



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำโดยใช้โพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับ
อลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

Transesterification of Jatropha Oil to Biodiesel Using Potassium Nitrate Loaded on
Alumina as a Heterogeneous Catalyst

นามผู้วิจัย นางสาวนิตา เศษตังศ์ ณ อยุธยา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงทองฉาย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงทองฉาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้โพแทสเซียมไนเตรด
บนตัวรองรับอลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

Transesterification of Jatropha Oil to Biodiesel Using Potassium Nitrate
Loaded on Alumina as a Heterogeneous Catalyst

โดย

นางสาวนิตา เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2551

นิตา เศษตังวงศ์ ณ อยุธยา 2551: การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำโดยใช้
โพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรม
เคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาอุบลฉาย, Ph.D.
117 หน้า

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไข
ปัญหาในเรื่องของการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการผลิตโดยทั่วไป
นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ ซึ่งประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและกระบวนการแยกตัวเร่ง
ปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยวิธีทรานเอสเทอร์ริฟิเค
ชันจากน้ำมันสบูดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา
ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้โดยการกรอง โดยทำการสังเคราะห์
ไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้กรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และเมทานอลทำปฏิกิริยา
เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นขั้นตอนแรก แล้วนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินาเป็นขั้นตอนที่ 2 โดยศึกษาถึงสภาวะที่
เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล และเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดที่ความ
เข้มข้นต่างๆบนอลูมินา โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 5 ชม. พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่สุดเมื่อ
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้ปริมาณสูงถึงร้อยละ 91.4 ที่
เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชม. สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบูดำ 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่ง
ปฏิกิริยาร้อยละ 7 ของน้ำหนักน้ำมันสบูดำ โดยใช้อัตราเร็วในการกวนและอุณหภูมิที่ใช้ทำ
ปฏิกิริยาครั้งที่คือ 600 รอบต่อนาที และ 65 °ซ ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพการ
ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้โดยตรง แต่
สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ ซึ่งพบว่าได้ปริมาณไบโอดีเซลร้อย
ละ 91.1 แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ได้ และมีประสิทธิภาพ
เหมือนเดิม สำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้พบว่าอยู่ในเกณฑ์
มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ยกเว้นปริมาณเมทิลเอสเทอร์ซึ่งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

นิตา เศษตังวงศ์ ณ อยุธยา
ลายมือชื่อนิตา

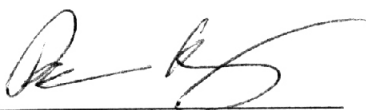

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

15 / น.ค. / 2551

Nida Dechatiwong Na Ayutthaya 2008: Transesterification of Jatropha Oil to Biodiesel Using Potassium Nitrate Loaded on Alumina as a Heterogeneous Catalyst. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D. 117 pages.

Biodiesel production using a heterogeneous catalyst is one of the several approaches in solving catalyst separation problem as found in conventional homogeneous process. The problem include environmental and separation problems. In this thesis, the transesterification of jatropha oil by using potassium nitrate loaded on Alumina as a heterogeneous solid catalyst in order to solve the problems by which the catalyst can be filtered out from the products. A technique to produce biodiesel has been developed by a two-step pretreatment process. In the first step, the esterification of jatropha oil by using 3%wt sulfuric acid and methanol. Then using potassium nitrate loaded on Alumina in second step transesterification. Suitable amount of KNO_3 loaded on alumina and calcined at 500 °C for 5 hrs and reaction condition were investigated for the biodiesel production from jatropha oil and methanol. It was found that 35 wt% of KNO_3 on alumina was the optimum catalyst and gave maximum biodiesel yield of 91.4% at 8 h, 15:1 methanol-to-oil molar ratio, 7 wt% catalyst amount. Using constant speeds of stirring and temperature were 600 rpm and 65 °C, respectively. Moreover, a study of the catalyst's recyclability indicated that the spent $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ cannot be directly reused for transesterification while this spent catalyst can be regenerated and the conversion reached 91.1%. This spent catalyst can be easily regenerated and the same activity can be obtained. Analysis on the properties of the synthesized biodiesel was found to comply well with the standards set by the department of energy business except the methyl ester production which was less than the standard value.

Nida Dechatiwong Na Ayutthaya
Student's signature


Thesis Advisor's signature

15 / May / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาอุยฉาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาดังๆที่เกิดขึ้น ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร (จักรกลเกษตร) จังหวัดพิษณุโลก ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันสนู้ดสำหรับการทำวิจัย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา X-Ray Diffraction (XRD) เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย ตลอดจนผู้มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจาก งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ รวมทั้งเป็นแรงจูงใจให้ผู้จัดทำสามารถทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

นิตา เดชาตังศ์ ณ อยุธยา

กุมภาพันธ์ 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	73
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	79
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าต่างๆ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	83
ภาคผนวก ค การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์	87
ภาคผนวก ง การใช้เครื่องมือวิเคราะห์	90
ภาคผนวก จ โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	95
ภาคผนวก ฉ โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี	100
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	9
2	รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรม ธุรกิจพลังงาน	13
3	องค์ประกอบของกรดไขมันที่พบในน้ำมันสบู่ดำ	20
4	คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วของไทย	22
5	ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสที่ใช้ในอุตสาหกรรม	29
6	การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด และเอนไซม์	32
7	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา	56
8	ค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำก่อนและหลังทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1	58
9	ผลการทดสอบคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบ เทียบกับค่ามาตรฐานไบโอดีเซล	69
10	มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน พ.ศ. 2549 ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน สำหรับเครื่องยนต์การเกษตร	70

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	ลักษณะผลและเมล็ดสนุ่นดำ
2	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอกอฮอล์
3	กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
4	ปฏิกิริยาสaponิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ
5	กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
6	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ
7	ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีการตกตะกอน
8	ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีการทำให้จุ่มชุ่ม
9	อุปกรณ์สำหรับการทดลองทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน
10	เดนซิติมิเตอร์ เครื่องมือทดสอบความหนาแน่น
11	วิสโคมิเตอร์ เครื่องมือทดสอบความหนืด
12	Pensky-Martens closed flash tester เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟ
13	เครื่องมือทดสอบหาจุดหมอกควัน (Cloud point) และจุดไหลเท (Pour point)
14	ผลการวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา
15	การวิเคราะห์สารประกอบในเชิงเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง XRD
16	ลักษณะของน้ำมันหลังทำปฏิกิริยากำจัดกรดไขมันอิสระในขั้นตอนที่ 1
17	ลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลหลังทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในขั้นตอนที่ 2

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
18	อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยใช้โพแทสเซียมไนเตรดที่ปริมาณต่างๆ กันบนตัวรองรับอลูมินา โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	60
19	อิทธิพลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15 ต่อ 1 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	62
20	อิทธิพลของสัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	64
21	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่สภาวะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง	65
22	อิทธิพลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ มีการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง	66
23	อิทธิพลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา ที่นำมาทำการสังเคราะห์ใหม่ สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ และมีการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
จ1	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	96
จ2	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	97
จ3	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 40% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	98
จ4	ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 45% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	99
ฉ1	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	101
ฉ2	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	102
ฉ3	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	103
ฉ4	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 45% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	104
ฉ5	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ฉ6 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 7 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	106
ฉ7 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	107
ฉ8 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 9 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	108
ฉ9 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	109
ฉ10 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 18 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	110
ฉ11 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ฉ12	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 8.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	112
ฉ13	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยนำมาทำปฏิกิริยาซ้ำครั้งที่ 1 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	113
ฉ14	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยนำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 1 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	114
ฉ15	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยนำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 2 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	115
ฉ16	โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยนำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 3 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที	116

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	= The American Society for Testing and Materials
B2	= 2 wt% of biodiesel blended with conventional diesel
B5	= 5 wt% of biodiesel blended with conventional diesel
B20	= 20 wt% of biodiesel blended with conventional diesel
B40	= 40 wt% of biodiesel blended with conventional diesel
B100	= 100% biodiesel
BET	= Brunauer-Emmett-Teller
°C	= degree celsius
cSt.	= centistokes
CNG	= compressed natural gas
D	= density
DTA	= differential thermal analysis
FAME	= fatty acid methyl ester
GC	= gas chromatography
g/l	= gram per liter
g/ml	= gram per milliliter
h	= hour
NGV	= natural gas vehicles
rpm	= revolution per minute
s	= second
TAN	= total acid number
TGA	= thermogravimetric analysis
THF	= tetrahydrofuran
vol %	= percentage by volumn
wt %	= percentage by weight
XRD	= X-Ray Diffraction

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำโดยใช้โพแทสเซียมไนเตรด บนตัวรองรับอลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

Transesterification of Jatropha Oil to Biodiesel Using Potassium Nitrate Loaded on Alumina as a Heterogeneous Catalyst

คำนำ

จากปัญหาราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ได้ส่งผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจโดยรวม และเป็นอุปสรรคต่อการขยายตัวของเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งนี้เป็นเพราะประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงมีความพยายามอย่างยิ่งที่จะหาพลังงานมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่นับวันจะลดน้อยลง ไบโอดีเซลจึงเป็นพลังงานทางเลือก (Alternative energy) ที่ใช้แทนน้ำมันปิโตรเลียม และพบว่าเป็นพลังงานทดแทนที่เหมาะสม เนื่องจากมีข้อดีคือเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ชินนัต, 2549) โดยเมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์แล้วพบว่ามีความสมบัติในการเผาไหม้ได้ดีไม่ต่างจากน้ำมันจากปิโตรเลียม และมีข้อดีกว่าหลายอย่าง คือ มีการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า ไอเสียมีคุณภาพที่ดีกว่า เพราะออกซิเจนในโมเลกุลไบโอดีเซลทำให้มีการสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลปกติ จึงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่า และเนื่องจากไม่มีกำมะถันในไบโอดีเซล จึงไม่มีปัญหาสารซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อย ไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสียง่าย ช่วยยืดอายุการใช้งานได้เป็นอย่างดี (อาภาณี, 2549)

ไบโอดีเซล เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันสัตว์นำมากำจัดสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เป็นอัลคิลเอสเทอร์ (alkyl esters) หรือไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอล (glycerol) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอางค์ ฯลฯ (Mether *et al.*, 2004) วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าวคือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันในเรื่องความหนืดให้เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล และเพิ่มค่าซีเทน (cetane number) โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันนี้ สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งแบบ

กรดและด่าง ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดเช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด มีข้อดีคือ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) กับกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ น้ำ ซึ่งน้ำทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว แต่มีข้อจำกัดคือเร่งปฏิกิริยาในระบบที่มีน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมัน โดยทำให้เกิดสบู่ และลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือการแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์ทำได้ยาก (Ma and Hanna, 1999) ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) ทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (homogeneous catalyst) เพราะว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ มีข้อดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ตรงที่สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Jitputti *et al.*, 2004)

น้ำมันสบู่ดำถือเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากต้นสบู่ดำสามารถปลูกและเจริญเติบโตได้ทั่วไปในทุกพื้นที่และยังให้ผลผลิตสูง และการใช้น้ำมันสบู่ดำไม่เป็นการแย่งตลาดของน้ำมันที่ใช้บริโภค อีกทั้งยังได้มีการวิจัยแล้วว่าน้ำมันสบู่ดำสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลทางการเกษตรได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ใดๆ ก่อนการนำมาใช้งานซึ่งหลังจากการทดสอบน้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดังกล่าวพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองและการสึกหรอของเครื่องยนต์อยู่ในเกณฑ์ปกติ และองค์ประกอบต่างๆ ของไอเสียที่ปล่อยออกมาอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและเอื้อประโยชน์ต่อการผลิตไบโอดีเซล เช่น มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวปริมาณสูงกว่าร้อยละ 80 (Foidl *et al.*, 1996) ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความหนืดที่เหมาะสมและมีคุณภาพดี ซึ่งเป็นผลดีต่อระบบในเครื่องยนต์ดีเซล

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้น้ำมันสบู่ดำมาดัดแปลงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลโดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับเมทานอลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็น เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยใช้การสังเคราะห์แบบ 2 ขั้นตอน เนื่องจากน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acids) สูง ซึ่งต้องปรับปริมาณกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 โดย

ใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ทำปฏิกิริยากับน้ำมันสบู่ดำเป็นขั้นตอนที่หนึ่ง (Marchetti *et al*, 2007) และสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอลูมินา ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นขั้นตอนที่สอง โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล เนื่องจากอลูมินา เป็นตัวรองรับที่ดี หาง่าย และมีการใช้ในงานวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยทำการผสมโพแทสเซียมไนเตรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์กับอลูมินา เพื่อทำการสังเคราะห์ให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซล และประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สกัดจากน้ำมันสบู่ดำ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้
2. ศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ซ้ำและการนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยา

ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้ไขมันสบู่ดำที่ปลูกและหีบได้ภายในประเทศและเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ปฏิกิริยาแบบกะ (Batch reactor)
2. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สนใจศึกษา คือ $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
3. ศึกษาปริมาณของ KNO_3 บนตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา
4. ศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทำการทดลองในช่วง 6-9 ชั่วโมง
5. ศึกษาอัตราส่วนของสัดส่วนโมลของเมทานอลต่อไขมันสบู่ดำโดยทำการทดลองในช่วง 12:1, 15:1 และ 18:1
6. ศึกษาปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทำการทดลองในช่วงปริมาณร้อยละ 6-8 โดยน้ำหนัก
7. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 65°C โดยใช้อุณหภูมินี้ทุกการทดลอง
8. ทำการทดลองโดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนนี้ทุกการทดลอง
9. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่
10. ทำการวิเคราะห์สมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ค่าความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดหมอก จุดไหลเทและค่าความเป็นกรด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของโพแทสเซียมไนเตรดที่มีความเข้มข้นเหมาะสมบนตัวรองรับอลูมินา และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอล
2. สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาและผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ต่อไปในอนาคต
3. ได้น้ำมันไบโอดีเซลมาใช้เพื่อเป็นพลังงานทดแทนการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ
4. เป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรและเป็นการส่งเสริมให้เกษตรกรผู้ปลูกพืชน้ำมันมีรายได้จากการเพาะปลูกและเป็นการช่วยประกันราคาพืชผลในอนาคต
5. เป็นแนวทางในการลดมลพิษทางอากาศจากการใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซล

การตรวจเอกสาร

พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทนที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงอยู่ในปัจจุบัน มีคุณสมบัติและมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันดังนี้

1. แก๊สโซฮอล์ 95

แก๊สโซฮอล์ 95 คือ น้ำมันแก๊สโซลีน (น้ำมันเบนซิน) ไร้สารตะกั่วออกเทน 95 ที่มีส่วนผสมของ “น้ำมันเบนซิน” กับ “เอทานอล” ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ เครื่องยนต์เบนซินทุกรุ่นที่ใช้เบนซินไร้สารตะกั่ว 91 และ เบนซินไร้สารตะกั่ว 95 สามารถเติมแก๊สโซฮอล์ 95 ได้ทันทีโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์แต่มีข้อด้อยคือ ราคาแก๊สโซฮอล์ไม่ต่างจากน้ำมันเบนซิน 95 มากนัก แก๊สโซฮอล์ยังให้พลังงานความร้อนต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน ดังนั้นปริมาณการสิ้นเปลืองของแก๊สโซฮอล์จะมีมากกว่าน้ำมันเบนซินประมาณร้อยละ 1-3 (หนึ่งฤทัย, 2547)

2. ก๊าซธรรมชาติ “NGV”

ก๊าซธรรมชาติ “NGV” หมายถึงก๊าซธรรมชาติที่มี “มีเทน” เป็นส่วนประกอบหลักและถูกอัดจนมีความดันสูงซึ่งบางประเทศเรียกว่า “ก๊าซธรรมชาติอัด” (Compressed Natural Gas, CNG) คุณสมบัติพิเศษของก๊าซ NGV คือ เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดควันดำหรือสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากมีสัดส่วนของคาร์บอนน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น และมีคุณสมบัติเป็นก๊าซ ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น คุณสมบัติเด่นอีกประการคือก๊าซ NGV เป็นเชื้อเพลิงที่มีความปลอดภัยมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติเบากว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วไหลก๊าซ NGV จะไม่มีการสะสมอยู่บนพื้นดินจนเกิดการลุกไหม้เหมือนก๊าซชนิดอื่นๆ และอุณหภูมิที่จะทำให้ก๊าซ NGV สามารถลุกติดไฟในอากาศเองได้ต้องสูงถึง 650 องศาเซลเซียส ข้อด้อยของก๊าซ NGV คือ รถยนต์ที่ใช้ก๊าซตัวนี้ต้องเป็นรถที่มีเครื่องยนต์ซึ่งสร้างขึ้นมารองรับการใช้ก๊าซ NGV โดยเฉพาะ หรือไม่ก็ต้องเป็น “เครื่องยนต์เชื้อเพลิงสองระบบ” หรือ “เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงร่วม” ที่ผ่านการดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์พิเศษที่ทำให้เครื่องยนต์ใช้ได้ทั้งน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลและก๊าซ NGV

3. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมันที่ใช้ได้เป็น 3 ประเภท

3.1 ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันสบู่ดำ หรือน้ำมันจากไขสัตว์ เช่น น้ำมันหมู เป็นต้น ป้อนลงไปเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีใดๆ อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญของการใช้น้ำมันพืชโดยตรงคือ ต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกๆ จุดที่น้ำมันผ่าน ได้แก่ ถังน้ำมัน ท่อทางเดินน้ำมัน ชุดกรองน้ำมัน ซึ่งวิธีการใช้น้ำมันประเภทนี้เป็นวิธีที่ได้น้ำมันในราคาถูก แต่การนำมาใช้อย่างเหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความรู้ในการหลอมเหลวไขแข็ง และลดความหนืดของน้ำมัน (อาภาณี, 2549) ที่อุณหภูมิต่ำ น้ำมันพืชยังมีความหนืดสูงขึ้นจนเกิดเป็นไข ทำให้หัวฉีดทำการฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยากและเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ น้ำมันพืชยังมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยมาก ยังทำให้การจุดระเบิดเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผงังลูกสูบ แหวนและวาล์ว ซึ่งถือเป็นความยุ่งยากที่เกิดขึ้นเมื่อใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซล

3.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันดีเซลเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชลงทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น ไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันมะพร้าว เรียกว่า โคโคดีเซล (Cocodiesel) อย่างไรก็ตาม น้ำมันที่ได้จากวิธีการนี้เหมาะกับกรณีจำเป็นต้องใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วน และใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก ตลอดจนใช้งานที่อุณหภูมิอากาศเขตร้อน

3.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้ เป็นไบโอดีเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเอสเทอร์ของไตรกลีเซอไรด์ เป็นไบโอดีเซลที่เป็นที่ยอมรับและผลิตกันโดยทั่วไป เช่น สหพันธรัฐเยอรมัน และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด และน้ำมันที่ได้มีความคงตัวมากขึ้น ทำให้เมื่อนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์แล้วไม่เกิดปัญหาสามารถเติมเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิดทั้งเดิมโดยตรงหรือผสมในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึง การผสมน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลในอัตราส่วน 95 ต่อ 5 หรือ B100 หมายถึง ไบโอดีเซล 100% เป็นต้น อย่างไรก็ตามต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้ยังคงมีราคาสูงกว่าดีเซล ส่งผลให้ปัจจุบัน ไบโอดีเซลยังคงมีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซลถึง 1-2 เท่าตัว ด้วยเหตุนี้ในการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์มักจะนำน้ำมันดีเซลมาผสมด้วยซึ่งปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระบบขนส่งมวลชนเนื่องจากมีราคาที่ไม่ต่างจากน้ำมันดีเซลมากนัก นอกจากนี้การเผาไหม้ยังหมดจด ไม่มีเขม่าหลงเหลือ และจุลชีพของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในระบบขนส่งและเก็บรักษามากขึ้น นอกจากนี้ ค่าซีเทนของไบโอดีเซลซึ่งเป็นดัชนีบ่งบอกถึงคุณภาพการติดไฟของน้ำมันยังคงมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้ทำให้ปัจจุบันไบโอดีเซลถูกนำมาผสมใช้กับน้ำมันดีเซลจำนวนมากในสถานีเติมน้ำมันแต่ละประเทศรวมถึงประเทศไทยด้วย (อาภาณี, 2549)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนทางเลือกรนอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช หรือ ไขมันสัตว์ โดยมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมาก จึงสามารถใช้ทดแทนกันได้ คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างของไบโอดีเซลคือสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพในธรรมชาติ (Biodegradation) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Wikipedia, 2006) ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลแทนการใช้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมจึงเป็นการช่วยลดมลภาวะในอากาศ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่มากกว่าน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรเพราะไบโอดีเซลผลิตมาจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ (กองบรรณาธิการ, 2548)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Fuel property	Diesel	Biodiesel
Fuel standard	ASTMD975	ASTM D6751
Lower heating value, Btu/gal	~129,050	~118,170
Kinematic viscosity, (40 °C)	1.3 to 4.1	4.0 to 6.0
Specific gravity kg/l, (60 °F)	0.85	0.88
Density, lb/gal (15 °C)	7.079	7.328
Water and sediment, vol%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt%	87	77
Hydrogen, wt%	13	12
Sulfur, wt%	0.05 max	0.0 to 0.0024
Boiling point, °C	180 to 340	315 to 350
Flash point, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud point, °C	-18 to 5	-3 to 12
Pour point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane number	40 to 55	48 to 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 to 5,000	>7,000

ที่มา: Tyson (2004)

1. มาตรฐานไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลอาจนำมาใช้โดยการผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่างๆ ซึ่งเราเรียกชื่อของน้ำมันชนิดนี้โดยใช้สัญลักษณ์เป็น B แล้วตามด้วยตัวเลขที่แสดงปริมาณร้อยละของไบโอดีเซลที่ใช้ผสมเช่น B5 หมายถึง ไบโอดีเซลที่มีไบโอดีเซลผสมอยู่ร้อยละ 5 โดยปริมาตร หรือการนำไบโอดีเซลมาใช้โดยไม่ผสมที่เราเรียกว่า B100 ไบโอดีเซลนอกจากจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดีเซลแล้ว ยังเป็นเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ดี มีการสันดาปที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล ช่วยลดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เหม่าและควันดำจากท่อไอเสีย จึงทำให้ปัจจุบันมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยรัฐบาลได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาระบบการผลิตไบโอดีเซล

ดีเซลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และมีปริมาณเพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล รวมทั้งการกำหนดมาตรฐานและวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซล เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล (รติกร, 2549)

ประเทศไทยได้มีการเริ่มผลิตและใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมในอัตราส่วน 2 ต่อ 98 (B2) หลังจากนั้นได้มีการรณรงค์ให้มีการใช้น้ำมันประเภทนี้มากขึ้นจนกระทั่งปัจจุบันสถานีเติมน้ำมันหลายแห่งได้มีการจำหน่ายน้ำมันดีเซล B5 สำหรับเติมในรถยนต์ดีเซลอย่างแพร่หลาย โดยที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้มีการกำหนดมาตรฐานเอาไว้ว่าน้ำมันไบโอดีเซล B100 ที่นำมาผสมนั้นต้องมีคุณสมบัติที่ผ่านตามาตรฐาน ASTM PS121 ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 2 สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันนี้ได้มีการนำน้ำมันไบโอดีเซล B20 มาให้บริการกับผู้บริโภคแล้ว และในอนาคตข้างหน้าอาจมีการให้บริการน้ำมันไบโอดีเซล B100 อย่างเต็มรูปแบบเพื่อลดมลภาวะที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในทางการค้าจะต้องมีการทดสอบคุณสมบัติบางประการของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญเบื้องต้นที่สำคัญของไบโอดีเซลซึ่งมักถูกพิจารณาเป็นอันดับแรกๆ ได้แก่

1.1 ความหนืด (Viscosity)

หมายถึง ความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันดีเซล มีผลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ถ้าน้ำมันมีความหนืดเชิงจลศาสตร์สูง จะทำให้การฉีดเป็นฝอยไม่ดี ละอองน้ำมันมีขนาดใหญ่ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไป จะทำให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมาก แต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควรทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่นกันเนื่องจากน้ำมันรวมตัวกับอากาศได้ไม่ดี ประสิทธิภาพด้านกำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลง

1.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

หมายถึง ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่อหน่วยปริมาตร โดยได้จากอัตราส่วน มวลต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงต่อมวลของปริมาตรน้ำซึ่งค่านี้ จะขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำและเชื้อเพลิง ค่าความถ่วงจำเพาะของไบโอดีเซลควรมีค่าใกล้เคียงกันกับมาตรฐานของน้ำมันดีเซล เพื่อให้เกิดการผสมเข้ากันได้

ดีซึ่งหากค่าความถ่วงจำเพาะมีความแตกต่างกันมากระหว่างสาร 2 ชนิดที่ผสมกัน จะทำให้เกิดการนอนกันหรือผสมกันได้ไม่ดี ทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่ผสมผิดเพี้ยน และไม่มีค่าคงตัว

1.3 จุดวาบไฟ (Flash point)

หมายถึง อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ไอของสารติดไฟและลุกไหม้เมื่อมีเปลวไฟจ่ออยู่ที่ผิวหน้าของสาร ถ้าเอาเปลวไฟออกสารจะไม่ลุกไหม้อีกต่อไปซึ่งจะมีความสำคัญในด้านการป้องกันอันตรายจากอัคคีภัยในการเก็บรักษาแต่ไม่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยปกติแล้วอุณหภูมิจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล (Tyson, 2004) แต่อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลอาจมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าปกติได้หากในผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์จากกระบวนการผลิตหลงเหลือหรือเจือปนอยู่ซึ่งควรต้องกำจัดออกเพื่อให้มีจุดวาบไฟสูง ปลอดภัยในการขนส่งเชื้อเพลิง

1.4 จุดขุ่นมัวหรือจุดหมอก (Cloud point)

หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มปรากฏให้เห็นกลุ่มหมอกจากการตกผลึกของแว็กซ์ (Wax) ในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการทำให้อุณหภูมิเย็นลงภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ หากน้ำมันมีจุดขุ่นมัวหรือจุดหมอกสูงเกินไป จะทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย มีแว็กซ์ก่อตัวอยู่ตามจุดต่างๆ ของท่อ ทำให้การฉีดพ่นน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยากในห้องเครื่องยนต์ และเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จนกระทั่งก่อให้เกิดควันที่ท่อไอเสียได้

1.5 จุดไหลเท (Pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้เมื่อได้รับความเย็นในเครื่องมือการหาจุดไหลเทซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการไหลของน้ำมันภายในท่อน้ำมันของรถยนต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ น้ำมันเชื้อเพลิงไม่ควรมีจุดไหลเทสูงเนื่องจากในสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมในประเทศเขตหนาวจะทำให้น้ำมันชนิดนั้นไม่สามารถไหลผ่านท่อต่างๆ ได้จนส่งผลให้เครื่องยนต์สตาร์ทไม่ติด อย่างไรก็ตามจุดไหลเทของไบโอดีเซลขึ้นกับความอึดตัวของน้ำมันโดยที่น้ำมันที่มีความอึดตัวสูง จะมีจุดไหลเทสูงเช่นกัน

1.6 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment)

หมายถึง ปริมาณน้ำและอนุภาคของตะกอนหรือของแข็งในเกณฑ์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้ซึ่งโดยปกติตามมาตรฐานสากลของไบโอดีเซลจะมีค่าเท่ากับน้ำมันดีเซล ซึ่งหากในน้ำมันมีปริมาณน้ำและตะกอนเจือปนอยู่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการสึกกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์สั้นลง

1.7 ค่าซีเทน (Cetane number)

ค่าซีเทนเป็นค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติในการจุดติดไฟ (Ignition quality) ของน้ำมัน โดยที่น้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงจะมีระยะเวลาในการจุดติดไฟสั้นซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่ายแม้ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เครื่องยนต์ร้อนได้เร็วขึ้นโดยไม่เกิดการสะดุด ไม่เกิดควันขาว คราบยางเหนียว (Varnish) และคราบเขม่าในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามน้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงเกินไปอาจทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จนกระทั่งทำให้เกิดควันที่ท้อไอเสียได้

1.8 กากคาร์บอน (Carbon Residue)

กากคาร์บอนคือ ปริมาณของสารที่เหลือตกค้างอยู่หลังจากน้ำมันดีเซลได้ระเหยออกไปหมดแล้วที่อุณหภูมิสูงๆ ถ้าน้ำมันมีค่าของกากคาร์บอนสูงเกินไปก็จะเป็นไปได้ที่จะเกิดคราบเขม่าสะสมในห้องเผาไหม้ได้มาก และไอเสียมีควันดำมากด้วย

1.9 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันในน้ำมันดีเซลเมื่อเผาไหม้กับอากาศ จะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นกลายเป็นกรดกำมะถัน กัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอเร็วกว่าปกติ การสึกหรอนี้จะไม่มีมากถ้าเครื่องยนต์ทำงานเต็มกำลังความเร็วคงที่ และอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์สูงๆ เช่น เครื่องยนต์เรือเดินทะเลหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงาน เครื่องยนต์ประเภทนี้สามารถใช้น้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันสูงๆ ได้

ตารางที่ 2 รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

Parameters	Standard value		Method
Methyl ester (%wt)	Min	96.5	EN 14103
Density at 15 °C (kg/m ³)		860-900	ASTM D 1298
Viscosity at 40 °C (cSt)		3.5-5.0	ASTM D 445
Flash point (°C)	Min	120	ASTM D 93
Sulphur (%wt)	Max	0.0010	ASTM D 2622
Carbon residue, on 10% distillation residue (%wt)	Max	0.30	ASTM D 4530
Cetane number (-)	Min	51	ASTM D 613
Sulfated Ash (%wt)	Max	0.020	ASTM D 874
Water (%wt)	Max	0.050	ASTM D 2709
Total contaminate (%wt)	Max	0.024	ASTM D 5452
Copper strip corrosion (-)	Max	No.1	ASTM D 130
Oxidation stability at 110 °C (h)	Min	6	EN 14112
Acid value (mgKOH/g)	Max	0.50	ASTM D 664
Iodine value (g Iodine/100g)	Max	120	EN 14111
Linoleic acid methyl ester (%wt)	Max	12.0	EN 14103
Methanol (%wt)	Max	0.20	EN 14110
Monoglyceride (%wt)	Max	0.80	EN 14105
Diglyceride (%wt)	Max	0.20	EN 14105
Triglyceride (%wt)	Max	0.20	EN 14105
Free glycerin (%wt)	Max	0.020	EN 14105
Total glycerin (%wt)	Max	0.25	EN 14105
Alkaline metals (mg/kg)	Max	5.0	EN 14108 & EN14109
Alkaline earth metals (mg/kg)	Max	5.0	prEN 14538
Phosphorus (%wt)	Max	0.0010	ASTM D 4951
Additive	As approved by Director General.		

