเรื่อง การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดยางพาราโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพังก์เบส
ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเครือข่ายเชิงกลยุทธ์ฯ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ
(สกอ) เป็นผู้ร่วมวิจัย

11) Single-walled Carbon Nanohorns Supported Sulfonated Catalyst for
Biodiesel Production, The Asian Conference on Sustainability, Energy and the
Environment (ACSEE) 2011, Osaka, Japan, ทุนงบประมาณเงินรายได้ปี 2553, ผู้ร่วมวิจัย

12) Patent Review on “Biodiesel Production Process”, Recent Patents on
Chemical Engineering, 2011, ผู้ร่วมวิจัย

13) Application of heterogeneous catalysts for transesterification of refined
palm oil in ultrasound-assisted reactor, Fuel Processing Technology, 2013, ผู้ร่วมวิจัย



6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพการทำวิจัย ว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณเท่าใด

1) ซัลโฟเนตบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ:ตัวเร่งปฏิกิริยากรดของแข็งชนิดใหม่สำหรับการผลิตไบโอดีเซล ได้รับทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) ร่วมกับสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ (มทรก) เป็นผู้วิจัย เริ่มดำเนินการ 1 มิถุนายน 2554 ทำการวิจัยลุล่วงไปแล้ว 80%

2) การศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายหน้าที่และการรวมกระบวนการสำหรับอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี ได้รับทุนส่งเสริมกลุ่มวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว.) ภายใต้กลุ่มวิจัยของ ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ เป็นผู้ร่วมวิจัย เริ่มดำเนินการ 1 สิงหาคม 2554 ทำการวิจัยลุล่วงไปแล้ว 15%



1. ชื่อ นางสาววารภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์
MISS WARAPORN TANAKULRUNGSANK

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2286 3991-5 ต่อ 1195, 1201, 1210
โทรสาร 0 2286 3991-5 ต่อ 1195
e-mail: waraporn.t@rmutk.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ การศึกษา	ระดับ ปริญญา	อักษรย่อปริญญา และชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2536	เอก	D. Eng. Doctor of Engineering	Catalyst Engineering	Catalyst Engineering	Kyoto University	ญี่ปุ่น
2530	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	ไทย
2521	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมีวิศวกรรม	เคมีวิศวกรรม	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	ไทย

5. สาขาวิชาการศึกษาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมตัวเร่งปฏิกิริยา

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย

—

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

- 1) การศึกษาการบำบัดมลพิษที่เกิดจากไอของสารประกอบซัลเฟอร์โดยใช้เทคนิค XPS และ DRIFT ด้วยปฏิกิริยาการใช้แสง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเผาแบบเฟลมสเปรย์
- 2) การควบคุมโครงสร้างรูพรุนขนาดเมโซของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์
- 3) การสังเคราะห์พอลิ (เมทิลเมทาคริเลต) ที่กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

- 1) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจลเพื่อเคลือบบนเยื่อแผ่นอะลูมินาสำหรับสังเคราะห์สารประกอบโอเลฟิน งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 หัวหน้าโครงการ
- 2) การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
- 3) การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดไอเซชันไอน้ำ งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
- 4) การสร้างอิมัลชันโพลิเมอร์ปริมาณแอลกอฮอล์ความเข้มข้นสูง งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
- 5) กระดาษต้นไม้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร งบประมาณผลประโยชน์ประจำปี 2548 ผู้ร่วมวิจัย
- 6) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียม การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 21 ระหว่างวันที่ 28 – 30

มีนาคม 2548 ณ โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ งบประมาณประจำปี 2546 (งบวัสดุฝึก) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ

7) การปรับปรุงน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้า การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลากูน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

8) การผลิตถ่านอัดก้อนจากผงถ่านแอนทราไซด์และวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร การประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลากูน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2545 (งบวัสดุฝึก) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ

9) การศึกษาสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์. 2543 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 17. 3, 740-752 โครงการวิจัยและพัฒนาหน้ากากป้องกันสารพิษทางทหาร งบประมาณประจำปี 2541 กองทัพอากาศ กระทรวงกลาโหม

10) The influence of base type on the characterization of a nickel oxide catalyst formed by a sol-gel technique, 2005, Proceeding of the International Conference on Recent Advances in Mechanical & Materials Engineering (ICRAMME 05), May 30-31, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia, Paper No. 57.

11) Modification of Crude Palm Oil to Diesel Engine Fuel, 29th Congress on Science and Technology of Thailand, October 20-22, 2003, Khon Kean, Thailand, SI-3 งบประมาณประจำปี 2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

12) The effect of silica added on large surface area of nanocrystalline titania”, Proceeding of the 10th International Ceramics Congress: Part B, Section D Sintering Science and Technology, Florence, Italy, July 2002, p.101-108 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

13) Phase transformation behavior of nanocrystalline χ -alumina powder obtained by thermal decomposition of AIP in inert organic solvent, 2004, *Journal of Materials Science* 39 (10): 2417-2421 ทุนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

14) Synthesis of thermally stable micro spherical χ -alumina by thermal decomposition of aluminum isopropoxide in mineral oil, 2003, *Inorganic Chemistry Communication* **6**: 930-934 *ทุนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

15) The influence of Si-O-Zr bonds on the crystal-growth inhibition of zirconia prepared by the glycothermal method, 2003, *Journal of Material processing Technology* **136**: 186-189 *ทุนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

