



รายงานการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากเส้นทะเลในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิต
ไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ ตอนที่ 2

Utilization of cattle fish bone to catalyze transesterification for low
cost biodiesel production Part 2



ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากกระดูกปลาในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิต
ไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ ตอนที่ 2

Utilization of cattle fish bone to catalyze transesterification for
low cost biodiesel production part 2



ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

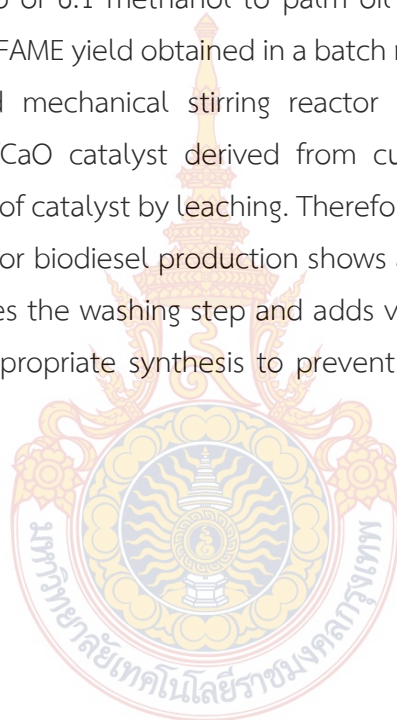
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลื่นทะเล ด้วยวิธีการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C และนำไปเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล โดยวิธีเอ็บซุ่มสารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 4 h ทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทานอลกับน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และหาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันปาล์ม 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO 10 %wt ที่ 240 min จะให้ผลได้ของ FAME ที่ดีที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกวน เท่ากับ 87.31 และ 94.70% ตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพจากการชะละลายของตำแหน่งว่องไว (Leaching) ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจะช่วยในด้านของการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากช่วยลดขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับลื่นทะเลเหลือทิ้งจากประมงแต่ต้องมีการศึกษาถึงวิธีการเตรียมที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากการชะละลาย



Abstract

This study aims to investigate the optimization for transesterification of palm oil to produce. CaO catalyst derived from cuttlefish were prepared by calcination in the air at 900°C KOH/CaO catalyst was synthesized by impregnation with 20 %wt of KOH solution at 600°C for 4 h. The catalytic activity of catalyst was test for transesterification of palm oil with methanol in a batch reactor. This research also investigated the optimum conditions for transesterification of palm oil for biodiesel production. The optimum conditions using batch reactor for transesterification was found at the molar ratio of 6:1 methanol to palm oil and 10% KOH/CaO catalyst at 240 min. The maximum FAME yield obtained in a batch reactor and ultrasound-assisted batch reactor (US) and mechanical stirring reactor (MS) were 87.31 and 94.70% respectively. This KOH/CaO catalyst derived from cuttlefish could not be reused because of deactivation of catalyst by leaching. Therefore, the use of KOH/CaO catalyst derived from cuttlefish for biodiesel production shows a cost-effective, environmental friendly due to it reduces the washing step and adds value to fisheries. However, this catalyst requires the appropriate synthesis to prevent one deactivation of KOH/CaO catalyst by leaching.



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| Abstract | ข |
| สารบัญ | ค |
| รายการตาราง | ช |
| รายการรูป | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัย | 4 |
| บทที่ 2 วารสารปารีทัศน์ | 5 |
| 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา | 5 |
| 2.2 แหล่งที่มาของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) | 7 |
| 2.3 ไบโอดีเซล (Biodiesel) | 10 |
| 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน | 13 |
| 2.5 ทฤษฎีคลื่นเหนือเสียง | 14 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการ | 23 |
| 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 23 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 23 |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง | 24 |
| 3.4 วิธีการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ | 28 |
| 3.5 วิธีการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียง ร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน | 29 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล | 31 |
| 4.1 ทดสอบความแรงเบส (Basic Strength) และการหาปริมาณเบส (Basicity) | 31 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.2 การเปรียบเทียบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาของ KOH/CaO จากลignite และตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite และตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน | 32 |
| 4.3 ลักษณะของสารในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ | 33 |
| 4.4 การหาภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite | 33 |
| 4.5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite กลับมาใช้ซ้ำ | 38 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 40 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 40 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 41 |
| บรรณานุกรม | 42 |
| ภาคผนวก | 46 |
| ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณปริมาตรน้ำมันและเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมล | 47 |
| ภาคผนวก ข วิธีคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO | 49 |
| ภาคผนวก ค วิธีคำนวณปริมาณเบส (Basicity) | 50 |
| ภาคผนวก ง วิธีการวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลโดยใช้เครื่อง GC ตามมาตรฐาน EN 14103 | 51 |
| ภาคผนวก จ เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) | 53 |
| ภาคผนวก ฉ วิธีตั้งค่าการใช้งาน GC ในการหาปริมาณไบโอดีเซล | 56 |
| ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์ FT-IR และ BET | 58 |
| ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากลignite ด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N ₂ absorbtion) | 59 |
| ประวัติผู้เขียน | 60 |

รายการตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์และเอกพันธุ์ [5] | 6 |
| 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) | 27 |
| 4.1 ความแรงเบสและปริมาณเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ KOH/CaO ที่สังเคราะห์ได้ 311 | |
| ค.1 ผลการทดลองปริมาณเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ที่สังเคราะห์ได้ | 50 |



รายการรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ลิ่นทะเล | 8 |
| 2.2 เปลือกหอยชนิดต่างๆ | 9 |
| 2.3 เปลือกไข่ | 9 |
| 2.4 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม | 10 |
| 2.5 ช่วงความถี่ของคลื่นเหนือเสียง | 15 |
| 2.6 การเกิดฟองอากาศและการแตกตัวของฟองอากาศ | 16 |
| 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน | 28 |
| 3.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน | 29 |
| 4.1 ผลได้ของ FAME จากตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล CaO จากลิ่นทะเล และ NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL | 322 |
| 4.2 การแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอลและเมทานอล | 33 |
| 4.3 ผลได้ของ FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล 10 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL | 34 |
| 4.4 ผลได้ของ FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล 2, 5, 10 และ 15 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL | 36 |
| 4.5 ผลได้ของ FAME ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล 10%wt อุณหภูมิ 60°C และที่เวลาต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย (US) เปรียบเทียบกับ เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (MS) ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 300 mL | 37 |
| 4.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล กลับมาใช้ซ้ำ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C และที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 300 mL | 39 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| จ.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ | 55 |
| ข.1 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite | 58 |
| ข.1 ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite | 59 |



บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย ขอบเขตของการทำงานวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากการทำงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์สำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม การขนส่ง และสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร ทำให้มีความต้องการพลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการคาดการณ์ด้านพลังงานทั่วโลกในปี ค.ศ. 2013 โดยองค์การบริหารข้อมูลพลังงานของสหรัฐอเมริกา (U.S energy information administration) รายงานปริมาณพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในปี 2010 มีค่า 5.5282×10^{20} J และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 8.6510×10^{20} J ในปี 2014 ซึ่งคิดเป็น 54% ของการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าภาคการขนส่งมีการใช้พลังงานเป็นอันดับที่สองและคิดเป็นพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้น 1.1% ต่อปี [1] แหล่งพลังงานที่ใช้สำหรับภาคการขนส่งส่วนใหญ่มาจากพลังงานฟอสซิล เช่น น้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีน แก๊สแอลพีจี (Liquid petroleum gas, LPG) น้ำมันดีเซล และแก๊สธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานจากฟอสซิลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการเช่น มีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเป็นจำนวนมาก การเกิดฝนกรด และทำให้เกิดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงแล้วยังมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณสำรองน้ำมันดิบที่ลดลง การเพิ่มขึ้นของราคาของน้ำมันปิโตรเลียมที่มาจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียมในปริมาณที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีความยั่งยืน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น โดยพบว่าแหล่งของพลังงานทางเลือกที่มีแนวโน้มจะสามารถใช้ได้กับสถานการณ์พลังงานในอนาคตของโลก ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม น้ำ และเชื้อเพลิงชีวภาพ (ไบโอดีเซล ไบโอเอทานอล ไบโอดีเซล พลังงาน ชีวมวล) ซึ่งมีศักยภาพที่จะนำมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้จากที่กล่าวมาพบว่าไบโอดีเซลเป็นพลังงานที่น่าสนใจ สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ และข้อได้เปรียบน้ำมันดีเซลคือ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นพลังงานหมุนเวียน ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ค่าซีเทนสูง จุดวาบไฟสูง กำมะถันต่ำ ให้ค่าการหล่อลื่นที่ดีกว่ากลุ่มอื่น ๆ นอกจากนี้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟอยู่ที่ 150°C ทำให้เป็นเชื้อเพลิงไม่ติดไฟและไม่เกิดระเบิด ซึ่งแตกต่างจากน้ำมันดีเซลที่มีจุดวาบไฟ 64°C [2] ดังนั้นการจัดการ การจัดเก็บและการขนส่งของไบโอดีเซลจะได้ง่ายและปลอดภัยกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ผลิตไบโอดีเซลยังสามารถเพิ่มโอกาสในการแข่งขันของตลาดน้ำมันภายในประเทศ หรือในประเทศกำลังพัฒนาโดยเป็นการสร้างรายได้ภาคเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรได้อีกด้วย

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลคือน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยนำไปผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-เคชันกับแอลกอฮอล์โมเลกุลต่ำๆ เช่น เมทานอล เอทานอล และบิวทานอล เกิดผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระซึ่งก็คือไบโอดีเซล โดยถ้าใช้เมทานอลจะได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระ (Fatty acid methyl ester) โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-เคชันนี้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งชนิดที่เป็นกรด (Acid catalyst) และชนิดที่เป็นเบส (Base catalyst) แต่พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-เคชันได้เร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดถึง 4,000 เท่า ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่างๆ ไป (Conventional biodiesel production process) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ/หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-เคชันของน้ำมันพืชบริสุทธิ์ ในการผลิตไบโอดีเซลได้ที่อุณหภูมิประมาณ 60°C โดยใช้เวลาไม่เกิน 3 h แต่กระบวนการนี้มีข้อเสียคือต้องใช้น้ำมันพืชบริสุทธิ์ และต้องมีขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก และเสียค่าใช้จ่ายในการล้าง การเกิดอิมัลชันระหว่างกระบวนการล้างทำให้เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการผลิตและสูญเสียไบโอดีเซลระหว่างกระบวนการแยก และไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ [3] ดังนั้นนักวิจัยมากมายจึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตไบโอดีเซลต่างๆ เช่น การผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเมทานอลวิกฤตยวดยิ่ง (Biodiesel production via super critical methanol) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่กระบวนการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการทำให้เมทานอลอยู่ในภาวะวิกฤตยวดยิ่ง [4] นอกจากนี้ยังมีการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าให้ผลได้ของไบโอดีเซลใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส แต่มีข้อด้อย คือเอนไซม์มีราคาแพง และเสื่อมสภาพได้ง่าย ต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบเฉพาะ ทำให้วิธีนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรม [5]

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพันธ์ (Heterogeneous catalyst) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการผลิต ไบโอดีเซล ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพันธ์ชนิดเบสที่นิยมใช้ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) [5] และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) [6] เป็นต้น ซึ่งพบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH หรือ KOH แต่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งของแคลเซียมออกไซด์สามารถหาได้จากธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่ เปลือกหอย และกระดูกสัตว์ต่างๆ รวมไปถึงลันทาเลหรือกระดูกปลาทู (Cattle fish bone) พบมากตามชายหาดทะเล มีลักษณะเป็นสีขาว มีสมบัติเปราะหักง่าย มักนำไปใช้เป็นอาหารนกและเต่า ซึ่งใช้ในปริมาณที่น้อย ดังนั้นลันทาเลจึงกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการประมงและอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งสามารถหาได้ง่าย มีราคาถูก การนำวัสดุเหล่านี้มาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้ง เนื่องจากลันทาเลมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และ สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต (Ca-PO₃) เป็นองค์ประกอบหลัก [7] เมื่อนำไปเผาภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิสูง จะได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมฟอสเฟต (Ca₃(PO₄)₂)

ที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้จากลigniteจึงเป็นแนวทางใหม่สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซล ทำให้ช่วยลดต้นทุน และเป็นการใช้ประโยชน์จากธรรมชาติให้มีความคุ้มค่า

งานวิจัยนี้จึงศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite รวมถึงวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ และนำมาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในการผลิตไบโอดีเซล และเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์ได้โดยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปหาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลigniteในการผลิตไบโอดีเซล ในแง่ของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน นอกจากนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจึงจำเป็นต้องศึกษาความเสถียรในการใช้งาน ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลigniteซ้ำ และศึกษาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนแคลเซียมออกไซด์ (KOH/CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากลignite
- 1.2.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลigniteในการผลิตไบโอดีเซล ในแง่ของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันในการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 60°C
- 1.2.3 ศึกษาความเสถียรในการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ที่สังเคราะห์ได้ซ้ำ
- 1.2.4 ศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนแคลเซียมออกไซด์ (KOH/CaO) ที่สังเคราะห์ได้จากลignite โดยเติม KOH ปริมาณ 20%wt โดยใช้วิธีเอ็บซุ่ม (Incipient wetness impregnation)
- 1.3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลigniteในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยการปรับอัตราส่วนของเมทานอลกับน้ำมันปาล์มและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้
 - 1.3.1.1 ปรับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันปาล์มดังนี้ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1
 - 1.3.1.2 ปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite ดังนี้ 2, 5, 10 และ 15 %wt
- 1.3.2 วิเคราะห์ผลได้ไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)
- 1.3.3 เปรียบเทียบผลได้ของไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย

- 1.3.4 หากภาวะที่ดีที่สุดมาผลิตไบโอดีเซล และนำมาใช้ซ้ำรอบที่ 1-5 เพื่อผลได้ของไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัย

1.4.1 ด้านวิชาการ

1. ได้องค์ความรู้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากลigniteเหลือทิ้งจากการทำประมง และอุตสาหกรรมอาหารทะเลแห้งแข็ง
2. นักศึกษาระดับปริญญาตรีได้รับองค์ความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับการสังเคราะห์และการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากลigniteเหลือทิ้งจากการทำประมง และอุตสาหกรรมอาหารทะเลแห้งแข็ง การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ สาเหตุการเสื่อมสภาพและวิธีการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ได้ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ (วารสารทางวิชาการและ/หรือการประชุมวิชาการ)

1.4.2 ด้านเศรษฐกิจและพาณิชย์

1. ได้พัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ยั่งยืนและสามารถพัฒนาไปเป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้
2. เป็นแนวทางในพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมเพื่อลดการนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง
3. เป็นการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าจากจากลigniteเหลือทิ้งจากการทำประมง และอุตสาหกรรมอาหารทะเลแห้งแข็ง

1.4.3 ด้านสังคมและชุมชน

1. สนับสนุนให้ชุมชนมีรายได้เพิ่มจากการขายลigniteเหลือทิ้งจากการทำประมง และอุตสาหกรรมอาหารทะเลแห้งแข็ง
2. ลดปริมาณขยะจากลigniteเหลือทิ้งจากการทำประมง และอุตสาหกรรมอาหารทะเลแห้งแข็งที่อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2 วารสารปาริทัศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและบทความซึ่งเกี่ยวกับ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา สมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล รวมถึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย เพื่อการผลิตไบโอดีเซล

2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีทั้งกรดและเบส สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น โดยมักใช้ในกรณีที่น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง ส่วนเบสที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอไมด์ และโพแทสเซียมเอไมด์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองประเภทพบว่าในกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลโดยทั่วไปมักใช้เบสในการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่สามารถแยกออกจากกันได้ง่ายเพราะมีความหนาแน่นต่ำและสภาพขั้วที่ต่างกัน และไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยา และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.1.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียสภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.1.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา ข้อดีคือสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ สามารถใช้ได้ทั้งภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานนาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักคือ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและตัวรองรับหรือตัวพา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวสูงเพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัวของสารและความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์และเอกพันธุ์ [5]

| ปัจจัยของตัวเร่งปฏิกิริยา | ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ | ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา | สูง | สูง |
| ผลกระทบของภาวะที่ใช้ในกาเกิดปฏิกิริยา | ไม่รุนแรง | รุนแรง |
| อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา | นาน | แปรค่าได้ |
| ความว่องไวในการเกิดพอยซัน | สูง | ต่ำ |
| การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ | ได้ | ได้ (แพง) |
| ราคา | ถูก | แพง |

2.1.2 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา [6]

การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาแล้วจะยังคงสภาพเดิม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เรื่อยๆ แต่ในความเป็นจริงแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้คงสภาพ เช่นนั้นตลอด โดยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจะลดลงตามเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่ง-ปฏิกิริยานี้เกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมของระบบ จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นระยะๆ ใน การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความสามารถหรือพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่ลดลง การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งได้ ดังนี้