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

2. สูตรการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในประเทศ

2.1 B2 (ไบโอดีเซล 2%: ดีเซล 98%) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะบังคับใช้ทั้งมลรัฐในปี 2548

2.2 B5 (ไบโอดีเซล 5%: ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5

2.3 B20 (ไบโอดีเซล 20%: ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติและสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ (Alternative Motor Fuels Act:AMFA 1988) ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะบริษัทและรถของหน่วยงานราชการกว่า 147 แห่ง รวมทั้งการใช้น้ำมันในพื้นที่ที่ต้องคำนึงถึงมลพิษเป็นพิเศษ เช่น รถรับส่งนักเรียน รถประจำทาง เรือ หรือเครื่องจักรกลที่ใช้ในเมืองแร่ ทั้งที่ได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตระบบหัวฉีดน้ำมันและเครื่องยนต์

2.4 B40 (ไบโอดีเซล 40%: ดีเซล 60%) เป็นสูตรที่ใช้ในรถขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศสทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ

2.5 B100 (ไบโอดีเซล 100) เป็นน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 100 ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ไบโอดีเซลที่ผลิตและจำหน่ายเป็นการค้าในประเทศต้องมีคุณภาพมาตรฐานกำหนด ปัจจุบันสำหรับสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานกำหนด ASTM D 6751 สหภาพยุโรปได้กำหนดมาตรฐาน EN 14214 ประเทศเยอรมันได้กำหนดมาตรฐาน DIN 51606 ส่วนประเทศไทยมีการผลิตไบโอดีเซลในระดับโรงงานที่อำเภอคอนสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีกำลังการผลิต 30,000 ลิตรต่อวัน โดยใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นการผลิตเพื่อใช้ในกิจการของตนเองโดยใช้กับเรือเฟอร์รี่ และใช้ในการศึกษาวิจัย (หนึ่งฤทัย, 2547)

สำหรับวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมในประเทศไทย ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้เริ่มต้นสำหรับผลิตไบโอดีเซลมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เนื่องจากชนิดและองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันเช่น ความอึดตัวของกรดไขมันและขนาดของโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น และเนื่องจากในปัจจุบันการผลิตและใช้ไบโอดีเซลกำลังได้รับความสนใจอย่างมากโดยเฉพาะไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่ให้น้ำมันที่มีคุณภาพดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น เจริญเติบโตได้ดีในทุกสภาวะ และน้ำมันสบู่ดำเองก็สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้้ำมันพืชชนิดอื่นๆ

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสบู่ดำ

สบู่ดำ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas L.* ชื่อสามัญคือ Phisic nut เป็นพืชจัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกันกับยางพารา ละหุ่ง และมันสำปะหลัง มีน้ำยางสีขาวใส ลื่น ๆ เป็นฟอง มีคุณสมบัติคล้ายสบู่อยู่ในทุกส่วนของลำต้น “สบู่” เป็นภาษาโปรตุเกส หมายถึง ต้นไม้ชนิดหนึ่งที่ใช้ไขมันจากเมล็ดมาเป็นส่วนผสมในการทำสบู่ สำหรับชำระล้างร่างกาย และซักล้างเสื้อผ้า ของใช้ มีบันทึกไว้ว่าค้นพบโดย พ่อค้าชาวโปรตุเกสที่เดินเรือไปทวีปอเมริกากลาง และนำเข้ามาในทวีปเอเชีย และแพร่มายังประเทศไทยสมัยกรุงศรีอยุธยาตอนปลาย ราว ๆ 300 ปีก่อน โดยมีการแนะนำให้ผู้คนสมัยนั้นปลูกและพ่อค้ารับซื้อเมล็ดไปทำสบู่ ในทวีปแอฟริกา สมัยก่อนปลูกกันมากที่แหลม Verde ในที่ดินที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์และเป็นแนวเขตรั้วบ้าน คอกสัตว์ หรือบริเวณหลุมฝังศพ เพื่อกันสัตว์ไม่ให้เข้าไปคุ้ยเขี่ย สำหรับในประเทศไทยมีรายงานว่า เคยมีการปลูกเป็นรั้วบ้าน ในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ โดยผู้เฒ่า ผู้แก่ใช้ยางใส ๆ ที่หักออกจากก้านใบ หรือส่วนยอดใช้ทาแผลสด โดยเฉพาะแผลที่ปากให้เด็ก ๆ ที่เป็นโรคปากนกกระจอก หรือใช้กวาดลิ้นเด็กที่เป็นฝ้าขาว และใช้เนื้อในเมล็ดสีขาวเสียบไม้ จุกแทนเทียนไข ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากขาดแคลนน้ำมันก๊าดที่ใช้จุดตะเกียง

สบู่ดำ มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น เช่น ภาคเหนือ เรียก มะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียก หมากเฒ่า มะเขย หรือสีหลอด ภาคใต้เรียก หงส์เทศ (เพราะต้นโต) และภาคกลางเรียก สบู่ดำ ชาวเขาเรียก ไท้ยู หรือเกงยู (เพราะน้ำมันมีสีดำ) พม่าเรียก แก๊ทซู เขมรเรียก ทะวอง จีนกลางเรียก หม่าฟ่งฮู้ แต่จิ๋วเรียก มั่วฮองฮิว ญี่ปุ่นเรียก บูราคิริ และภาษาอังกฤษเรียก

physic nut หรือ purging nut (*Jatropha* spp.) พืชสกุลนี้จัดเป็นไม้สกุลใหญ่ กระจายอยู่ในเขตร้อน และกึ่งร้อน จเร สดากกร (2527) รายงานว่า พบสบู่ดำ 175 ชนิด ในอินโดจีน พบ 4 ชนิด 3 ชนิด พบในพม่าและมาเลเซีย ในประเทศไทยเองพบ 5 ชนิด คือ *J. gossypifolia* (สบู่แดง) *J. podagrica* (หนุมานนั่งแท่น) *J. integerima* (ปัดดาเวีย) *J. multifida* (มะละกอฝรั่ง ฝิ่นคั่น) และ *J. curcas* (สบู่ดำ) (นันทวรรณ, 2549)

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

สบู่ดำ เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2 – 7 เมตร มีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae เช่นเดียวกับยางพารา สบู่แดง ปัดดาเวีย มะละกอฝรั่ง หนุมานนั่งแท่น ไป้ยเซียน มันสำปะหลัง มะยม มะขามป้อม ผักหวานบ้าน เป็นต้น (อนุวัฒน์, 2549)

1.1 ลำต้น

มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทา-น้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม่มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส

1.2 ใบ

เป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้ารูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก

1.3 ดอก

ลักษณะดอกมีช่อดอกแบบ panicle หรือ panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรอง และกลีบดอก อย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง 2 วง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อ ที่ซอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมีย (อัตราดอกตัวผู้ : ดอกตัวเมีย เท่ากับ 6-7 : 1) ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน

มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่จะติดผลเพียง 8-14 ผล

1.4 ผล

ผลที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลือง คล้ายลูกจันทน์ ดังภาพที่ 1 (ก. และ ข.) ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ผลมีขนาดปานกลาง กว้าง 2 – 3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตร ผลมี 3 พูๆ ละ 1 เมล็ด เมื่อสุกแก่ผลจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัม มีจำนวน 85-90 ผล

1.5 เมล็ด

รูปกลมรี เปลือกนอกสีดำ ดังภาพที่ 1 (ค.) เนื้อในสีขาว มีสารพิษ (curcin) หากบริโภค จะเกิดอาการอาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300-1,500 เมล็ด



(ก.)

(ข.)

(ค.)

ภาพที่ 1 ลักษณะผลและเมล็ดสบู่ดำ

ที่มา: อาภาณี (2549)

2. ประโยชน์และโทษของสบู่ดำ

2.1 ประโยชน์ของสบู่ดำ (นิรนาม, 2548 ข)

ทุกส่วนของลำต้นรวมทั้งเมล็ดของสบู่ดำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย

2.1.1 ราก น้ำต้มรากกินเป็นยาแก้ท้องเสีย ใช้ทาถูนิ้ว แสบปวดตามข้อ (อวยพร 2548)

2.1.2 ใบและเปลือกไม้ ใบอ่อนสามารถนำมาแห้ง หรือต้มรับประทานได้อย่างปลอดภัย ส่วนเปลือกไม้สามารถนำมาสกัดเอาแทนนิน (Tannin) ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนังได้

2.1.3 เมล็ด ใช้เป็นยาถ่าย ยาระบาย

2.1.4 กากเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่เหลือจากการหีบเอาน้ำมันไปใช้แล้ว จะนำมาอัดเป็นก้อน ส่วนนี้จะมีเคอร์ซิน (Curcin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่เป็นพิษ เหมือนกับไรซิน (Ricin) ในละหุ่ง ไม่เหมาะที่จะนำมาเลี้ยงสัตว์ แต่เหมาะที่จะนำมาทำปุ๋ย หรือนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่อง Steam Turbine สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.5 น้ำมัน น้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำเป็นผลผลิตที่สำคัญของสบู่ดำ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการดังนี้

ก. ทำเครื่องสำอางและถนอมผิว น้ำมันจากเมล็ดสามารถนำมาทาแก้โรคผิวหนังพร้อมทั้งสามารถบรรเทาอาการปวดข้ออันเนื่องมาจากรูมาตอยด์ได้ด้วย กรดลิโนลิคในน้ำมันสบู่ดำมีอยู่ประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ มีความน่าสนใจในการนำมาทำเป็นครีมถนอมผิว

ข. สารเคมีกำจัดศัตรูพืช น้ำมันและสารสกัดจากน้ำมันสบู่ดำ สามารถนำมาใช้กำจัดศัตรูพืชได้ โดยมีตัวอย่างในการนำไปใช้ในการควบคุมแมลงศัตรูพืช โดยเฉพาะหนอนเจาะปอฝ้าย สารสกัดจากสบู่ดำ ซึ่งประกอบด้วยสารพิษบางชนิด มีการทดลองนำไปใช้ในการควบคุมพยาธิในหอยที่นำมาบริโภค

ค. ทำสบู่ มีการนำเอาน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำมาผลิตสบู่ โดยการนำน้ำมันมาต้มกับโซดา มีการทดลองในห้องปฏิบัติการของบริษัท ตาตา ออยล์ มิลล์ จำกัด (TaTa Oil Mills Co.Ltd.) ในเมืองบอมเบย์ ประเทศอินเดีย โดยการนำส่วนผสมที่ประกอบด้วยน้ำมันสบู่ดำที่มีส่วนผสมของไฮโดรเจน (Hydrogenated Physic nut) 75 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันสบู่ดำบริสุทธิ์ 15 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมันมะพร้าว 10 เปอร์เซ็นต์ ผลิตเป็นสบู่ที่มีฟองและมีค่าพีเอชเป็นกลาง ใช้สำหรับทำความสะอาดร่างกายได้

ง. น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับจุดไฟ เชื้อเพลิงในการปรุงอาหาร และน้ำมันไบโอดีเซล (นิรนาม, 2548 ก) จากผลการวิจัยรายงานตรงกันว่า น้ำมันที่สกัดได้จากสบู่ดำสามารถนำมาใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องเพิ่มส่วนผสมอื่นๆ เหมาะกับเครื่องยนต์สูบลมเดี่ยวรอบต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของเครื่องจักรกลการเกษตร นอกจากนี้ยังมีปริมาณค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซลและไม่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ อีกทั้งสามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำมันดีเซลและเบนซิน

นอกจากนี้การใช้น้ำมันสบู่ดำแปรรูปเป็นเมทิล หรือ เอทิลเอสเทอร์ สำหรับผสมน้ำมันดีเซลกำลังเป็นที่กล่าวถึงและศึกษาวิจัยโดยทั่วกันเนื่องจากน้ำมันสบู่ดำให้ผลผลิตที่มีคุณภาพไบโอดีเซลที่ดีและมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ อยู่หลายประการเช่น ให้ไบโอดีเซลที่มีค่าซีเทนสูง และมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในปริมาณสูงดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งถือเป็นข้อดีต่อคุณภาพของน้ำมัน เป็นต้น

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของกรดไขมันที่พบในน้ำมันสบู่ดำ

Fatty acid	Composition (%wt)
Myristic acid (C14:0)	0.18
Palmitic acid (C16:0)	11.4
Palmitoleic acid (C16:1)	0.44
Stearic acid (C18:0)	2.27
Oleic acid (C18:1)	45
Linoleic acid (C18:2)	40.3
Linolenic acid (C18:3)	0.11
<i>cis</i> -11-Eicosenoic acid (C20:1)	0.12
<i>cis</i> -11,14-Eicosadienoic acid (C20:2)	0.11

ที่มา: Martínez-Herrera *et al.* (2006)

2.2 โทษของสบู่ดำ

ต้น ใบ ผล และเมล็ดของสบู่ดำ มีสารพิษเป็นกรดที่เรียกว่าไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic) เช่นเดียวกับมันสำปะหลัง มีกลิ่นเหม็นเขียว ทำให้สัตว์เลี้ยง เช่น โค กระบือ ม้า แพะ และแกะ ไม่เข้าไปใกล้และกัดกินสบู่ดำ (อวยพร, 2548) นอกจากนี้ ยังพบว่าเมล็ดสบู่ดำยังมีสารพิษที่เรียกว่า เคอร์ซิน (Curcin) และสารพอก เรซิน (Resin) เจือปนอยู่ หากบริโภคแล้วจะทำให้ท้องเดิน มีฤทธิ์คล้ายสลดและถ้าบริโภคในปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิต จากรายงานศูนย์วิจัยมะเร็งแห่งประเทศเยอรมัน ได้ทำการวิจัยค้นคว้า พบว่าน้ำมันสบู่ดำมีสารที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเป็นสารกระตุ้นทำให้เกิดเนื้องอกหากสัมผัสในระยะยาวได้ (ทวีศักดิ์, 2548)

3. การใช้น้ำมันสบู่ดำเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล

การใช้สบู่ดำเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล โดยหลักการแล้วสามารถแยกได้ 2 ประเภท

3.1 ไบโอดีเซลสบู่ดำ

ไบโอดีเซลสบู่ดำ หรือเอสเทอร์สบู่ดำ ปัจจุบันมีการส่งเสริมค่อนข้างมากในประเทศอินเดีย เพื่อทดลองใช้กับยานยนต์ เช่น รถไฟ รถยนต์ ฯลฯ คุณสมบัติของไบโอดีเซลสบู่ดำจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ทำให้สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่ปัญหาที่สำคัญคือเกษตรกรไม่สามารถที่จะผลิตไบโอดีเซลสบู่ดำด้วยตนเองได้

3.2 น้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำ คือน้ำมันพืช (straight vegetable oil, SVO) ที่ได้จากการบีบอัดเมล็ดสบู่ดำ ปัจจุบัน บางประเทศในทวีปแอฟริกา ซึ่งน้ำมันดีเซลมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับรายได้ของเกษตรกร ได้มีการทดลองให้เกษตรกรเก็บเกี่ยวสบู่ดำที่ปลูกตามหัวไร่ปลายนา และบีบอัดน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องมือที่ใช้แรงงานคน แล้วนำไปตกตะกอนและกรองละเอียด เพื่อนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้ในการต่างๆ ที่ไม่สามารถทดแทนด้วยแรงงานคนหรือแรงงานสัตว์ได้ เช่น สูบน้ำ ปั่นไฟฟ้า ฯลฯ อย่างไรก็ตามแนวคิดทำนองนี้กรมวิชาการเกษตรเคยพยายามถ่ายทอดให้เกษตรกรไทยปฏิบัติตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 แต่ก็ไม่ได้รับการยอมรับจากเกษตรกร เพราะขณะนั้นประเทศไทยเริ่มเข้าสู่ยุคของการขาดแคลนแรงงานภาคการเกษตร ค่าจ้างแรงงานภาคการเกษตรมีราคาสูงใกล้เคียงกับค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำ ขณะที่การเก็บเกี่ยวสบู่ดำ และการบีบอัดน้ำมันสบู่ดำต้องใช้แรงงานและเวลาค่อนข้างมาก

อย่างไรก็ตามมีคุณสมบัติข้อสำคัญที่น้ำมันสบู่ดำต่างจากมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วค่อนข้างมาก ได้แก่ค่าความหนืด (kinematic viscosity) ซึ่งน้ำมันสบู่ดำมีค่าความหนืดสูงถึง 50.7 centistoke ขณะที่มาตรฐานดีเซลหมุนเร็วอยู่ราว 1.8 - 5.0 centistoke แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งถ้าใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิง อาจจะทำให้การฉีดน้ำมันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ และอาจเกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วถ้าจะใช้น้ำมันสบู่ดำต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ให้มีการอุ่นน้ำมันให้มีความหนืดลดลง และมีการดัดแปลงอื่นๆ อีก เช่น เปลี่ยนกรองน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น แม้ว่าจะมีรายงานการทดลองในประเทศไทยตั้งแต่ปี 2525 ว่าสามารถใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรที่ไม่ผ่านการดัดแปลง

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วของไทย

คุณสมบัติ	สบู่ดำ	มาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว
Specific gravity	0.9188	0.82 - 0.90
Flash point (°C)	240	ไม่ต่ำกว่า 52
Cetane value	51.0	ไม่ต่ำกว่า 50
Distillation (°C)	295	ไม่สูงกว่า 370

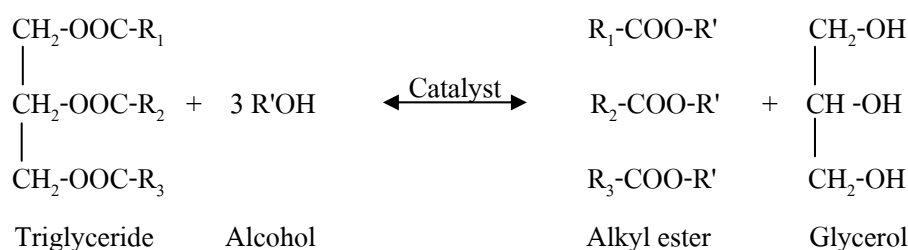
ที่มา: อัครพล (2549)

แต่ปัจจุบันเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรได้ใช้เทคโนโลยีสูงกว่าในอดีต การใช้น้ำมันสบู่ดำโดยไม่ดัดแปลงเครื่องยนต์ให้มีการอุ่นน้ำมัน และเปลี่ยนกรองน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น จะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำลง และอาจเกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ อย่างไรก็ตามถ้าเกษตรกรต้องการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปลง เพื่อลดความเสี่ยง ที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ ควรนำน้ำมันสบู่ดำไปผ่านกระบวนการตกตะกอนและกรองละเอียด และใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตรา 1 ต่อ 20 เพื่อให้ค่าความหนืดของน้ำมันที่ผสมแล้วใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และต้องตระหนักว่าปัจจุบันยังไม่มีผู้ผลิตเครื่องยนต์ดีเซลรายใดที่รับรองเป็นทางการให้สามารถใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งถ้าเกษตรกรใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงอาจส่งผลต่อการรับประกันเครื่องยนต์ดังกล่าว (อัครพล, 2549)

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำน้ำมันสบู่ดำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันสบู่ดำกับแอลกอฮอล์และได้ผลิตภัณฑ์เป็น อัลคิลเอสเทอร์ และกลีเซอริน ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ดีและมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมอีกด้วย

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจาก Alkoxy group (-OR) ของเอสเทอร์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ในรูปอื่นตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ กระบวนการแลกเปลี่ยน Alkoxy group ระหว่างเอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ โดยที่กรดสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยให้โปรตอนแก่หมู่ Alkoxy ขณะที่เบสสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยย้ายโปรตอนจากแอลกอฮอล์ สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สารประกอบไตรกลีเซอไรด์ จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้อัลคิลเอสเทอร์ หรือเรียกโดยทั่วไปว่าไบโอดีเซล ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: อาภาณี (2549)

กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ผลิตโดยใช้น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ โดยกระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์ กับแอลกอฮอล์เพื่อก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ เป็นกลีเซอรอล และอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ทำให้ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้ลดลง

ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เข้ามาช่วยเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยการลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (Activation energy) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาอะตะไลซิส (Catalysis reaction) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ปฏิกิริยาอะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalytic reaction) ปฏิกิริยาอะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic reaction) และปฏิกิริยาอะตะไลซิสโดยเอนไซม์ (Enzyme catalytic reaction)

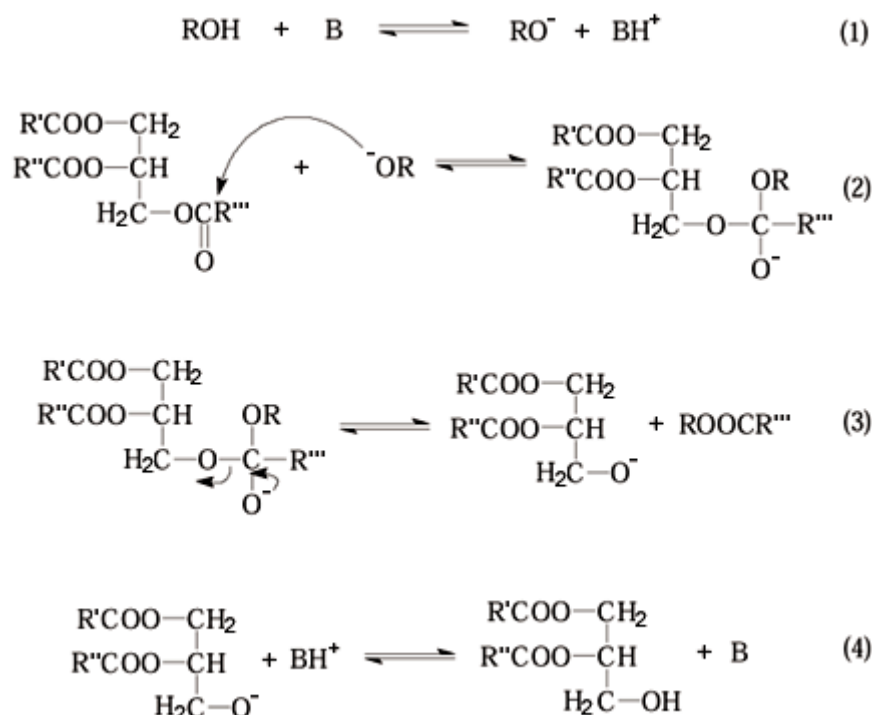
อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้น ปริมาณและคุณภาพเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ขึ้นกับหลายปัจจัยประกอบกัน ได้แก่ ปริมาณและการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม อัตราส่วนการใช้แอลกอฮอล์กับน้ำมันพืช อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คุณภาพของวัตถุดิบ และปริมาณกรดไขมันอิสระที่เจือปนมากับน้ำมันวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการผลิตแต่ละกระบวนการอาจถูกดำเนินไปภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบและตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด ให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงในระยะเวลาอันสั้นซึ่งส่วนมากมักเลือกใช้สารประกอบอัลคอกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ (Alkaline metal oxide alkoxides and hydroxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Schuchardt *et al.*, 1998)

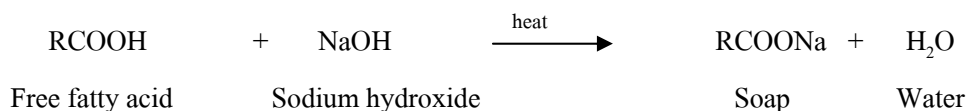
กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 3 ขั้นตอนที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นอัลคอกไซด์ (alkoxide, RO^-) และโปรตอนเนต (protonated catalyst, BH^+) จากนั้นอัลคอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (tetrahedral intermediate) แสดงดังขั้นตอนที่ 2 โดยสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอลจะเปลี่ยนไปเป็นอัลคิลเอสเทอร์และแอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังขั้นตอนที่ 3 จากนั้นแอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโปรตอนเนตเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์และให้ตัวเร่งเบสกลับคืนมาแสดงดังขั้นตอนที่ 4 ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาจะกลับไปขั้นตอนที่ 1 ใหม่ สุดท้ายจะให้กลีเซอรอลและอัลคิลเอสเทอร์ออกมา



ภาพที่ 3 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Schuchardt *et al.* (1998)

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นที่นิยมมากในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกและเป็นตัวเร่งที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว แต่ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ปฏิกิริยาจะมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระ โดยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเกิดเป็นสบู่ หรือเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification) แสดงดังภาพที่ 4 การเกิดสบู่ไม่เพียงแต่ทำให้สิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันเท่านั้น แต่สบู่จะทำให้เกิดคอลลอยด์ (ของผสมสองชนิดที่ไม่ละลายผสมกัน) ซึ่งเป็นผลทำให้การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับ ไบโอดีเซลทำได้ยากขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมาใช้เป็นวัตถุดิบ จึงควรที่จะไล่น้ำออกก่อน และควรที่จะกำจัดกรดไขมันอิสระอีกด้วย



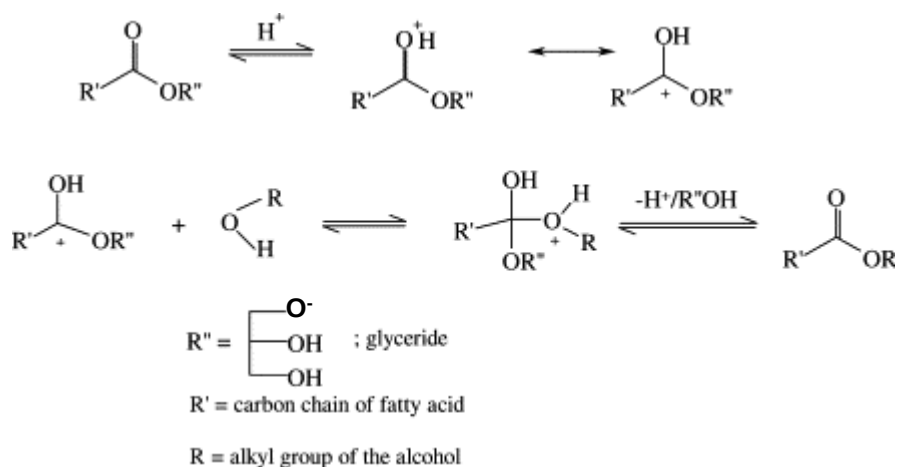
ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาสaponification ของกรดไขมันอิสระ

ที่มา: อาภาณี (2549)

1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ชนิดกรด

จากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีข้อเสียคือในระบบมีกรดไขมันอิสระมากจะทำให้การผลิตนั้นได้ไบโอดีเซลในปริมาณที่ไม่มากนัก ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดแทน แต่การใช้ตัวเร่งที่เป็นกรดก็มีข้อเสียคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปช้ามาก เวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจึงใช้เวลานาน จากการทดลองของ Freedman (1984) เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำมัน) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 30 ต่อ 1 และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 69 ชั่วโมง น้ำมันพืชจะเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้ 90 เปอร์เซ็นต์