16) Critical nanoparticle size for thermal stability, 2003, *Journal of Materials Science Letters*, **22**: 1587-1589 *ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

17) Synthesis of thermally stable micro spherical chi-alumina by thermal decomposition of aluminum isopropoxide in mineral oil, 2003, *Inor. Chem. Comm.*, **6** 930-934, *ทุนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

18) Effect of crystallite size and calcination temperature on the thermal stability of single nanocrystalline chromium oxide: expressed by novel correlation, 2003, *Materials Research Innovation*, **7**, 118-123 *ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

19) New correlation for the effects of the crystallite size and calcination temperature on the single iron oxide nano-crystallites, 2003, *Crystal Growth & Design*, **2** (3), 215-210 *ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

20) Synthesis of large-surface area silica-modified zirconia by the glycothermal method, 2002, *Journal of Materials Science Letters*, **21** (18), 1461-1464 *ทุนกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

21) Thermal Stability of Silica-Modified Titania Ultrafine Particles Synthesized by the Glycothermal Method, 2000, *Ceramic Transactions*, **115**, 643-654 *ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

22) One pot solvothermal synthesis of thermal stable, porous silica-modified alumina powders by supercritical removal of organic solvents, 2000, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **9** (2), 35-54 *ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*

23) Effect of organic solvents on the thermal stability of porous silica-modified alumina powders prepared via one pot solvothermal synthesis, 2000 *Inorganic*

Chemistry Communication, **3**, 671-676, 2000.ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

24) Synthesis of large-surface area silica-modified titania ultrafine particles by the glycothermal method, 2000, *J. Material Science Letters*, **19**, 1439-1443 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

25) Mechanism of Diesel Exhaust Gas Abatement by Synthetic Zeolite ZSM-5, 1998, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **7** (2), 32-38 ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

26) Selective Aromatization of Propane on Metallosilicate Catalysts , 1996, *Journal of Science Faculty, Chiangmai University*, **23** (2), 42-49 งบประมาณประจำปี 2537 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

27) Inui, T., K. Fujioka, Y. Fujii, T. Takeguchi, H. Nishiyama and W. Tanakulrungsank, "Highly Active Catalysts for Syngas Production to Methanol and More Valuable Hydrocarbons", *Study of Surface Science and Catalysis*, 1993. ผู้ร่วมวิจัย

28) Inui, T., K. Fujioka, W. Tanakulrungsank and T. Takeguchi, "Spillover Effect in Methane Reforming Reactions in Ni-based Composite Catalysts Modified with Precious Metals", *Study of Surface Science and Catalysis*, 1993. ผู้ร่วมวิจัย

29) Takeguchi, T., W. Tanakulrungsank and T. Inui, "Separation and/or Concentration of CO₂-N₂ Gaseous Mixture by Pressure-Swing Adsorption using Metal-incorporated Microporous Crystals with High Surface Area", *Gas Separation and Purification*, **7**, 3, 1993. ผู้วิจัย

30) Inui, T., S. Shibata and W. Tanakulrungsank, "Purification of O₂-N₂ Gaseous Mixture by Pressure-Swing Adsorption using Na-A Zeolites", *Gas Separation and Purification*, **6**, 185, 1992. ผู้ร่วมวิจัย

31) การควบคุมโครงสร้างรูพรุนขนาดเมโซของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณ ประจำปี 2549 หัวหน้าโครงการ

32) การแยกโลหะหนักออกจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้หูดูดซับแบบขั้นตึง ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณประจำปี 2549 ผู้ร่วมวิจัย

33) การศึกษาการบำบัดมลพิษที่เกิดจากไอของสารประกอบซัลเฟอร์โดยใช้เทคนิค XPS และ DRIFT ด้วยปฏิกิริยาการใช้แสง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเผาแบบเฟลมสเปร์รี่ ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณประจำปี 2550 หัวหน้าโครงการ

34) การสังเคราะห์พอลิ (เมทิลเมทาคริเลต) ที่กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549 หัวหน้าโครงการ

35) มาริสา จินะดิษฐ์, ปทุมทิพย์ ตันทับทิมทอง, สุรัตน์ บุญพึง, , วราภรณ์ ณะกุลรังสรรค์, ไชยยันต์ ไชยยะ และฉันทมณี วังสะจันทานนท์ “กระถางต้นไม้จากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร” (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี 2548

36) ไชยยันต์ ไชยยะ และวราภรณ์ ณะกุลรังสรรค์ “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ฟลูอิดไอเซนไอน้ำ” (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

37) ไชยยันต์ ไชยยะ และวราภรณ์ ณะกุลรังสรรค์ “การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง” (ผู้ร่วมวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

38) วราภรณ์ ณะกุลรังสรรค์ และชัชวาลย์ สุขม้น “การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจลเพื่อเคลือบบนเยื่อแผ่นอะลูมินาสำหรับสังเคราะห์สารประกอบโอเลฟิน” (หัวหน้าโครงการวิจัย) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

39) โครงการการผลิตแบบบูรณาการเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากเมล็ดยางพารา
โครงการวิจัยย่อยเรื่อง การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดยางพาราโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพังก์เบส
ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเครือข่ายเชิงกลยุทธ์ฯ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ) เป็นผู้ร่วมวิจัย

6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพการทำวิจัย ว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณเท่าใด