2.1.2.1 พอยซันนิง (Poisoning) เป็นการเสื่อมสภาพโดยที่มีสิ่งแปลกปลอมที่เป็นอันตราย ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาพร้อมกับสารตั้งต้น (Feed) แล้วสิ่งแปลกปลอมหรือสารพิษจะไปเกาะบนผิว ของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ทำให้พื้นที่ผิวในการทำ ปฏิกิริยาลดลง

2.1.2.2 การเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเกิดถ่านโค้ก (Coking) เกิดขึ้นจากทำ ปฏิกิริยาแล้วจะมีจำพวกสารไฮโดรคาร์บอนหรือเขม่ามาเกาะอยู่บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหรืออุดรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่สามารถที่จะกำจัดหรือฟื้นฟูประสิทธิภาพการทำงานได้โดยการใช้ความร้อน

2.1.2.3 การเสื่อมสภาพของเม็ดอนุภาค แม้ว่าเม็ดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกออกแบบ มาจำเพาะกับงาน แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกหรือแรงขีดสีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ อาจทำให้เกิดการ หลุดออกขององค์ประกอบบางตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของเม็ด

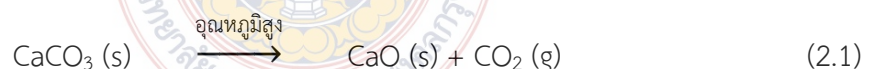
อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมักเป็นสาเหตุสืบเนื่อง คือเกิดการแตกหรือเกิดผองอนุภาคและนำไปสู่การอุดตันการไหล (Plugging) ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มของความดันลดในระบบ หรือเกิดช่องการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Channeling) ซึ่งทำให้ระบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนรูปแบบไป นำไปสู่การสะสมของความร้อนเฉพาะที่ (Hot spot) ซึ่งเป็นผลรวมของความร้อนและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยา

2.1.2.4 การเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจากการซินเทอริง (Sintering) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700-800°C ขึ้นไป โดยปกติโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะมี การเคลื่อนที่มากขึ้น จึงทำให้เกิดการเลื่อนของโลหะอะตอมที่เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยามารวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาลดลงเช่นเดียวกัน

2.1.2.5 การเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนแปลงในสภาวะของแข็ง (Solid state transformation) เป็นการเสื่อมสภาพที่เป็นผลต่อเนื่องและรุนแรงขึ้นจากกระบวนการซินเทอริงที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น กล่าวคือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

2.2 แหล่งที่มาของแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

แคลเซียมออกไซด์หรือหินปูนสุก (Quick lime) เป็นสารอนินทรีย์ที่มีประโยชน์มากในภาคอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า (Steel making) การผลิตโลหะแคลเซียม (Ca) และการผลิตกระดาษซึ่งแคลเซียมออกไซด์ สามารถเตรียมได้จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูน (CaCO₃) ในการเผาอุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า กระบวนการแคลไซน์เนชัน (Calcination) ดังสมการ



แคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่ภาวะอุณหภูมิที่สูงมีสมบัติที่ดีคือ ไม่มีการกัดกร่อนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2.1 ลิ่นทะเล (Cuttlefish bone) ลิ่นทะเลเป็นแกนกลางลำตัวที่มีลักษณะแข็ง หนา พรุณของกระดองปลาหมึก (Cuttlefish) หลายชนิดดังรูปที่ 2.1 หมึกกระดองเป็นสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลังกลุ่มหนึ่งที่อาศัยอยู่ในทะเล จัดอยู่ใน *Sepai* วงศ์ *Sepiidae* ที่พบในประเทศไทยเพียง 6 ชนิด เช่น หมึกกระดองหลายเสื่อ (*Sepai pharaonis* Ehrenberg) เป็นต้น มีชื่อสามัญว่า Sea-biscuit, Cuttlefish bone, Cuttlefish Shell, *Os Sepiae* ภายในของกระดองปลาหมึกมีแก๊สไนโตรเจนและของเหลวหลายชนิดอยู่รวมกัน กระดองนี้เป็นเครื่องช่วยในการลอยตัว โดยการปรับสมดุลระหว่างแก๊สกับของเหลว

ลึนทะเล ประกอบด้วยหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 80-83% มีสีขาว เปราะหักง่าย ภายในโปร่งพูน เมื่อสัมผัสจะรู้สึกสาก มีรสเค็ม นิยมใช้เป็นยาฆ่าพยาธิกรวด ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟันผง ยาขัด ใช้ผสมในขนมบางชนิด เช่น ขนมถ้วยฟู ขนมปุยฝ้าย ฯลฯ เพื่อให้ขนมขึ้นฟูตำราสรรพคุณยาในสมัยโบราณซึ่งลึนทะเลมีรสเค็มกร่อย ปรงเป็นยาฆ่าเชื้อและยาแก้มูกเลือด



รูปที่ 2.1 ลึนทะเล

2.2.2 เปลือกหอย (Mussel shell)

เปลือกหอยประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือเป็นสารอื่น ๆ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต โปรตีนประเภทคอนไคโอลิน (Conchinolin) เปลือกหอยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ

ชั้นนอกสุด เรียก **ชั้นผิววนอก (Periostracum layer)** ประกอบด้วยสารส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน เป็นชั้นที่บางและหลุดง่าย ซึ่งจะสังเกตได้จากหอยที่ตายแล้วและเปลือกที่ถูกทิ้งอยู่ตามชายหาด หรือหอยที่ยังมีชีวิตแต่เปลือกถูกคลื่นซัดหรือทรายขัดสี เปลือกชั้นนี้อาจหลุดหายไปจนไม่เหลือให้เห็น

ชั้นกลาง เรียก **ชั้นผนิกแคลเซียม (Prismatic layer)** ประกอบด้วยผลึกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) เป็นชั้นที่หนาและแข็งแรงที่สุด

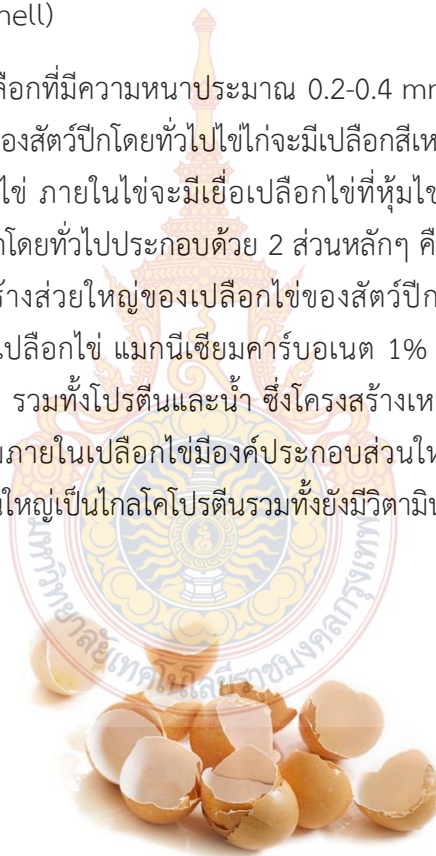
ชั้นในสุด เรียก **ชั้นมุก (Nacreous layer)** ประกอบด้วยผนิกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะราโกไนต์ (Aragonite) เป็นชั้นที่เรียบมีความหนาบางแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของหอย ทำให้เปลือกมีสีขาวขุ่นและเป็นมันแวววาวแตกต่างกัน [7]



รูปที่ 2.2 เปลือกหอยชนิดต่างๆ

2.3.3 เปลือกไข่ (Egg shell)

ไข่ถูกห่อหุ้มด้วยเปลือกที่มีความหนาประมาณ 0.2-0.4 mm สีของเปลือกไข่จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของสัตว์ปีกโดยทั่วไปไข่ไก่จะมีเปลือกสีเหลือง ไข่เป็็นจะมีสีขาว และไข่นกส่วนใหญ่จะมีจุดบนเปลือกไข่ ภายในไข่จะมีเยื่อเปลือกไข่ที่หุ้มไข่แดงและไข่ขาวอยู่ภายใน เมื่อกล่าวถึงเปลือกไข่ของสัตว์ปีกโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือส่วนที่เป็นเปลือกไข่และเยื่อหุ้ม ภายในดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างส่วนใหญ่ของเปลือกไข่ของสัตว์ปีกเป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 94% ของน้ำหนักเปลือกไข่ แมกนีเซียมคาร์บอเนต 1% แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) 1% ที่เหลือเป็นแร่ธาตุต่างๆ รวมทั้งโปรตีนและน้ำ ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้อาจแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสัตว์ปีกส่วนเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประมาณ 69.2% ไขมัน 2.7% ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่เป็นไกลโคโปรตีนรวมทั้งยังมีวิตามิน เอ บี ดีและอี อยู่ด้วย [8]



รูปที่ 2.3 เปลือกไข่

2.3 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

พลังงานทางเลือกที่ใช้แทนน้ำมันดีเซลได้คือ ไบโอดีเซล ซึ่งสามารถผลิตได้จากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ไบโอดีเซลผลิตได้โดยการให้น้ำมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (เมทานอลหรือเอทานอล) และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลจากการทำปฏิกิริยาจะทำให้ได้ไบโอดีเซล ซึ่งเป็นสารเอสเทอร์ เรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ เมื่อกระบวนการทางเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์

2.3.1 ไบโอดีเซลแบ่งเป็นประเภทได้ 3 ประเภท

2.3.1.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลืองหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลย โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นๆ ไม่ต้องนำมาปรับปรุงสมบัติของน้ำมันอีก



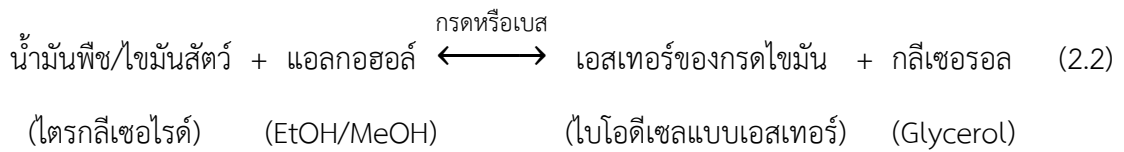
รูปที่ 2.4 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

2.3.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชและน้ำมันจากไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ดังรูปที่ 2.4

2.3.1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้มีกระบวนการที่ยุงยากมาก โดยส่วนใหญ่ผลิตผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แสดงได้ดังสมการที่ 2.2 ได้เมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีสมบัติเหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดและให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่าไอเสียมีคุณภาพดีกว่าเพราะออกซิเจนให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล จึงทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยและในไบโอดีเซลจะไม่มีการอุดตันเป็นองค์ประกอบจึงไม่มีปัญหาเรื่องซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อยจึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสียและยังช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้อีกด้วย



2.3.2 เทคนิคการผลิตไบโอดีเซล

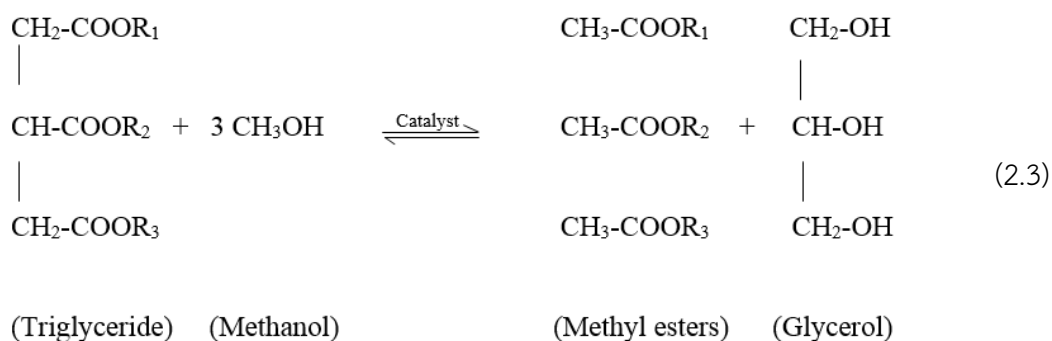
ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี คือ การใช้โดยตรงหรือการผสม การทำไมโครอิมัลชัน การสลายตัวด้วยความร้อน กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน วิธีการผลิตไบโอดีเซลดังกล่าวข้างต้น แสดงรายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 การใช้โดยตรงหรือการผสม (Direct use and blending) เป็นการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรงในสัดส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดความหนืดของน้ำมันพืชลดลง สามารถผสมน้ำมันได้ตั้งแต่ 10% ขึ้นไปตามความเหมาะสมของน้ำมันที่ใช้ พบว่าข้อเสียของวิธีนี้คือให้ค่าความหนืดที่สูงแต่ค่าเกี่ยวกับการระเหยต่ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในระยะยาว และถ้าผสมมากเกินไปจะทำให้การกลายเป็นไอต่ำ เกิดโค้กสะสมบนหัวฉีดของเครื่องยนต์

2.3.2.2 การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) เป็นการกระจายของอนุภาคของเหลวที่แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล ด้วยการผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้น เช่น เมทานอล เอทานอล 1-บิวทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลาย ของเหลวทั้งสองชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะกระจายอยู่ได้ด้วยสารลดแรงตึงผิว วิธีนี้สามารถปรับปรุงลักษณะที่เป็นละอองฝอยจากหัวฉีด เนื่องจากตัวทำละลายมีจุดเดือดต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช

2.3.2.3 การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking or pyrolysis) เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งๆ ไปเป็นสารอื่นๆ มากกว่าหนึ่งสาร โดยการให้ความร้อนที่ 450°C เพียงอย่างเดียว หรือมีตัวเร่งปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2CO_3 และซีโอไลต์ช่วยเพื่อทำให้น้ำมันที่มีโมเลกุลใหญ่แตกเป็นโมเลกุลที่เล็กลง วิธีนี้พบว่ามีค่าใช้จ่ายสูง สมบัติที่ได้มีแนวโน้มจะเป็นเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนมากกว่าเชื้อเพลิงดีเซล

2.3.2.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมี ที่เรียกว่าทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters) หรือ เอทิลเอสเทอร์ (Ethyl esters) ขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และกลีเซอรอล แสดงได้ดังสมการ 2.3 โดยทั่วไปแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะนิยมใช้เมทานอล (CH_3OH) เนื่องจากมีราคาถูก มีโครงสร้างที่มีขั้วมากกว่าและโมเลกุลสั้นที่สุดจึงทำปฏิกิริยากับน้ำมันหรือไขมันได้รวดเร็ว เมื่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสิ้นสุดลงจะต้องแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกโดยตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น กลีเซอรอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยา



2.3.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ประกอบด้วยปฏิกิริยาแบบลำดับ 3 ขั้นตอน ดังสมการที่ 2.4

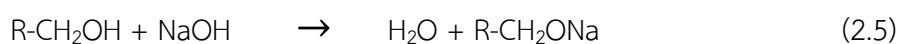


2.3.4 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [9]

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งควรใช้ทำปฏิกิริยากับเมทานอลหรือเอทานอล โดยน้ำมันที่ใช้จะเป็นชนิดใดก็ได้เช่น น้ำมันดิบ น้ำมันที่ใช้แล้ว เป็นต้น ก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันควรเปลี่ยนจากรูปเบส (NaOH หรือ KOH) ไปเป็นในรูปของสารประกอบอัลคอกซี (Alcoxy) ก่อน โดยการเตรียมสารประกอบอัลคอกซีเป็นไปดังปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.5 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนี้จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังเป็นสารผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) ในปริมาณที่สูงด้วย ส่วนข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส คือ น้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ในน้ำมันดิบ ถ้ามีน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในระบบของการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณมากจะทำให้มีสบู่เกิดขึ้นแทนที่จะได้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นสารผลิตภัณฑ์



2.3.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid catalyst)

กรดที่ใช้กันทั่วไป คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิตคือ น้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมากแต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก อาจใช้เวลามากกว่า 1 วันกว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับกลีเซอไรด์ที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวและน้ำในปริมาณสูงได้ เช่น น้ำมันที่ใช้แล้ว เป็นต้น

2.3.4.3 เอนไซม์ไลเปส (Lipase)

เอนไซม์ไลเปสถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น ไฮโดรไลซิสของกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) และ แอซิโดไลซิส (Acidolysis) ข้อดีของเอนไซม์ไลเปสคือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ไม่มีของเสียออกมาจากกระบวนการ ข้อเสียของเอนไซม์ คือมีราคาค่อนข้างแพง

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

2.4.1 น้ำ หรือความชื้นการที่มีความชื้นในไขมันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมัน โดยน้ำจะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่ได้ทำให้สารละลายผสมทั้งสองมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้นวิธีป้องกันคือการใช้แอลกอฮอล์ไขมันหรือน้ำมันที่มีน้ำหรือความชื้นปนอยู่น้อย ($< 0.06\%wt$) เพื่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์

2.4.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ได้ทั้งกรดและเบส แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและให้ผลที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับแอลกอฮอล์ เช่น ถ้าใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรเป็นโซเดียมเมทอกไซด์ หรือโซเดียมเอทอกไซด์ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดพบว่ามีความเสียหายอยู่หลายประการได้แก่ ภาวะที่ต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไขมันที่ใช้สูง อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา

2.4.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยาและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมจึงจำเป็นในการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์

2.4.4 อุณหภูมิของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้เกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาต่ำลงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลดลง อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างมาก