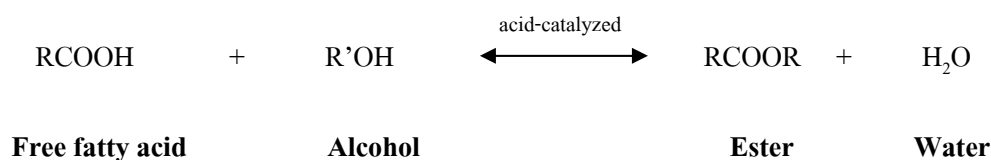
กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 5 ขั้นแรกโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ของโมโนกลีเซอไรด์เกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน (carbocation) จากนั้นคาร์โบแคตไอออนจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (tetrahedral intermediate) และเมื่อกำจัดกลีเซอรอลและโปรตอนออกก็จะได้เอสเทอร์ สำหรับกลไกปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์สามารถอธิบายได้จากภาพที่ 5 เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Schuchardt *et al.* (1998)

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดี คือ เป็นตัวเร่งที่มีราคาถูก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) เปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่มีมากในน้ำมันที่ผ่านการปรุงอาหารแล้วให้เป็นเอสเตอร์ได้แสดงดังภาพที่ 6 แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยก็คือ น้ำ ซึ่งน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้เอสเตอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันลดลง (Kusdiana and Saka, 2004) และข้อจำกัดในการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญอีกอย่างก็คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำมาก จึงใช้เวลานานกว่าที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 6 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

ที่มา: อาภาณี (2549)

1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอ็นไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีทั้งแบบเอกพันธุ์และแบบวิวิธพันธุ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธุ์ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิด Mobilized enzyme แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็น Immobilized enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ปัจจุบันมีการศึกษาโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยามีความจำเพาะสูง ง่ายต่อการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกลีเซอริน แต่มีข้อจำกัดที่ต้องควบคุมค่า pH อุณหภูมิที่ใช้ และมีต้นทุนสำหรับกระบวนการนี้สูง (Fukuda *et al.*, 2001)

1.4 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้นซึ่งสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น ทำให้ไม่มีไออนบวกซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสบู่ละลายเจือปนอยู่ในระบบ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ยังสามารถนำมารองหรือตกตะกอนแยกออกจากปฏิกิริยาได้โดยง่ายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น และโดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสสำหรับเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมากกว่าเนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่า เบสมีความว่องไวในปฏิกิริยามากกว่าและใช้สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ง่ายกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสยังคงมีความหลากหลายให้เลือกใช้งานได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 8 ประเภทดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสที่ใช้ในอุตสาหกรรม

Type	Typical catalyst	Details of the catalyst
Single metal oxide	Alkaline earth oxide	MgO, CaO, SrO, BaO
	Rare earth oxide	La ₃ O ₃ , YbO ₂
	Transition metal oxide	ZrO ₂
Mixed oxide	Mg-Al mixed oxide	MgO-Al ₂ O ₃
	Mg-Ti mixed oxide	MgO-TiO ₂
Zeolite	Alkali ion-exchanged zeolite	Cs-exchanged zeolite X, Y
	Alkali metal or metal oxide occluded zeolite	Cs-occluded zeolite X, Y
Mesoporous material	Modified mesoporous material	MgO/SBA-15
	Functionalized mesoporous	MCM-41 functionalized with amino groups
	Mesoporous silicon oxynitride	-
Supported catalyst	Compound: Na, K, KF, KNO ₃ , K ₂ O	KF/Al ₂ O ₃ , Na/NaOH/Al ₂ O ₃ ,
	Support: C, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ , MgO	Na/MgO
Clay and modified clay	Hydrotalcite, calcined and rehydrated hydrotalcite	Mg-Al hydrotalcites
	Chrysotile	-
	Sepiolite	Magnesium silicate
Oxynitride	Silicon oxynitride	SiON
	Aluminophosphate oxynitride	AlPON
	Zirconophosphate oxynitride	ZrPON
Other	Modified natural phosphate (NP)	Calcined NaNO ₃ /NP

ที่มา: Li (2005)

2. แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันคือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล โดยเฉพาะเมทานอลถูกใช้มากที่สุดเพราะมีราคาถูกอีกทั้งยังมีข้อดีในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพและด้านเคมี คือ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีขั้ว ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของเมทานอลสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอไรด์ได้อย่างรวดเร็วและสามารถละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ตามสัดส่วนของปฏิกิริยาเคมีพบว่าเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 3:1 แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น หลังปฏิกิริยาลิ้นสุดผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของผสมระหว่าง เอสเทอร์ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ไตร-, ได-, และโมโนกลีเซอไรด์ เพราะฉะนั้นการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์จึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก เพราะถ้าไบโอดีเซลมีส่วนผสมของโมโนกลีเซอไรด์จะทำให้ไบโอดีเซลเกิดการแข็งตัวง่าย ทั้งนี้ถ้ามีสิ่งเจือปนอยู่ในไบโอดีเซลก็จะทำให้จุดหมอก (Cloud Point) และจุดไหลเท (Pour Point) มีค่าสูงขึ้นด้วย (Ma and Hanna, 1999)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

3.1 ผลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (NaOH ,KOH ,คาร์โบเนต เป็นต้น) กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสมเพราะน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบูขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาดังแสดงในภาพที่ 4 สบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง นอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลคือทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้น ทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจล และ ยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลด้วย

จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ทำให้ปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดสบู นอกจากน้ำแล้วยังมี กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ที่มีอยู่ในน้ำมันวัตถุดิบ ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันวัตถุดิบควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เพราะการมีกรดไขมันอิสระในน้ำมันวัตถุดิบที่มากเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) น้อยลง (Ramsdhas *et al.*, 2005)

แต่สำหรับสำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่ค่าความเป็นกรดสูง (มากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อกรัม) จะต้องนำน้ำมันมาทำการลดค่าความเป็นกรดลง โดยให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Acid esterification) ดังแสดงในภาพที่ 6 แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ (Ramadhas *et al.*, 2005)

3.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ เพราะฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้นซึ่งก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นเช่นกัน โดยในภาพที่ 2 สัดส่วนในปฏิกิริยาพบว่าต้องใช้ 3 โมลของแอลกอฮอล์ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ ดังนั้นยังใช้อัตราส่วนมากเท่าไรก็จะทำให้ได้เอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้นเท่านั้นและภายในเวลาที่สั้นลงด้วย จึงมักใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่อัตราส่วน 6:1 ถึง 9:1 (อาภาณี, 2549)

3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งสามารถแบ่งได้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เบส กรด หรือ เอนไซม์ กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าเมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่งแต่อย่างไรก็ตามกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิสระในปริมาณมากและมีน้ำผสมอยู่ด้วยการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่า (Ma and Hanna, 1999) โดยในตารางที่ 6 คือตารางที่เปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เบส กรด และเอนไซม์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ความเข้มข้น 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ (yield) 94 – 99 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสไม่ได้เป็นการช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้น แต่กลับเพิ่มค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาเบสออกจากผลิตภัณฑ์ (Agarwal, 2006)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เบส กรด และเอนไซม์

ตัวแปร	ตัวเร่งชนิดเบส	ตัวเร่งชนิดกรด	เอนไซม์ไลเปส
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60 - 70	55 - 80	30 - 40
กรดมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
น้ำในน้ำมัน	มีผลกระทบต่อ เกิดปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อ เกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การ Recovery กลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้าง
ราคา	ถูก	ถูก	ค่อนข้างแพง

ที่มา: Marchetti *et al.* (2005)

3.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลา นั่นคือถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากขึ้นเช่นกัน อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เช่นกันภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้เช่น ถ้าเป็นเมทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 60 – 70 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Agarwal, 2006)

3.5 ผลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพราะน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกันปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงจะเกิดและได้เป็นไบโอดีเซล (Meher *et al.*, 2006)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ถือเป็นส่วนที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมต้องมีความว่องไวในเชิงปฏิกิริยา มีความคงตัว และสามารถบังคับไม่ให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม องค์ประกอบทางเคมีจะเป็นสิ่งที่ควรพิจารณามากที่สุด แต่ปัจจัยอื่นทางด้านกายภาพปกติก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน คือ พื้นที่ผิว (Surface area) ความคงทน (Stability) และคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

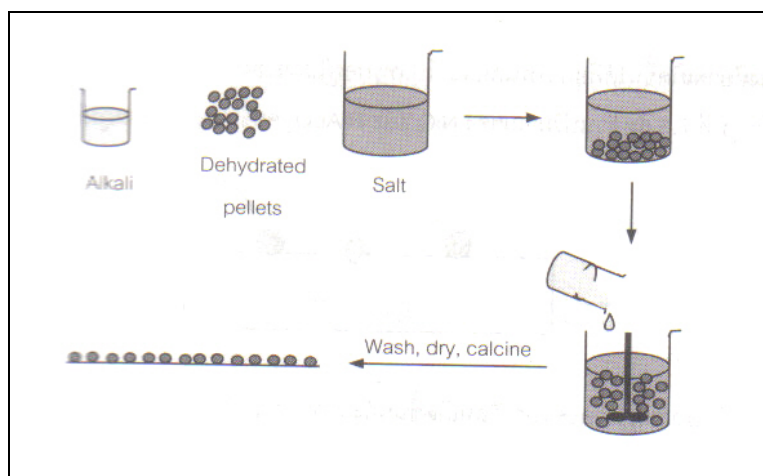
วิธีการทั่วไปของการผลิตทางอุตสาหกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นโลหะที่กระจายตัวอยู่บนตัวรองรับ (Support) เช่น อลูมินา หรือ ซิลิกา หรือสารประกอบที่อาจจะซับซ้อนมากหรือน้อยก็ตาม ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

1. วิธีการตกตะกอน (Precipitation method)

เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมน้อยกว่าวิธีการแบบฝังตัวแต่มีข้อได้เปรียบที่ว่า สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์สูงได้ ซึ่งวิธีการแบบฝังตัวทำไม่ได้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการตกตะกอนมีอยู่ 2 วิธีคือ

1.1 การตกตะกอนแบบธรรมดา (Precipitation)

เพื่อให้ได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยมีวิธีการทำโดยการเติมสารละลายที่เป็นเกลือของโลหะลงไปในสารละลายพวกอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่ง จะเกิดการตกตะกอนออกมาในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ได้เมื่อถูกทำให้ร้อน ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีการตกตะกอน
ที่มา: จตุพร และนุรักษ์ (2547)

1.2 การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

หลักการเกี่ยวกับการตกตะกอนแบบธรรมดา แต่แทนที่จะใช้โลหะเกลือเพียงอย่างเดียว ต้องใช้เกลือของโลหะมากกว่า 2 ชนิด เพื่อให้เกิดสารละลายเชิงซ้อนที่เรียกว่า “พรีเคอร์เซอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา” (Catalyst precursor) ข้อควรระวังในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบตกตะกอนคือการควบคุมสภาวะในการเตรียมเช่น pH ของสารละลาย อัตราการผสม อัตราการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมาก

2. วิธีการฝังตัว

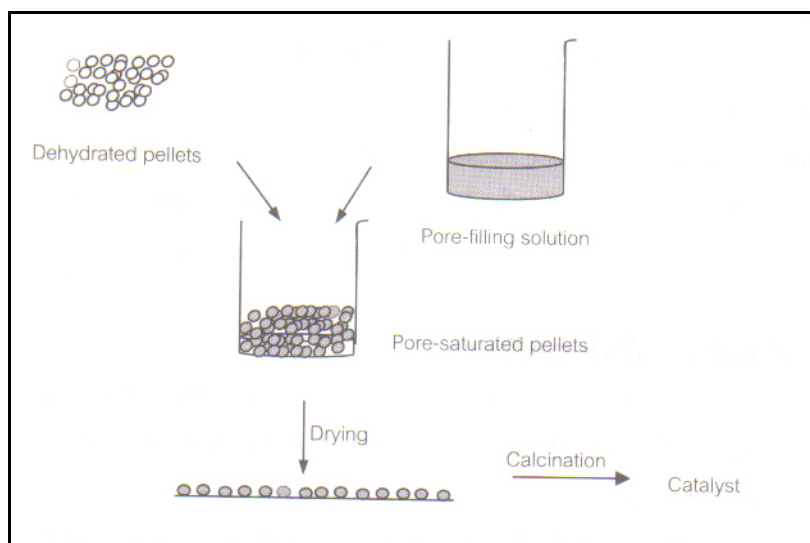
เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวรองรับที่มีรูพรุนจะสัมผัสกับสารละลายซึ่งโดยปกติจะเป็นสารละลายของสารประกอบโลหะ 1 ชนิดหรือมากกว่าและมีน้ำเป็นตัวทำละลาย หลังจากนั้น ตัวรองรับจะถูกทำให้แห้ง เช่นเดียวกับวิธีการตกตะกอน ขนาดและรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นไปตามตัวรองรับ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฝังตัวนี้ต้องการอุปกรณ์น้อยกว่าเนื่องจากไม่มีขั้นตอนการกรอง การจัดรูปร่าง และการล้าง

2.1 การฝังตัวแบบเปียก (Wet impregnation)

วิธีนี้ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินพอ ดังนั้นจะรู้ปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับก็ต่อเมื่อรู้ปริมาณของเกลือโลหะก่อนและหลังเตรียม ผลต่างของปริมาณเกลือโลหะก่อนและหลังการเตรียมจะเป็นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ ซึ่งไม่สะดวกนักที่จะเตรียมในห้องปฏิบัติการ

2.2 การฝังตัวแบบแห้ง (Dry impregnation)

การฝังตัวแบบแห้ง หรืออีกชื่อหนึ่งเรียกว่า Incipient wetness impregnation เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในทางอุตสาหกรรม ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นเหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับ หรืออาจจะน้อยกว่าเล็กน้อย เป็นการควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับ ได้อย่างถูกต้อง แต่ปริมาณสูงสุดของการเกาะแต่ละครั้งจะถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของสาร หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะถูกทำให้แห้ง และนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง หลังจากในตัวถูกละลายเข้าไปในรูพรุนแล้ว การแจกแจงของเกลือโลหะในชั้นแรก จะยังไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำให้แห้งจะพบโลหะอยู่บริเวณส่วนปลายทางเข้าของรูพรุน แต่เมื่อตัวถูกละลายเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับแล้วปล่อยทิ้งไว้ในภาชนะปิด ที่ความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัว หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป การแจกแจงเกลือของโลหะจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ โดยที่ในการดูดซับเริ่มแรกปริมาณการดูดซับยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย แต่เมื่อการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้ว ความเข้มข้นของสารละลายจะไม่มีผลต่อการดูดซับอีกต่อไป เมื่อการดูดซับอิ่มตัวแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการกำจัดตัวทำละลาย ซึ่งต้องมีการอบแห้ง ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะอาจทำให้การคาดคะเนความว่องไวของปฏิกิริยาผิดปกติไปได้ เนื่องจากรูพรุนของตัวรองรับมีขนาดแตกต่างกัน เมื่อทำการระเหยสารละลายที่อยู่ในรูพรุนที่ขนาดใหญ่กว่าจะระเหยไป เนื่องจากความดันแคปิลารีจะดันสารละลายไปอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า ด้วยเหตุนี้ในการอบแห้งปริมาณความร้อนที่ต้องเป็นไปอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการทำให้ชุ่มชื้น
ที่มา: จตุพร และนุรักษ์ (2547)

3. กรรมวิธีหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 การทำให้แห้ง

สามารถทำได้ทั้งในตู้อบ หรือตั้งทิ้งไว้ในอากาศ แต่โดยส่วนมากนิยมทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่า น้ำได้ระเหยออกจากโครงสร้างจนหมดแล้ว

3.2 การเผาที่อุณหภูมิสูง

การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการคือ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการเช่น ตัวประสาน (Binder) รวมทั้งไอออนบวก และไอออนลบที่ไม่เสถียรและระเหยได้ง่ายที่เติมลงไปในช่วงแรกเริ่ม แต่ไม่เป็นที่ต้องการในตัวเร่งปฏิกิริยาสุดท้ายที่เตรียมได้ ทั้งนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผานี้ควรจะสูงพอสมควรเพื่อทำให้เกิดสภาพการรวมตัวของผลึก แต่ต้องไม่ให้สูงมากเกินไป เนื่องจากสภาพดังกล่าวจะลดความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เป็นตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาลดลง และอาจเป็นสาเหตุของการจำกัดการแพร่กระจาย อัน

เนื่องจากขนาดของรูพรุนเล็กลง แต่ว่าเหตุที่สำคัญของการเผาที่อุณหภูมิสูงคือ ต้องเปลี่ยนรูปเกลือโลหะ ให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยทั่วไปการเลือกอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเผานั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xie *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) บนตัวรองรับซีโอไลต์ NaX (Si/Al = 1.23) โดยศึกษาผลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวของตัวรองรับ พบว่าปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10% บนตัวรองรับทำปฏิกิริยาที่สภาวะการใช้เมทานอลต่อน้ำมัน 10 ต่อ 1 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ 3% โดยน้ำหนักสามารถผลิตไบโอดีเซลได้สูงสุด ร้อยละ 85.6

Kim *et al.* (2004) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพพันธุ์ Na/NaOH/ γ - Al_2O_3 เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อศึกษาหาสภาวะการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยใช้ร่วมกับนอร์มอลเฮกเซน (n-hexane) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C และให้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ Na/NaOH/ Al_2O_3 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิพพันธุ์ในการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับตัวทำละลายร่วมที่สภาวะเดียวกันจะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้สูงเท่ากับการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

Jitputti *et al.* (2005) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพพันธุ์ชนิดกรด และ เบส สำหรับทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวกับเมทานอลเพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์สแตนเลสปริมาตร 300 มิลลิลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดก่อนนำมาใช้จะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งหลังจากทำการศึกษาภายในระบบที่มีการกวนด้วยความเร็ว 350 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 200 °C ในทุกการทดลอง พบว่าสำหรับน้ำมันปาล์มตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไบโอดีเซล โดยตัวเร่งปฏิกิริยารายลำดับตามความว่องไวต่อปฏิกิริยาจากมากไปหาน้อยคือ $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2 > \text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2 > \text{ZnO} > \text{KNO}_3/\text{ZrO}_2 > \text{KNO}_3/\text{KL zeolite} > \text{ZrO}_2$ และสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เรียงตามความว่องไวจากมากไปหาน้อยได้แก่

$\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2 > \text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2 > \text{ZnO} > \text{KNO}_3/\text{KL zeolite} > \text{KNO}_3/\text{ZrO}_2 > \text{ZrO}_2$ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ ให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุดร้อยละ 90.3 และ 86.3 จากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว ตามลำดับ

Ebiura (2005) ได้รายงานเกี่ยวกับการนำอะลูมินา มาทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะอัลคาไล (alkali metal salt) โดยนำมาใช้เป็นตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรโอเลอินกับเมทานอลและปฏิกิริยาไกลเซโรไลซิส (glycerolizes) ของไตรโอเลอินกับกลีเซอรอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือของโลหะอัลคาไลที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมินานั้นมีผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในปฏิกิริยาซึ่งต้องทำการศึกษา เช่น สัดส่วนของเมทานอลกับไตรโอเลอินกับปริมาณผลิตภัณฑ์ของผลได้ (methyl oleate) และผลกระทบของน้ำต่อปฏิกิริยาที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ จะมีน้ำอยู่ด้วยซึ่งวัตถุดิบอาจมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไบปาล์มสเตียรีนกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารวผสมชนิดที่เป็น สารประกอบโลหะ (metal compound) ในการเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ สารประกอบจำพวกเบสของโลหะออกไซด์ (alkaline-earth metals oxide) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โพแทสเซียมไนเตรทบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ (KNO_3/CaO) และแอมโมเนียมไนเตรทบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ($\text{NH}_4(\text{NO}_3)/\text{CaO}$) เพื่อเปรียบเทียบผลจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลโดยศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิ ความเร็วรอบในการกวน ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณการใช้สารตัวทำละลาย ไตรฟลูออโรโทลูอีน (THF) เป็นตัวทำละลายร่วม โดยพิจารณาจากร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยามาวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เทียบกับมาตรฐานข้อกำหนดเชื้อเพลิงอากาศยาน

Liu *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SrO ซึ่งมีค่าความแรงของความเป็นเบสสูงกว่า $H_- = 26.5$ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เริ่มต้นจากการเผา SrCO_3 ในเตาเผาที่อุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมงเพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็น SrO และจากการทดลองพบว่าปริมาณการใช้ SrO 3% โดยน้ำหนัก

สามารถสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ได้สูงสุด มากกว่า 95% ที่อุณหภูมิ 65 °C สัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมัน 12 ต่อ 1 โดยมีการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที และนอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ SrO ยังคงมีประสิทธิภาพดีเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำซึ่งจากการทดลองพบว่าหลังจากการใช้ซ้ำแล้ว 10 ครั้งยังสามารถให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงเกินกว่า ร้อยละ 90

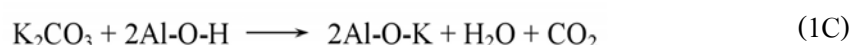
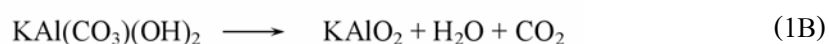
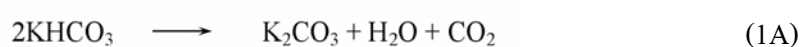
Xie และ Haitao (2005) ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์โพแทสเซียมไอโอไดด์บนตัวรองรับอะลูมินา (KI/Al_2O_3) รวมถึงศึกษาถึงผลของความแรงของความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากสถานะต่างๆ กันต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ และทำการศึกษาสภาวะการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่เหมาะสมที่ปัจจัยการทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ สัดส่วนโมลของเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโพแทสเซียมไอโอไดด์ 35% บนตัวรองรับอะลูมินาที่ถูกเผาด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 773 K เป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีความเป็นเบสแรงที่สุดและให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดถึงร้อยละ 96 จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่สภาวะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5% โดยมีการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงภายใต้กระบวนการควบแน่นของเมทานอล

Xie *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ (Mg-Al hydrotalcite) สำหรับปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสหรือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เมทานอลกับน้ำมันถั่วเหลืองโดยที่ทำการศึกษาผลกระทบจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากสัดส่วนโดยโมลของการใช้แมกนีเซียมกับอะลูมิเนียม และอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความร้อนสูงต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 773 K ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมเป็น 3 เท่าของอะลูมิเนียมมีปริมาณความเป็นเบสสูงที่สุดและให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดถึงร้อยละ 67 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาที่ใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5% โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง

Alonso *et al.* (2007) ทำการทดลองเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($K/\gamma-Al_2O_3$) โดยใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Wet impregnation ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต สำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันโดยจากการทดลอง

พบว่า $K/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ มีประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาซึ่งให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงเกือบ 100% ภายในเวลา 30 นาทีแต่ตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านการใช้งานไปแล้วเพียงครั้งเดียวซึ่งในการทดลองพบว่าเกิดจากสาเหตุที่มีไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวบางส่วนถูกละลายกับเมทานอลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวลงไป

และนอกจากนี้ในการทดลองยังมีการศึกษาถึงขั้นตอนของการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความร้อนซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังสมการที่ 1A-1C



จากการสลายตัวทั้ง 3 ขั้นตอนประกอบด้วยการกำจัดน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก โดยการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต (KHCO_3) ที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 373-473 K เป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนต ต่อมาที่อุณหภูมิประมาณ 500-620 K เป็นขั้นตอนการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮโดรอะลูมิโนคาร์บอเนต ($\text{KAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียมและโพแทสเซียม (KAlO_2 หรือ Spinel $\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) และสุดท้ายที่อุณหภูมิ 610 K เป็นขั้นตอนการสลายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งไม่ได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $\text{KAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปเข้ากับพื้นผิวของ Al-OH จนกระทั่งอยู่ในรูปของ Al-O-K จากการเข้าแทนที่ของโปรตอนโดยไอออนของโพแทสเซียม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการทดลอง

- 1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดถึงตำแหน่งที่ 4: Ohaus รุ่น Advanture™
- 1.2 เครื่องให้ความร้อนไฟฟ้า (Hot-plate magnetic stirrer): Harmony รุ่น HTS-1003, Laboratory & Medical Supplies
- 1.3 เตาอบลมร้อน (Hot air oven): Yamato รุ่น Model DK-42, Scientific Co.,Ltd.
- 1.4 เตาเผาภายใต้บรรยากาศออกซิเจน: Vecstar รุ่น 2416 Eurotherm
- 1.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer)
- 1.6 นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)
- 1.7 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 1.8 เครื่องแก้วและชุดอุปกรณ์แบบกะ (Batch reactor)
- 1.10 เครื่องกรองสุญญากาศ
- 1.11 กระดาษกรองเบอร์ 5 บริษัท Whatman

2. เครื่องมือในการวิเคราะห์

- 2.1 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี: SHIMADZU รุ่น GC 2010
- 2.2 เครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD):

Bruker AXS รุ่น D8 Advance

- 2.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว : Quantachrome Instruments รุ่น Autosorb 1-C
- 2.4 เครื่องวัดความหนาแน่น (Density Meter) (บริษัท METTLER, รุ่น TOLEDO

DE40)

- 2.5 เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟ (Pensky-Martens closed flash tester)

3. สารเคมี

3.1 โพแทสเซียมไนเตรด (Potassium nitrate, KNO_3) ความบริสุทธิ์ 99.5% ผลิตโดย บริษัท APS AJAX Finechem ประเทศออสเตรเลีย

- 3.2 อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 95% ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals Limited ประเทศนิวซีแลนด์
- 3.3 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ 95-97% ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- 3.4 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate, Na_2SO_4) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท VWR International Ltd. ประเทศอังกฤษ
- 3.5 เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ (Analytical grade) ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- 3.6 น้ำมันสนุดำจากศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร (จักรกลเกษตร) จังหวัดพิษณุโลก (ค่า Acid value = 6.0, มวลโมเลกุล = 880.623)
- 3.7 นอร์มอลเฮปเทน (n-heptane) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท Lab-Scan ประเทศไอร์แลนด์
- 3.8 เมทิลเฮปตะดะคานะอีนเอต (Methylheptadecanoate; $\text{C}_{17:0}$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ ผลิตโดย Fluka ประเทศเยอรมัน
- 3.9 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
- 3.10 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) ความบริสุทธิ์ 85% ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี

วิธีการ

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา ($\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของ Supported catalyst เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของตัวเร่งโดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดที่ปริมาณต่างๆ โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาตามขั้นตอน ดังนี้

- 1.1 หาปริมาณน้ำสูงสุดที่ลูมินาสามารถดูดซับได้โดยการหยดน้ำกลั่นลงบนผงลูมินา ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผงลูมินา 1 กรัมมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ 2.5 กรัม
- 1.2 ชั่งตัวรองรับลูมินาตามปริมาณที่ต้องการ
- 1.3 เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดโดย ชั่งโพแทสเซียมไนเตรดตามปริมาณที่ต้องการในการนำมาสังเคราะห์บนตัวรองรับลูมินา คือ 25%, 35%, 40% และ 45% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปละลายในน้ำกลั่นตามปริมาณที่กำหนดได้
- 1.4 หยดสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดที่เตรียมได้ลงบนตัวรองรับลูมินาและกวนอย่างต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิห้อง
- 1.5 นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 1.6 บดตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นผงละเอียด
- 1.7 นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 1.8 เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาคผนวก ง

2. การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

หลังจากทำการทดลองสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับลูมินาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน จึงทำการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นำกลับมาใช้ซ้ำ โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาตามขั้นตอน ดังนี้

- 2.1 เมื่อทำการกรองเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์แล้ว ก็นำมาทำการล้าง โดยล้างด้วยเมทานอลประมาณ 40 มิลลิลิตร โดยทำการคนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2.2 เมื่อครบตามเวลา ทำการกรองอีกครั้ง เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากเมทานอล
- 2.3 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเมทานอลที่เหลืออยู่

3. การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาสังเคราะห์ใหม่

หลังจากทำการทดลองสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับลูมินาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน จึงทำการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาตามขั้นตอนดังนี้

3.1 ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังทำการทดลอง เพื่อหาน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูญเสียไปในการทดลอง

3.2 จากนั้นหยดสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว ตามน้ำหนักที่หายไป โดยคำนวณจากภาคผนวก ก

3.3 ทำการกวนอย่างต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำที่อุณหภูมิห้อง

3.4 นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

3.5 บดตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นผงละเอียด

3.6 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก็จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์ใหม่ (Regenerated catalyst)

4. การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

เนื่องจากทำการทดลองที่อุณหภูมิ 65 °ซ ซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของเมทานอลเล็กน้อย (จุดเดือดเมทานอลคือ 64.7 °ซ) ดังนั้นในชุดการทดลองจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบควบแน่น (Reflux) เพื่อควบแน่นเมทานอลกลับสู่ระบบ ในที่นี้ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองประกอบด้วย เครื่องควบแน่น เครื่องให้ความร้อนไฟฟ้า อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) และขวดก้นกลมชนิด 2 คอ ดังภาพที่ 9

สำหรับในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลในการทำปฏิกิริยาที่ละปัจจัยได้แก่ สัดส่วน โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และในกรณีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินาที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด และศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการทำการทดลองจะกำหนดให้ปัจจัยอื่นที่ยังไม่ได้ทำการศึกษาคงที่ตลอดการทดลอง (โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 65 °ซ และความเร็วยกวนคือ 600 รอบต่อนาที ในทุกการทดลอง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ)



ภาพที่ 9 อุปกรณ์สำหรับการทดลองทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

5. ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน

เนื่องจากน้ำมันสุญุดำมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจึงต้องทำปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

5.1 ขั้นตอนที่ 1 : การกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้กรดซัลฟิวริก

จากการคำนวณการใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ใน 1 กระ (ภาคผนวก ข) ซึ่งขั้นตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีกระบวนการดังต่อไปนี้

5.1.1 ชั่งน้ำมันสุญุดำปริมาณ 30 กรัมใส่ลงในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ ที่ใช้ทำปฏิกิริยา

5.1.2 ทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1 โดยเติมเมทานอลร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก และกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงในน้ำมันสุญุดำแล้วทำปฏิกิริยาโดยกวนให้เข้ากันด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพน้ำมัน (pretreatment) และกำจัดกรดไขมันอิสระเป็นการลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันสุญุดำ

5.1.3 เมื่อครบ 1 ชม. นำน้ำมันที่ทำปฏิกิริยามาใส่กรวยแยก ทิ้งให้แยกชั้นระหว่างน้ำมันกับเมทานอลเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งกรดซัลฟิวริกจะละลายปนอยู่ในชั้นของเมทานอล

5.1.4 จากนั้นไขเอาเฉพาะสารชั้นล่างซึ่งเป็นชั้นของน้ำมันไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใส่ในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ

5.2 ขั้นตอนที่ 2 : การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2.1 นำน้ำมันที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ใส่ในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ

5.2.2 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ตามปริมาณที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

5.2.3 ชั่งเมทานอลโดยใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำตามที่คำนวณได้ในแต่ละการทดลอง (จากภาคผนวก ข)

5.2.4 ใส่เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ลงไปในน้ำมันที่เตรียมไว้

5.2.5 ติดตั้งระบบตามภาพที่ 9 โดยให้มีการกวนอย่างต่อเนื่อง ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 65°C โดยใช้เวลาตามที่ใช้ศึกษาในแต่ละการทดลอง

5.2.6 เมื่อครบตามเวลา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก

5.2.7 นำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่แยกได้ใส่ลงในกรวยแยกเพื่อรอการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรินเป็นเวลาประมาณ 14 ชั่วโมง

5.2.8 ไขเอาสารชั้นล่างซึ่งเป็นชั้นของกลีเซอรินออก แล้วล้างชั้นของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งอยู่ชั้นบนด้วยน้ำกลั่นดื่มที่อุณหภูมิ 55°C เพื่อกำจัดเมทานอลและกลีเซอรินที่เหลืออยู่ โดยทำการล้าง 3 ครั้ง

5.2.9 นำเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านกระบวนการล้างแล้ว มาเติมโซเดียมซัลเฟต (ประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) และเขย่าเพื่อดูความชื้นออก ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

5.2.10 แยกเอาโซเดียมซัลเฟต ออกจากเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการดูความชื้นโดยนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ จากนั้นเก็บเมทิลเอสเทอร์ไว้ในขวดเก็บสารตัวอย่างเพื่อรอการนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์

6. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

จากคุณสมบัติที่มีความคล้ายคลึงกันมากระหว่างน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลทำให้ปัจจุบันสถานีเติมน้ำมันต่างๆ ได้มีการผสมน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้บริการแก่

ผู้บริโภคร้อยแปดหลายแล้วซึ่งไบโอดีเซลหรือ B100 ที่นำมาเจือจางกับน้ำมันดีเซลนั้นต้องมีคุณสมบัติต่างๆ ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดไว้โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงบางประการของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม ซึ่งค่าที่ทดสอบได้ควรจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงดังกล่าวด้วยวิธีการดังนี้

6.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (Density Meter)

เปิดเครื่องวัดความหนาแน่นรุ่น TOLEDO DE40 จากบริษัท METTLER ทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการวัด แล้วรอจนกระทั่งเครื่องขึ้นคำว่า Ready จึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของสารตัวอย่างได้ โดยนิตสารตัวอย่างเข้ากับหลอดออสซิลเลตติงของเครื่องวัดประมาณ 3-5 มิลลิลิตรด้วยหลอดนิตยา ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ กด Measure เครื่องจะทำการวัดค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่าง รอจนกระทั่งวัดค่าความหนาแน่นเสร็จ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยดันหลอดนิตยาให้สารตัวอย่างเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมประมาณ 10 เซนติเมตร แล้วจึงค่อยทำการวัดใหม่ นำผลที่ได้มาเฉลี่ยจะได้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้ว ให้ดูดสารตัวอย่างกลับเข้าหลอดนิตยาให้หมด แล้วจึงทำการล้างโดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล หรืออะซิโตน นิดเข้าไปในเครื่องวัดทางหลอดออสซิลเลตติง ทำการล้างจนสะอาด กดค้างที่คำสั่ง Purge เครื่องจะเป่าลมผ่านหลอดออสซิลเลตติงจนแห้ง แล้วจึงกดที่คำสั่ง Calibrate เครื่องจะทำการ Calibrate ด้วยอากาศ ซึ่งเครื่องจะบอกว่า Calibrate ผ่านหรือไม่ ถ้าไม่ผ่านให้ทำการล้างด้วยตัวทำละลายใหม่ จากนั้นค่อยทำการ Calibrate ด้วยน้ำกลั่น โดยนิตน้ำกลั่นเข้าไปในหลอดออสซิลเลตติงด้วยหลอดนิตยา ซึ่งเครื่องจะบอกว่า Calibrate ผ่านหรือไม่ ถ้าไม่ผ่านให้ทำการล้างด้วยตัวทำละลายใหม่ สุดท้ายกดค้างที่คำสั่ง Purge อีกครั้ง เพื่อทำการการเป่าลมจนแห้งจึงค่อยปิดเครื่อง



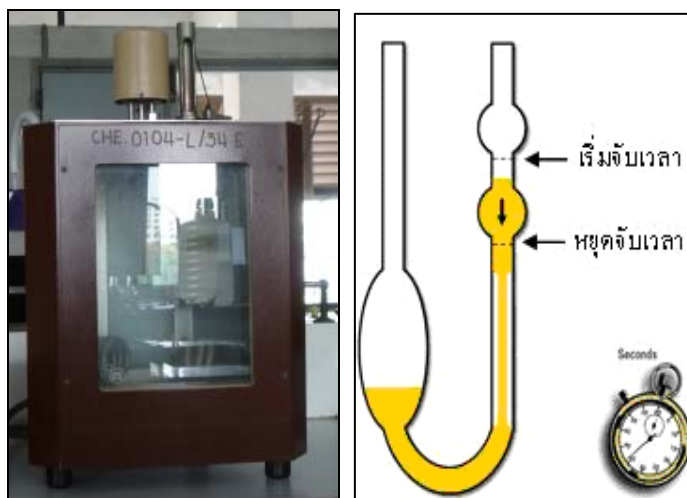
ภาพที่ 10 เดนซิติมิเตอร์ เครื่องมือทดสอบความหนาแน่น

6.2 การวิเคราะห์ความหนืดโดยใช้วิสโคมิเตอร์ (Viscometer)

เปิดเครื่อง Constant – Temperature Bath ทำการปรับอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียส เทสารตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดวัดความหนืด (Viscometer) ที่ทราบค่าคงที่ของหลอด แล้วจึงนำไปใส่ในเครื่อง Constant – Temperature Bath รอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ใช้ลูกยางทำการดูดสารตัวอย่างจากหลอดวัดความหนืดให้ขึ้นมาอยู่เหนือขีดบนของหลอด ทำการจับเวลาเมื่อสารตัวอย่างไหลลงมาจากขีดบนจนถึงขีดล่างของหลอดวัดความหนืด บันทึกเวลาที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง นำเวลาที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อหาค่าความหนืดจากสมการที่ 1

$$\mu_k = Ct \quad (1)$$

โดย μ_k คือ ค่าความหนืด หน่วยเป็น เซนติสโตกส์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
 C คือ ค่าความหนืดต่อเวลาของหลอดวัดความหนืด ซึ่งในการทดลองนี้ใช้หลอดวัดความหนืดที่มีค่า C ที่ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.014151 เซนติสโตกส์ต่อวินาที
 t คือ เวลาที่สารตัวอย่างใช้ในการไหลลงมาจากขีดบนจนถึงขีดล่างของหลอดวัดความหนืด หน่วยเป็น วินาที



ภาพที่ 11 วิสโคมิเตอร์ เครื่องมือทดสอบความหนืด

6.3 การหาจุดวาบไฟ

จุดวาบไฟ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ทำการทดสอบโดยใช้ Pensky-Martens closed flash tester ดังแสดงในภาพที่ 12 ทดลองโดยนำสารที่ต้องการหาจุดวาบไฟใส่ในถ้วยโลหะที่มีด้ามจับ หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอย่างช้าๆ พร้อมกับจุดไฟในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นแต่ละช่วง จนได้แสงวาบขึ้นเป็นครั้งแรกและบันทึกค่าอุณหภูมิขณะนั้น



ภาพที่ 12 Pensky-Martens closed flash tester เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟ

6.4 การวิเคราะห์หาจุดหมอกควัน (Cloud point) และจุดไหลเท (Pour point)

หาจุดหมอกควัน โดยเทสารตัวอย่างลงใน test jar ให้ได้ระดับที่ขีดไว้บน test jar ปิดด้วยจุกที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่สูงกว่าก้น test jar ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร สวม gasket รอบ test jar เพื่อป้องกันการกระแทก นำ test jar ไปวางลงใน jacket แล้วจึงนำไปไว้ในอ่างที่มีน้ำแข็งกับเกลือผสมอยู่ คอยสังเกตบริเวณก้น test jar เมื่อเกิดไขขึ้นที่ก้นของ test jar ให้อ่านอุณหภูมิขณะนั้น

หาจุดไหลเท โดยเทสารตัวอย่างลงใน test jar ให้ได้ระดับที่ขีดไว้บน test jar ปิดด้วยจุกที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ต่ำกว่าระดับที่ขีดไว้บน test jar ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร สวม gasket รอบ test jar เพื่อป้องกันการกระแทก นำ test jar ไปวางลงใน jacket แล้วจึงนำไปไว้ในอ่างที่มีน้ำแข็งกับเกลือผสมอยู่ และเมื่ออุณหภูมิลดลง จนสารตัวอย่างเริ่มแข็ง ค่อยๆเอียง test jar เป็นมุมประมาณ 45 องศา เป็นเวลา 3 วินาที อุณหภูมิแรกที่ทำให้สารตัวอย่างไม่มีการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลกคือ จุดไหลเท



ภาพที่ 13 เครื่องมือทดสอบหาจุดหมอกควัน (Cloud point) และจุดไหลเท (Pour point)

6.5 การวัดค่าความเป็นกรด

การวัดค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลในหน่วย มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของไบโอดีเซลสามารถทำได้โดยการไทเทรตหาจุดยุติระหว่างไบโอดีเซลกับ

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยมีสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นตัวชี้วัดจุดยุติซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบปริมาณ 5 กรัมในภาชนะเครื่องแก้ว
2. เติมไอโซโพรพานอลปริมาณ 50 มิลลิลิตร ผสมกับไบโอดีเซลพร้อมกับเขย่าให้เข้ากัน
3. เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนปริมาณ 2-3 หยด
4. เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในบิวเรต
5. ไขวาล์วของบิวเรตให้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ไหลอย่างช้าๆ ผสมกับไบโอดีเซลที่เตรียมไว้พร้อมกับเขย่าเบาๆ
6. สังเกตการทดลองจนกระทั่งสีของระบบเปลี่ยนเป็นสีชมพูบานเย็น
7. ไขวาล์วของปิเปตต์ทันทีหลังจากระบบเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูบานเย็น
8. อ่านปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการหาจุดยุติและบันทึกผลการทดลอง
9. คำนวณหาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากสมการที่ 2

$$TAN = \frac{56.1 \times M \times V}{m} \quad (2)$$

เมื่อ	M	คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วย โมล/ลิตร
	V	คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยมิลลิลิตร
	m	คือ มวลในหน่วย กรัม ของไบโอดีเซลที่ใช้ในการหาจุดยุติ

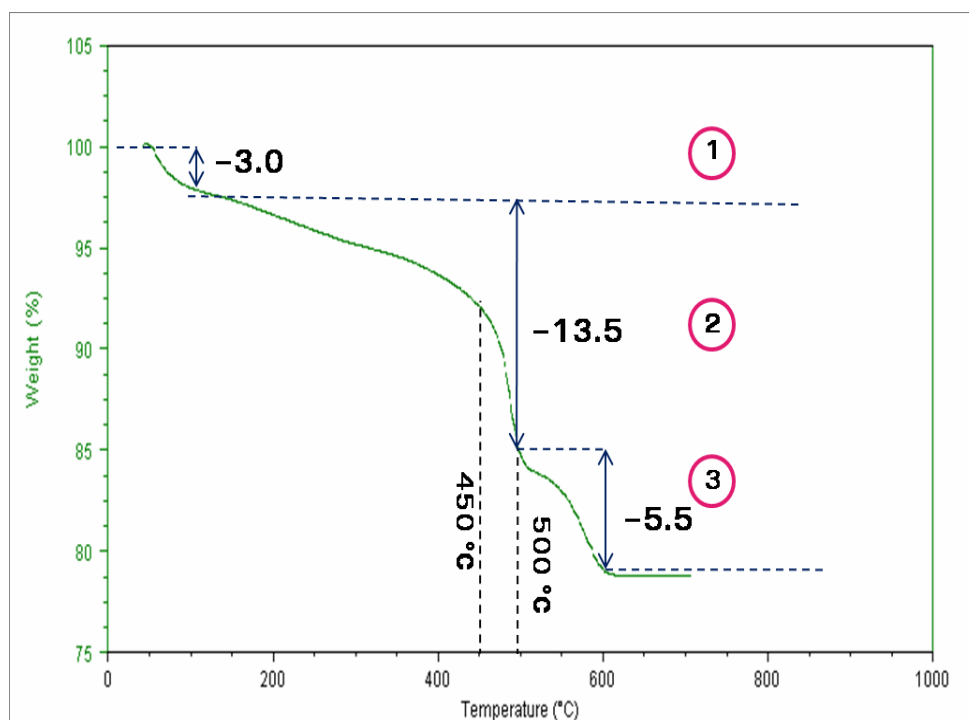
ผลและวิจารณ์

การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะประกอบด้วยขั้นตอนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การทดสอบปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อหาปริมาณ KNO_3 ที่เหมาะสมที่ใส่บนตัวรองรับอลูมินาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล และทดสอบคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการผลิตในสภาวะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

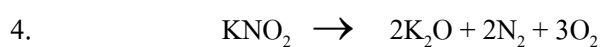
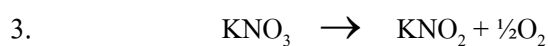
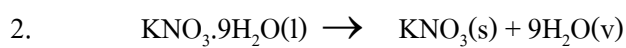
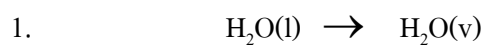
1. การวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา (DTA/TGA)

ในขั้นตอนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องมีกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน ไอออนบวกและไอออนลบที่ไม่เป็นที่ต้องการ แต่สาเหตุที่สำคัญที่สุดคือ ความต้องการในการเปลี่ยนรูปของเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเลือกอุณหภูมิในการเผานั้นขึ้นกับชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในการเลือกใช้อุณหภูมิในการเผาให้เหมาะสม จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงอุณหภูมิในการเผาเพื่อทราบถึงช่วงของการดูดความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเกลือของโลหะให้อยู่ในรูปออกไซด์ของโลหะ ซึ่งจากภาพที่ 14 แสดงถึงผลของการสลายตัวจากความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา โดยจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าช่วงที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำกลายเป็นไอน้ำตามสมการที่ 1 และในช่วงที่ 2 และ 3 น้ำในโพแทสเซียมไนเตรดจะตกผลึกและแตกตัวให้น้ำดังสมการที่ 2 จากนั้นโพแทสเซียมไนเตรดจะแตกตัวเป็นโพแทสเซียมไนไตรด์และออกซิเจนดังสมการที่ 3 จากนั้นโพแทสเซียมไนไตรด์จะแตกตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์โดยให้ก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน ดังสมการที่ 4 โดยในการทดลองได้เลือกทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็น K_2O ทั้งหมด เนื่องจากต้องการจะทำให้เกิดการผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา และเพื่อเป็นการลดการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนมากเกินไป ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 500 °C ก็เป็นช่วงของการสูญเสียมวลมากที่สุด คือร้อยละ 13.5 โดยน้ำหนัก แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเกลือโพแทสเซียมไนเตรดบนพื้นผิวของอลูมินา



ภาพที่ 14 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอลูมินา

ในการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากภาพที่ 14 จะเห็นว่า ช่วงที่ 1, 2 และ 3 เกิดการสลายตัว ดังสมการ



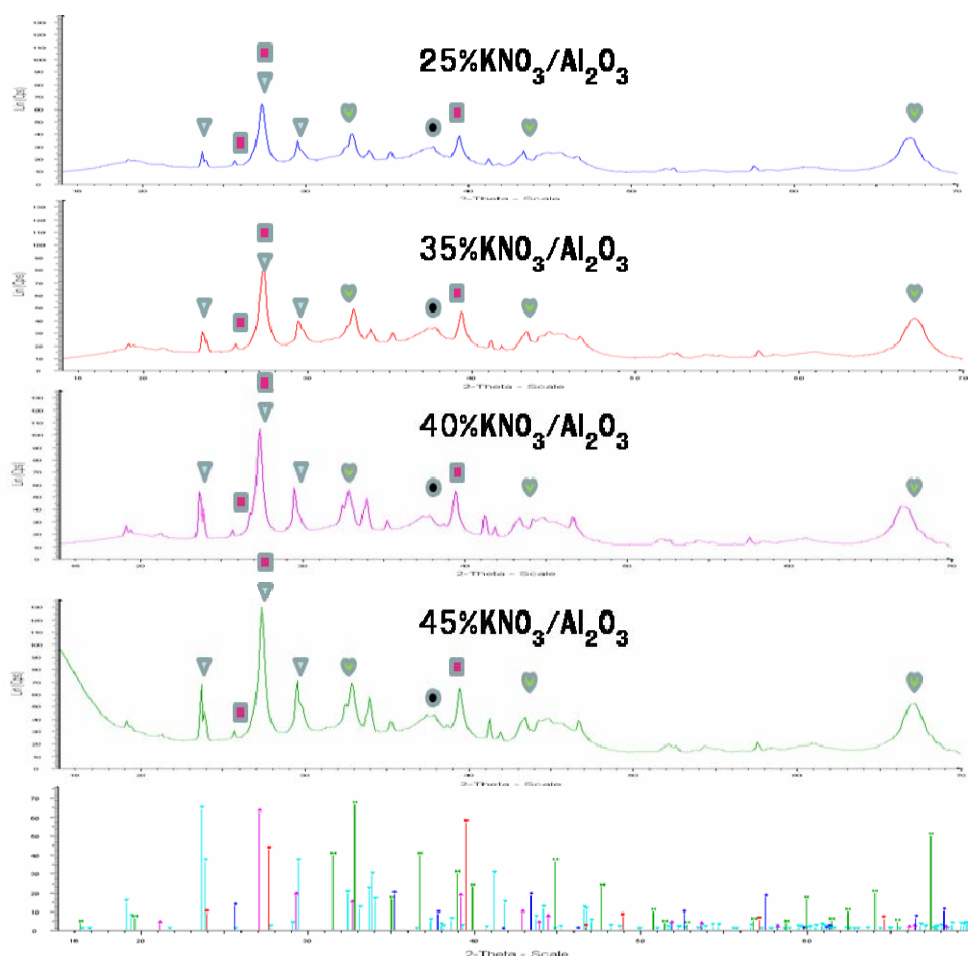
จากกราฟ มีการแตกตัวรวมทั้งหมด 22% แต่เมื่อหักความชื้น 3% ออก จะเหลือแค่ 19% ซึ่งใน 19% มาจากสองปฏิกิริยาหลัก (ดังการคำนวณในภาคผนวก ก.) โดยถ้ามีการแตกตัวหมดตามทฤษฎี พบว่าต้องมีการสูญเสียทั้งหมด 82% แต่จากการทดลอง ในความเป็นจริงจากกราฟต้องเสีย 19% แสดงว่าปฏิกิริยาตามสมการยังเกิดไม่สมบูรณ์ อาจเนื่องจากถูกตัวรองรับอุมินาปิดไว้ และอุณหภูมียังไม่สูงพอ ดังนั้นจึงยังเหลือสารตั้งต้นอยู่ ซึ่งตรงกับผลการทดสอบด้วย XRD

ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอุมินาที่สังเคราะห์ได้นั้น ก่อนการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล จำเป็นต้องมีการปรับสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำจัดสารประกอบต่างๆ ที่เจือปนอยู่ และเพื่อเปลี่ยนสารประกอบไนเตรตไปเป็นสารประกอบออกไซด์ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า ดังนั้นในการปรับสภาพนั้นใช้วิธีการเผาด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับข้อมูลทางกายภาพและเคมีของโพแทสเซียมไนเตรตจากศูนย์ข้อมูลอันตรายและเคมีภัณฑ์ (MSDS) ซึ่งได้รายงานว่โพแทสเซียมไนเตรตสลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 400 °C

2. การวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว นำมาทดสอบโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 15

จากภาพที่ 15 เป็นผลของการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอุมินาที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูง โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณต่างๆกันของโพแทสเซียมที่ใส่บนตัวรองรับอุมินา ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของโพแทสเซียมไนเตรตที่แตกต่างกันจะให้ปริมาณองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันด้วย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟลักของโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เกิดที่ตำแหน่ง $2\theta = 23.878, 27.636, 39.481$ ฟลักของโพแทสเซียมไนเตรตที่ตำแหน่ง $2\theta = 23.574, 27.703, 29.394$ ฟลักของโพแทสเซียมไนไตรด์ที่ตำแหน่ง $2\theta = 37.954, 44.830$ และฟลักของอุมินาที่ตำแหน่ง $2\theta = 32.77, 44.839, 67.417$ ซึ่งแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอุมินาเมื่อทำการเผาแล้วจะกลายเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ แต่ก็ยังพบฟลักของโพแทสเซียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนไตรด์อยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน



ภาพที่ 15 การวิเคราะห์สารประกอบในเชิงเปรียบเทียบของตัวเร่งปฏิกิริยา KNO₃/Al₂O₃ ที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิ 500 °ซ (โดยสัญลักษณ์ ■ = K₂O, ▼ = KNO₃, ● = KNO₂ และ ♥ = Al₂O₃)

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของโพแทสเซียมไนเตรดไปเป็นโพแทสเซียมออกไซด์โดยทำการพิจารณาจากพีคหลักของโพแทสเซียมไนเตรดกับพีคหลักของโพแทสเซียมออกไซด์ โดยพิจารณาที่ตำแหน่งของมุมในการเกิดเดียวกันในแต่ละความเข้มข้น พบว่าการเปลี่ยนไปเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ของโพแทสเซียมไนเตรดเป็นดังนี้คือ 25%KNO₃/Al₂O₃ > 35%KNO₃/Al₂O₃ > 40%KNO₃/Al₂O₃ > 45%KNO₃/Al₂O₃ เนื่องจากที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KNO₃/Al₂O₃ มีปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดน้อยที่สุด แต่มีปริมาณอลูมินามากที่สุด ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของอลูมินาไปเป็นโพแทสเซียมออกไซด์จึงเกิดได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณอลูมินาน้อยกว่า แต่เนื่องจากว่ายังพบพีคของโพแทสเซียมไนเตรดอยู่อีกมาก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลูกผสม คือมีทั้งโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา

และโพแทสเซียมออกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา ซึ่งโพแทสเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาโดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ส่วนโพแทสเซียมไนเตรดที่เหลืออยู่จะทำปฏิกิริยาโดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์

สำหรับการเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการปรับสภาพแล้วควรเก็บให้อยู่ภายใต้สภาวะสูญญากาศโดยมีสารดูดความชื้นป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมออกไซด์กับน้ำซึ่งจะทำให้เกิดผลึกของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาลดประสิทธิภาพลดลงได้อีก Granados *et al.* (2007)

3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการของ BET

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่พื้นที่ผิว (S_{BET}), ปริมาตรของรูพรุน (V_p) และขนาดของรูพรุน (d_{BJH}) โดยใช้หลักการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธีการของ BET Nitrogen Adsorption ด้วยเครื่อง High speed gas analyzer รุ่น Autosorb 1-C ของบริษัท Quantachrome ซึ่งค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (Total surface area) จะถูกคำนวณ เมื่อทราบค่าน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (S_{BET}) (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (V_p) (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน (d_{BJH}) (nm)
Al_2O_3	80.6	0.2375	10.5
25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	7.6	0.06542	9.5
35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	2.6	0.03044	5.6
40% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	2.1	0.02810	2.7
45% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	1.4	0.02424	2.6

จากผลการทดสอบพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดลงบนพื้นที่ผิวของอลูมินามากขึ้น จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แสดง

ว่า โพลีเอสเตอร์ในเตาจะไปทำลายเนื้อผิวของอลูมินา ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนลดลงด้วยเช่นกัน แสดงว่า ค่าความเนื่องมาจากโพลีเอสเตอร์ในเตาไปเกาะตามรูพรุนของอลูมินา

จากนั้นทำการทดสอบโดยนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอล และหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซล

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

สำหรับการทดลองได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันสบู่ดำโดยทำปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนโดยใช้กรดซัลฟิวริก ทำปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนแรก และนำมาทำปฏิกิริยาโดยใช้ $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในขั้นตอนที่สอง ซึ่งปัจจัยที่ถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบประกอบด้วย เวลาในการทำปฏิกิริยา สัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมัน ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำมาใช้ซ้ำและเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ โดยมีการแสดงผลการทดลองในรูปแบบแนวโน้มของปริมาณร้อยละขององค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ (Methyl ester content) และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เทียบจากมวลของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นที่ใช้ (Biodiesel yield)

1. ผลจากการทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1 โดยใช้กรดซัลฟิวริก

เนื่องจากในน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 12.34 mgKOH/g) ซึ่งกรดไขมันอิสระนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน กล่าวคือ กรดไขมันอิสระมีผลทำให้เกิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสไปในการปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันแทนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ในงานวิจัย Kusdiana and Saka (2004) ได้กล่าวว่า น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยา (deactivate) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส และเมื่อมีการใช้เบสมากเกินไปยังส่งผลต่อการเกิดของสารอิมัลชัน (emulsion) ซึ่งเพิ่มความหนืด และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์น้อยลง ดังนั้นน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จึงควรกำจัดกรดไขมันอิสระออกไปก่อน โดยควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันอยู่ไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Ma *et al.*, 1998) จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสอย่างสมบูรณ์ได้

ในการทำปฏิกิริยากำจัดกรดไขมันอิสระในขั้นตอนแรกโดยใช้กรดซัลฟิวริกและเมทานอล ทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันลดลง 96.4 เปอร์เซ็นต์ แต่จะทำให้สีของน้ำมันเปลี่ยนเป็นสีส้ม ดังแสดงในรูปที่ 16 ไม่เหมาะสำหรับทำเพื่อจำหน่าย แต่เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาต่อในขั้นที่สองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา น้ำมันจะเป็นสีเหลืองอ่อนใส ดังแสดงในรูปที่ 17



ภาพที่ 16 ลักษณะของน้ำมันหลังทำปฏิกิริยากำจัดกรดไขมันอิสระในขั้นตอนที่ 1



ภาพที่ 17 ลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลหลังทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในขั้นตอนที่ 2

ในการทดลองทำการกำจัดกรดไขมันอิสระ ได้ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริก 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณเมทานอล 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่มีผู้เคยทำการทดลอง โดยค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำก่อนและหลังทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1 แสดงดังตารางที่ 8