2.4.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำและสูงเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำ ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าเหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันในน้ำมันทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification หรือการเกิดสบู่

2.4.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีแล้วสัดส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันจะเท่ากับ 3 ต่อ 1 โดยโมล ในทางปฏิบัติจะต้องเพื่อให้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าปริมาณตามทฤษฎีเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งโดยปกติจะใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันระหว่าง 6:1 ถึง 15:1 ดังนั้นจะมีแอลกอฮอล์เหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะต้องมีระบบการกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

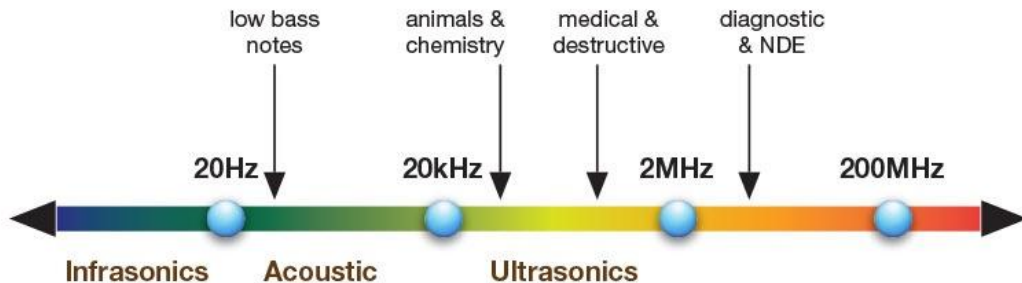
2.4.7 ปริมาณกรดไขมันอิสระ ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสารตั้งต้นควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ต่ำกว่า 1% หากมากกว่านี้จะทำให้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

2.5 ทฤษฎีคลื่นเหนือเสียง [10,11]

2.5.1 คลื่นเหนือเสียงหรือคลื่นอัลตราซาวนด์ เป็นคลื่นกลที่มีความถี่ 20 kHz จนถึง 10^6 kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูของคนปกติไม่สามารถได้ยิน เพราะหูของคนปกติได้ยินเสียงในช่วงความถี่ 16-16,000 Hz ความถี่ที่สูงขึ้นนี้ก่อให้เกิดทั้งผลทางเคมี (Chemical effect) และผลทางฟิสิกส์ (Physical effect) ในรูปแบบต่างๆ

คลื่นเหนือเสียงที่มีความแรงมากจะทำให้เกิดฟองอากาศ เกิดความดันสูง และเกิดความร้อนเฉพาะที่ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีพบว่าทำให้เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) การสลายตัว (Decomposition) การเกิดผลึก (Crystallization) เป็นต้น ส่วนผลทางฟิสิกส์มักเป็นผลรวมทางตรงหรือทางอ้อมที่เกิดจากผลทางเคมี ได้แก่ การเกิดฟองอากาศ เกิดความร้อน และเกิดความดัน เป็นต้น

Ultrasonics Range Diagram



รูปที่ 2.5 ช่วงความถี่ของคลื่นเหนือเสียง [10]

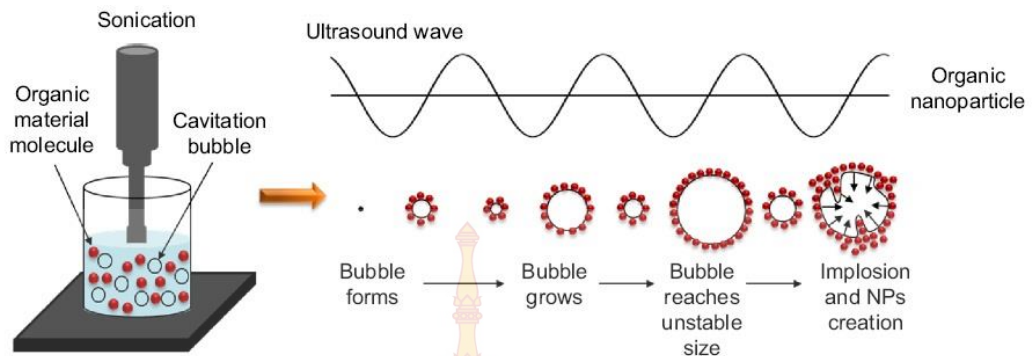
2.5.2 เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงและอัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ การที่จะนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ประโยชน์ได้อย่างน้อยจะต้องมีเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic generator) กับอัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ (Ultrasonic transducer) ซึ่งทำหน้าที่และทำงานสัมพันธ์กันดังนี้

2.5.2.1 เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับจากสายส่งจากความถี่ปกติ 50 Hz หรือ 60 Hz ให้มีค่าสูงขึ้นจนถึงย่านความถี่ของคลื่นเหนือเสียงแล้วส่งไปยังอัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ โดยอาจส่งไปเป็นพลังงานของคลื่น คลื่นที่ส่งไปจะมีการกวาด (Sweeping) ของความถี่รอบๆ ความถี่ที่ใช้เป็นค่ากลาง เครื่องกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ทันสมัยที่สุดสามารถปรับความถี่ของคลื่นส่งออกให้มีค่าที่เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ ได้

2.5.2.2 อัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ ทรานส์ดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดพลังงานจากระบบหนึ่งเข้าสู่อีกระบบหนึ่ง โดยส่วนมากจะเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งก่อนที่จะถ่ายทอดพลังงานระหว่างระบบอัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดพลังงานระหว่างระบบ โดยเปลี่ยนพลังงานระหว่างระบบโดยเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของการสั่นเชิงกลในย่านความถี่ของคลื่นเหนือเสียงหรือในทางกลับกัน คือ เปลี่ยนพลังงานกลในการสั่นเชิงกลในย่านความถี่ของคลื่นเหนือเสียงเป็นพลังงานแม่เหล็กหรือพลังงานไฟฟ้า อัลตราโซนิกส์ทรานส์ดิวเซอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ประโยชน์

2.5.3 หลักการของคลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียงทำให้เกิดและสลายฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากอย่างรวดเร็ว เรียกกระบวนการนี้ว่า Cavitation ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดแตกต่างกัน มีทั้งชนิดที่เกิดขึ้นแล้วแตกทันที (Temporary bubble) และชนิดที่เป็นฟองอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงแตก (Stable bubble) การแตกของฟองอากาศ



รูปที่ 2.6 การเกิดฟองอากาศและการแตกตัวของฟองอากาศ [11]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรารภรณ์ และสรณ์ปวีณ์ [2] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาลิ้นทะเลสำหรับการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแคลไซน์ภายใต้บรรยากาศหนึ่งที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 900°C ซึ่งจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ยกเว้นการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C จะมีลักษณะเป็นผงสีเทาเข้ม และวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อน (TGA) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโคปี (FT-IR) และเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N₂-adsorption) ทดสอบความว่องไวในของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5, 10 และ 20 %wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 300 min ที่อุณหภูมิ 60°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C ให้ค่าผลได้ของ FAME สูง ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น (5-60 min) และผลได้ FAME ที่เวลา 15 min รองลงมาคือ 700, 600 และ 800°C ตามลำดับ

กิตติพงศ์ และกฤตติรเมธ [12] ศึกษาภาวะเหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้จากเปลือกไข่และเปลือกหอยแมลงภู่อเตรียมโดยวิธีการเผาในบรรยากาศหนึ่งที่อุณหภูมิ 900°C ทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเร่งปฏิกิริยาโดยการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อนภาวะในการทำปฏิกิริยา โดยภาวะในการทำปฏิกิริยาสัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt และที่ภาวะสัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยแมลงภู่อใช้ 10 %wt ให้ค่าผลได้ของ FAME ที่ที่สุด (93.21%) ที่เวลา 120 min ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทั้งเปลือกไข่และหอยแมลงภู่อใช้ซ้ำได้ 3 รอบโดยที่ยังให้ค่าผลได้ของ FAME ที่ 93.21, 90.41 และ 87.63% ตามลำดับ

Ibrahim Korkut และคณะ [13] ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันคาโนลาจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ คือ โดโลไมต์ และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 200 W ความถี่ 20 kHz และใช้หัววัดแบบฮอร์นที่มีความยาว 19 mm ซึ่งใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3-7 %wt อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อมัน 4:1-15:1 คลื่นเหนือเสียงที่พลังงาน 30-50 W อุณหภูมิ 25-60°C และที่เวลา 60-120 min จะพบว่าช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและทำให้ได้ไบโอดีเซลมากถึง 97.4% สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์ ที่เวลา 90 min และ 95.5% ของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ที่เวลา 75 min จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยจะใช้เวลาในการผลิตน้อยลงและทำให้ได้ไบโอดีเซลมากขึ้น สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์กับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

Guanyi Chen และคณะ [14] ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคของแคลเซียมออกไซด์จากไซนเกอร์จอกเทศ CaO (OE) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย XRD, N₂-adsorption, XRF และ Hammett indicator ในขณะที่เร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลภายใต้คลื่นเหนือเสียง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง CaO (OE) มีคุณลักษณะในการเร่งปฏิกิริยาที่เทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ CaO (Lab) นอกจากนี้ภายใต้ภาวะคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มการเร่งปฏิกิริยาของ CaO (OE) ได้เป็นอย่างมาก ผลได้ของ FAME สูงถึง 92.7% ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 min ที่พลังงานคลื่นเหนือเสียง 60% (120 W) อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 8 %wt ผลการวิจัยพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO (OE) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และอาจช่วยลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลได้

Oguzhan Ilgen [15] ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาของโพลีไมด์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันคาโนลา กับเมทานอลต่อน้ำมัน กำหนดอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแปร เช่น อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคาโนลา และระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C สามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูงที่สุด เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคาโนลา 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt ให้ผลได้ FAME สูงถึง 91.78% หลังจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 h

Edith Martinez-Guerra และคณะ [16] ศึกษาผลของแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช ภายใต้ไมโครเวฟร่วมกับคลื่นเหนือเสียง ร่วมกับเอทานอลและเมทานอลถูกใช้เป็นแอลกอฮอล์ในการศึกษา ผลรวมพลังงานของไมโครเวฟและคลื่นเหนือเสียงถูกนำมาประเมินผลและเปรียบเทียบผ่านชุดทดลอง ที่อัตราส่วนโดยโมล 9:1 (แอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน) พบว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมทั้ง เอทานอล และเมทานอล ให้ผลได้ของไบโอดีเซลโดยประมาณ 98 และ 96% ตามลำดับ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 0.75% ส่งผลให้ผลได้ไบโอดีเซลสูงสุด 97 และ 96% จากเมทานอล และเอทานอลตามลำดับ ทำปฏิกิริยาที่เวลา 2 min เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้เมทานอลหรือเอทานอล ที่เวลาการใช้เอทานอลจะมีผลต่อปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จากการศึกษาการทำงานของคลื่นไมโครเวฟและคลื่นเหนือเสียงร่วมกันในอัตราส่วนที่เท่ากันส่งผลให้ผลได้ของไบโอดีเซลของแอลกอฮอล์ทั้งสองที่สูงขึ้น ในขณะที่เอทานอลเป็นสารตั้งต้นจะให้ผลได้ที่สูงกว่าคลื่นเหนือเสียงเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในไบโอดีเซล จาก FAMEs (เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน) จะมีโครงสร้างโมเลกุลที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับกรดไขมันที่มาจาก FAEEs (เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน)

Anton Esipovich และคณะ [17] ศึกษาวิธีการกระตุ้นเพื่อปรับปรุงการเร่งปฏิกิริยา ความ เป็นกรด และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมัน ถั่วเหลือง พบว่ามีการสร้างแคลเซียมกลีเซอรอออกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และอาจเป็นตำแหน่งความว่องไวในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าการเร่งปฏิกิริยาของ CaO หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ใหม่ ดังนั้นการกระตุ้นด้วยกลีเซอรอลจึงเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มขึ้นของการเร่ง-ปฏิกิริยาของ CaO ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อเทียบกับเทคนิคดั้งเดิม เช่น การบำบัด ด้วยความร้อนและการกระตุ้นด้วยเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมกลีเซอรอออกไซด์ที่สังเคราะห์ สามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูงที่สุด ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม อัตราโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9: 1 และ อุณหภูมิในการปฏิกิริยา 60°C ผลได้ของ FAME 82.6% ที่เวลา 120 min ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.3 %wt ของแคลเซียมกลีเซอรอออกไซด์ ในเวลาเดียวกันผลได้ของ FAME เท่ากับ 76.9% เมื่อใช้ CaO กับ เมทานอล

Hanif Ahmed Choudhury และคณะ [18] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ การสังเคราะห์ได้ดำเนินการใน 2 ขั้นตอน ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน กระบวนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะไม่ได้รับผลกระทบจากคลื่นเหนือเสียง ส่วนกระบวนการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นจากการใช้คลื่นเหนือเสียง การออกแบบการทดลองเชิงสถิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการสังเคราะห์การวิเคราะห์ XRD พบว่ามีการสะสมของ $\text{Ca}(\text{OMe})_2$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานสำหรับปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับผลได้สูงสุดของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกำหนดดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 11 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 5.5 %wt และอุณหภูมิ 64°C พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาคำนวณเป็น 133.5 kJ/mol ความไม่สม่ำเสมอของระบบจะเพิ่มข้อจำกัดในการโอนย้ายมวลสารซึ่งส่งผลให้ประมาณ 4 เท่า เพิ่มพลังงานกระตุ้นเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ของระบบที่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ความเข้มข้นเกิดจากการพาความร้อนที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียงที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลสารของระบบด้วยการลดพลังงานกระตุ้น 20% เมื่อเทียบกับการกระตุ้นทางกล ผลของความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ต่อผลได้ของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีการเชื่อมโยงกันระหว่างการสร้างไอออนของเมทอกไซด์ และการแพร่เข้าไปในชั้นของน้ำมันและแอลกอฮอล์ ซึ่งในทางกลับกันจะกำหนดปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอนผลการทดลองจะพบว่าผลได้ของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีค่าสูงพอประมาณของค่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

Hamed Mootabad และคณะ [19] ศึกษาการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ โลหะอัลคาไลนอล (CaO , SrO และ BaO) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงขนาด 20 kHz เวลาปฏิกิริยา (10-60 นาที) อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันปาล์ม (3:1-15:1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (0.5-3%) และกำหนดช่วงของคลื่นเหนือเสียง (25-100%) การเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความแรงเบส ลำดับในการเร่งปฏิกิริยาดังนี้ $\text{CaO} < \text{SrO} < \text{BaO}$ ในภาวะที่เหมาะสมต้องใช้เวลา 60 min เพื่อให้ได้ผลได้ 95% เมื่อเทียบกับ 2-4 h โดยใช้เครื่องกวนสารแบบธรรมดา นอกจากนี้ผลได้ที่ 60 min เพิ่มขึ้นจาก 5.5% เป็น 77.3% (CaO) 48.2% เป็น 95.2% (SrO) และ 67.3% เป็น 95.2 (BaO) ช่วงที่เหมาะสมที่สุดของคลื่นเหนือเสียงคือ 50% และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากที่ทำปฏิกิริยาที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา BaO มีการลดลงอย่างมากหลังจากที่มีการทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนสำคัญต่อการลดลงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับตัวเร่งปฏิกิริยา BaO

Pengfei Lu และคณะ [20] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่อัดขึ้นรูปและใช้สำหรับสังเคราะห์กลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอลและไดเมทิลคาร์บอนเนต ผลของสารยึดเกาะ (โดโลไมต์ ดินขาว และ อะลูมินากัมมันต์) สารก่อให้เกิดรูพรุน (โพลีอะคริลาไมด์ ถ่านกัมมันต์ และ โพลีเอทิลีน ไกลคอล) และอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ (700, 800 และ 900°C) จากสมบัติการเร่งปฏิกิริยาและความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา XRD, FT-IR, BET และ SEM เพื่อหาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ พบว่าเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยใช้ อะลูมินาเป็นสารยึดเกาะและใช้โพลีอะคริลาไมด์, ถ่านกัมมันต์ หรือ โพลีเอทิลีน ไกลคอล เป็นตัวก่อตัวเป็นรูพรุน ภายใต้อัตราส่วน CaO ต่อมวลของสารยึดเกาะ 3:1 อุณหภูมิในการแคลไซน์ 800°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80°C การเปลี่ยนกลีเซอรอลและกลีเซอรอลคาร์บอนเนตผลได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO / Al₂O₃ (โพลีอะคริลาไมด์ 3%) สามารถเพิ่มขึ้นได้ 95.39% และ 90.57% ตามลำดับ การนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 5 พบว่าการเปลี่ยนกลีเซอรอลและกลีเซอรอลคาร์บอนเนตผลได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO / Al₂O₃ (โพลีอะคริลาไมด์ 3%) ที่คืนสภาพแล้วก็ยังคงสูงถึง 65.47% และ 62.53% ตามลำดับซึ่งสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัดขึ้นรูปยังมีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำได้ ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงถึงตำแหน่งวงวงวอของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่อัดขึ้นรูปเป็น CaO ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัดรูปไม่เพียงแต่มีพื้นที่ผิวที่สูง ปริมาตรรูพรุนสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่ยังมีความแข็งแรงทางกลที่สูงขึ้นและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อผลิตกลีเซอรอลคาร์บอนเนต