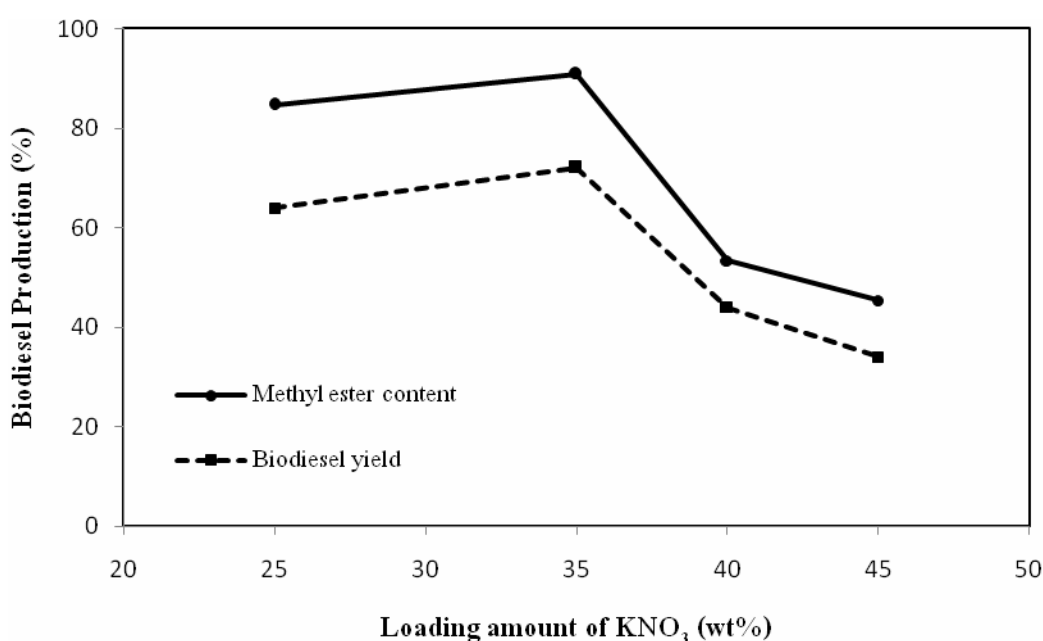
ตารางที่ 8 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำก่อนและหลังทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1

น้ำมันสบู่ดำ	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
ก่อนทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1	12.34
หลังทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1	0.44

2. อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยใช้โพแทสเซียมไนเตรดที่ปริมาณต่าง ๆ กัน บนตัวรองรับอลูมินา

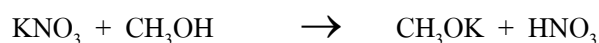
จากการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับน้ำมันสบู่ดำได้ดีที่สุด โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโพแทสเซียมต่าง ๆ กัน คือ 25%, 35%, 40%, และ 45 % โดยน้ำหนัก $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 5 ชม. จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับน้ำมันสบู่ดำ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาได้ต่างกันที่ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดและอลูมินาที่ต่างกันดัง ภาพที่ 18 ซึ่งจากภาพแสดงผลของปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดที่ต่าง ๆ กันบนตัวรองรับอลูมินากับปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะเห็นว่าที่ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรด 35 % โดยน้ำหนัก จะได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด คือ 90.8% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดมากขึ้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะลดลง อาจเกิดจากเมื่อปริมาณของ KNO_3 ที่มากเกินไป ทำให้การกระจายตัวของ KNO_3 ในอลูมินาเกิดได้ไม่ดี เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันของโพแทสเซียมไนเตรด และทำให้อลูมินาสูญเสียพื้นที่ผิวมากเกินไป ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการของ BET จะเห็นว่าเมื่อเติมโพแทสเซียมไนเตรดมากขึ้น พื้นที่ผิวของอลูมินาจะลดลงมากขึ้นด้วย และจากผลการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินามากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพแทสเซียมออกไซด์จะน้อยลง ซึ่งจะทำให้การเร่งปฏิกิริยาลดลงด้วย แต่ที่ปริมาณ KNO_3 ร้อยละ 25 ได้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์น้อยกว่าที่ปริมาณ KNO_3 ร้อยละ 35 เล็กน้อย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยรังสีเอกซ์ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงจากโพแทสเซียมไนเตรดไปเป็นโพแทสเซียมออกไซด์มากที่สุด แต่เมื่อนำมาทดสอบในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ สามารถสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ได้น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เล็กน้อย อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีส่วนของโพแทสเซียมไนเตรดที่ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย และอาจเนื่องมาจากเมื่อมีปริมาณของโพแทสเซียมไนเตรดน้อย ปริมาณ K^+ ที่อยู่บนอลูมินาก็น้อยด้วย ทำให้อลูมินายังไม่อิ่มตัวด้วย K^+ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์จึงลดลง

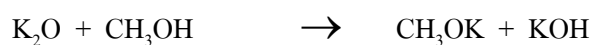


ภาพที่ 18 อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยใช้โพแทสเซียมไนเตรดที่ปริมาณต่างๆ กันบนตัวรองรับอลูมินา โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลูกผสมที่สังเคราะห์ได้ ส่วนที่เป็นเอกพันธ์คือ โพแทสเซียมไนเตรต จะมีการทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดเป็นโพแทสเซียมเมทิลเลท (Potassium Methylete) กับกรดไนตริก ดังสมการ



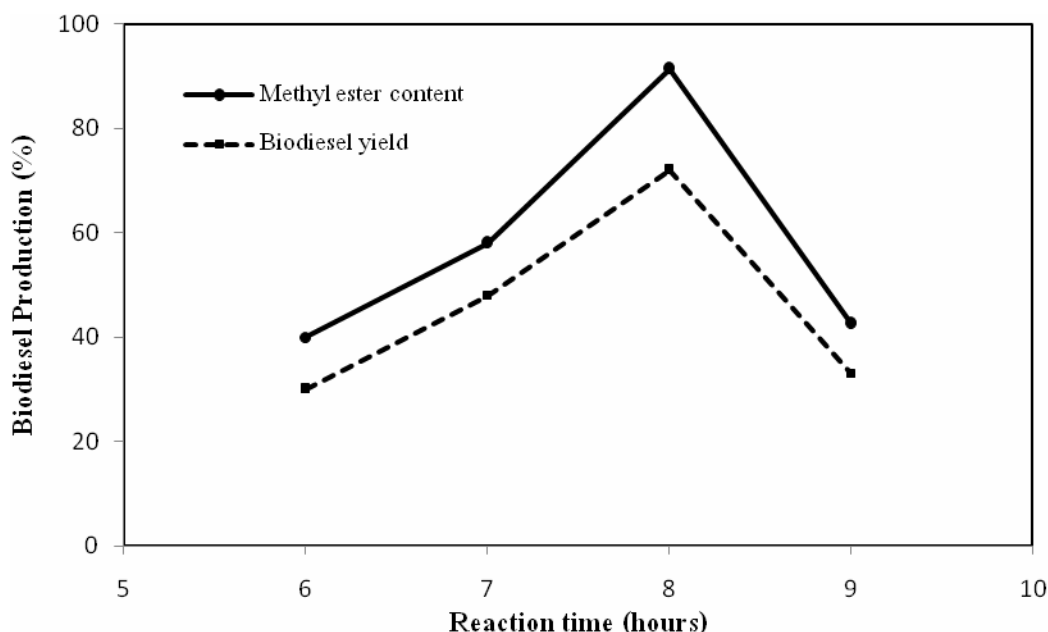
และส่วนที่เป็นวิวิธพันธุ์คือโพแทสเซียมออกไซด์ จะมีการทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดเป็นโพแทสเซียมเมทิลเลท (Potassium Methylete) กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



3. อิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ซึ่งเมื่อปฏิกิริยาได้ดำเนินสู่สภาวะสมดุลแล้วอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในระบบการผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์อาจต้องใช้เวลาพอสมควรในการเข้าสู่สภาวะสมดุลเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารตั้งต้นมายังบนพื้นผิวที่มีความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการดำเนินสู่สภาวะสมดุลนั้นจึงเป็นอีกสภาวะหนึ่งที่ต้องศึกษาเพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาได้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์แล้วหรือไม่

โดยได้ทำการทดลองในช่วงเวลา 6 ถึง 9 ชั่วโมง ที่สภาวะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 อิทธิพลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15 ต่อ 1 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

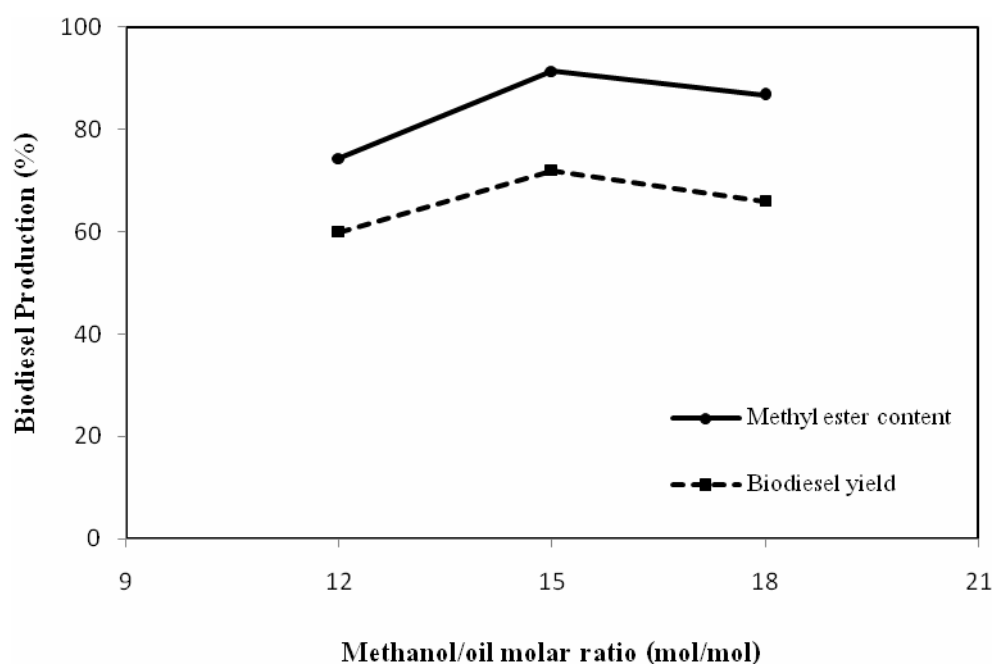
ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่เวลา 8 ชั่วโมงสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้มากที่สุด ปริมาณร้อยละ 91.4 และหลังจากนั้นเมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 9 ชั่วโมงกลับส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดต่ำลง โดยมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เหลือเพียงร้อยละ 42.6 เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้นทำให้ภายในระบบมีความร้อนสะสมมากขึ้น ส่งผลให้ระบบการควบแน่นมีประสิทธิภาพต่ำลง ดังนั้นการรักษาปริมาณของเมทานอลให้อยู่ในระบบจึงมีประสิทธิภาพลดลง โดยที่มีเมทานอลจำนวนหนึ่งถูกระเหยออกทางปลายเปิดของเครื่องควบแน่น และเมื่อเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาระเหยออกไปในปริมาณหนึ่งแล้ว ส่งผลให้เกิดการรบกวนสถานะสมดุลของปฏิกิริยา และทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ในที่สุด

วัฒนา และคณะ (2548) กล่าวว่าปัญหาดังกล่าวนี้อาจมีวิธีแก้ไขได้โดยใช้ น้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีการทดสอบพบว่าระบบการควบแน่นยังคงมีประสิทธิภาพดีในช่วงเวลาการผลิต 0 ถึง 300 นาที หากใช้น้ำหล่อเย็นแบบไหลวนที่อุณหภูมิต่ำ แต่หากใช้น้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว ประสิทธิภาพในการควบแน่นเมทานอลจะลดลงอยู่ในช่วงเวลาเพียง 0 ถึง 150 นาทีหรือต่ำกว่านั้นและหลังจากเวลาผ่านไป 300 นาที

4. อิทธิพลของสัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสนุ่ดำ

จากอัตราส่วนโดยโมลของของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์แสดงให้เห็นว่า 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ ต้องการใช้เอทานอลอย่างน้อย 3 โมลเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาผันกลับมาเป็นสารตั้งต้นได้ ดังนั้นหากมีการรบกวนสมดุลนี้ด้วยการเพิ่มแอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินไปจะสามารถผลักดันให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพื่อเกิดเป็นไบโอดีเซลได้มากขึ้น (Xuejun *et al.*, 2007) ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาถึงสัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมันสนุ่ดำที่ใช้ ต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ในช่วง 12:1, 15:1 และ 18:1 ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °C ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาทีซึ่งได้ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนโมลเมทานอลกับน้ำมันจาก 12 ต่อ 1 ถึง 18 ต่อ 1 แล้ว ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีแนวโน้มสูงขึ้น และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเมทานอลมากขึ้นอีก ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จะเริ่มจะไม่ขึ้นกับสัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันอีก เนื่องจากที่สภาวะสัดส่วนโมล 18 ต่อ 1 นี้ ปฏิกิริยาได้ดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว การเพิ่มปริมาณเมทานอลจึงเกือบจะไม่มีผลต่อปฏิกิริยาอีก ดังนั้นสัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 15 ต่อ 1 จึงเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดและสามารถให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 91.4

อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยของ Liu *et al.* (2007) ได้กล่าวว่า หากมีการเพิ่มปริมาณการใช้เมทานอลที่มากเกินไปอาจส่งผลให้ทำให้เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีปริมาณลดลงเนื่องจากการแยกตัวของเมทานอลกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ยากทำให้เมทานอลและกลีเซอรินอาจเจือปนอยู่ในเมทิลเอสเทอร์ซึ่งส่งผลให้คุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ตกต่ำลงได้ อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเมทานอลมากเกินไปทำให้องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบเจือจางลงซึ่งถือเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการลดลงของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้

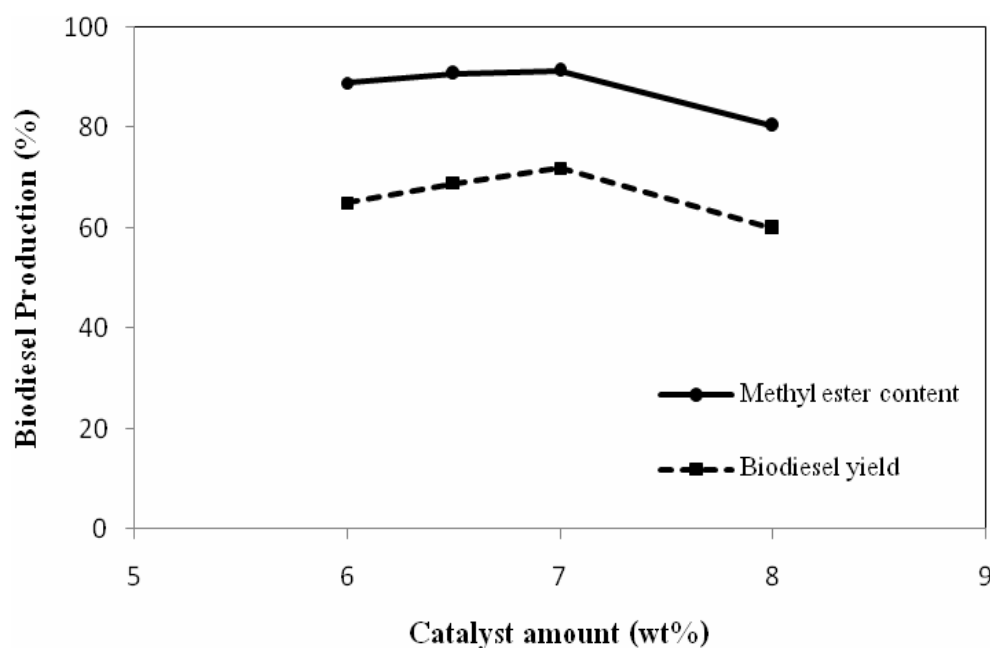


ภาพที่ 20 อิทธิพลของสัดส่วน โมลของเมทานอลกับน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

5. อิทธิพลของปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับการทำปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสนั้นเป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากพอจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นจากการลดลงของค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามในระบบการเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นฐานั้น ของแข็งในปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดอุปสรรคในด้านของการผสมเข้ากัน และความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยาก (Kim *et al.*, 2004) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณสูงและไม่ใช้พลังงานเพื่อช่วยในการกวนผสมที่มากเกินไปโดยทำการทดลองที่สภาวะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 15 ต่อ 1 อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมงได้ผลการทดลองดังภาพที่ 21 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นการเพิ่ม

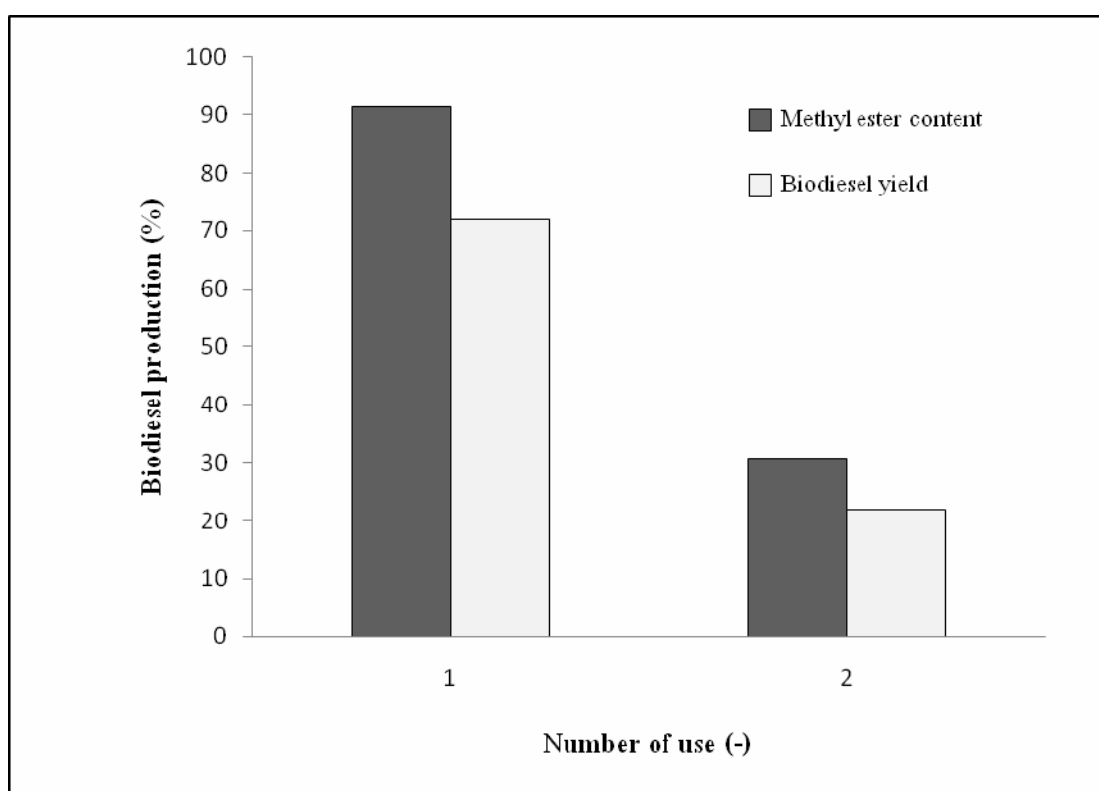
พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและรวดเร็วขึ้น (Liu *et al.*, 2007) และหลังจากที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถให้เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้สูงสุดร้อยละ 91.4 โดยหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 8 พบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้กลับลดลงเนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปส่งผลให้ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น และทำให้การผสมกันเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดเกิดขึ้นได้ไม่ดี ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จึงลดลงในที่สุด (Kim *et al.*, 2004) และทำให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลง ดังนั้นหากต้องการให้เกิดการผสมเข้ากันที่ดีขึ้น อาจแก้ปัญหาด้วยวิธีการเพิ่มความเร็วในการกวนให้เร็วขึ้นเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตั้งต้นที่ดีในสถานะที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมาก



ภาพที่ 21 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่สภาวะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

6. การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

ในการทดลองทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในตัวรองรับอลูมินา โดยหลังจากการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกรองแยกออกจากระบบ และนำไปล้างด้วยเมทานอล หลังจากนั้นกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ซ้ำที่สภาวะการทำปฏิกิริยาเดิมคือ ใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ และมีการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมงซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงที่สุดจากการศึกษาข้างต้น และผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ถูกแสดงในภาพที่ 22



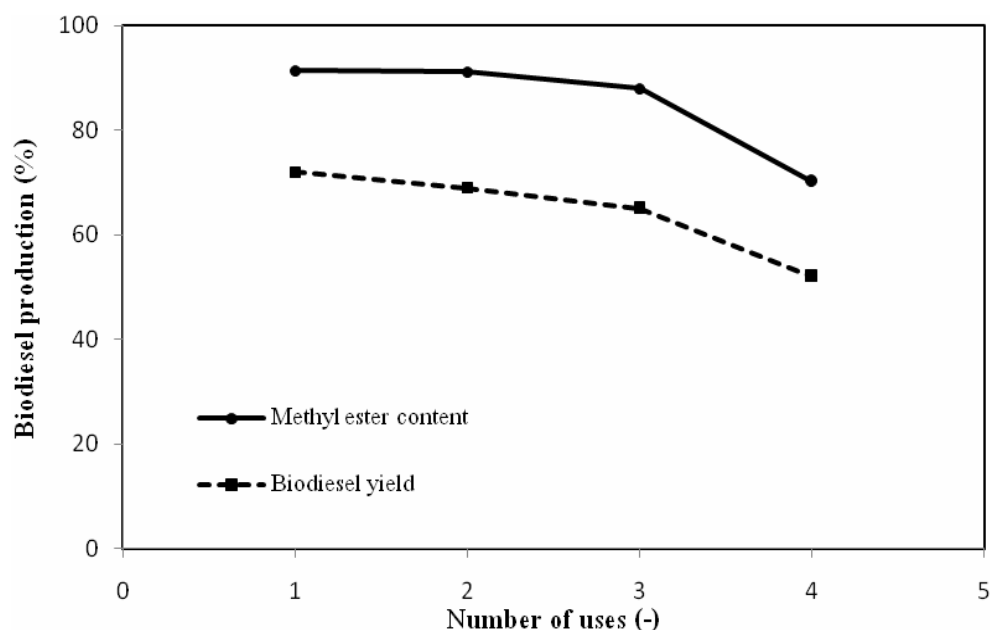
ภาพที่ 22 อิทธิพลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในตัวรองรับอลูมินา สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ และมีการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพลงโดยผลผลิตของไบโอดีเซลลดลงจากร้อยละ 91.4 เป็นร้อยละ 30.8 หลังจากการใช้งานในครั้งแรก แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพลง อาจเนื่องมาจากผลการวัดด้วยรังสีเอกซ์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งแบบลูกผสมระหว่างโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา และโพแทสเซียมออกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา จึงได้ทำการวัดน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากทำการทดลองในครั้งแรกไปแล้ว พบว่าหลังทำปฏิกิริยาครั้งแรกน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงคิดเป็นร้อยละ 19.0 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของส่วนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ ซึ่งก็คือส่วนที่เป็นโพแทสเซียมไนเตรด ดังนั้นเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการทดลองซ้ำจึงได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์น้อยลง และอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งน่าจะเกิดจากการสูญเสียพื้นที่ที่มีความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเกิดจากพื้นที่ที่มีความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกทำลาย

อย่างไรก็ตามได้ลองนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาสังเคราะห์ใหม่ โดยใช้วิธีการเดิมโพแทสเซียมไนเตรดเพิ่มลงไปทดแทนการโพแทสเซียมไนเตรดที่สูญเสียไปจากการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วกลับมามีความว่องไวมากขึ้น

7. การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาสังเคราะห์ใหม่

ข้อดีซึ่งเป็นจุดเด่นของตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิพันธุ์คือการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำอีก แต่จากการทดลองนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำโดยตรง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพลงโดยให้ผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง และจากการวัดน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากทำการทดลองในครั้งแรกไปแล้ว พบว่าหลังทำปฏิกิริยาครั้งแรกน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงคิดเป็นร้อยละ 19.0 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของส่วนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ ดังนั้นจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาสังเคราะห์ใหม่ โดยการเดิมโพแทสเซียมไนเตรดลงไปปริมาณเท่ากับน้ำหนักที่สูญเสียไปในการทดลอง จากนั้นกวนผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลา 5 ชม. จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการสังเคราะห์ใหม่ไปทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลได้ผลการทดลองดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 อิทธิพลการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอลูมินาที่นำมาทำการสังเคราะห์ใหม่ สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7 ที่อุณหภูมิ 65 °ซ และมีการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพที่ 23 เป็นการทำการทดลองโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วมาทำการสังเคราะห์ใหม่ จะเห็นว่าเมื่อทำการสังเคราะห์ใหม่จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในครั้งแรก ได้ปริมาณไบโอดีเซลร้อยละ 91.1 แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ได้ และเป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วกลับมามีความว่องไวเหมือนเดิม และจากนั้นได้ทำการสังเคราะห์ใหม่ซ้ำเป็นครั้งที่สองและสาม พบว่าได้ปริมาณไบโอดีเซลลดลงเหลือร้อยละ 88.0 และร้อยละ 70.2 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณไบโอดีเซลที่ลดลงอาจเกิดจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มมีการเสื่อมสภาพลง โดยไม่สามารถทำให้กลับมามีความว่องไวเหมือนเดิมได้

ผลการทดสอบสมบัติบางประการของน้ำมันไบโอดีเซล

จากการทดลองหาปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และสถานะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำซึ่งปรากฏว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึงร้อยละ 91.4 ซึ่งหลังจากนั้นได้นำไบโอดีเซลจาก

การผลิตในสภาวะดังกล่าวนี้มาทดสอบคุณสมบัติและเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซลจากการสังเคราะห์	มาตรฐานไบโอดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ¹	มาตรฐานไบโอดีเซล ASTM 6751-02 ²
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์	91.4	≥ 96.50	-
ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 15°C (kg/m ³)	890	860-900	-
ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40°C (mm ² /s)	4.68	3.5-5.0	1.9-6.0
จุดวาบไฟ (°C)	178	มากกว่า 120	มากกว่า 130
จุดหมอก (°C)	14	-	-3 – 12
จุดไหลเท (°C)	8	-	-15 – 10
ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	0.39	น้อยกว่า 0.5	น้อยกว่า 0.8

ที่มา: ¹กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

² Ramadhas *et al.* (2005)

จากการทดสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้พบว่า จุดวาบไฟ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด จุดไหลเท และค่าความเป็นกรดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากทำการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากร้าน้ำมันก่อนการนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งพบว่าโดยรวมแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน แต่พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ยังต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย และจุดหมอกควันมีค่าสูงกว่าที่เกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751-02 กำหนดเล็กน้อย ซึ่งจุดหมอกควันจะมีผลเสียต่อเครื่องยนต์มาก ถ้านำไบโอดีเซลนี้ไปใช้ในภูมิภาคที่หนาวเย็น โดยน้ำมันจะเกิดกลุ่มหมอกจากการตกผลึกของแว็กซ์ (wax) ในน้ำมัน และเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิที่สูงเกินไป แต่สำหรับประเทศ

ไทย มาตรฐานไบโอดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานของจุดหมอกควันและจุดไหลเท เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศที่ร้อน และมีโอกาสน้อยที่อุณหภูมิจะลดลงไปจนถึงจุดดังกล่าว

ตารางที่ 10 มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน พ.ศ. 2549 ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน สำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

ลำดับที่	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 °ซ กิโลกรัม/ม ³	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 860 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 1.9 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
4	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า 47	ASTM D 613
6	เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า 0.2	ASTM D 2709
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า หมายเลข 3	ASTM D 130
9	ค่าความเป็นกรด mgKOH/g	ไม่สูงกว่า 0.80	ASTM D 664
10	กรีเซอร์อินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 6584
11	กรีเซอร์อินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 1.5	ASTM D 6584
12	สี	ม่วง*	ตรวจพินิจด้วย สายตา
13	สารเติมแต่ง(ถ้ามี)		

หมายเหตุ * ใช้สารประกอบประเภท 1,4-dialylamino anthraquinone และ alkyl derivatives of azobenzene-4-azo-2-naphthol

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2549)

ส่วนปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน ซึ่งพิจารณาคคุณสมบัติของน้ำมัน 13 ข้อ ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่าไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลชุมชนทุกข้อ เนื่องจากมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนไม่พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ดังนั้นไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จึงสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตรในชุมชนได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอลเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ โดยที่หลังจากการทดสอบและวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าเกิดฟิสิกของโพแทสเซียมออกไซด์ แต่ก็ยังมีฟิสิกของโพแทสเซียมไนเตรดอยู่อีกมาก อาจเนื่องจากยังใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลูกผสม คือมีทั้งส่วนที่เป็นเอกพันธุ์คือส่วนที่เป็นโพแทสเซียมไนเตรด และส่วนที่เป็นแบบวิวิธพันธุ์คือโพแทสเซียมออกไซด์

สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำจากตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าปริมาณของโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินาที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตไบโอดีเซลคือ ร้อยละ 35 ของโพแทสเซียมไนเตรดบนตัวรองรับอลูมินา โดยให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดร้อยละ 91.4 สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำ 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 7 ของน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °ซ และความเร็วรอบในการกวนในช่วง 600 รอบต่อนาที และหลังจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการสูญเสียความว่องไวค่อนข้างมาก แต่เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการสังเคราะห์ใหม่พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำมาสังเคราะห์ใหม่ได้ โดยได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่าเดิมในการใช้ซ้ำใหม่ครั้งแรก และลดลงเล็กน้อยเมื่อนำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่เป็นครั้งที่สองและสาม

จากการทดสอบคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้พบว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่วิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงพาณิชย์ ยกเว้นปริมาณเมทิลเอสเทอร์ซึ่งยังต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย และจุดหมอกควันมีค่าสูงกว่าที่เกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751-02 กำหนดเล็กน้อย แต่ก็มีความเป็นไปได้สูงในการขยายผลเพื่อผลิตไบโอดีเซลในระดับที่มีขนาดกำลังการผลิตมากขึ้น ซึ่งอาจมุ่งเป้าในการผลิตเพื่อใช้ในชุมชนหรือพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในรถยนต์เชิงพาณิชย์ทั่วไป

ข้อเสนอแนะ

สำหรับในการศึกษาถึงปัจจัยในการผลิตไบโอดีเซล อัตราการกวนที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น เนื่องจากการผสมกันได้มากขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาที่อัตราเร็วมากกว่า 600 รอบต่อนาทีได้ และควรใช้วิธีการรีฟลักซ์แบบหล่อเย็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบแน่นเมทานอล

ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้ หลังจากการนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงแล้วควรเก็บรักษาในสถานะที่ปราศจากความชื้นหรือหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับอากาศเนื่องจากการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยากับความชื้นจะส่งผลให้เกิดสารประกอบของไฮดรอกไซด์และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในที่สุด

ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา อาจทำการเปลี่ยนชนิดของตัวรองรับ โดยใช้ตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เช่น ซิลิกา

ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งแนวทางการแก้ไขอาจมีการใช้ตัวทำละลายร่วม (organic cosolvents) เช่น เตตระไฮโดรฟูแรน (THF), 1,4-ไดออกเซน (1,4-dioxane) และ ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) เพื่อเพิ่มอัตราการละลายระหว่างเฟสน้ำมันและเฟสเมทานอลให้สูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. 2548. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 122 ตอนพิเศษ 70 ง: 12.

กองบรรณาธิการ. 2548. ไบโอดีเซล – พลังงานทดแทนช่วยชาติ. เทคนิคเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม. 22 (256): 154-163.

จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชินนัต สันประเสริฐโชค. 2549. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทวีศักดิ์ อุ่ณจิตติกุล. 2548. สบู่ดำพืชพลังงานสารพัดประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท วศิระ จำกัด, กรุงเทพฯ.

นันทวรรณ สโบล. 2549. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:

<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/oth/his.HTM>, 30 ตุลาคม 2549.

นิรนาม. 2548 ก. สบู่ดำกับน้ำมันดีเซล. กลีกร. 5 (78): 22-33.

นิรนาม. 2548 ข. สบู่ดำพืชพื้นบ้าน พัฒนาทดแทนน้ำมัน. ผู้ส่งออก. 18 (427): 51-53.

รติกร อลงกรโชติกุล. 2549. ไบโอดีเซล. กลุ่มงานทดสอบเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมโครงการเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2549. สารชีวโมเลกุล. แหล่งที่มา:

<http://th.wikipedia.org/wiki/สารชีวโมเลกุล-29k>, 17 พฤศจิกายน 2549.

หนึ่งฤทัย คุ่มเสาร. 2547. พลังงานทดแทนจากน้ำมันแพง. วารสารสิ่งแวดล้อม. ปีที่ 8 ฉบับที่ 32:38-43.

อัศพล เสนาณรงค์. 2549. การใช้เครื่องจักรกลเกษตรกับสบู่ดำ. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/mac/001.HTM>, 30 พฤศจิกายน 2549.

อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2549. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/oth/bot.HTM>, 30 พฤศจิกายน 2549.

อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2549. ไบโอดีเซล วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แหล่งที่มา:
<http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=409>, 5 ตุลาคม 2549.

อวยพร เพชรหลายสี. 2548. สบู่ดำ: พืชพลังงานทดแทนในอนาคต. วารสารเศรษฐกิจการเกษตร. 51 (588): 4-7.

Agarwal, A.K. 2006. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**. (Unpublished manuscript).

Alonso, D.M., R. Mariscal, R. Moreno-Tost, M.D. Zafara Poves, and M. López Granados. 2007. Potassium leaching during triglyceride transesterification using $K/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalysts. **Catalysis Communications**: 1-20.

Ebiura T., T. Echizen, A. Ishikawa, K. Murai, and T. Baba. 2005. Selective transesterification of triolein with methanol to methyl oleate and glycerol using alumina loaded with alkali metal salt as a solid-base catalyst. **Applied Catalysis A: General** 283: 111-116.

Foidl N., G. Foidl, M. Sanchez, M. Mittelbach, and S. Hackel. 1996. *Jatropha curcas L.* as a source for the producing of biofuel in Nicaragua. **Bioresource Technology**: 77-82.

- Freedman, B., E.H. Pryde and T.L. Mounts. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oil. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 61: 1638-1643.
- Fukuda, H. Kondo, A., and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Biosci. Bioeng** (92): 405-416.
- Granados M.L., D.M. Alonso, R. Mariscal, M.D. Zafra Poves, F.C. Galisteo, R. Moreno-Tost , J. Santamaría , and J.L.G. Fierro. 2007. Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide. **Applied Catalyst B: Environmental** 73: 327-336.
- Jitputti J., B. Kittiyanan, P. Rangsunvigit, K. Bunyakiat, L. Attanatho, and P. Jenvanitpanjakul. 2005. Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by difference solid catalysts. **Chemical Engineering Journal** 116: 61-66.
- Kim, H.J., B.S. Kang, M.J. Kim, Y.M. Park, D.K. Kim, J.S. Lee, and K.Y. Lee. 2004. Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. **Catalysis Today**: 315–320.
- Kusdiana, D. and S. Saka. 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. **Bioresource Technology**. 91: 289-295.
- Li Z. 2005. Novel solid base catalysts for Michael additions Synthesis. **Characterization and Application**.
- Liu X., H. He, Y. Wang, and S. Zhu. 2007. Transesterification of soybean oil to biodiesel using SrO as a solid base catalyst. **Catalysis Communications** 8: 1107–1111.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**. 70: 1-15.

Marchetti, J.M., V.U. Miguel and A.F. Errazu. 2007. Possible methods for biodiesel production.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 11: 1300-1311.

Martínez H.J., P. Siddhuraju, G. Francis, G. Davila-Ortiz, and K. Becker. 2006. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas L.* from Mexico. **Food Chemistry** 96: 80–89.

Meher, L.C., Vidya S.S. Dharmagadda and S.N. Naik. 2004. Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Pongamia pinnata* oil for production of biodiesel. **Bioresource Technology.** 97: 1392-1397.

Meher, L.C., Vidya S.S. Dharmagadda and S.N. Naik. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. **Renewable and sustainable Energy reviews.** 10: 248-268.

Ramadhas, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleedharan. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel.** 84: 335-340.

Schuchardt Ulf., R. Sercheli , and R.M. Vargas. 1998. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. **J. Braz. Chem. Soc.**, Vol. 9, No. 1: 199-210.

Tyson, K.S. 2004. **Biodiesel Handling and Use Guidelines.** National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy: 17-18.

Xie W., H. Peng, and L. Chen. 2006. Calained Mg-Al hydrotalcites as solidbase catalyst for methanolysis of soybean oil. **Journal of Molecular Catalyst** 246.

Xie W., X. Hung, and H. Li. 2006. Soybean oil methyl preparation using NaX zeolite loaded with KOH as a heterogeneous catalyst. **Bioresource Technology.** In Press.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

การคำนวณเพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไนเตรต, ปริมาณอลูมินา และปริมาณน้ำ ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 25%, 35%, 40% และ 45% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

1.) ชั่ง Al_2O_3 มา 1.0 กรัม แล้วหยดน้ำลงไป เพื่อวัดปริมาณน้ำที่ทำให้อลูมินาดูดซึมได้พอดี โดยได้ปริมาณน้ำ 2.5 กรัม

2.) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (KNO_3 35 กรัม : Al_2O_3 65 กรัม)

กำหนดให้ น้ำสารเข้า 10.0 กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา

จาก Al_2O_3 1.0 กรัม ใช้ปริมาณน้ำ 2.5 กรัม

ถ้า Al_2O_3 6.5 กรัม ใช้ปริมาณน้ำ 16.25 กรัม

นั่นคือ KNO_3 3.5 กรัม + น้ำ $16.25 - 3.5 = 12.75$ กรัม

ดังนั้น เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดย เตรียมสารละลาย KNO_3 3.5 กรัม เติมน้ำ 12.75 กรัม จากนั้นหยดใส่ลงใน Al_2O_3 6.5 กรัม

2. การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาสังเคราะห์ใหม่ (Regenerated Catalyst)

คำนวณจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เมื่อเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยา จากนั้นทำการวัดน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูญเสียไปขณะทำปฏิกิริยา โดย

วัดน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยาได้น้ำหนัก 2.1 กรัม

วัดน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยาเหลือน้ำหนัก 1.7 กรัม

นั่นคือ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาหายไป $2.1 - 0.7 = 0.4$ กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ : ก่อนทำปฏิกิริยามี 2.1 กรัม คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

หลังทำปฏิกิริยาหายไป 0.4 กรัม คิดเป็น 19.05 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น พบว่าหลังทำปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง 19% ซึ่งน้ำหนักที่หายไป อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของส่วนที่เป็นเอกพันธ์

การทำปฏิกิริยาครั้งที่ 1 :

ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ มี KNO_3 3.5 กรัม และ Al_2O_3 6.5 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาคือ 10 กรัม

จากตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม มีปริมาณ KNO_3 3.5 กรัม

ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.1 กรัม มีปริมาณ KNO_3 0.735 กรัม

และจากตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม มีปริมาณ Al_2O_3 6.5 กรัม

ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.1 กรัม มีปริมาณ KNO_3 1.365 กรัม

จากการคำนวณตามทฤษฎี ต้องมี Al_2O_3 อยู่ 1.365 กรัม แต่จากผลการทดลอง มี Al_2O_3 (assume ว่าที่เหลืออยู่เป็น Al_2O_3 ทั้งหมด) อยู่ 1.7 กรัม ซึ่งเกินมาเท่ากับ $1.7 - 1.365 = 0.335$ กรัม ซึ่ง 0.335 กรัม ที่เกินมา คือปริมาณของ KNO_3 ที่เหลือ

ดังนั้น ต้องเติม KNO_3 ลงไปเท่ากับ $0.735 - 0.335 = 0.4$ กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาสังเคราะห์ใหม่เตรียมโดย :

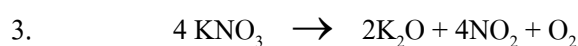
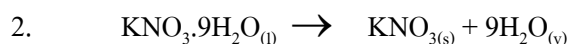
คิดปริมาณน้ำที่ใช้ จาก Al_2O_3 1.0 กรัม ใช้น้ำ 2.5 กรัม

Al_2O_3 1.365 กรัม ใช้น้ำ 3.412 กรัม

นั่นคือ KNO_3 0.735 กรัม + น้ำ เท่ากับ $3.412 - 0.735 = 2.677$ กรัม

ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่เตรียมโดย เตรียมสารละลาย KNO_3 0.4 กรัม เติมน้ำ 2.7 กรัม จากนั้นหยดใส่ลงในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ 1.7 กรัม

3. การคำนวณการสูญเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อน (DTA/TGA)



จากสมการที่ 2 และ 3 คำนวณหาร้อยละการสูญเสีย จาก

$$\text{Total loss} = \frac{(9 \times 18) + 46 + 8}{263.10} \times 100 = 82\%$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าต่างๆ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

1. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาขั้นที่ 1 : การกำจัดกรดไขมันอิสระด้วยกรดซัลฟิวริก

สถานะของการทดลองที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาณการใช้น้ำมันสบู่ดำ 30 กรัม ต่อ 1 กะ

อุณหภูมิ 65 °ซ

อัตราการกวนผสม 600 รอบ/นาที

สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1

ปริมาณการใช้กรด 3.0% โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ

การคำนวณหาปริมาณเมทานอลสำหรับทำปฏิกิริยา

$$m_{\text{MeOH}} = \frac{30}{880.632} \times \frac{15 \times 32.04}{0.79} = 20.72$$

∴ ต้องใช้เมทานอลในการผลิตไบโอดีเซล 20.72 มิลลิลิตร

การคำนวณปริมาณกรดที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยา

$$m_{\text{acid}} = 30 \times \frac{3.0}{100} = 0.9$$

สารตั้งต้น	ปริมาณที่ใช้
น้ำมันสบู่ดำ	30.0 กรัม
เมทานอล	20.72 มิลลิลิตร
กรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄)	0.9 กรัม

อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระสามารถทำได้ครั้งละมากๆ เพื่อรอเก็บไว้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้โดยเพิ่มอัตราส่วนการใช้สารตั้งต้นตามการคำนวณที่แสดงในข้างต้น

2. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาขั้นที่ 2 : การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอูมินาตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาปริมาณสารตั้งต้นจากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไนเตรตบนตัวรองรับอูมินา

สภาวะของการทดลองที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาณการใช้น้ำมันสบู่ดำ 30 กรัม ต่อ 1 กะ

อุณหภูมิ 65 °ซ

อัตราการกวนผสม 600 รอบ/นาที

สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1

ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ

มวลโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันสบู่ดำ 880.623 กรัม/โมล

มวลโมเลกุลของเมทานอล 32.04 กรัม/โมล

การคำนวณหาปริมาณเมทานอลสำหรับทำปฏิกิริยา

$$\text{เปลี่ยนเป็นโมลของน้ำมัน; } n_{oil} = \frac{30}{880.623} = 0.0341 \text{ mol}$$

$$\text{อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 15:1 ต้องการใช้เมทานอล ; } n_{MeOH} = \frac{30}{880.623} \times 15 = 0.511 \text{ mol}$$

$$\text{เปลี่ยนเป็นหน่วยน้ำหนัก ; มวลเมทานอล} = n_{MeOH} \times 32.04 = 16.37 \text{ กรัม}$$

$$\text{เปลี่ยนเป็นหน่วยปริมาตร ; ปริมาตรเมทานอล} = \frac{n_{MeOH} \times 32.04}{0.79} = 20.72 \text{ มิลลิลิตร}$$

∴ ต้องใช้เมทานอลในการผลิตไบโอดีเซล 20.72 มิลลิลิตร

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

$$m_{cat} = 30 \times \frac{7}{100} = 2.1$$

∴ ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.1 กรัม

สารตั้งต้น	ปริมาณที่ใช้
น้ำมันสบู่ดำ	30.0 กรัม
เมทานอล	20.72 มิลลิลิตร
ตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$)	2.1 กรัม

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์

1. การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์

จากข้อมูลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซได้พื้นที่ใต้กราฟของ Fatty acid methyl ester โดยคำนวณจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด ดังแสดงในตาราง

Weight 60.8 mg	
Std. Area 3791332	
FAME	Peak area
Methyl Myristate	10973
Methyl Palmitate	3087077
Methyl Palmitolate	163942
Methyl Stearate	1388523
Cis-9-Oleic Methyl Ester	9254268
Methyl Linolate	7084222
Methyl Linolate	29966
Methyl Arachidate	33597
Methyl Behenoate	10497

จากสูตรการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในสมการที่ 3

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \sum A &= 3,791,332 + 10,973 + 3,087,077 + 163,942 + 1,388,523 + 9,254,268 \\
 &\quad + 7,084,222 + 29,966 + 33,597 + 10,497 \\
 &= 24,854,397 \\
 A_{EI} &= 3,791,322 \\
 C_{EI} &= 10 \quad \text{mg/ml} \\
 V_{EI} &= 1 \quad \text{ml} \\
 m &= 60.8 \quad \text{mg}
 \end{aligned}$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ

$$C = \frac{24,854,397 - 3,791,322}{3,792,322} \times \frac{10 \times 1}{60.8} \times 100\%$$

$$C = 91.4\%$$

2. การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เทียบกับน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น (Yield)

จากสูตรการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เทียบกับน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น (Yield) จากสมการที่ 4

$$Yield(\%) = C \times \frac{W_f}{W_i} \quad (4)$$

$$W_f = 23.12 \text{ g}$$

$$W_i = 30.0 \text{ g}$$

$$C = 91.4$$

$$Yield(\%) = 91.4 \times \frac{23.12}{30.0}$$

$$Yield(\%) = 70.5$$

ภาคผนวก ง

การใช้เครื่องมือวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เทคนิค X- Ray Diffraction (XRD) โดยใช้เครื่อง Bruker AXS รุ่น D8 Advance ซึ่งประกอบด้วย Solid state detector แบบบรรจุซิลิกอน (Si) และใช้รังสี Cu- α (40 kV, 40 mA) ซึ่งมีความยาวคลื่น 1.5418 nm. และตรวจวัดในช่วงมุมสองกวาด 2θ เท่ากับ $5-70^\circ$ ด้วย Step size เท่ากับ 0.099 deg/step และอัตราเร็วในการสองกวาด เท่ากับ 0.04 deg/min เป็นเวลา 31.15 นาที โดยมีวิธีการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ XRD ดังนี้

1.1 บดสารให้ละเอียดเป็นผงในปริมาณประมาณ 2 ลูกบาศก์มิลลิเมตร แล้วอัดลง Polyethylene window ที่ปิดกระจกไว้ด้านหนึ่งให้เต็มแล้วปาดด้วย Spatula ให้เรียบ ปิดทับด้วยแผ่นอลูมิเนียมและเทปกระดาษ เปิดกระจกออกเมื่อต้องการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

1.2 นำตัวอย่างเข้าเครื่อง XRD เพื่อวัดความเข้มแสงที่มุมตกกระทบ (2θ) ค่าต่างๆ ขึ้นกับสารที่ต้องการวิเคราะห์

1.3 อ่านค่าตำแหน่งมุมของพิก (Peak) ที่ได้ และคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบ d ตามสมการของ Bragg's law

1.4 ค้นหาหมายเลขไฟล์ของสารตัวอย่าง

1.5 ค้นหา JCPDS จาก Microfilm หรือ CD-rom

1.6 ตรวจสอบข้อมูลจาก JCPDS และ XRD pattern ทั้งค่า d และความเข้มแสงสัมพัทธ์ (Relative intensity)

1.7 สรุปผลการวิเคราะห์

2. หลักการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธีการของ BET

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยวิธีการของ BET ด้วยเครื่อง Autosorb 1-C ของบริษัท Quantachrome ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ชั่งน้ำหนักกระเปาะ จากนั้นใส่สารที่ต้องการวิเคราะห์ในปริมาณ 1/4 ของหลอด แล้วนำไปชั่ง เพื่อบันทึกน้ำหนักก่อนทำการวิเคราะห์

2.2 เปิดก๊าซฮีเลียม และก๊าซไนโตรเจนที่ 10 psi ทั้ง 2 ถัง

2.3 เข้าโปรแกรม AS1

2.4 ใส่กระดาษที่ต้องการวิเคราะห์ที่ station 1 หรือ 2

2.5 สวมเครื่องทำความร้อน Heater ตั้งอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

2.6 เข้าโปรแกรม Operation เลือก Out gasser ซึ่งใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำการดูดความชื้น

ออกจากสารตัวอย่าง

2.7 ทำการวิเคราะห์โดยเข้าสู่โปรแกรมโดยเลือก Analysis เลือก Physisorption

2.8 โหลด User file ทำการเปลี่ยน ID และ Operator

2.9 เริ่มการวิเคราะห์ เมื่อเครื่องทำการวิเคราะห์เสร็จให้นำกระดาษที่บรรจุสารที่ทำ
การวิเคราะห์ไปชั่งน้ำหนัก

2.10 เลือก Edit analysis ใส่น้ำหนักที่บันทึกได้

2.11 เครื่องจะทำการคำนวณให้โดยอัตโนมัติ เมื่อทราบค่าน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ใน
การวิเคราะห์

3. การวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal Analysis)

การวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่อง Simultaneous Differential Analyzer (SDT) ของบริษัท Perkin Elmer มีขั้นตอนดังนี้

3.1 ระบายน้ำที่ตกค้างในปั๊มอากาศออกจากปั๊ม

3.2 เปิดวาล์วอากาศที่ 10 psi

3.3 เปิดเครื่อง SDT พร้อมทั้งปรับอัตราการไหลของอากาศ ให้ให้อยู่ในช่วง 120 ถึง 130
เพื่อให้ มีปริมาตรของก๊าซไนโตรเจน (N_2) มีค่าเท่ากับ $100 \text{ cm}^3/\text{min}$

3.4 เปิดคอมพิวเตอร์เลือกโปรแกรม TA Instrument control ver.1999

3.5 เปิดเครื่อง Simultaneous DSC-TGA Analysis

3.6 นำ Pan เปล่า 2 ใบวางในเครื่อง

3.7 กดปุ่ม Tare จากโปรแกรม TA Instrument control ver.1999

3.8 กดปุ่ม Tare อีกครั้งเพื่อเปิดเครื่อง หลังจากนั้นคืบ Pan 1 ใบเพื่อเติมสารตัวอย่าง
ประมาณ 2/3 ของ Pan หรือประมาณ 0.2 กรัม

3.9 วาง Pan เข้าที่เดิมของเครื่อง

3.10 ตั้งค่า Set up ดังนี้ Heat rate $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ โดยเริ่มจากอุณหภูมิ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ จนถึง $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$
จากนั้นเลือกชนิดของ Pan เป็น Alumina พร้อมทั้งตั้งชื่อของไฟล์ที่จะจัดเก็บ

3.11 กดปุ่ม Browse เพื่อตั้งชื่อและเลือกตำแหน่งที่จัดเก็บของไฟล์ที่จะถูกบันทึก หลังจาก
นั้นกด Save

3.12 กดปุ่ม Start

3.13 รอจนกระทั่งระบบมีการระบายความร้อนเสร็จสมบูรณ์หลังจากโปรแกรมได้ดำเนิน
จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว

3.14 ปิดเครื่อง Heater เครื่อง SDT ปิดวาล์วอากาศ และปิดถังอากาศ ตามลำดับ

3.15 เลือกโปรแกรม TA Universal Analysis ver.2000 เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลดิบ

3.16 เปิดไฟล์ที่บันทึกไว้ในตำแหน่งที่จัดเก็บไว้ตอนต้น

3.17 จะได้ Data file information กด OK

3.18 เลือก View ที่ Menu bar หลังจากนั้นเลือก Data table เลือก Report

3.19 เลือกอุณหภูมิที่ต้องการให้แสดงผลจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดในช่วงการทดลองที่
ต้องการวิเคราะห์

3.20 เลือกช่วงกว้างของข้อมูลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

3.21 กด OK โปรแกรมจะแสดง Report editor ซึ่งเป็นข้อมูลดิบ

3.22 นำข้อมูลที่ได้มาแสดงผลในรูปแบบกราฟระหว่างอุณหภูมิกับน้ำหนัก

4. การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas chromatography)

หลังจากผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแล้ว เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จะถูก
นำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ โดยมีขั้นตอนและการเตรียมการดังต่อไปนี้

4.1 ชั่งเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ปริมาณ 50 มิลลิกรัมบรรจุลงในขวดเก็บสารปริมาตร 2
มิลลิลิตร

4.2 เติมน้ำมันมาตรฐานเมทิลเฮปตะดิวเทน 10 มิลลิกรัมต่ออนุโมลเฮปเทน
(n-heptane) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ Pipette

4.3 เขย่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้อย่างรุนแรงเพื่อให้เกิดการผสมเข้ากันอย่างดี

4.4 นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไปฉีดกับเครื่องวิเคราะห์ก๊าซในปริมาณ 1 ไมโครลิตร

4.5 นำพื้นที่ใต้กราฟที่เครื่องวิเคราะห์ก๊าซประมวลผลได้มาคำนวณหาปริมาณเมทิลเอส
เทอร์โดยใช้สมการที่ 3 ในการคำนวณ และหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เทียบกับน้ำมันสนูปดา
เริ่มต้น (Yield) จากสมการที่ 4

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \quad (3)$$

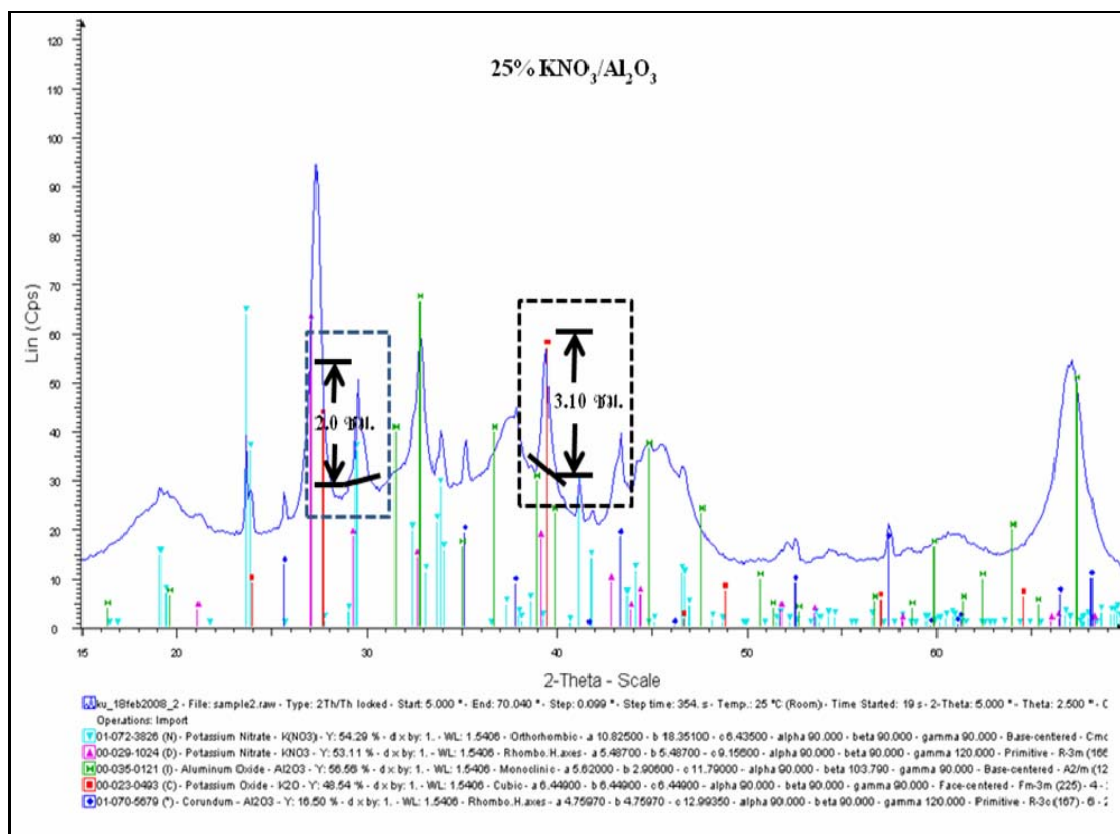
$$Yield(\%) = C \times \frac{W_f}{W_i} \quad (4)$$

เมื่อ	C	คือ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
	$\sum A$	คือ พื้นที่พีค (Peak) รวมของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ C_{14} ถึง $C_{24:1}$
	A_{EI}	คือ พื้นที่พีคที่ตรงกันกับของเมทิลเฮปตะดีคาโนเอท
	C_{EI}	คือ ความเข้มข้นหน่วย มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ของสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอท
	V_{EI}	คือ ปริมาตรในหน่วย มิลลิลิตร ของสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอท
	m	คือ มวลในหน่วย มิลลิกรัม ของสารตัวอย่าง
	W_i	คือ น้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น
	W_f	คือ น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

ภาคผนวก จ

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction)