Anilkumar R และคณะ [21] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้วกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบิวทิรพังก์ แคลเซียม ไดกลีเซอออกไซด์ โดยใช้คลื่นเหนือเสียง มีการศึกษาผลกระทบของตัวแปร อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลกับน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และหาความถี่ของคลื่นเหนือเสียงพร้อมทั้งรอบในการทำปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลกับน้ำมันที่ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ของน้ำมัน อุณหภูมิ 60°C ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง 120 W และรอบการทำงาน 50% ผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด 93.5% ในขณะที่ใช้การกวนแบบธรรมดาผลได้ของไบโอดีเซล 65.6% สำหรับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 min เหมือนกัน สังเกตได้ว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยลดพลังงาน (1.083 × 10⁻⁴ g/J) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำส่งผลให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ลดลง

Gajendra Kumar [22] ใช้คลื่นเหนือเสียงที่สามารถสกัดได้เร็วและเป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำ อัลคิล เอสเทอร์ จากน้ำมันพืชได้เป็นพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิต โดยการทำปฏิกิริยาขั้นตอนเดียว คือการผลิตไบโอดีเซลโดยการสกัดน้ำมันสบู่ดำและปฏิกิริยาของสารสกัดกับแอลกอฮอล์ โดยใช้คลื่นเหนือเสียง มีภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอล 1:10 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 %wt ของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 min และแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียง 50% เวลา 0.3 s ให้ค่าผลได้ของไบโอดีเซลสูงที่สุด

Sukhvir Kaur Bhangu และคณะ [23] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนลาและเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาไลเปส ภายใต้ภาวะการทดลองที่แตกต่างกันโดยใช้คลื่นเหนือเสียงแบบฮอว์น (20 kHz) และแบบจัน (22, 44, 98 และ 300 kHz) โดยศึกษาภายใต้ภาวะการทดลองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฮอว์น กำลังของคลื่นเหนือเสียง ความถี่และความเข้มข้นเอนไซม์ของผลได้ของไบโอดีเซล จากผลการทดลองพบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 22-24 h เป็น 1.5 h โดยใช้คลื่นเหนือเสียงแบบฮอว์นขนาด 3.5 cm กำลัง 40 W อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่ 5:1 และความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.23 %wt ของน้ำมัน คลื่นเหนือเสียงมีความเข้มข้นต่ำมีประสิทธิภาพและเป็นอุปกรณ์ที่มีแนวโน้มสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ในการผลิตไบโอดีเซลขณะที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ลดประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์

Yulin Xiang และคณะ [24] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาของถ่านหินที่ผ่านการตัดแปลงแล้วมาทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วภายใต้ภาวะการทำงานของคลื่นเหนือเสียง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านหินที่ทำการตัดแปลงสามารถช่วยให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ทำให้ได้ผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุดจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้วถึง 95.57% ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมัน 10.71:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 4.97 %wt ของน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.41 min การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านหินตัดแปลงสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้ดี และส่งผลให้ได้ผลผลิตที่มากกว่า 90% หลังจากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 8 ครั้ง

Dipak Dadaso Pukale และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งต่างชนิดกันในงานวิจัยได้ศึกษาตัวแปรที่แตกต่างกันโดยศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลกับน้ำมัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไตรโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_3PO_4) มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา K_3PO_4 3% อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลกับน้ำมัน 6:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา $50^\circ C$ ได้ผลได้ของไบโอดีเซล 92.0% เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 min ผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าเมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบเดิมภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

Chien-Chih Liao และคณะ [26] ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันสบู่ออกไซด์กับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมออกไซด์ด้วยวิธีการเอ็บซุ่มด้วยแคลเซียมออกไซด์ (KOH/CaO) ตัวแปรในกระบวนการทดลอง เช่น อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน (X_1) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (X_2) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (X_3) ซึ่งถูกปรับให้เหมาะสมกับวิธีการตอบสนองของพื้นผิวโดยใช้แบบจำลอง Box-Behnken ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 8.42, 3.17% และ 67.9 min ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยาทั้งหมดมีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงกว่า 96.5% ของอัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl esters)

ขึ้นอยู่กับภาวะที่เหมาะสมของไบโอดีเซลที่คาดการณ์ไว้เป็น 97.6% แต่ค่าที่ทดลองจริงเท่ากับ 97.1% ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธีการตอบสนองของผิว (RSM) จากแบบจำลอง Box-Behnken สามารถคาดการณ์ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยพบว่าการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 8.42 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.17% และอุณหภูมิ 60°C จะให้ผลได้ของ FAME ที่สูงที่สุด



บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

บทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการทดลอง ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลันทะเลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากลันทะเล

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ลันทะเล (Cuttlefish bone)
- 3.1.2 เมทานอล (Methanol, CH₃OH) เกรด AR บริษัท QReC
- 3.1.3 น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค (Plam oil) บริษัทสุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด
- 3.1.4 เมทิลเฮปตาเดคาโนเอต (Methyl Heptadecanoate, CH₃(CH₂)₁₅COOCH₃, ≥99%)

บริษัท SIGMA-ALDRICH

- 3.1.5 เฮปเทน (Heptane, C₇H₁₆, 95%) เกรด AR บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.6 ซิลิโคนออยล์ (Silicone oil)
- 3.1.7 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) บริษัท Ajax Finechem
- 3.1.8 Bromothymol blue (C₂₇H₂₈Br₂O₅S) บริษัท Ajax Finechem
- 3.1.9 Phenolphthalein (C₂₀H₁₄O₄) บริษัท APS
- 3.1.10 2, 4-dinitroaniline (C₆H₅N₃O₄) บริษัท ACROS
- 3.1.11 4-nitroaniline (C₆H₆N₂O₂) บริษัท Himedia
- 3.1.12 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์
 - 3.2.1.1 ถ้วยระเหยสาร (Evaporating disk)
 - 3.2.1.2 ตะแกรง (Sieve) 24-60 mesh ขนาด 0.25-0.71 mm
 - 3.2.1.3 เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNE 550
 - 3.2.1.4 เตาเผา (Muffle furnace) ยี่ห้อ Cabolite รุ่น ELF 11/148
 - 3.2.1.5 ขวดเก็บสาร
 - 3.2.1.6 ค้อน (Hammer)
 - 3.2.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดตณนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204 ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

3.2.2.1 ขวดสามคอ (Three-neck flask)

3.2.2.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

3.2.2.3 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

3.2.2.4 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Magnetic stirrer, MS)

3.2.2.5 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ Hettich รุ่น EBA 20

3.2.2.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph, GC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010

3.2.2.7 คอลัมน์แก๊สโครมาโทกราฟี (Column gas chromatograph) ยี่ห้อ Shimadzu ชนิด SH-Rxi-5Sil MS

3.2.2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย (Ultrasound-assisted reactor, US) ความถี่ 23 kHz ห้างหุ้นส่วนจำกัด แอคมี่ อัลตราโซนิค ทูล

3.2.2.8.1 ตัวแปลงสัญญาณคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic transducer)

3.2.2.8.2 แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic generator)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากลignite

3.3.1.1 นำลigniteไปล้างเพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกและตากให้แห้ง

3.3.1.2 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 6 h และปล่อยให้เย็นในตู้อบ

3.3.1.3 นำไปทุบเพื่อลดขนาด และคัดขนาดโดยใช้ตะแกรง 24 - 60 mesh ให้ลigniteเล็มน้อยกว่าอยู่ในช่วง 0.25 - 0.71 mm

3.3.1.4 นำลigniteไปสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ โดยการเผาภายใต้อากาศนิ่ง (Calcined) ที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 5 h โดยเลือกภาวะที่เหมาะสมจากงานวิจัยของ วราภรณ์ และสรณ์ปวีณ์ [2]

3.3.1.5 นำตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากลignite เก็บในภาชนะที่สะอาดและไร้ความชื้น และนำไปศึกษาลักษณะด้วยเครื่อง FT-IR และ N₂ adsorption ดังแสดงในภาคผนวก ข และ ช ตามลำดับ

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ (KOH/CaO) โดยวิธีการเอ็บซุ่ม (Impregnation method) โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมของ Chien-Chih Liao และ Tsair-Wang Chung [26]

3.3.2.1 ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20% ของ CaO (วิธีการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข)

3.3.2.2 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมไว้ 10 g

3.3.2.3 ใส่น้ำกลั่นลงไปเพื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ให้เข้ากัน

3.3.2.4 นำตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ ที่ผสมกันแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เวลา 10 h และปล่อยให้เย็นในตู้อบ

3.3.2.5 นำตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ไปสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเผาภายใต้ภาคนิ่ง ที่อุณหภูมิ 600 °C เวลา 4 h

3.3.3 หาความแรงเบส (Basic strength) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลื่นทะเล และ KOH/CaO จากลื่นทะเลโดยใช้วิธี Hammett indicator [27] Hammett indicator ถูกนำมาใช้ในการวัดความแรงเบส (H_-) ของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 300 mg ผสมกับสารละลายเมทานอล 10 mL Hammett indicator 1 mL หลังจาก 2 h สารละลายจะถึงสมดุล กล่าวคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมของสี โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ Bromothymol blue ($H_- = 7.2$), phenolphthalein ($H_- = 9.8$), 2,4-dinitroaniline ($H_- = 15.0$), และ 4-nitroaniline ($H_- = 18.4$) ที่ความเข้มข้น 0.02 mol/L โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย

3.3.4 หาปริมาณเบส (Basicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลื่นทะเล และ KOH/CaO จากลื่นทะเล โดยใช้วิธี Hammett indicator-benzene carboxylic acid [27] ไตเตรทสารที่ได้จากการทดสอบความแรงเบส (อินดิเคเตอร์ เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา) ด้วย benzene carboxylic acid (0.02 mol/L methanol) จนกว่าสีจะเปลี่ยนกลับไปเป็นสีแดง โดยวิธีคำนวณปริมาณเบสอยู่ในภาคผนวก ค

3.3.5 ทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย

3.3.5.1 นำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทานอลกับน้ำมันที่ดีที่สุดจากการปรับอัตราส่วนของเมทานอลกับน้ำมันปาล์ม 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60, 120 และ 240 min ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

3.3.5.2 เลือกภาวะที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.5.1 มาใช้แล้วปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล ที่ 2, 5, 10 และ 15 %wt ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อุณหภูมิ 60°C และความดันบรรยากาศ โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60, 120 และ 240 min

3.3.5.3 เลือกภาวะที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.5.1 และ 3.3.5.2 มาทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60, 120 และ 240 min

3.3.5.4 เก็บตัวอย่างที่เวลาที่กำหนดใส่ในหลอดเก็บสาร แล้วหยุดปฏิกิริยาแล้วนำตัวอย่างที่เก็บได้มาเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการแยกชั้น

3.3.5.5 เมื่อเก็บตัวอย่างครบตามเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างที่เหวี่ยงแยกชั้นแล้ว และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.3.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลั่นทมเลमतดลองใช้ซ้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย

นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ซ้ำในการทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแยกออกจากสารทำปฏิกิริยาโดยทิ้งไว้ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตกตะกอนแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาใช้ซ้ำโดยการเติมน้ำมันและเมทานอลเข้าไปใหม่โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันและการปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด จากการทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ที่อุณหภูมิเดียวกัน แล้วเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60, 120 และ 240 min

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน EN 14103

3.3.7.1 ชั่งสารละลายมาตรฐานเมทิลเฮปตาเดคาโนเอท (Methyl heptadecanoate) $0.05 \text{ g} \pm 0.0005 \text{ g}$ ลงในขวดสีชา ปริมาตร 5 mL

3.3.7.2 นำหลอดเก็บสารที่บรรจุน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาเหวี่ยงให้แยกชั้น 30 s จากนั้นชั่งตัวอย่างน้ำมัน $0.25 \text{ g} \pm 0.0015 \text{ g}$

3.3.7.3 บีเปตเฮปแทน (Haptane) 5 mL ลงไปในขวดสีชาและปิดฝาทันทีจากนั้นเขย่าให้เพื่อให้สารละลายผสมกัน แล้วนำสารตัวอย่างที่เตรียมไปฉีดเพื่อวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซล (FAME) จากน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยฉีดในปริมาณ $0.5 \mu\text{L}$ และคำนวณผลได้ของไบโอดีเซลจากปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่วิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 14103 (ดังภาคผนวก ง)

ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

| Condition | Value |
|--------------------------|--------------------------|
| Injection port | |
| Injection mode | Split |
| Carrier gas | He |
| Temperature | 250°C |
| Pressure | 122.1 kPa |
| Split ratio | 50.0 |
| Injection volume | 1 μ L |
| Column oven | |
| Initial temperature | 150 °C |
| Total program time | 38.33 min |
| Ramp rate | เพิ่ม 10°C /min |
| Zone 1 | อุณหภูมิ 150°C นาน 5 min |
| Zone 2 | อุณหภูมิ 190°C นาน 5 min |
| Zone 3 | อุณหภูมิ 220°C นาน 5 min |
| Column final temperature | 220°C |

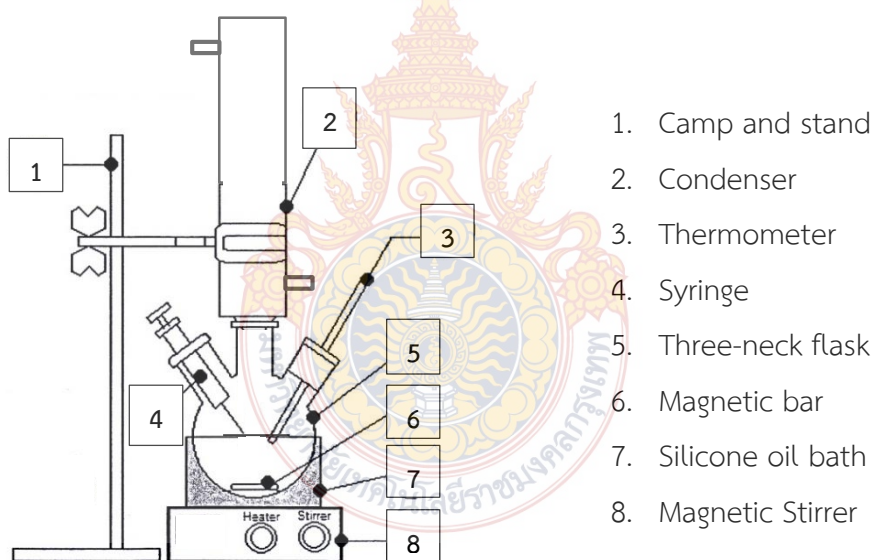
3.4 วิธีการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

3.4.1 ทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ตัวอย่างภาวการณ์ดำเนินการทำการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล

| | |
|------------------------------------|---|
| อุณหภูมิ | 60°C |
| ความดัน | 1 atm |
| ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา | KOH/CaO จากลื่นทะเล calcine ที่อุณหภูมิ 600°C |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา | 10 %wt |
| อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน | 12:1 |

3.4.2 วิธีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน

3.4.2.1 เท silicone oil ใส่ขามสแตนเลสที่เตรียมไว้และนำไปตั้งบน Magnetic stirrer

3.4.2.2 ชั่งน้ำมันปริมาณ 70.75 g และแท่งแม่เหล็กกวนสาร ใส่ลงไปในขวดสามคอ น้ำไปจุ่มลงใน Silicone oil และหนีบขวดไว้ด้วย camp อุ่นน้ำมันให้ร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

3.4.2.3 ติดตั้ง Condenser พร้อมสายยางและเปิดน้ำ

3.4.2.4 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา 7.0750 g และ Methanol 32.34 g ใส่ลงไปในขวดสามคอจากนั้นกวนสารด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm

3.4.2.5 เก็บตัวอย่างสารตามเวลาที่กำหนด (0, 5, 15, 30, 60, 120 และ 240 min)

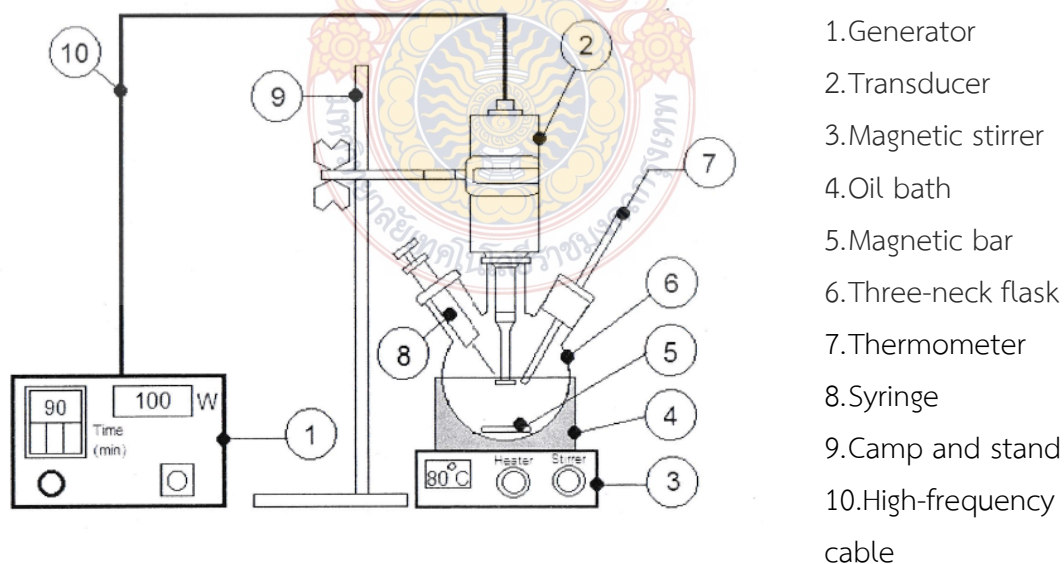
3.5 วิธีการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน

3.5.1 ทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน รายละเอียดมีดังนี้

ภาวะการดำเนินการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลื่นทะเล

| | |
|------------------------------------|---|
| อุณหภูมิ | 60°C |
| ความดัน | 1 atm |
| ความถี่ | 23 kHz |
| พลังงาน | 250 W (scale ที่อ่านได้ 115 W) |
| ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา | KOH/CaO จากลื่นทะเล calcine ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 4 h |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา | 10 %wt |
| อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน | 6:1 |

3.5.2 วิธีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน



รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน

- 3.5.2.1 เท silicone oil ใส่ชามสแตนเลสที่เตรียมไว้และนำไปตั้งบน Magnetic stirrer
- 3.5.2.2 ชั่งน้ำมันปริมาณ 212.78 g และแท่งแม่เหล็กที่ใช้ในการกวนใส่ลงไปขวดสามคอ
น้ำไปจุ่มลงใน Silicone oil และหนีบขวดไว้ด้วย Camp อุณหภูมิให้ร้อนที่อุณหภูมิ 60°C
- 3.5.2.3 ติดตั้ง Transducer บริเวณตรงกลางคอขวด หนีบไว้ด้วย Camp (ยังไม่ต้องเปิดเครื่อง)
- 3.5.2.4 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา 21.2780 g และ Methanol 48.32 g ใส่ลงไปขวดสามคอ
จากนั้นกวนสารด้วยความเร็วรอบ 900 rpm
- 3.5.2.5 เปิด Generator เริ่มจับเวลา และเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C . และการนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite มาใช้ซ้ำในการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 2, 5, 10, และ 15 %wt โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน และวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103

4.1 ทดสอบความแรงเบส (Basic Strength) และการหาปริมาณเบส (Basicity)

การวิเคราะห์หาความแรงเบส (H_-) และปริมาณเบส จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี Hammett indicator โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ Bromothymol blue ($H_- = 7.2$), phenolphthalein ($H_- = 9.8$), 2,4-dinitroaniline ($H_- = 15.0$), และ 4-nitroaniline ($H_- = 18.4$)

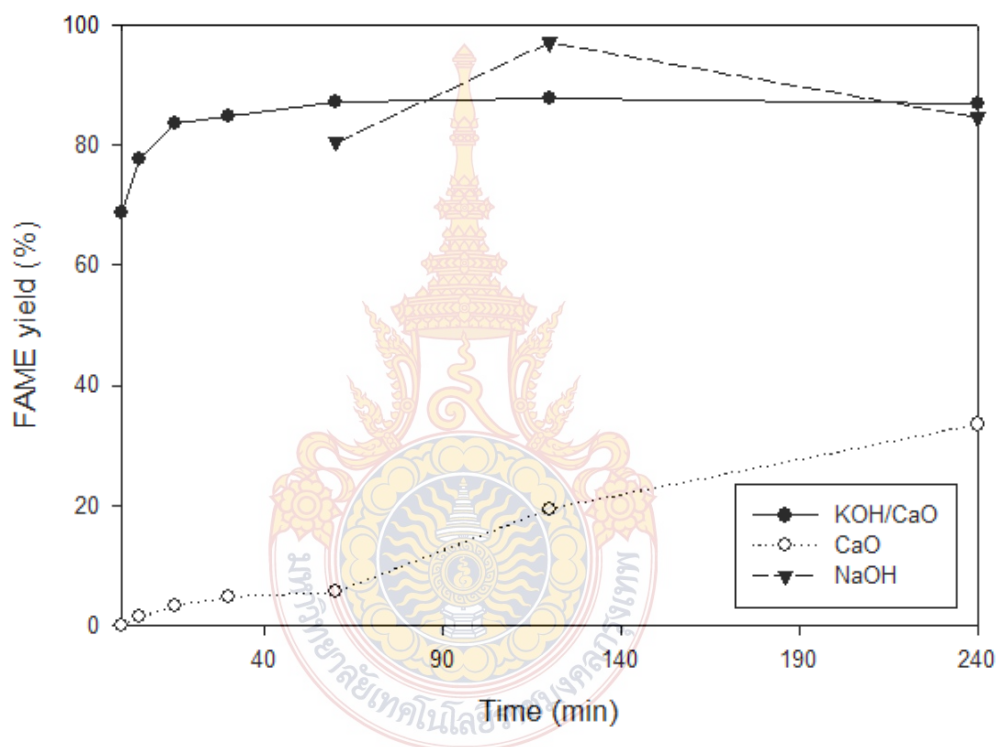
ตารางที่ 4.1 ความแรงเบสและปริมาณเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ KOH/CaO ที่สังเคราะห์ได้

| Catalyst | Basic strength (H_-) | Basicity (mmol/g cat.) | | | | |
|----------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------|
| | | Bromothy mol blue ($H_- = 7.2$) | Phenolph thalein ($H_- = 9.8$) | 2,4- dinitroaniline ($H_- = 15.0$), | 4- nitroaniline ($H_- = 18.4$) | Total |
| CaO | $7.2 < H_- < 9.8$ | 0.020 | 0.022 | - | - | 0.042 |
| KOH/CaO | $7.2 < H_- < 18.4$ | 0.1300 | 0.1330 | 0.0833 | 0.1000 | 0.4463 |

จากตารางที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์จากลignite มีความแรงเบสอยู่ (H_-) 7.2 ถึง 9.8 แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite ที่เตรียมโดยวิธีเอ็บซุ่มมีความแรงเบส (H_-) อยู่ระหว่าง 7.2 ถึง 18.4

นอกจากนี้การหาปริมาณเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite ที่เตรียมด้วยวิธีเอิบซุ่ม จะเห็นว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO มีความแรงเบสที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite ซึ่งการเติม KOH ซึ่งเป็นเบสแก่ทำให้ความแรงเบสเพิ่มขึ้น มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์ได้จากลignite ถึง 10 เท่า

4.2 การเปรียบเทียบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาของ KOH/CaO จากลignite ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite และตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

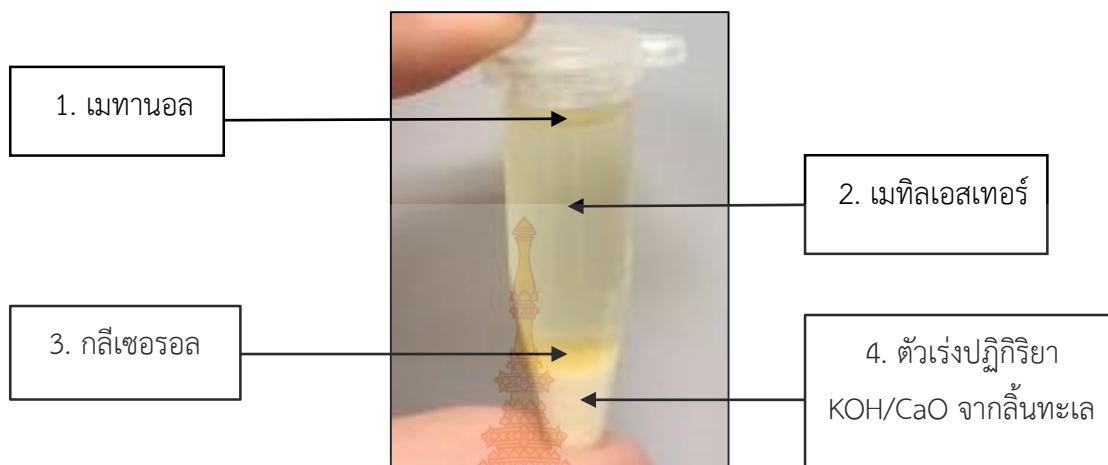


รูปที่ 4.1 ผลได้ของ FAME จากตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite CaO จากลignite และ NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL

จากรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของ KOH/CaO จากลignite CaO จากลignite และ NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าค่าผลได้ของ FAME ของตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH มีค่าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite และ CaO จากลignite ตามลำดับ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ทำให้ทุกโมลของ NaOH ที่ใส่เข้าไปสามารถใช้ในการเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้การทดสอบความแรงเบสจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO มีความแรงเบสและปริมาณที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite ทำให้

สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ไปศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.3 ลักษณะของสารในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.2 การแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอลและเมทานอล

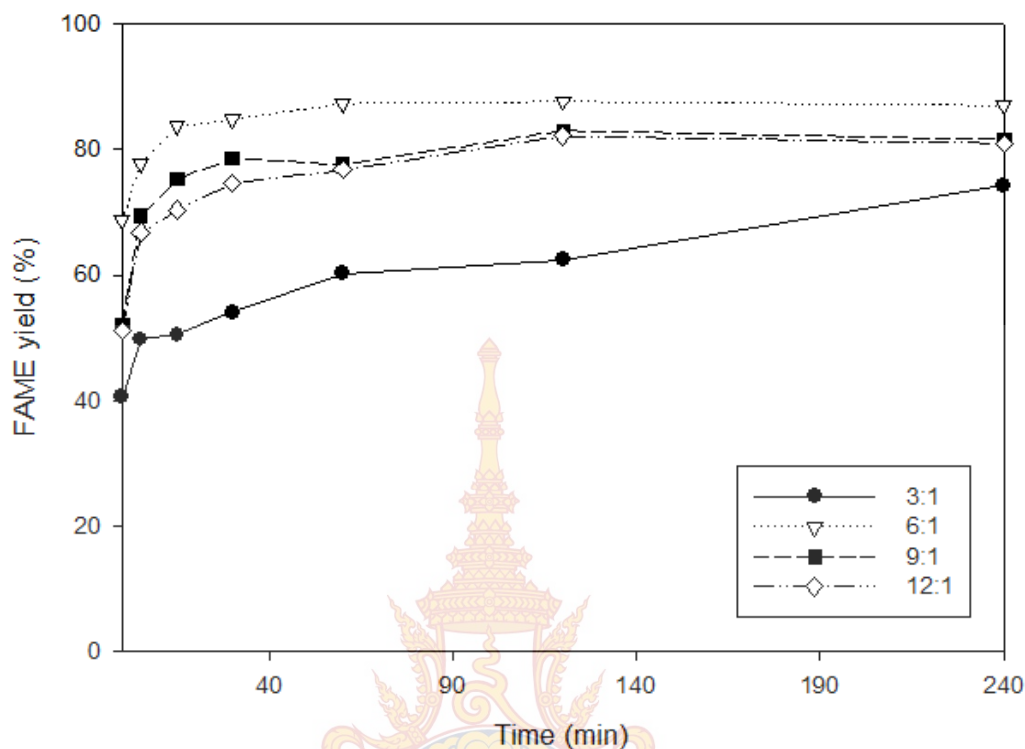
จากรูปที่ 4.2 เป็นการทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเล เป็นเวลา 240 min และเก็บตัวอย่างสารนำไปวิเคราะห์หาผลได้ของ FAME ซึ่งลักษณะของสารเมื่อนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบหนีศูนย์กลางสารจะแยกกันทั้งหมด 4 ชั้น โดยชั้นล่างสุดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ซึ่งมีลักษณะสีขาว ชั้นที่สามเป็นกลีเซอรอลซึ่งมีลักษณะเป็นสีเหลืองเข้ม ชั้นที่สองเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอเซลมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน และชั้นบนสุดเป็นเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

4.4 การหาภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเล

4.4.1 ผลการทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่แตกต่างกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

การหาความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ FAME สำหรับปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ใช้อัตราส่วนโดย

โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt ของน้ำมันปาล์ม และวิเคราะห์ผลได้ของ FAME ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 4.3 ผลได้ของ FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล 10 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL

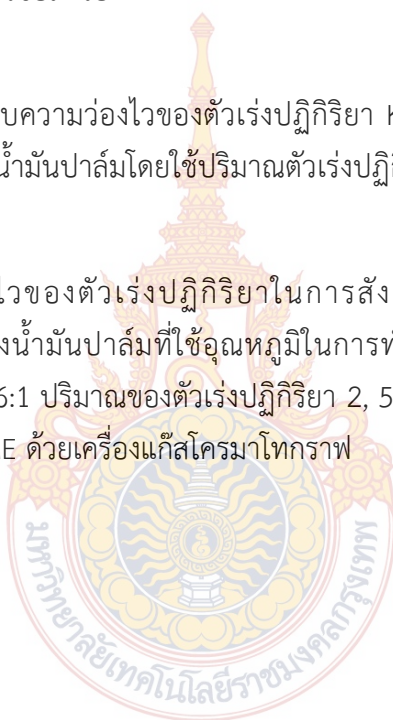
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าผลได้ของ FAME เพิ่มขึ้นจนเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลค่าผลได้ของ FAME จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มต้น (0 min) จะพบว่าอัตราการผลิตปฏิกิริยาของสารทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมล 6:1 มีค่าผลได้ของ FAME สูงกว่าที่อัตราส่วนโดยโมล 9:1, 12:1 และ 3:1 ตามลำดับ การใช้เมทานอลต่อน้ำมันที่อัตราส่วน โมล 9:1 และ 12:1 จะทำให้ค่าผลได้ของ FAME ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันที่สูงเกิน (9:1 และ 12:1) จะทำให้ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันลดลง ซึ่งทำให้อัตราการผลิตปฏิกิริยาลดลงด้วย ส่งผลให้ค่าผลได้ของ FAME ลดลง สำหรับที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 เป็นอัตราส่วนทางทฤษฎีของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลได้ของ FAME น้อยที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible reaction) ทำให้เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์ที่มากพอ ผลิตภัณฑ์นั้นจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นสารตั้งต้นอีกครั้ง

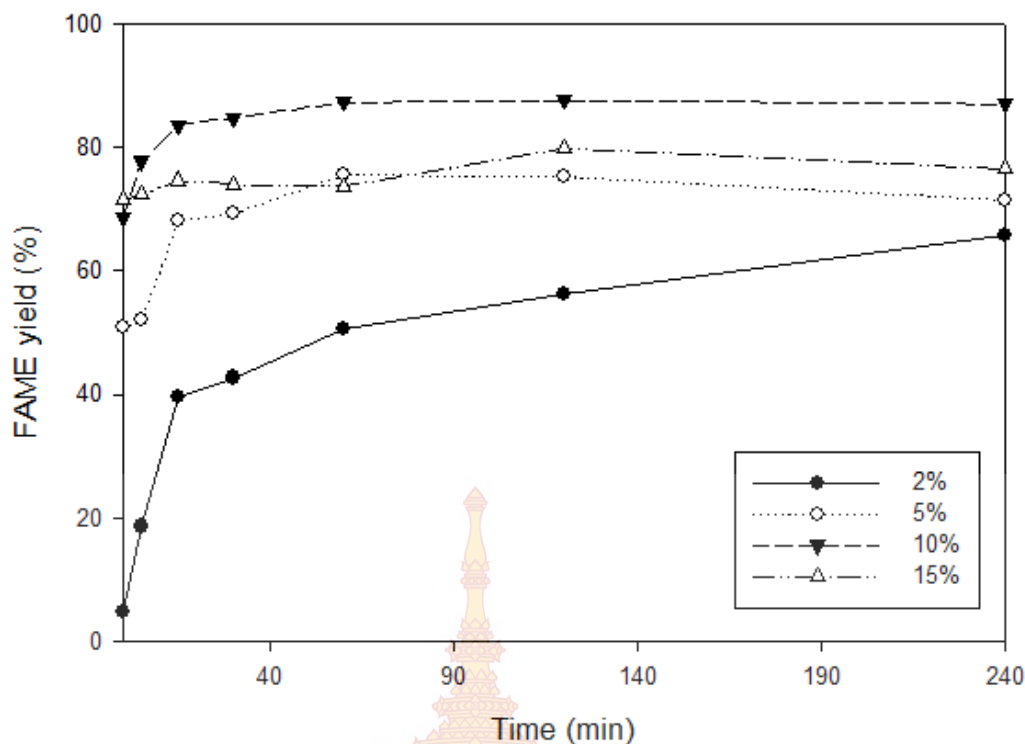
เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Chien-Chih Liao และคณะ [26] ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมออกไซด์ด้วยวิธีการเอิบซุ่มด้วยแคลเซียมออกไซด์ (KOH/CaO) ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาที่ใช้ในการปฏิกิริยา คือ 8.42, 3.17% และ 67.9 min ตามลำดับ ค่าผลได้ของ FAME 97.1% ซึ่งจะเห็นได้ว่าในงานวิจัยที่กล่าวไปมีค่าผลได้ของ FAME มากกว่าการทดลองนี้ เนื่องจากในงานวิจัยที่กล่าวไปได้ทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ จึงทำให้ได้ค่าผลได้ของ FAME ในปริมาณที่มากกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 6:1 ไปศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.2 ผลการทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

การหาความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ FAME สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2, 5, 10 และ 15 %wt ของน้ำมันปาล์ม และวิเคราะห์ผลได้ของ FAME ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี





รูปที่ 4.4 ผลได้ของ FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเล 2, 5, 10 และ 15 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 120 mL

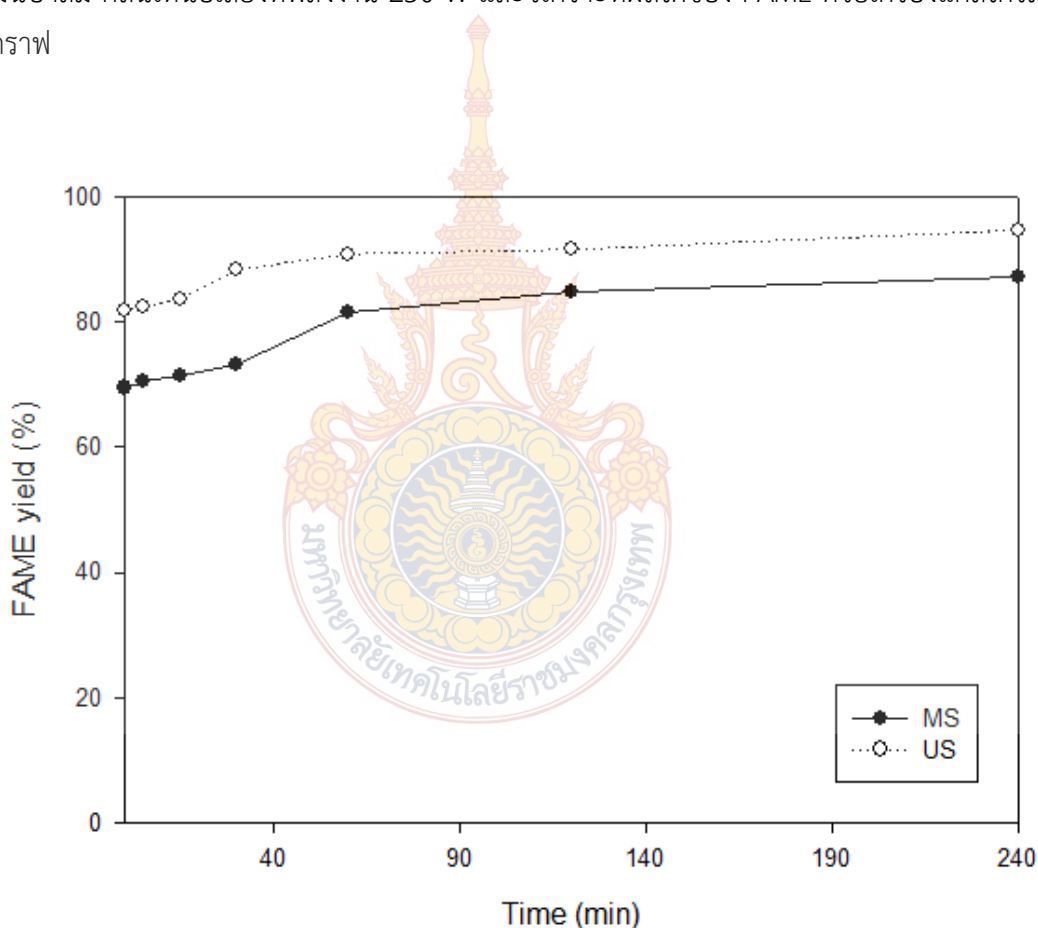
จากรูปที่ 4.4 เป็นการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเล ที่มีต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60°C และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 พบว่าเมื่อเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเลเป็น 2, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ จะให้ค่าผลได้ของ FAME ที่เวลา 240 min เป็น 65.85, 71.46 และ 87.02% ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเป็นการเพิ่มตำแหน่งความว่องไว (Active site) ในการทำปฏิกิริยา จึงทำให้ผลได้ของ FAME เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเลเป็น 15 %wt จะทำให้ค่าผลได้ของ FAME น้อยกว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากล้นทะเลที่ 10 %wt เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวลสาร สังเกตได้จากการที่สารทำปฏิกิริยาจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลได้ของ FAME ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chien-Chih Liao และคณะ [26] จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไปทำให้ผลได้ของ FAME ลดลง เนื่องจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวลสาร

ดังนั้นจึงเลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt ไปศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วยที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.3. ศึกษาผลของสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/ CaO ลิ่นทะเลโดยเลือกภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ร่วมกับการสารแบบให้ความร้อน (US) และเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (MS)

การหาความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ FAME สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล 10 %wt ของน้ำมันปาล์ม คลื่นเหนือเสียงที่พลังงาน 250 W และวิเคราะห์ผลได้ของ FAME ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



รูปที่ 4.5 ผลได้ของ FAME ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลิ่นทะเล 10%wt อุณหภูมิ 60°C และที่เวลาต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย (US) เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (MS) ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 300 mL

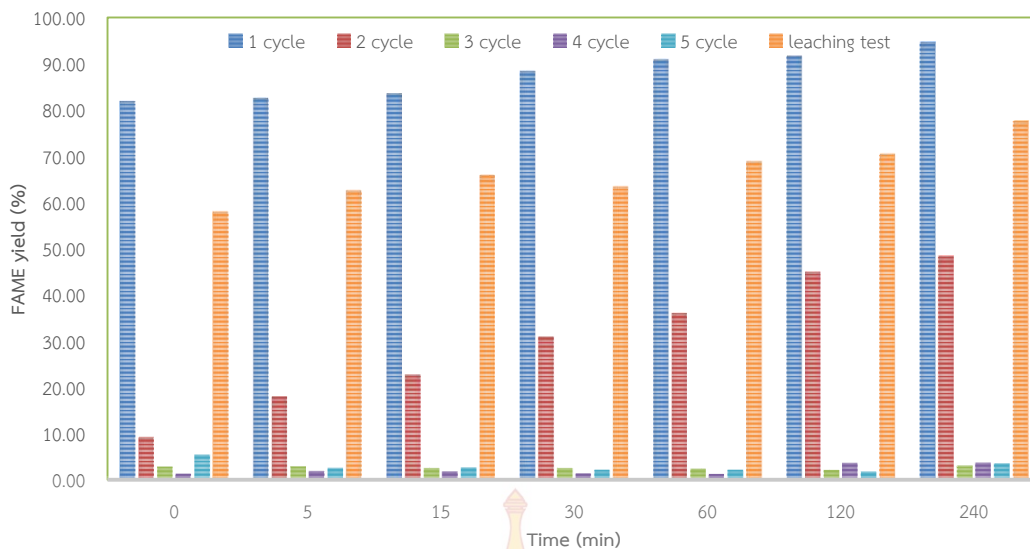
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าที่ช่วงเวลาเริ่มต้น (0 min) ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล 10 %wt อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ค่าผลได้ของ FAME มีค่าสูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ MS เพียงอย่างเดียว ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 240 min การใช้เครื่องปฏิกรณ์ MS ทำให้โอกาสในการสัมผัสกันระหว่างตำแหน่งว่องไว (Active site) กับสารทำปฏิกิริยาน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ US เนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียงจะทำให้เกิดสารทำปฏิกิริยา (เมทานอลและน้ำมัน) มีการผสมกันดียิ่งขึ้น โดยการส่งคลื่นผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว (สารทำปฏิกิริยา) ทำให้เกิดส่วนอัดส่วนขยายส่งผลให้เกิดฟองขนาดเล็กที่มีอุณหภูมิและความดันสูงเป็นจำนวนมากหรือเรียกลักษณะดังกล่าวว่ากระบวนการกัดตัวของเหลว (Cavitation) และเมื่อฟองขนาดเล็กเกิดการแตกตัวจึงทำให้สารละลายเข้ากันได้ดีมากขึ้น

เมื่อเทียบกับงานวิจัยของพินดาภรณ์ [28] และนภาพรรณ [29] พบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่และเปลือกหอย ตามลำดับ เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงจะช่วยเพิ่มการละลายระหว่างน้ำมันกับเมทานอล ทำให้ค่าผลได้ของ FAME สูงขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อนสามารถให้ค่าผลได้ของ FAME ได้สูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพียงอย่างเดียว และพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO 10 %wt ซึ่งให้ค่าผลได้ของ FAME ที่สูง จึงได้มีการนำไปศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.5. การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลกลับมาใช้ซ้ำ

การทดสอบการนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลมาใช้ซ้ำ โดยใช้ปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO 10 %wt ของน้ำมันปาล์มคลื่นเหนือเสียงที่พลังงาน 250 W ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ร่วมกับการกวนสารแบบให้ความร้อน และวิเคราะห์ผลได้ของ FAME ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 4.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล กลับมาใช้ซ้ำ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C และที่เวลาต่างๆ ที่ปริมาตรรวมของสารทำปฏิกิริยา 300 mL

จากรูปที่ 4.6 ค่าผลได้ของ FAME ตั้งแต่รอบที่ 1 ถึง 5 ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่สถานะเดียวกัน พบว่าค่าผลได้ของ FAME ตั้งแต่รอบที่ 1 ถึง 5 มีการลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลมีการเสื่อมสภาพ โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพอาจเกิดจากสารทำปฏิกิริยาไปสะสมบนตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Carbon deposition) หรืออาจเกิดจากตำแหน่งความว่องไว (Active site) ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา และละลายในสารทำปฏิกิริยา ซึ่งเกิดจากการชะละลาย (Leaching) ดังนั้นจึงมีการทดสอบการชะละลาย โดยนำเอาตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล ไปแช่ในเมทานอลที่อุณหภูมิ 60°C นาน 1 h แล้วกรองเอาเมทานอลมาผสมกับน้ำมันและทำปฏิกิริยาที่ภาวะเดียวกันโดยไม่ต้องเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณผลได้ของ FAME ของ cycle 2nd ลดลงจาก cycle 1st เท่ากับปริมาณที่ผลได้ของ FAME ที่ได้จากการทดสอบการชะละลาย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการชะละลายเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล ดังนั้นวิธีการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาคือการนำมาเอิบชุ่มด้วย KOH ให้มีทุกรอบของการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ ซึ่งการเอิบชุ่มด้วย KOH ทำให้เพิ่มตำแหน่งความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเฉพาะใน cycle แรกเท่านั้น ดังนั้นกลไกของการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จึงเป็นการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะของการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล เพื่อใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ลักษณะของสารทำปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าสารทำปฏิกิริยาจะแยกชั้นทั้งหมด 4 ชั้น ได้แก่เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ (FAME) กลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

5.1.2 การหาความแรงเบสและปริมาณเบส จากตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ KOH/CaO พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO มีความแรงเบสอยู่ระหว่าง 7.2 ถึง 9.8 และตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO มีความแรงเบสอยู่ระหว่าง 7.2 ถึง 18.4 ส่วนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO เท่ากับ 0.0420 mmol/gcat และตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO เท่ากับ 0.4463 mmol/gcat ซึ่งสอดคล้องกับผลได้ของ FAME ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ภาวะเดียวกัน

5.1.3 การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยการปรับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เป็นเวลา 240 min พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt ค่าผลได้ของ FAME สูงตั้งแต่ช่วงเริ่มทำปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ 3:1, 9:1 และ 12:1

5.1.4 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2, 5, 10 และ 15 %wt อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เป็นเวลา 240 min พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt ค่าผลได้ของ FAME สูงถึง 87.02% ที่เวลา 240 min เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 2, 5 และ 15 %wt ที่เวลาเดียวกัน

5.1.5 ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลื่นทะเล พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของเมทานอลกับน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt อุณหภูมิ 60°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 240 min

ค่าผลได้ของ FAME 94.70% ที่เวลา 240 min สูงกว่าเมื่อเทียบการทำปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่เวลาเดียวกัน ได้ FAME 87.31%

5.1.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO จากลignite มาใช้ซ้ำรอบที่ 1 ถึง 5 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt อุณหภูมิ 60°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 240 min พบว่าไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยารอบที่ 1 ถึง 5 มาใช้ซ้ำได้ เนื่องจากค่า FAME มีค่าน้อย และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพจากการชะละลาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองเปลี่ยนแหล่งแคลเซียมออกไซด์ที่นำมาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ เช่น กระดูกหมู เปลือกหอยแครง เป็นต้น

5.2.2 ควรฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลignite เล็ก่อนนำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2.3 ควรหาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา



บรรณานุกรม

- [1] “ลื่นทะเล”. 2556. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://fony.igetweb.com/index.php?mo=3&art=42079124>.
 (วันที่สืบค้น 17 กุมภาพันธ์ 2559)
- [2] วราภรณ์ เทพเดช และ สรณป์วีณ์ ฉายแสง. 2557. “การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจากลื่นทะเลสำหรับการผลิตไบโอดีเซล”. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [3] พัทธนันท์ ภูสกุล. 2554. ศึกษาการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยมีการป้อนกลับของแอลกอฮอล์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] Vishwanath Deshmane, Parag Gogate and Aniruddha Pandit (2009) *Ultrasound-Assisted Synthesis of Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate*. Chemical Technology 48 : 7923-7927.
- [5] C. Adams, J.F. Peters, M.C. Rand, B.J. Schroer, and M.C. Ziemke (1983) *Investigation of Soybean oil as a diesel fuel extender*. Endurance Tests 60, 8(August) : 1574-1579
- [6] จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] วันทนา อยู่สุข. 2539. “เปลือกหอย” จดหมายข่าวราชบัณฑิตยสถาน. 6, 56 (มกราคม)
- [8] Romanoff, A.L. and Romanoff, A.J (1949) *The avian egg*. New York : University of Michigan
- [9] ชัยวุฒิ นาคเวียง. 2553. “การผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซลโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์และแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์”. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม.
- [10] สุชาติ แซ่เฮง. 2544. *คลื่นเสียงและการประยุกต์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : องค์การการค้าอุตสาหกรรม.
- [11] ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. *เครื่องมือวิทยาศาสตร์*, พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนาวิทยา, 2544.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] กิตติพงศ์ ทองดา และกฤตติรเมธ พลบุบผา. (2557). “ความหวังไวในการเร่งปฏิกิริยาและการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสของแข็งที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย”. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [13] Ibrahim Korkut and Mahmut Bayramoglu (2016) **Ultrasound assisted biodiesel production in presence of dolomite catalyst.** Fuel 180 : 624–629.
- [14] Guanyi Chen, Rui Shan, Jiafu Shi and Beibei Yan (2014) **Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts.** Bioresource Technology 171 : 428–432.
- [15] Oguzhan Ilgen (2011) **Dolomite as a heterogeneous catalyst for transesterification of canola oil.** Fuel Processing Technology 92 : 452–455.
- [16] Edith Martinez-Guerra and Veera Gnanaswar Gude (2016) **Alcohol effect on microwave-ultrasound enhanced transesterification reaction.** Chemical Engineering and Processing 101 : 1-7.
- [17] Anton Esipovich, Sergey Danov, Artem Belousov and Anton Rogozhin (2014) **Improving methods of CaO transesterification activity.** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 395 : 225–233
- [18] Hanif Ahmed Choudhury, Partha Pratim Goswami, Ritesh Malani and Vijayanand Moholkar (2014) **Ultrasonic biodiesel synthesis from crude Jatropha curcas oil with heterogeneous base catalyst: Mechanistic insight and statistical optimization** Ultrasonics Sonochemistry 21 : 1050–1064.
- [19] Hamed Mootabadi, Babak Salamatinia, Subhash Bhatia and Ahmad Zuhairi Abdullah (2010) **Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts.** Fuel 89: 1818–1825.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Pengfei Lu, Huajun Wang and Keke Hu (2013) **Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dimethyl carbonate over the extruded CaO-based catalyst.** Chemical Engineering Journal 228: 147–154.
- [21] Anilkumar Gupta, Suraj Yadav and Virendra Rathod (2015) **Enhancement in biodiesel production using waste cooking oil and calcium diglyceroxide as a heterogeneous catalyst in presence of ultrasound.** Fuel 158: 800-806.
- [22] Gajendra Kumar (2017) **Ultrasonic-assisted reactive-extraction is a fast and easy method for biodiesel production from Jatropha curcas oilseeds.** Ultrasonics Sonochemistry 37: 634-639.
- [23] Sukhvir Kaur Bhangu, Shweta Gupta and Muthupandian Ashokkumar (2017) **Ultrasonic enhancement of lipase-catalysed transesterification for biodiesel synthesis.** Ultrasonics Sonochemistry 34: 305-309.
- [24] Yulin Xiang, Lipeng Wang and Yurong Jiao (2016) **Ultrasound strengthened biodiesel production from waste cooking oil using modified coal fly ash as catalyst.** Journal of Environmental Chemical Engineering 4: 818-824.
- [25] Dipak Dadaso Pukale, Ganesh Maddikeri, Parag Gogate, Aniruddha Pandit and Amit Pratap (2015) **Ultrasound assisted transesterification of waste cooking oil using heterogeneous solid catalyst.** Ultrasonics Sonochemistry 22: 278-286.
- [26] Chien-Chih Liao and Tsair-Wang Chungb (2013) **Optimization of process conditions using response surfacemethodology for the microwave-assisted transesterification of Jatropha oil with KOH impregnated CaO as catalyst.** chemical engineering research and design 9 1 : 2457–2464
- [27] Nezahat Boz. and Miray Kara. (2008). **Solid base catalyzed transesterification of canola oil.** Chemical Engineering Communication : 196: (80-92).
- [28] พนิดาภรณ์ ฤทธิ์ประเสริฐ. 2556. “การประยุกต์ใช้เปลือกไข่เหลือทิ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ แฉิ่งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย”. ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