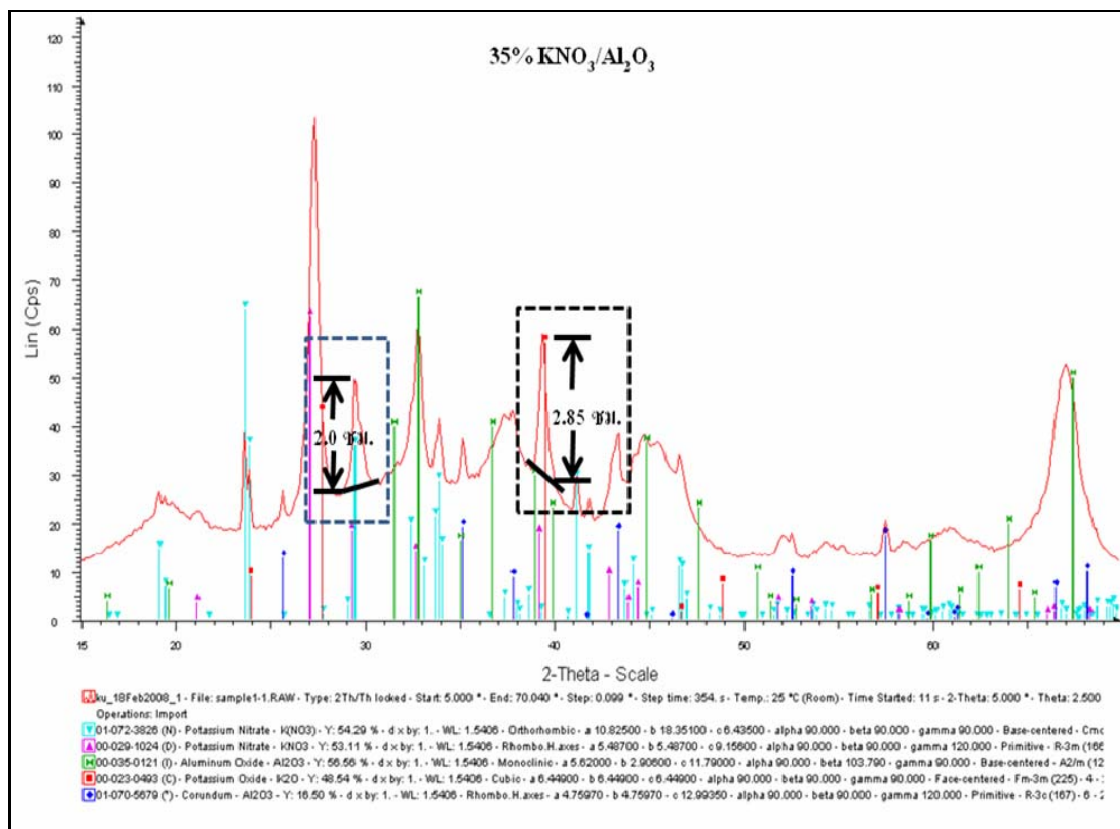
ภาพผนวกที่ จ1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 25% KNO₃/Al₂O₃

จากรูปการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เลือกพีคเด่นของโพแทสเซียมไนเตรด คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และพีคเด่นของโพแทสเซียมออกไซด์ คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 39.481$ แล้วทำการเปรียบเทียบความสูงของพีคโดยคิดจาก

$$\text{ความสูงของพีค K}_2\text{O} : \text{ความสูงของพีค KNO}_3 = \frac{3.10}{2.0} = 1.55$$

หมายเหตุ: พีคที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดคือที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.703$ แต่เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แยกพบว่า พีคมีการซ้อนทับกัน (Over lap) ของสารทั้งสองตัว คือโพแทสเซียมไนเตรด และโพแทสเซียมออกไซด์ จึงไม่สามารถวัดความสูงของพีคได้ จึงเลือกพีคที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และ $2\theta = 39.481$

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction)



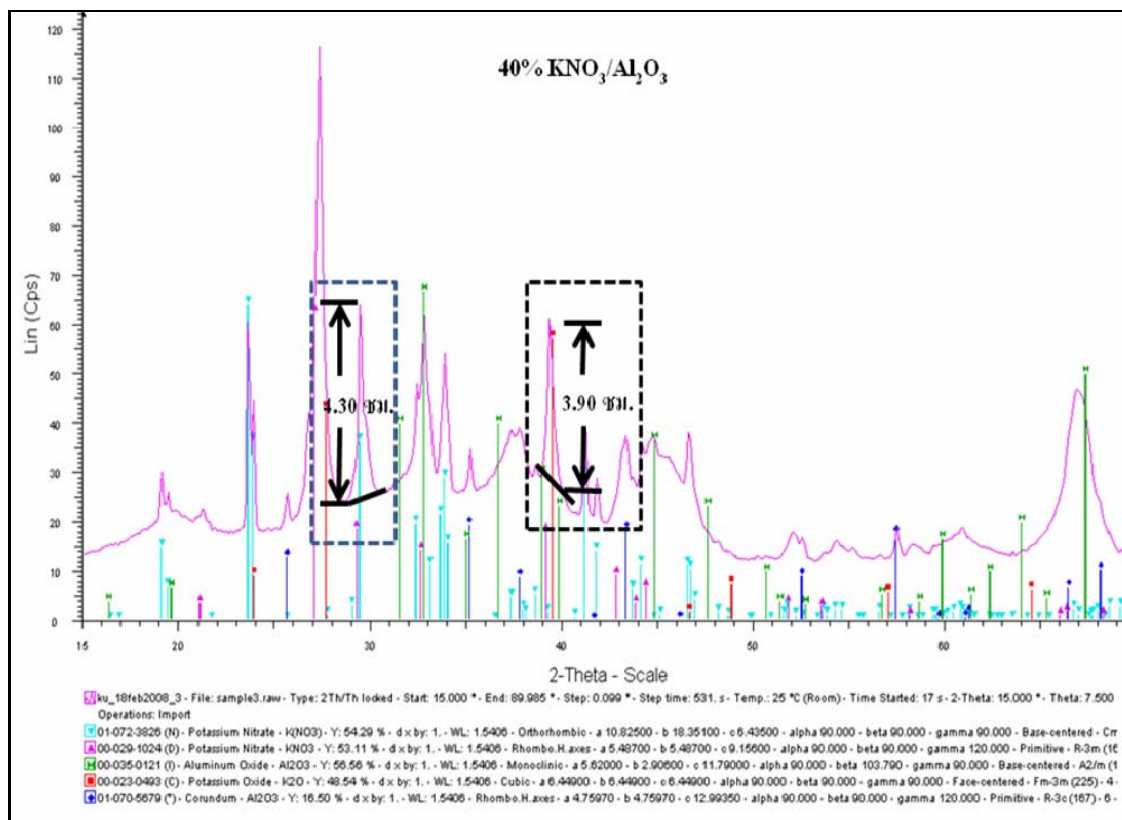
ภาพผนวกที่ ๒ ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 35% KNO₃/Al₂O₃

จากรูปการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เลือกพิกัดเด่นของโพแทสเซียมไนเตรด คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และพิกัดเด่นของโพแทสเซียมออกไซด์ คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 39.481$ แล้วทำการเปรียบเทียบความสูงของพิกัดโดยคิดจาก

$$\text{ความสูงของพิกัด K}_2\text{O} : \text{ความสูงของพิกัด KNO}_3 = \frac{2.85}{2.0} = 1.425$$

หมายเหตุ: พิกัดที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดคือที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.703$ แต่เนื่องจากการวิเคราะห์แยกพบว่า พิกัดมีการซ้อนทับกัน (Over lap) ของสารทั้งสองตัว คือโพแทสเซียมไนเตรด และโพแทสเซียมออกไซด์ จึงไม่สามารถวัดความสูงของพิกัดได้ จึงเลือกพิกัดที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และ $2\theta = 39.481$

โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction)



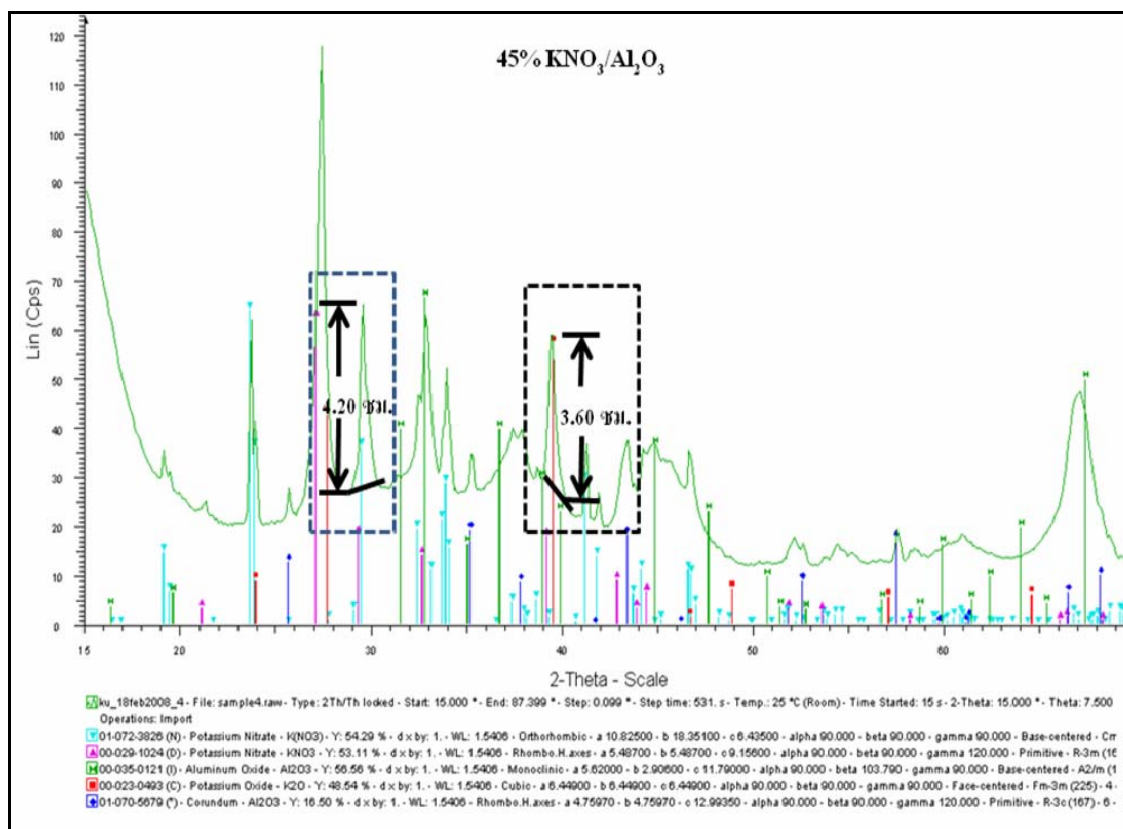
ภาพผนวกที่ จ3 ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 40% KNO₃/Al₂O₃

จากรูปการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เลือกพิกัดเด่นของโพแทสเซียมไนเตรด คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และพิกัดเด่นของโพแทสเซียมออกไซด์ คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 39.481$ แล้วทำการเปรียบเทียบความสูงของพิก โดยคิดจาก

$$\text{ความสูงของพิก K}_2\text{O} : \text{ความสูงของพิก KNO}_3 = \frac{3.90}{4.30} = 0.91$$

หมายเหตุ: พิกที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดคือที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.703$ แต่เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แยกพบว่า พิกมีการซ้อนทับกัน (Over lap) ของสารทั้งสองตัว คือโพแทสเซียมไนเตรด และโพแทสเซียมออกไซด์ จึงไม่สามารถวัดความสูงของพิกได้ จึงเลือกพิกที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และ $2\theta = 39.481$

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction)



ภาพผนวกที่ 4 ข้อมูลจากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ 45% KNO₃/Al₂O₃

จากรูปการวิเคราะห์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เลือกพีคเด่นของโพแทสเซียมไนเตรด คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และพีคเด่นของโพแทสเซียมออกไซด์ คือที่ตำแหน่ง $2\theta = 39.481$ แล้วทำการเปรียบเทียบความสูงของพีคโดยคิดจาก

$$\text{ความสูงของพีค K}_2\text{O} : \text{ความสูงของพีค KNO}_3 = \frac{3.60}{4.20} = 0.857$$

หมายเหตุ: พีคที่ตำแหน่งที่สูงที่สุดคือที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.703$ แต่เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แยกพบว่า พีคมีการซ้อนทับกัน (Over lap) ของสารทั้งสองตัว คือโพแทสเซียมไนเตรด และโพแทสเซียมออกไซด์ จึงไม่สามารถวัดความสูงของพีคได้ จึงเลือกพีคที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.393$ และ $2\theta = 39.481$

ภาคผนวก จ

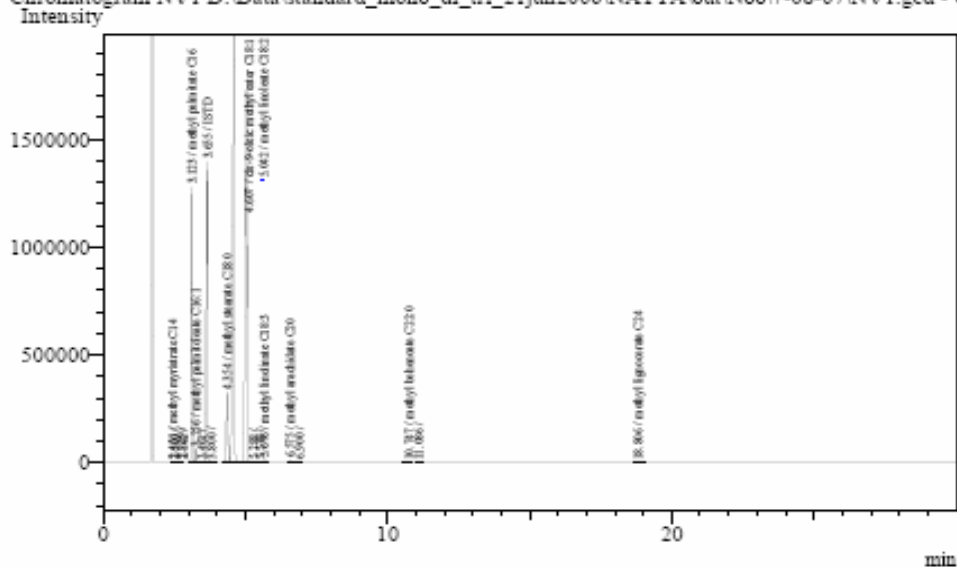
โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 7/8/2550 14:56:26
Vial# : 5

Chromatogram NV1 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\7-08-07\NV1.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.451	10719	5520	0.043	%		methyl myristate C14
2	2.500	1104	610	0.004		V	
3	2.729	4398	1513	0.018		V	
4	2.802	1002	431	0.004		V	
5	3.123	3086919	1277059	12.387	%		methyl palmitate C16
6	3.256	168862	65226	0.678	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.461	2400	881	0.010		V	
8	3.655	3938107	1395013	15.802	%	V	ISTD
9	3.800	12867	2967	0.052		V	
10	4.354	1383299	327726	5.551	%		methyl stearate C18:0
11	4.607	9111348	2106917	36.561	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	5.042	7097552	1761850	28.480	%		methyl linoleate C18:2
13	5.288	2739	688	0.011		V	
14	5.518	2312	512	0.009			
15	5.676	30303	8400	0.122	%	V	methyl linolate C18:3
16	6.575	33059	6894	0.133	%		methyl arachidate C20
17	6.900	12024	2248	0.048			
18	10.747	9828	1002	0.039	%		methyl behenate C22:0
19	11.086	5265	815	0.021			
20	18.806	6887	559	0.028	%		methyl lignocerate C24
Total		24920994	6966831				

ภาพผนวกที่ ๑1 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 25% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสถานะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

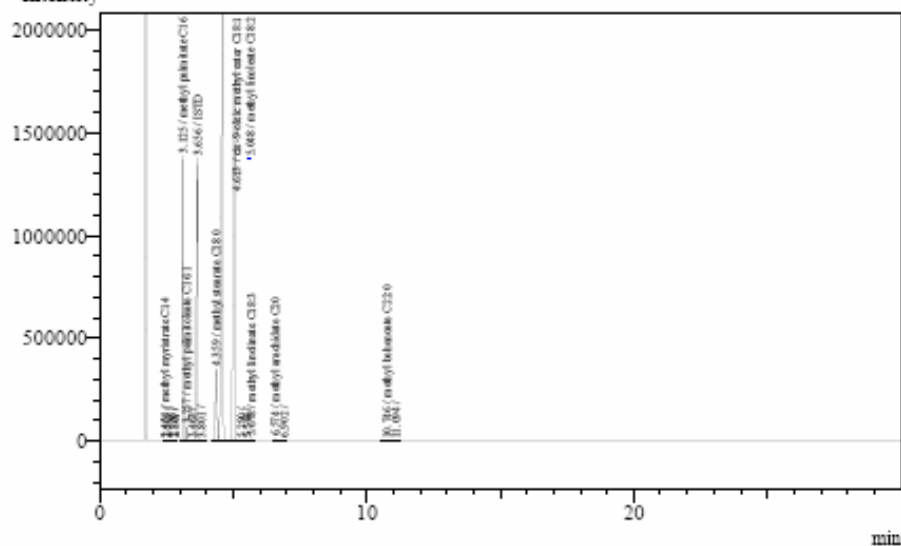
โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Analysis Date & Time : 7/8/2550 15:33:25
Vial# : 6

Sample Information

Chromatogram NV2 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\7-08-07\NV2.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.451	11416	5980	0.043	%		methyl myristate C14
2	2.501	1224	655	0.005		V	
3	2.730	4246	1552	0.016		V	
4	2.801	1756	466	0.007		V	
5	3.125	3358660	1388648	12.552	%		methyl palmitate C16
6	3.257	182529	70716	0.682	%	V	methyl palmitoleate C16:1
7	3.463	2499	937	0.009		V	
8	3.656	3940489	1375443	14.727	%	V	ISTD
9	3.801	13467	3207	0.050		V	
10	4.359	1518560	351234	5.675	%		methyl stearate C18:0
11	4.613	9927444	2236991	37.102	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	5.048	7691156	1848218	28.744	%	S	methyl linoleate C18:2
13	5.290	2213	643	0.008		T	
14	5.518	2549	567	0.010			
15	5.678	32754	9096	0.122	%	V	methyl linolenate C18:3
16	6.574	36633	7705	0.137	%		methyl arachidate C20
17	6.902	13236	2493	0.049			
18	10.746	10459	1061	0.039	%		methyl behenate C22:0
19	11.094	5944	912	0.022			
Total		26757234	7306524				

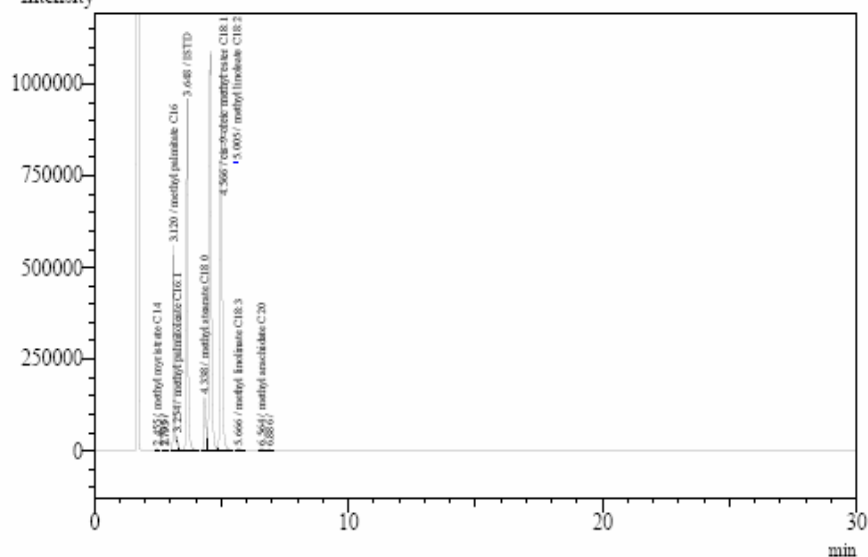
ภาพผนวกที่ ๓2 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 21/8/2550 12:58:55
Vial# : 1

Chromatogram NV3 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\21-08-07\NV3.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.455	8368	2948	0.045	%		methyl myristate C14
2	2.735	2466	879	0.013		V	
3	2.795	1156	331	0.006		V	
4	3.120	2096033	558467	11.288	%	S	methyl palmitate C16
5	3.254	44828	18701	0.241	%	T	methyl palmitoleate C16:1
6	3.648	4271656	958195	23.005	%	V	ISTD
7	4.338	799103	143207	4.303	%		methyl stearate C18:0
8	4.566	6035573	1088452	32.504	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
9	5.005	5264402	1056515	28.351	%	V	methyl linoleate C18:2
10	5.666	21901	4153	0.118	%		methyl linoleate C18:3
11	6.564	17966	2326	0.097	%		methyl arachidate C20
12	6.886	5241	757	0.028			
Total		18568693	3834931				

ภาพผนวกที่ ๓ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสถานะการทำให้ปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

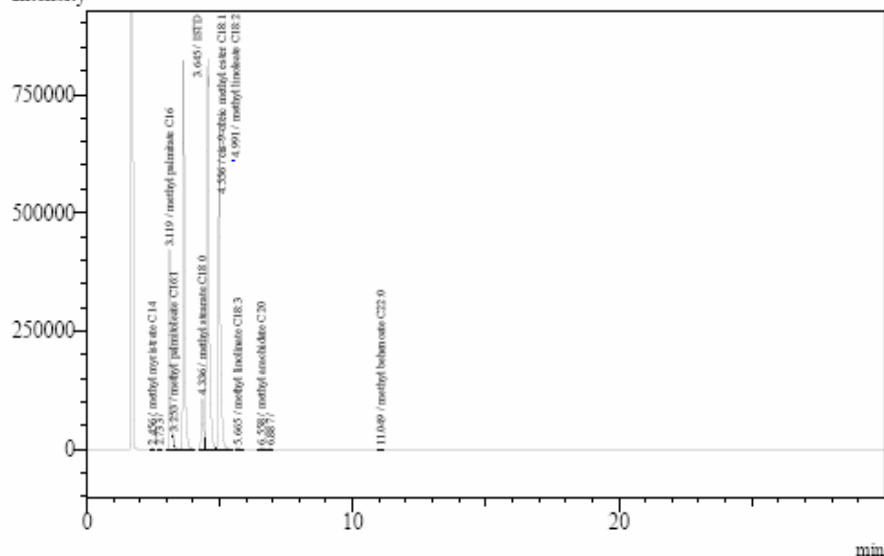
โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Analysis Date & Time : 21/8/2550 13:35:48
Vial# : 2

Sample Information

Chromatogram NV4 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\21-08-07\NV4.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

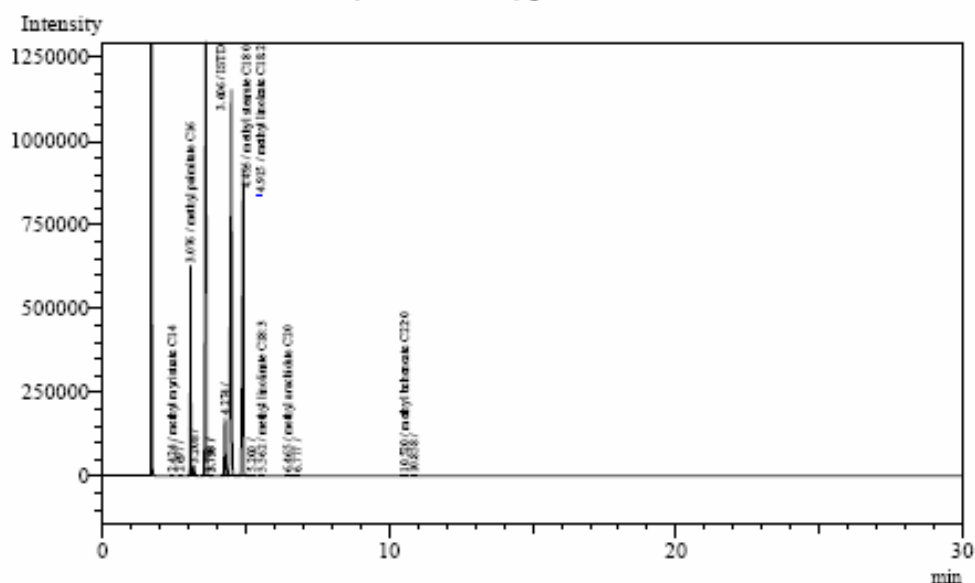
Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.456	7019	2197	0.046	%		methyl myristate C14
2	2.733	1906	595	0.013	%		
3	3.119	1729108	421696	11.437	%	S	methyl palmitate C16
4	3.253	23156	10350	0.153	%	T	methyl palmitoleate C16:1
5	3.645	3899105	821870	25.790	%	V	ISTD
6	4.336	616354	107174	4.077	%		methyl stearate C18:0
7	4.556	4938091	824884	32.662	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
8	4.991	3872248	710563	25.612	%	V	methyl linoleate C18:2
9	5.665	15715	2769	0.104	%		methyl linolenate C18:3
10	6.558	11844	1577	0.078	%		methyl arachidate C20
11	6.887	2565	448	0.017	%		
12	11.049	1554	232	0.010	%		methyl behenoate C22:0
Total		15118665	2904355				

ภาพผนวกที่ ๓4 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 45% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี

Analysis Date & Time : 16/1/2551 12:02:34
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : NV16
 Sample ID : NV16
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\Data\Noo\16-01-07\NV16.gcd
 Method Name : D:\Data\bsc(method for Fame).gcm



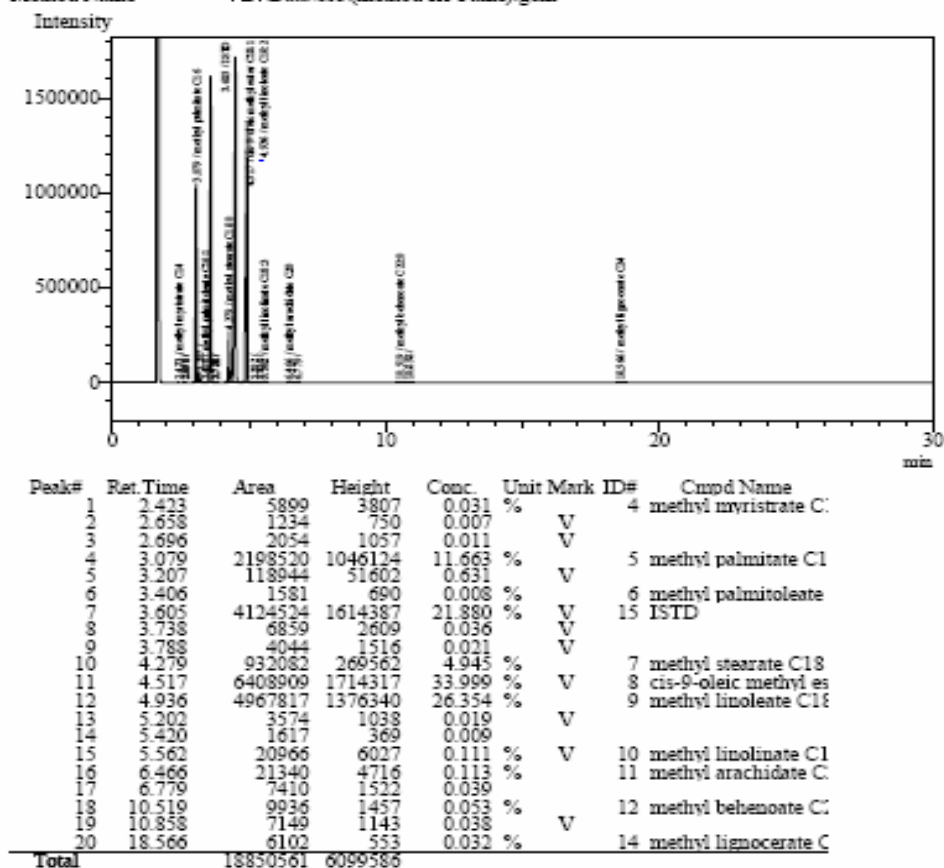
Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit Mark	ID#	Compd Name
1	2.424	3589	2355	0.028	%	4	methyl myristate C14
2	2.697	1405	747	0.011	V		
3	3.076	1275789	627062	10.070	%	5	methyl palmitate C16
4	3.208	69174	30390	0.546	V		
5	3.606	4130671	1625839	32.603	%	SV	15 ISTD
6	3.738	1878	992	0.015	T		
7	3.790	2301	1069	0.018	TV		
8	4.274	525812	171811	4.150			
9	4.495	3714424	1151726	29.318	%	V	7 methyl stearate C18
10	4.915	2902783	913882	22.911	%	S	9 methyl linoleate C18
11	5.200	3291	982	0.026	T		
12	5.562	12474	3727	0.098	%	V	10 methyl linolenate C18
13	6.465	12040	2824	0.095	%		11 methyl arachidate C20
14	6.777	4496	942	0.035			
15	10.520	5703	905	0.045	%		12 methyl behenate C22
16	10.858	3794	678	0.030			
Total		12669624	4535931				

ภาพผนวกที่ ๑5 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี

Analysis Date & Time : 16/1/2551 12:39:28
 User Name : Admin
 Vial# : 2
 Sample Name : NV17
 Sample ID : NV17
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\Data\Noo\16-01-07\NV17.gcd
 Method Name : D:\Data\bsc\method for Fame).gcm



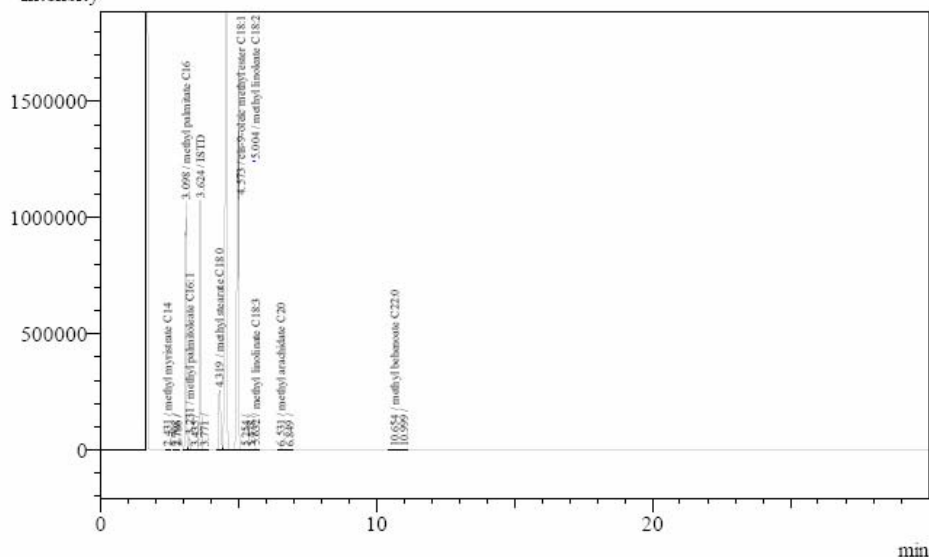
ภาพผนวกที่ ๑๖ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 7 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 29/8/2550 15:41:41
Vial# : 3

Chromatogram NV6 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\29-08-07\NV6.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

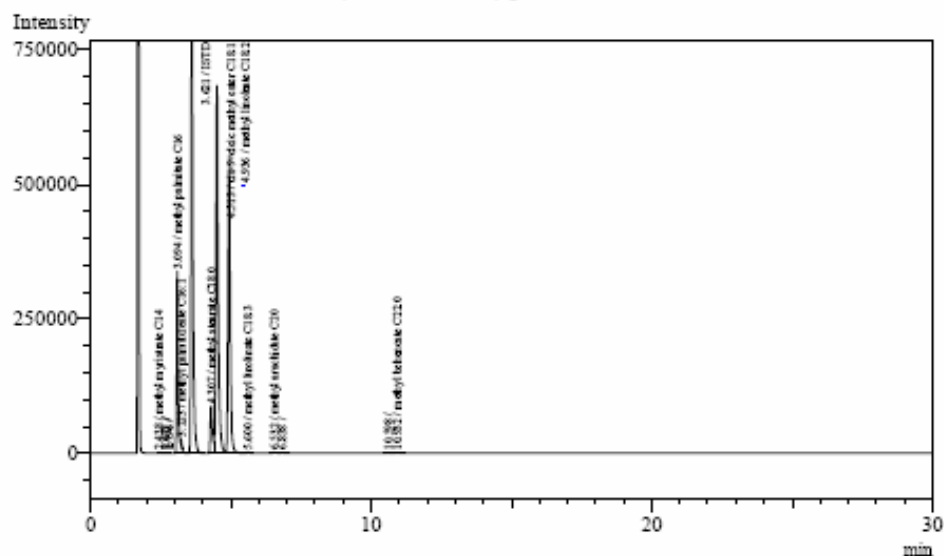
Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.431	10973	4771	0.044	%		methyl myristate C14
2	2.708	3918	1261	0.016		V	
3	2.786	1542	399	0.006		V	
4	3.098	3087077	1067795	12.399	%		methyl palmitate C16
5	3.231	163942	54849	0.658	%	V	methyl palmitoleate C16:1
6	3.435	2193	722	0.009		V	
7	3.624	3791332	1073971	15.228	%	V	ISTD
8	3.771	13094	2512	0.053		V	
9	4.319	1388523	255273	5.577	%		methyl stearate C18:0
10	4.573	9254268	2019023	37.169	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
11	5.004	7084222	1672997	28.453	%		methyl linoleate C18:2
12	5.254	2559	553	0.010		V	
13	5.478	2273	442	0.009			
14	5.632	29966	7126	0.120	%	V	methyl linolate C18:3
15	6.531	33597	5602	0.135	%		methyl arachidate C20
16	6.849	11675	1874	0.047			
17	10.654	10497	1146	0.042	%		methyl behenoate C22:0
18	10.999	6096	889	0.024			
Total		24897747	6171205				

ภาพผนวกที่ ๗ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี

Analysis Date & Time : 14/2/2551 15:07:00
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : NV19
 Sample ID : NV19
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\Data\Noo\14-02-08\NV19.gcd
 Method Name : D:\Data\bsc\method for Fame).gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	2.438	4849	1639	0.038	%		4	methyl myristate C1
2	2.671	1156	530	0.009				
3	2.712	1349	516	0.011		V		
4	2.796	1098	295	0.009		V		
5	3.094	1328390	338564	10.538	%	SV	5	methyl palmitate C1
6	3.223	17391	8147	0.138	%	T	6	methyl palmitoleate
7	3.621	4041599	912915	32.061	%	V	15	ISTD
8	4.307	475171	87535	3.769	%		7	methyl stearate C18
9	4.513	3777384	683158	29.965	%	V	8	cis-9-oleic methyl es
10	4.936	2922601	553659	23.184	%	SV	9	methyl linoleate C18
11	5.600	12976	2367	0.103	%		10	methyl linolate C1
12	6.532	9817	1366	0.078	%		11	methyl arachidate C
13	6.838	3586	463	0.028		S		
14	10.598	4168	506	0.033				
15	10.932	4538	501	0.036	%		12	methyl behenoate C
Total		12606073	2592161					

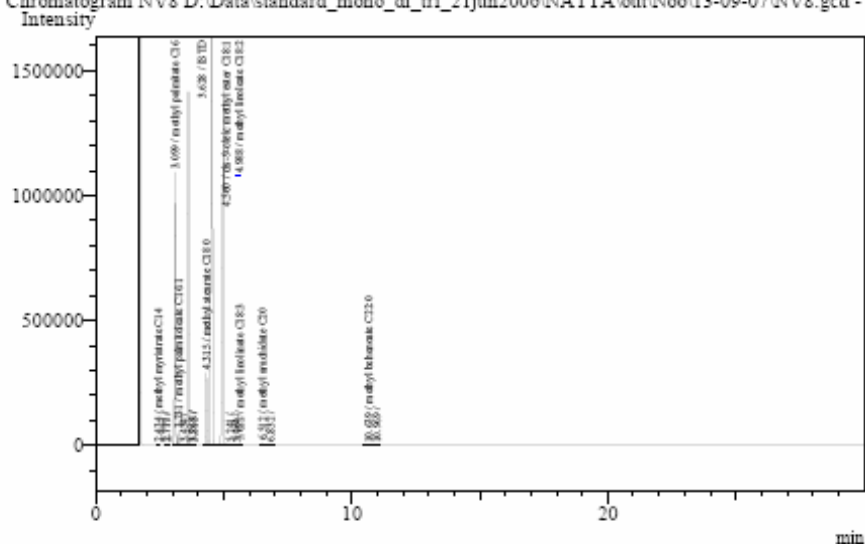
ภาพผนวกที่ ๘ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 9 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 13/9/2550 15:49:24
Vial# : 2

Chromatogram NV8 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\13-09-07\NV8.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc	Units	Mark	Name
1	2.434	8493	4874	0.042	%		methyl myristate C14
2	2.711	2900	1406	0.014		V	
3	2.777	1407	367	0.007		V	
4	3.099	2456076	1092446	12.114	%		methyl palmitate C16
5	3.231	1333365	54457	0.658	%	V	methyl palmitoleate C16:1
6	3.434	1774	748	0.009		V	
7	3.628	3792264	1413232	18.705	%	V	ISTD
8	3.768	6897	2642	0.034		V	
9	3.815	4765	1671	0.024		V	
10	4.315	1068799	290535	5.272	%		methyl stearate C18:0
11	4.560	7188283	1805733	35.456	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
12	4.988	5532209	1452615	27.287	%		methyl linoleate C18:2
13	5.241	2274	586	0.011		V	
14	5.464	1868	402	0.009			
15	5.622	23799	6676	0.117	%	V	methyl linolenate C18:3
16	6.512	25505	5375	0.126	%		methyl arachidate C20
17	6.832	9130	1780	0.045			
18	10.639	9243	1089	0.046	%		methyl behenoate C22:0
19	10.969	4958	776	0.024			
Total		20274009	6137410				

ภาพผนวกที่ ๑๑ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

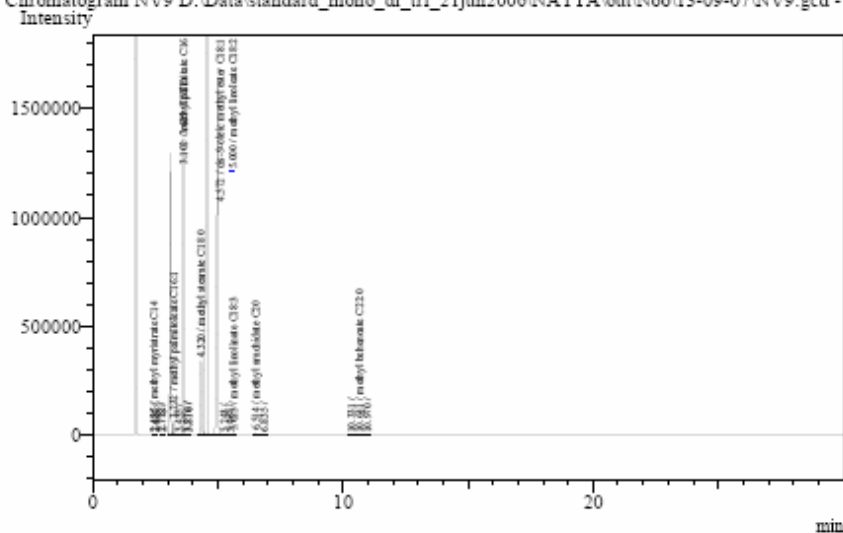
โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Analysis Date & Time : 13/9/2550 16:26:19
Vial# : 3

Sample Information

Chromatogram NV9 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\13-09-07\NV9.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc	Units	Mark	Name
1	2.435	9807	5480	0.041	%		methvl myristate C14
2	2.484	1152	636	0.005		V	
3	2.712	3135	1502	0.013		V	
4	2.778	1668	453	0.007		V	
5	3.102	2960838	1292697	12.462	%	V	methvl palmitate C16
6	3.232	159382	64287	0.671	%	V	methvl palmitoleate C16:1
7	3.435	2103	843	0.009		V	
8	3.629	3765706	1362987	15.849	%	V	ISTD
9	3.770	8299	3063	0.035		V	
10	3.816	4625	1751	0.019		V	
11	4.320	1322276	342144	5.565	%		methvl stearate C18:0
12	4.572	8753589	2035575	36.843	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
13	5.000	6672014	1631565	28.082	%	S	methvl linoleate C18:2
14	5.243	2068	596	0.009		T	
15	5.467	2184	499	0.009			
16	5.623	28129	7910	0.118	%	V	methvl linolenate C18:3
17	5.514	31834	6617	0.134	%		methvl arachidate C20
18	6.835	11161	2141	0.047			
19	10.331	2222	381	0.009			
20	10.641	10402	1231	0.044	%		methvl behenolate C22:0
21	10.970	6705	988	0.028		V	
Total		23759299	6763346				

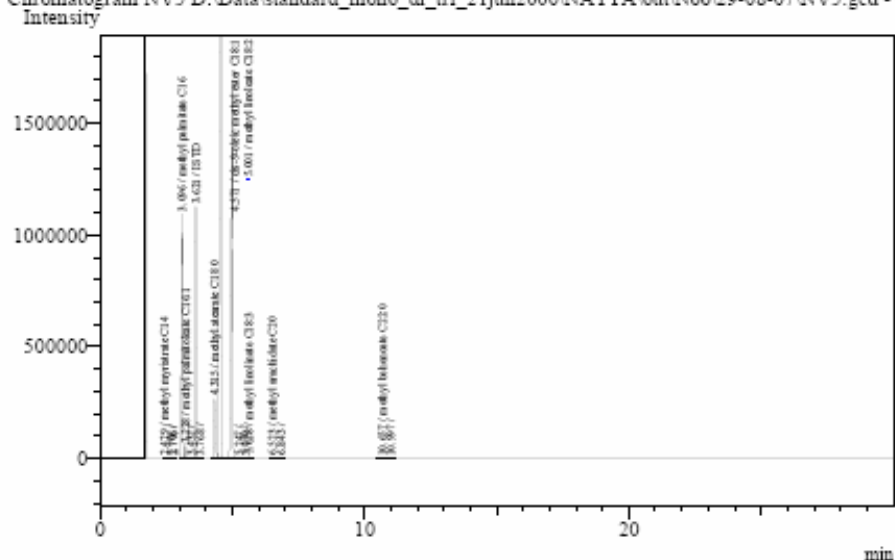
ภาพผนวกที่ ๑10 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 18 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 29/8/2550 15:04:48
Vial# : 2

Chromatogram NV5 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\29-08-07\NV5.gcd - Channel 1

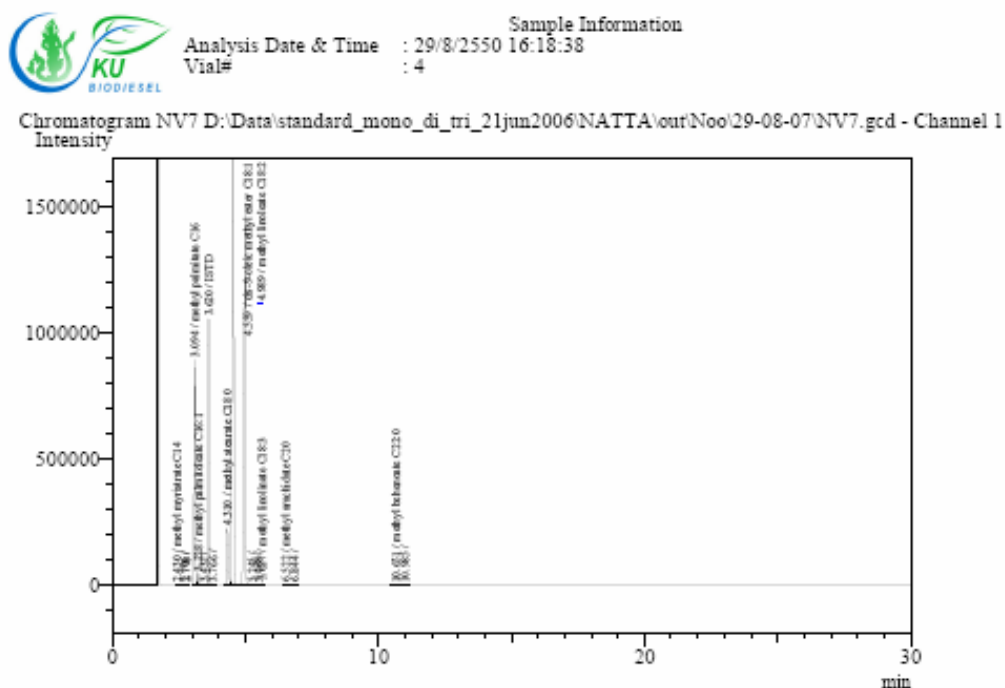


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.429	10925	4907	0.044	%		methvl myristate C14
2	2.706	3897	1316	0.016			
3	2.776	1661	411	0.007		V	
4	3.096	3086403	1094218	12.394	%	V	methvl palmitate C16
5	3.228	165263	55987	0.664	%	SV	methvl palmitoleate C16:1
6	3.432	1915	711	0.008		T	
7	3.621	3792197	1126885	15.229	%	SV	ISTD
8	3.768	7955	1857	0.032		T	
9	4.315	1385391	267947	5.563	%		methvl stearate C18:0
10	4.571	9249228	2047205	37.143	%	V	cis-9-oleic methvl ester C18:1
11	5.001	7099526	1679553	28.510	%		methvl linoleate C18:2
12	5.247	2640	554	0.011		V	
13	5.470	2276	430	0.009			
14	5.628	30057	7257	0.121	%	V	methvl linolenate C18:3
15	6.523	33514	5545	0.135	%		methvl arachidate C20
16	6.843	11789	1890	0.047			
17	10.657	10607	1179	0.043	%		methvl behenoate C22:0
18	10.997	6605	924	0.027			
Total		24901849	6298776				

ภาพผนวกที่ ๑11 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสถานะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.430	9657	4120	0.044	%		methyl myristate C14
2	2.706	3549	1133	0.016	%	V	
3	2.778	1428	361	0.007	%	V	
4	3.094	2643588	892091	12.114	%		methyl palmitate C16
5	3.228	141182	46146	0.647	%	V	methyl palmitoleate C16:1
6	3.432	1795	607	0.008	%	V	
7	3.620	3768243	1055690	17.267	%	SV	ISTD
8	3.766	4749	1072	0.022	%	T	
9	4.310	1168440	226315	5.354	%		methyl stearate C18:0
10	4.559	7904354	1760675	36.220	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
11	4.989	6094507	1500537	27.927	%		methyl linoleate C18:2
12	5.245	2207	468	0.010	%	V	
13	5.468	1972	367	0.009	%		
14	5.627	26114	6025	0.120	%	V	methyl linolenate C18:3
15	6.522	27877	4445	0.128	%		methyl arachidate C20
16	6.844	9381	1493	0.043	%		
17	10.651	8428	919	0.039	%		methyl behenoate C22:0
18	10.985	5483	728	0.025	%		
Total		21822954	5503192				

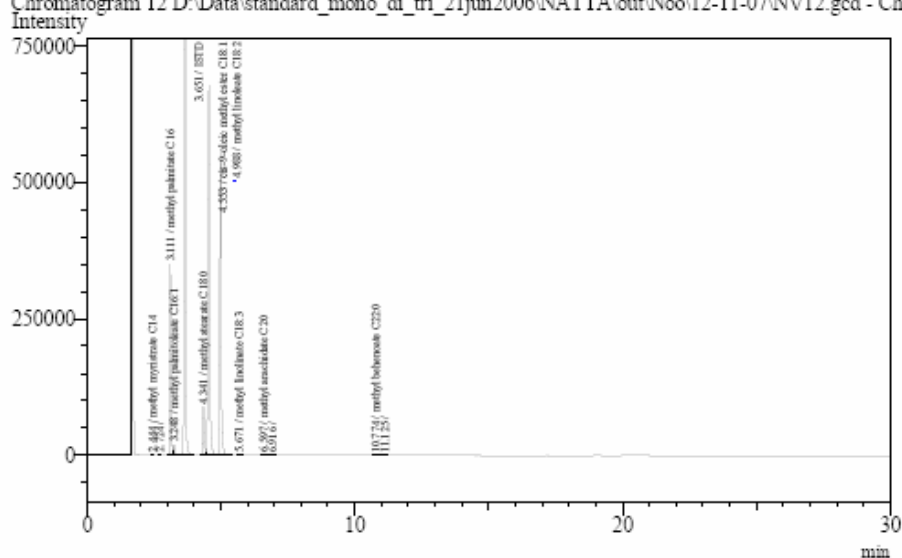
ภาพผนวกที่ ๑๒ โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยทำปฏิกิริยาในสถานะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 8.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 13/11/2550 13:57:30
Vial# : 3

Chromatogram 12 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\12-11-07\NV12.gcd - Channel 1



Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.444	4079	1938	0.039	%		methyl myristate C14
2	2.724	1903	815	0.018	%	V	
3	3.111	962729	350081	9.179	%		methyl palmitate C16
4	3.248	58680	19152	0.559	%	SV	methyl palmitoleate C16:1
5	3.651	4028813	1231082	38.411	%		ISTD
6	4.341	382143	88969	3.643	%		methyl stearate C18:0
7	4.553	2820307	678330	26.889	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
8	4.988	2205241	557164	21.025	%	SV	methyl linoleate C18:2
9	5.671	9668	2205	0.092	%		methyl linolenate C18:3
10	6.597	8138	1321	0.078	%		methyl arachidate C20
11	6.916	2267	417	0.022	%		
12	10.774	2942	387	0.028	%		methyl behenoate C22:0
13	11.125	1900	301	0.018	%		
Total		10488810	2932162				

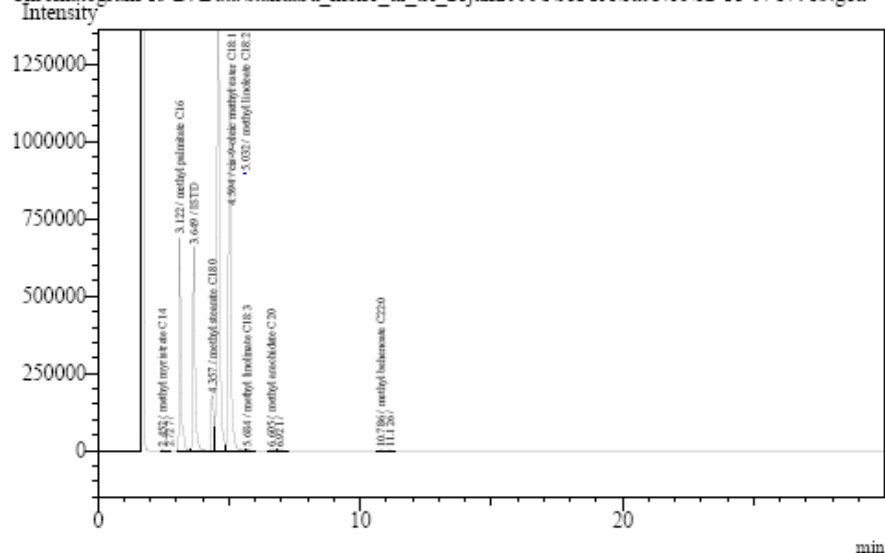
ภาพผนวกที่ ๑13 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยนำมาทำปฏิกิริยาซ้ำครั้งที่ 1 ในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



Sample Information
Analysis Date & Time : 13/11/2550 15:48:21
Vial# : 6

Chromatogram 15 D:\Data\standard_mono_di_tri_21jun2006\NATTA\out\Noo\12-11-07\NV15.gcd - Channel 1

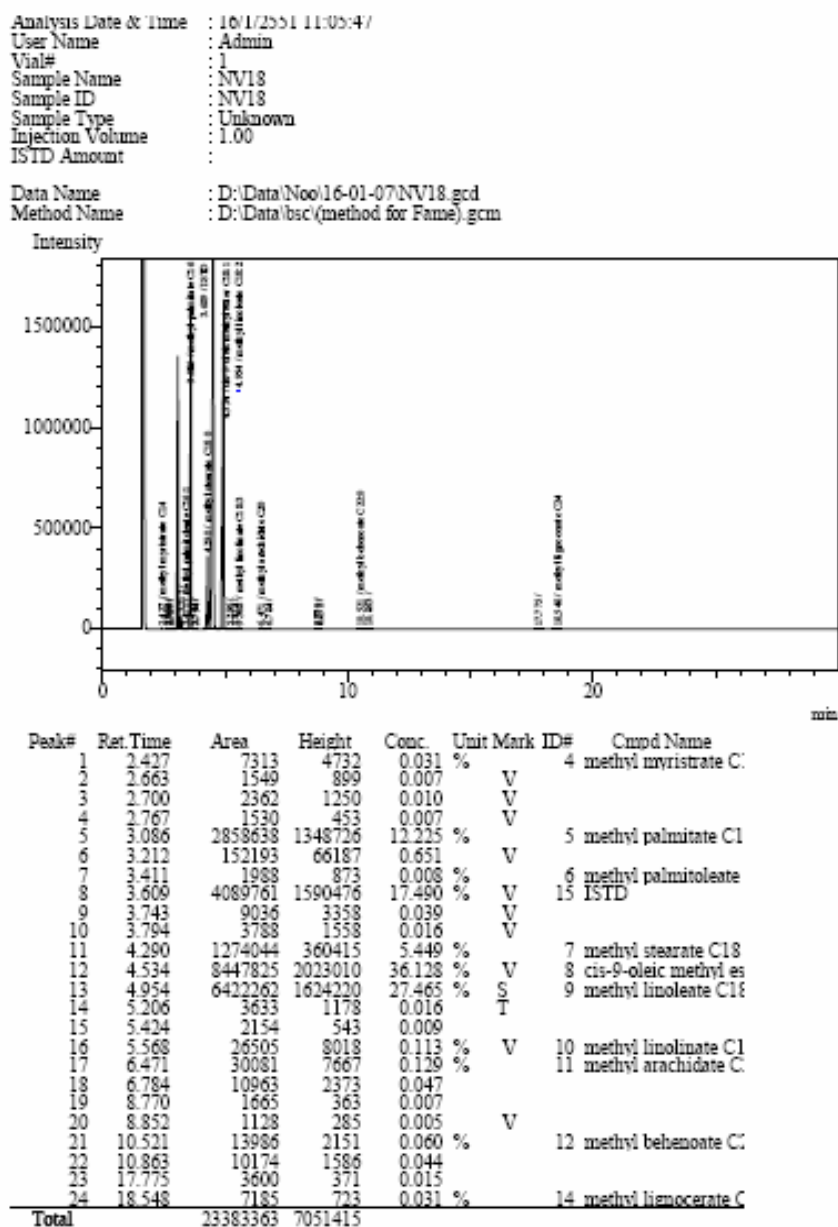


Peak Table - Channel 1

Peak#	Ret Time	Area	Height	Conc.	Units	Mark	Name
1	2.452	11941	3186	0.045	%	S	methyl myristate C14
2	2.727	2573	670	0.010	%		
3	3.122	3483271	692402	13.090	%		methyl palmitate C16
4	3.649	3846615	661027	14.455	%	SV	ISTD
5	4.357	1210179	179053	4.548	%	V	methyl stearate C18:0
6	4.594	10282067	1410324	38.639	%	V	cis-9-oleic methyl ester C18:1
7	5.032	7686667	1209872	28.886	%	SV	methyl linoleate C18:2
8	5.684	26676	4474	0.100	%	T	methyl linolenate C18:3
9	6.605	31807	3173	0.120	%		methyl arachidate C20
10	6.921	16400	1392	0.062	%	V	
11	10.786	7613	779	0.029	%		methyl behenoate C22:0
12	11.126	4924	533	0.019	%		
Total		26610733	4166885				

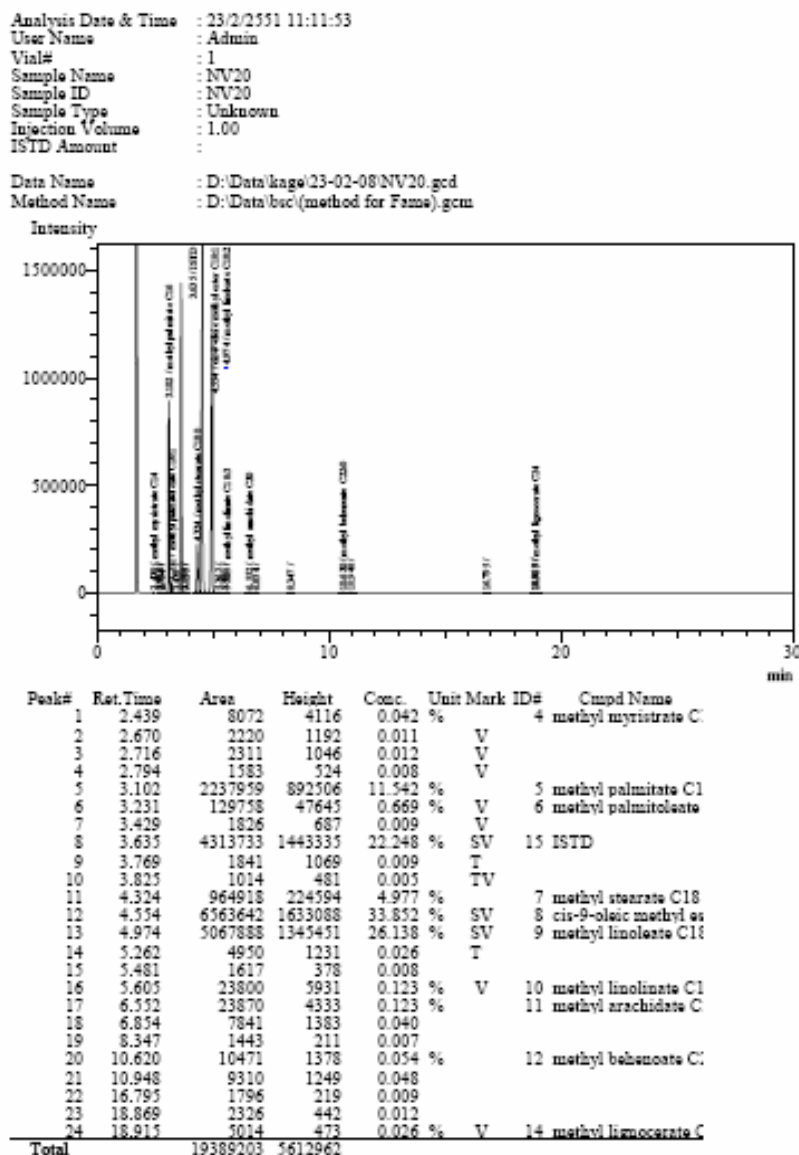
ภาพผนวกที่ 14 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่นำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 1 โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



ภาพผนวกที่ ๑15 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่นำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 2 โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

โครมาโตแกรมได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี



ภาพผนวกที่ ๑16 โครมาโตแกรมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่นำมาสังเคราะห์ซ้ำใหม่ครั้งที่ 3 โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวนิตา เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 มกราคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดสุโขทัย
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วท.บ. (เคมี) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (พ.ศ. 2548)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้าน ปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรม เคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