- [29] นภาพรรณ สุยะปัน. 2556. “ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของแข็งจากเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหมุนเวียนสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมด้วย” ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณปริมาตรน้ำมันและเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมล

ก.1 การคำนวณปริมาณน้ำมันและเมทานอลโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1

$$\text{จาก } n = \frac{m}{M_w}, m = M_w n$$

เมื่อ M_w ของน้ำมันปาล์มเท่ากับ 847 g/mol และเมทานอลเท่ากับ 32 g/mol

$$\begin{aligned} \text{เมื่อใช้น้ำมัน 1 mol} & \quad ; \quad m = 1 \text{ mol} \times 847 \text{ g/mol} \\ & \quad \quad \quad m = 847 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อใช้เมทานอล 12 mol} & \quad ; \quad m = 12 \text{ mol} \times 32 \text{ g/mol} \\ & \quad \quad \quad m = 384 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{จาก } \rho = \frac{m}{v}, v = \frac{m}{\rho}$$

เมื่อ ρ ของน้ำมันปาล์มเท่ากับ 0.89 g/mL และเมทานอลเท่ากับ 0.7918 g/mL

$$\text{เมื่อใช้น้ำมัน 847 g} \quad ; \quad V = \frac{847 \text{ g}}{0.89 \text{ g/mL}}$$

$$V = 951.685 \text{ mL}$$

$$\text{เมื่อใช้เมทานอล 384 g} \quad ; \quad V = \frac{384 \text{ g}}{0.7918 \text{ g/mL}}$$

$$V = 487.309 \text{ mL}$$

ก.2 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 %wt

$$\text{เมื่อใช้น้ำมันปาล์ม 847 g} \quad ; \quad \text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา} = 847 \times \frac{15}{100}$$

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา} = 127.05 \text{ g}$$

ก.3 การคำนวณปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 100 mL

$$\text{จาก ก.1 สารตั้งต้นในการใช้ทำปฏิกิริยา (น้ำมัน + เมทานอล)} = 1438.994 \text{ mL}$$

คำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 100 mL

สารตั้งต้น 1438.994 mL ใช้เมทานอล 487.309 mL

$$\text{ถ้าใช้สารตั้งต้น 100 mL ใช้เมทานอล } \frac{487.309\text{mL} \times 100\text{mL}}{1438.994\text{mL}} = 33.8646\text{mL}$$

คิดเมทานอลเป็นกรัม (g) จะได้ เท่ากับ 26.8140 g

คำนวณหาปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 100 mL

สารตั้งต้น 1438.994 mL ใช้เมทานอล 951.685 mL

$$\text{ถ้าใช้สารตั้งต้น 100 mL ใช้เมทานอล } \frac{951.685\text{mL} \times 100\text{mL}}{1438.994\text{mL}} = 66.1354\text{mL}$$

คิดน้ำมันเป็นกรัม (g) จะได้ เท่ากับ 58.8605 g

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 \%wt จะได้เป็น } 58.8605 \times \frac{15}{100} = 8.8291\text{g}$$



ภาคผนวก ข

วิธีคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO โดยใช้ วิธีการเอิบชุ่ม

สารเคมีที่ใช้

1. KOH

2. CaO จากลั่นทมทะเล

วิธีคำนวณ

ใช้ KOH 20% ของ CaO จากลั่นทมทะเล

เมื่อใช้ CaO จากลั่นทมทะเล 10 g จะต้องใช้ KOH $10 \times \frac{20}{100} = 2g$



ภาคผนวก ค
วิธีคำนวณปริมาณเบส (Basicity)

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองปริมาณเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/CaO ที่สังเคราะห์ได้

| ชนิดเบส | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย | Basicity (mol/g cat.) |
|-------------------------------------|------------|------------|--------|-------------------------------------|
| Bromothymol ($H_+ = 7.2$) | 2.0 | 1.9 | 1.95 | 1.30×10^{-4} |
| 2, 4-Dinitroanilin ($H_+ = 15.0$) | 1.1 | 0.9 | 1.00 | 1.33×10^{-4} |
| Phenolphthalein ($H_+ = 9.8$) | 1.2 | 1.3 | 1.25 | 0.833×10^{-4} |
| P-Nitroanilin ($H_+ = 18.4$) | 0.7 | 0.8 | 0.75 | 1.00×10^{-4} |
| Total | | | | 4.46×10^{-4} |
| | | | | $\approx 0.446 \text{ mmol/g cat.}$ |

ค.1 การคำนวณความเข้มข้นของเบสที่ได้จากการไทเทรต

จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ

V_1 = ปริมาตรสารละลาย benzoic acid ที่ได้จากการไทเทรต

C_1 = ความเข้มข้นของ benzoic acid (mol/L)

น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา = 0.3000 g

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณเบส (Basicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO

จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$C_2V_2 = \frac{0.02 \text{ mol}}{1} \times \frac{1.95 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ mol/g}$$

ภาคผนวก ง

วิธีการวิเคราะห์ผลได้ของไบโอดีเซลโดยใช้เครื่อง GC ตามมาตรฐาน EN 14103

ร้อยละโดยน้ำหนักของไบโอดีเซล บวกถึงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยส่งผลต่อค่าผลได้ของไบโอดีเซล สามารถคำนวณได้จากโครมาโทแกรมโดยนำมาเทียบกับสารมาตรฐาน

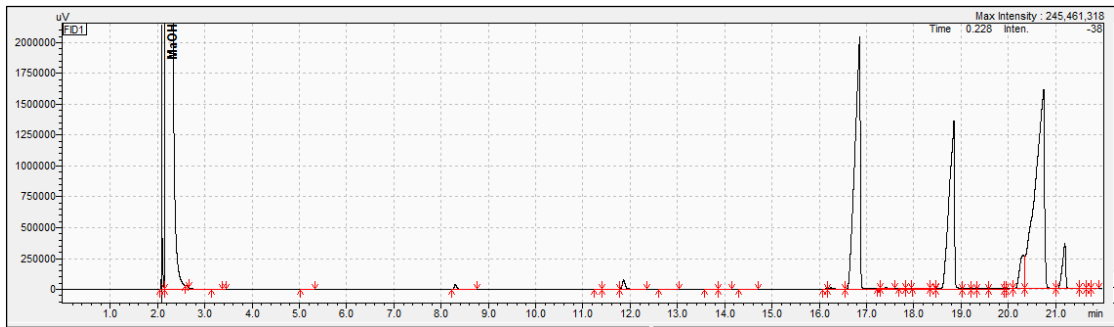
การคำนวณร้อยละค่าผลได้ (Yield)

การคำนวณร้อยละค่าผลได้คือ ไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลังจากแยกกลีเซอรอล โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

| | | | |
|-------|------------|-----|--|
| เมื่อ | ΣA | คือ | พื้นที่ใต้โครมาโทแกรมทั้งหมดของเมทิลเอสเทอร์ |
| | A_{EI} | คือ | พื้นที่ใต้โครมาโทแกรมของ internal standard (Methyl heptadecanoate) |
| | C_{EI} | คือ | ความเข้มข้นของ Methyl heptadecanoate (mg/mL) |
| | V_{EI} | คือ | ปริมาตรของ Heptane (mL) |
| | m | คือ | น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (mg) |

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟชนิดของสารที่เวลาต่าง ๆ ดังนี้



①

②

③

④

⑤

⑥

โดย

① Heptane (Solvent)

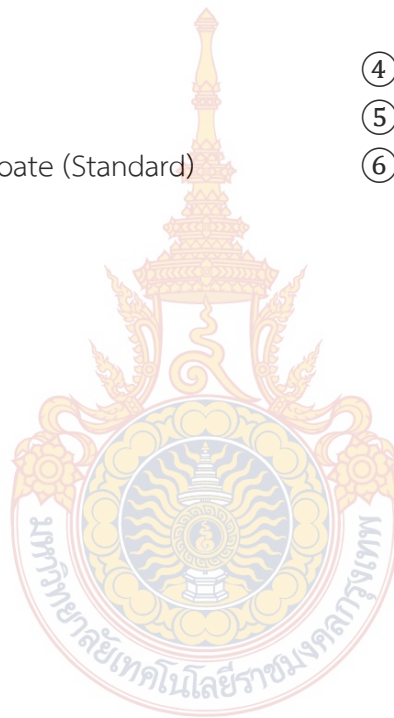
② Methyl palmitate

③ Methyl heptadecanoate (Standard)

④ Methyl ilnoleate

⑤ Methyl oleate

⑥ Methyl stearate



ภาคผนวก จ เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

จ.1 หลักการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิค GC

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC chromatograph) เป็นเทคนิคการแยกสารเนื้อเดียวออกจากกัน โดยตัวอย่างที่จะนำเข้าสู่ระบบจะต้องสามารถระเหยกลายเป็นไอได้และมีความเสถียรเมื่อถูกความร้อน ตัวอย่างที่เป็นไอจะถูกพาด้วยแก๊สเฉื่อย (Mobile phase) ไปยังคอลัมน์ (Stationary phase) เพื่อทำการแยกสารออกจากกัน สารที่แยกได้จะถูกบันทึก เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

จ.2 ชนิดของแก๊สโครมาโทกราฟี

สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามชนิดของ stationary phase ดังนี้

จ.2.1 Gas-Liquid : stationary phase เป็นของเหลวที่ถูกดูดซับอยู่บนของแข็ง

จ.2.2 Gas-Solid : stationary phase เป็นของแข็งมักใช้วิเคราะห์ Atmospheric gas เช่น O_2 N_2 Ar CO_2 และ CO

จ.2.3 gas-Bonded phase : stationary phase เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างพันธะกับพื้นผิวของแข็ง

จ.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสาร

จ.3.1 อัตราไหลของแก๊สตัวพา (carrier gas)

จ.3.2 อุณหภูมิที่สารตัวอย่างระเหยเป็นไอ

จ.3.3 รั่วของคอลัมน์

จ.3.4 ชนิดของตัววัด

จ.4 เครื่องมือ

โดยทั่วไปเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

จ.4.1 แก๊สตัวพา ทำหน้าที่พาตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่มีสมบัติเป็นแก๊สเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาและมีความบริสุทธิ์ ตัวอย่าง ได้แก่ N_2 Ar CO_2 และ He_2 การเลือกชนิดของแก๊สจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัววัดที่ใช้

จ.4.2 ส่วนฉีดสารตัวอย่าง (Sample injection port) เป็นบริเวณสำหรับฉีดตัวอย่างเข้าไปในคอลัมน์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนตัวอย่างที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปไอ

จ.4.3 ตัวควบคุมการไหล (Flow controller) เครื่องควบคุมความดันและอัตราความเร็วของแก๊สจะสามารถปรับให้แก๊สพาเข้าสู่เครื่อง GC โดยมีปั๊มสำหรับปรับความดันของแก๊ส แก๊สที่จะเข้าสู่เครื่อง GC ควรมีค่าประมาณ 40 psi หรือ 3 bar การวัดอัตราเร็วของแก๊สที่เข้าสู่เครื่อง GC สามารถ

ใช้เครื่องวัดอัตราเร็วของแก๊ส ซึ่งมีอยู่หลายแบบแต่ที่นิยมใช้มีดังนี้คือ 1. Mobile ball flow 2. Manometric flow meter 3. Soap bubble flow meter

จ.4.4 คอลัมน์ (Column) นิยมใช้ที่ทำจากเหล็กสแตนเลส (stainless steel) ทองแดง (Copper) นิกเกิล (Nickel) โดยอาจอยู่ในรูปท่อตัวยู (U-tube) หรือเป็นขดทรงกลม ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-6 mm.

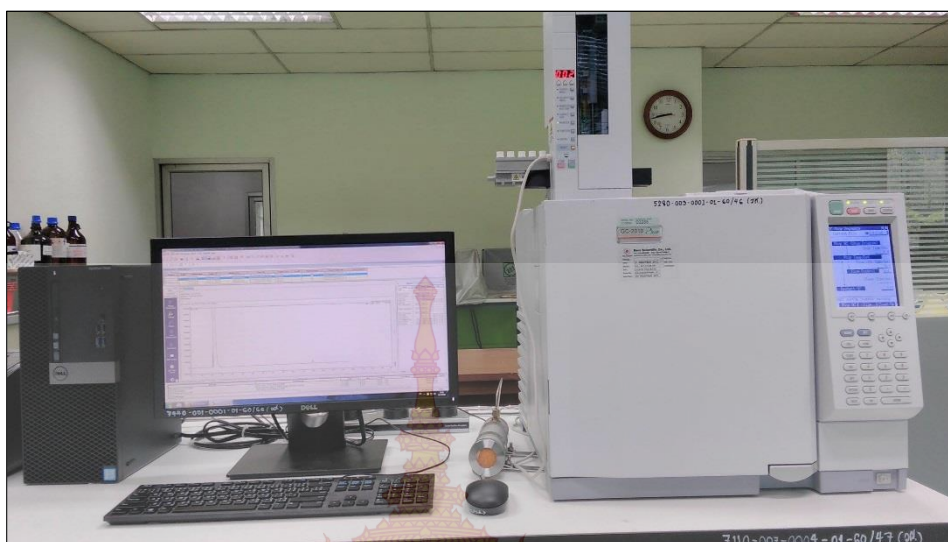
นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดแคพพิลลารี (Capillary column) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 mm. คอลัมน์แคพพิลลารี แบ่งได้ 3 ชนิด คือ คอลัมน์แบบวอลล์โคท (Wall-coated open tubular, WCOT) เป็นชนิดที่มีวาลูภาคหนึ่ง ของเหลวเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 μm) อยู่ทั้งผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 m คอลัมน์แบบซัพพอร์ตโคท (Support coated open tubular, SCOT) เป็นชนิดที่มีตัวรองรับ (Support) บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 m และคอลัมน์แบบไมโครแพค (Micropacked column) เป็นคอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 m

คอลัมน์และส่วนฉีดสารตัวอย่าง อยู่ในเตาอบ (Oven) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในรูปที่แก๊ส หรือเป็นไอ อุณหภูมิของเตาอบอาจมีการตั้งอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา หรือมีการปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง

จ.4.5 ส่วนการตรวจวัด (Detector) ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารที่ทำการแยกผ่านออกจากคอลัมน์มีหลายชนิด ได้แก่ ตัวตรวจวัดชนิดเทอร์มอลคอนดักติวิตี (Thermal conductivity detector, TCD) ตัวตรวจวัดชนิดแฟรมไอออไนเซชัน (Flame ionization detector, FID) ตัวตรวจวัดชนิดไนโตรเจนฟอสฟอรัส (Nitrogen phosphorus detector, NPD) ตัวตรวจวัดชนิดอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Electron capture detector, ECD) และตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer, MS)

จ.4.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คุมอุณหภูมิของคอลัมน์และตัวตรวจวัด อุณหภูมิมีความสำคัญมากในการใช้เครื่อง GC การทดลองแต่ละครั้งจะต้องกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์เสมอ อุณหภูมิของบริเวณที่ฉีดสารจะต้องสูงพอทำให้สารที่ต้องการวิเคราะห์ระเหยได้แต่ไม่ควรสูงมากจนทำให้สารนั้นสลายตัว อุณหภูมิของตัวตรวจวัดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจวัดซึ่งจะมีค่าแตกต่างกัน อุณหภูมิของคอลัมน์จะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Oven) เครื่อง GC บางรุ่นสามารถตั้งอุณหภูมิตัวควบคุมอุณหภูมิได้ การตั้งอุณหภูมิของคอลัมน์ควรคำนึงถึงอุณหภูมิสูงสุดของคอลัมน์ที่สามารถใช้ได้ ถ้าอุณหภูมิของคอลัมน์สูงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูงขึ้น การแยกสารที่วิเคราะห์จะได้ผลดี ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปอาจจะไม่มีการแยกเกิดขึ้นเพราะสารที่ต้องการวิเคราะห์ไม่ระเหย จึงไม่กระจายตัวเข้าไปในตัวพาแก๊ส การวิเคราะห์จึงต้องเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม

จ.4.7 การแสดงผล (Recorder) ทำหน้าที่แสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็นส่วนที่บันทึกผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม โดยใช้สัญญาณที่ได้มาจากตัวตรวจวัด เครื่องตรวจวัดนี้สามารถนำไปใช้กับเครื่องมืออื่นๆได้ วิธีการใช้เครื่องตรวจวัดนี้จะมีแตกต่างกันไปตามชนิดตัวตรวจวัด



รูปที่ จ.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



ภาคผนวก ฉ

วิธีตั้งค่าการใช้งาน GC ในการหาปริมาณไบโอดีเซล

วิธีการตั้งค่าการใช้งาน GC ในการหาปริมาณไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN14103 มีดังนี้

ฉ.1 ตั้งค่า AOC-20i

Instrument Parameters View Normal Advanced End Time : 22.00 min

AOC-20i SPL1 Column FID1 General

Injection Volume: 1.0 uL (10.0 uL syringe)

of Rinses with Presolvent: 0

of Rinses with Solvent(Post): 5

of Rinses with Sample: 5

Plunger Speed(Suction): High Middle Low

Viscosity Comp. Time: 1.0 sec

Plunger Speed(Injection): High Middle Low

Syringe Insertion Speed: High Low

Injection Mode: Normal Set...

Advanced...

ฉ.2 ตั้งค่า SPL1

Instrument Parameters View Normal Advanced End Time : 22.00 min

AOC-20i SPL1 Column FID1 General

Temperature: 250.0 C

Injection Mode: Split

Sampling Time: 1.00 min

Carrier Gas : He

Flow Control Mode: Linear Velocity

Pressure: 99.0 kPa

Total Flow: 19.7 mL/min

Column Flow: 0.80 mL/min

Linear Velocity: 25.0 cm/sec

Purge Flow : 3.0 mL/min

Split Ratio: 20.0

INJ.Program: Purge Flow Redraw

| | Rate | Flow | Hold Time |
|---|------|------|-----------|
| 0 | - | 3.0 | 0.00 |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 2 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 3 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |

Total Program Time : 0.00 min Advanced...

Column Information (SH-Rxi-5Sil MS)

Length: 30.0 m Film Thickness: 0.25 um

Inner Diameter: 0.25 mm ID

ฉ.3 ตั้งค่า Column

Instrument Parameters View Normal **Advanced** End Time : 22.00 min

AOC-20i SPL1 **Column** FID1 General

Temperature: 150.0 C

Equilibration Time: 3.0 min

Column Information (SH-Rxi-5Sil MS)

Column ID: 1282375

Installation Date: 17/04/20

Column Max Temp.: 320 C

Length: 30.0 m

Inner Diameter: 0.25 mm ID

Film Thickness: 0.25 um

Comment:

Set...

c

Column Oven Temperature Program Redraw

| | Rate | Temperature | Hold Time |
|---|-------|-------------|-----------|
| 0 | - | 150.0 | 5.00 |
| 1 | 10.00 | 190.0 | 5.00 |
| 2 | 10.00 | 220.0 | 5.00 |
| 3 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |

Total Program Time : 22.00 min

ฉ.4 ตั้งค่า FID1

Instrument Parameters View Normal **Advanced** End Time : 22.00 min

AOC-20i SPL1 Column **FID1** General

Temperature: 250.0 C

Data Acquisition

Sampling Rate: 40 msec

Stop Time: 22.00 min

(Link to Oven Program)

Delay Time: 0.00 min

Subtract Detector: None

mL/min

Flow Program Makeup Redraw

| | Rate | Flow | Hold Time |
|---|------|------|-----------|
| 0 | - | 30.0 | 0.00 |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 2 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 3 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |

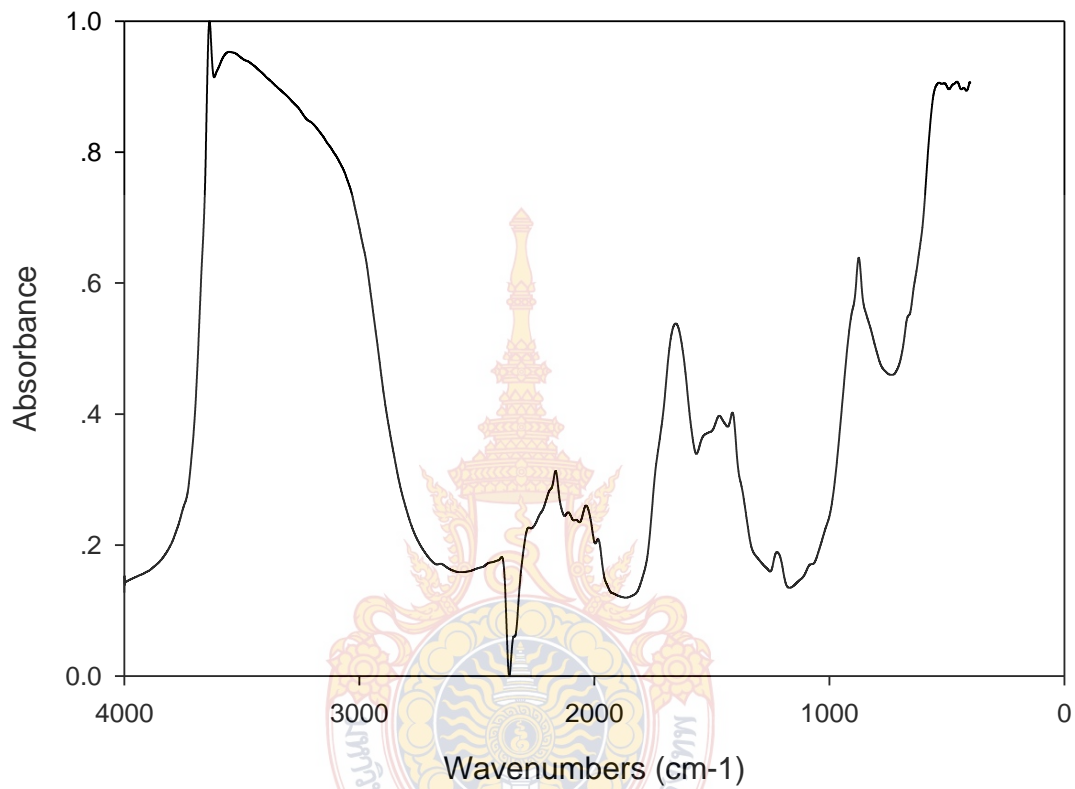
Total Program Time : 0.00 min

Makeup Gas: N2 H2 Flow : 40.0 mL/min

Makeup Flow : 30.0 mL/min Air Flow : 400.0 mL/min

ภาคผนวก ข

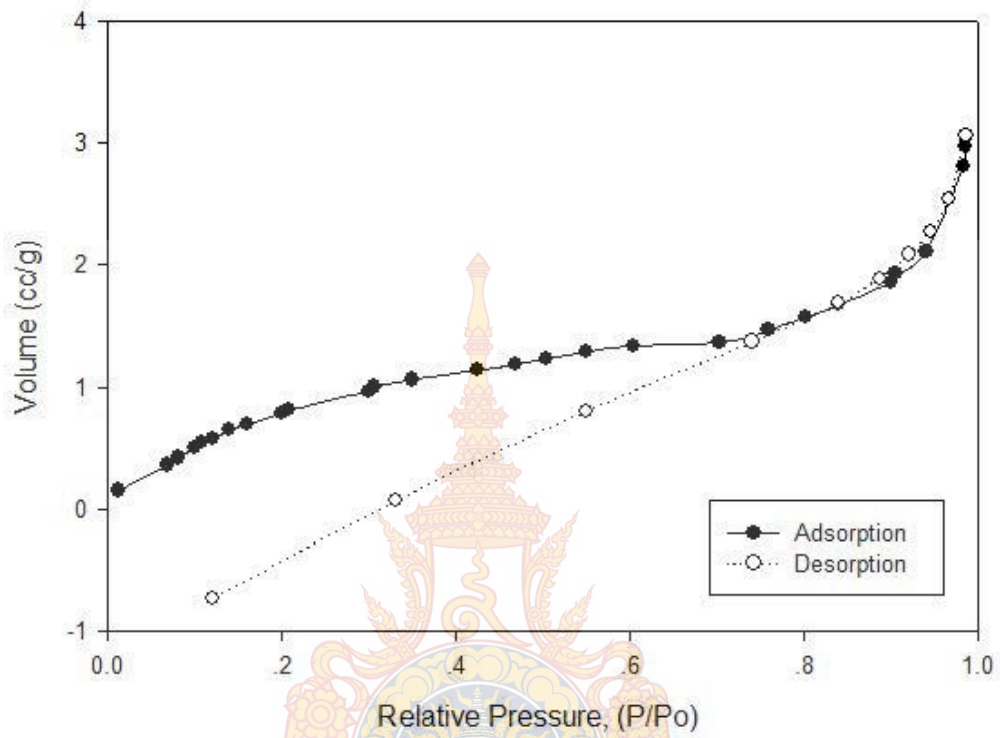
ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากลันทะเลด้วยเครื่องฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโคปี (FT-IR)



รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลันทะเล

ภาคผนวก ซ

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากลignite ด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 adsorption)



รูปที่ ซ.1 ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากลignite

ประวัติผู้เขียน

ส่วน ค : ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ นางสาวกนกวรรณ ง้าวสุวรรณ
MISS KANOKWAN NGAOSUWAN
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทรศัพท์ 0 2287 9600 ต่อ 7116
โทรสาร 0 2287 9600
e-mail: kanokwannng@gmail.com . kanokwan.n@rmutk.ac.th
5. ประวัติการศึกษา

| ปีที่จบการศึกษา | ระดับปริญญา | อักษรย่อปริญญา และชื่อเต็ม | สาขาวิชา | วิชาเอก | ชื่อสถาบันการศึกษา | ประเทศ |
|-----------------|-------------|--|--------------|--------------|------------------------|--------|
| 2553 | เอก | วศ.ด. วิศวกรรมศาสตร์ ดุชนวัตกรรม | วิศวกรรมเคมี | วิศวกรรมเคมี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | ไทย |
| 2544 | โท | วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต | วิศวกรรมเคมี | วิศวกรรมเคมี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ไทย |

| | | | | | | |
|------|-----|----------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-----|
| 2541 | ตรี | วศ.บ. วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต | วิศวกรรมเคมี | วิศวกรรมเคมี | มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี สุรนารี | ไทย |
|------|-----|----------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-----|

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานทดแทน การใช้ประโยชน์จากชีวมวล เครื่อง
ปฏิกรณ์แบบหลายหน้าที่

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ สถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วม วิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย

—

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

- 1) การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์บายตัวรองรับ
เซอร์โคเนีย (ตอนที่ 1)
- 2) การผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์บายตัวรองรับ
เซอร์โคเนีย (ตอนที่ 2)
- 3) ซัลโฟเนตบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ: ตัวเร่งปฏิกิริยากรดของแข็งชนิดใหม่
สำหรับการผลิตไบโอดีเซล
- 4) การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมด้วย (ตอนที่ 1)
- 5) การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมด้วย (ตอนที่ 2)
- 6) การผลิตกรีนดีเซลผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
แพลเลเดียมบนคาร์บอน : ผลของตัวรองรับคาร์บอนที่มีต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา

7) [การใช้ประโยชน์จากกลิ่นทะเลในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ](#) (ตอนที่ 1)

8) [การใช้ประโยชน์จากกลิ่นทะเลในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ](#) (ตอนที่ 2)

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

1) Mathematical modeling and simulation for gas-liquid reactors, 2005, *Computers and Chemical Engineering*, 2461-2473, ทุน CHE-ADB, ผู้ร่วมวิจัย

2) การสังเคราะห์พอลิ (เมทิลเมทาคริเลต) ที่กราฟต์บนแป้งข้าวโพดโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549, ผู้ร่วมวิจัย

3) Hydrolysis of Triglycerides using Solid Acid Catalysts, 7th Annual Symposium of the Southeastern Catalysis Society, 2009, North Carolina, USA ทุน Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้วิจัย

4) Simultaneous Free Fatty Acid Esterification and Triglyceride Transesterification Using a Solid Acid Catalyst with in Situ Removal of Water and Unreacted Methanol, 2009, *Ind.Eng. Chem. Res.*, page 2810-2818, ทุน Animal Co-Products Research & Education Center (ACREC) ที่มหาวิทยาลัย Clemson ประเทศสหรัฐอเมริกา, ผู้ร่วมวิจัย

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

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

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

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

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

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

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

12) Patent Review on “Biodiesel Production Process”, Recent Patents on Chemical Engineering, 2011, 4, ผู้ร่วมวิจัย

13) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตคาร์บอนนาโนฮอ์นแบบผนังชั้นเดียว สำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ มทร กรุงเทพฯ ปี 2554 เป็นผู้ร่วมวิจัย เริ่มดำเนินการวิจัย 1 ตุลาคม 2553

14) โครงการการผลิตแบบบูรณาการเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากเมล็ดยางพารา โครงการวิจัยย่อยเรื่อง การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดยางพาราโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพังก์เบส ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเครือข่ายเชิงกลยุทธ์ฯ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ (สกอ.) เป็นผู้ร่วมวิจัย เริ่มดำเนินการ 1 ตุลาคม 2554

15) Issara Choedkiatsakul, Kanokwan Ngaosuwan and Suttichai Assabumrungrat, [Application of heterogeneous catalysts for transesterification of refined palm oil in ultrasound-assisted reactor](#), *Fuel Processing Technology*, 111, (2013), 22-28 (Impact factor (2013) 3.019) ผู้ร่วมวิจัย

16) ซัลโฟเนตบนถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ: ตัวเร่งปฏิกิริยากรดของแข็งชนิดใหม่ สำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้รับทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ของ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) ร่วมกับสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ (มทรก)

17) Ultrasound combined flow reactor for biodiesel production เป็นโครงการย่อยในชุดโครงการเรื่องการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายหน้าที่และการรวมกระบวนการสำหรับอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี / ทุนส่งเสริมกลุ่มวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว.) ของศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ตั้งแต่ 31 สิงหาคม 2554 – 30 สิงหาคม 2557

18) การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล โครงการคลังสเตอร์พลังงานของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งบประมาณปี 2556 งบประมาณ 2 ปีต่อเนื่อง ร่วมกับศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

19) การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ร่วมด้วย (ตอนที่ 1) ได้รับเงิน (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2557 ตั้งแต่ วันที่ 1 ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

20) Kanokwan Ngaosuwan, James G. Goodwin Jr., Piyasan Prasertdham, A green sulfonated carbon-based catalyst derived from coffee residue for esterification, *Renewable Energy*, 86 (2016) 262-269 (Impact factor (2016) 4.357) ทุนพัฒนาศักยภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ ของ สกว ร่วมกับ สกอ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ หัวหน้าโครงการวิจัย

21) Issara Choedkiatsakul, Kanokwan Ngaosuwan, Suttichai Assabumrungrat, S. Mantegna, and G. Cravotto Biodiesel production in a novel continuous flow microwave reactor, *Renewable Energy* 83 (2015) 25-29, (Impact factor (2014) 3.476), ผู้ร่วมวิจัย

22) Issara Choedkiatsakul, Kanokwan Ngaosuwan, Suttichai Assabumrungrat, S. Tabasso, and G. Cravotto, Integrated flow reactor that combines

high-shear mixing and microwave irradiation for biodiesel production, *Biomass and Bioenergy* 77 (2015) 186-191, (Impact factor (2014) 3.394), ผู้ร่วมวิจัย

23) Issara Choedkiatsakul, Kanokwan Ngaosuwan, G. Cravotto and Suttichai Assabumrungrat, [Biodiesel production from palm oil using combined mechanical stirred and ultrasonic reactor](#), *Ultrasonics Sonochemistry*, 21 (2014) 1585–1591, (Impact factor (2014) 4.321) , ผู้ร่วมวิจัย

24) การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมด้วย (ตอนที่ 2) ได้รับเงิน (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2558 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

25) การผลิตกรีนดีเซลผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนคาร์บอน : ผลของตัวรองรับคาร์บอนที่มีต่อความไวในการเร่งปฏิกิริยา ได้รับเงิน (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2559 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

26) Jutipong Poosumas, Kanokwan Ngaosuwan, Armando T. Quitain, and Suttichai Assabumrungrat, Role of ultrasonic irradiation on transesterification of palm oil using calcium oxide as a solid base catalyst, *Energy Conversion and Management*, 120 (2016), 62-70 (Impact factor (2016) 5.589) ทูลส่งเสริมกลุ่มวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว.) ของศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

27) [การใช้ประโยชน์จากลิกนินในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ](#) (ตอนที่ 1) ได้รับเงิน (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2560 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2559 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2560 ส่งร่างรายงานฉบับสมบูรณ์

28) Nattawat Petchsoongsakul, Kanokwan Ngaosuwan, Worapon Kiatkittipong Farid Aiouache, Suttichai Assabumrungrat, Process design of biodiesel production: Hybridization of ester-and transesterification in a single reactive distillation, *Energy Conversion and Management*, 153 (2017), 493-503 (Impact factor (2016) 5.589) ทูลส่งเสริมกลุ่มวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว.) ของศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

29) [การใช้ประโยชน์จากลิกนินในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลต้นทุนต่ำ](#) (ตอนที่ 2) ได้รับเงิน (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2561 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2561 ส่งร่างรายงานฉบับสมบูรณ์

6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพการทำวิจัย ว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณเท่าใด

1) Reactive distillation for biodiesel production เป็นโครงการย่อยในชุดโครงการเรื่องการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหลายหน้าที่และการรวมกระบวนการสำหรับอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี / ทุนส่งเสริมกลุ่มวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว.) ของศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ตั้งแต่ 31 สิงหาคม 2558 – 30 สิงหาคม 2561 ส่งร่างรายงานฉบับสมบูรณ์

