

ปัจจัยสำคัญของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อการผลิต ไบโอดีเซล

Important Parameters in Transesterification for Biodiesel Production

ธาดา ทรัพย์พัฒนา ชนินทร ตรีมิ่งมิตร ธนวรรณ พิณรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยทั่วไปที่นิยมใช้มี 4 วิธี คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์ และการใช้สภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งแต่ละวิธีนั้นจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป โดยบทความนี้จะเปรียบเทียบแต่ละวิธี และกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน อิทธิพลของอัตราส่วน โดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล, ตัวเร่งปฏิกิริยา, ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน, ตัวทำละลาย

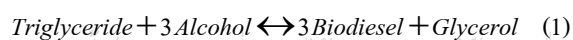
Abstract

This article presents the reviews of the production of biodiesel from transesterification. There are four common methods, which are base catalyst, acid catalyst, enzyme catalyst and supercritical method. Each methodology have different advantage and disadvantage. This article will compare each method. The factors, which affect to the production of biodiesel such as temperature and pressure, molar ratio of alcohol to oil, type and amount of catalyst, reaction time, and use of solvent, were discussed

Keywords : Biodiesel, Catalyst, Transesterification, Solvent

1. บทนำ

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็ว โดยที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์) กับแอลกอฮอล์โดยมีการให้ความร้อน เกิดอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และมีสารข้างเคียงเกิดขึ้นคือ กลีเซอรอล ดังแสดงในสมการที่ (1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลนั้นจะมีผลอย่างมากกับการเลือกใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีอยู่ในสารตั้งต้น โดยงานวิจัยของ Kusdiana และ Saka [1] แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระเพียงร้อยละ 20 จะทำให้อัตราผลผลิตของไบโอดีเซลลดลงโดยถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงร้อยละ 65 เทียบกับการใช้วัตถุดิบบริสุทธิ์ที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เกือบร้อยละ 100 นอกจากนี้ น้ำที่ปริมาณ

เพียงร้อยละ 1 จะส่งผลกระทบต่อร้อยละการผลิตไบโอดีเซลอย่างมาก โดยถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 10 และถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 20 [1] เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำและกรดไขมันอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น โดยในกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส น้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล โดยที่กรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่ในปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน นอกจากส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงแล้วจะทำให้การแยกสารผลิตภัณฑ์กับสารที่ไม่ต้องการนั้นยากขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะใช้ได้ดีเฉพาะวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ซึ่งปกติมีราคาแพงทำให้ต้นทุนสูง สำหรับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระอยู่เป็นจำนวนมากเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว พืชน้ำมันที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ หรือสาหร่าย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีถ้าทำการแยกน้ำออก ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยากรดเกิดเป็นไบโอดีเซลและน้ำได้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแสดงดังในสมการที่ (2)



แต่ถ้าไม่ทำการแยกน้ำออกจากสารตั้งต้น กรดจะเกิดการแตกตัวในน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของกรดลดลง [2]

นอกจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดและเบส ยังมีนักวิจัยบางส่วนได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาโดยที่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำปนเปื้อน [3-5] อีกหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจคือ การใช้สถานะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ ที่สถานะนี้คุณสมบัติของน้ำมันและแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลง โดยสารตั้งต้นทั้งสองสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ในสถานะดังกล่าว ประกอบกับอุณหภูมิและความดันที่สูงทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและรวดเร็ว รวมทั้งการทำปฏิกิริยา ณ สถานะนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งสิ่งเจือปน (กรดไขมันอิสระและน้ำ) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา [1], [6-7]

2. อิทธิพลของตัวแปร

สถานะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยอิทธิพลของแต่ละตัวแปรจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิและความดันถือเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยตรงเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ภายในโมเลกุลทำให้สารตั้งต้นนั้นทำปฏิกิริยากัน ผลผลิตไบโอดีเซลจะเกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมักนิยมใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาใกล้จุดเดือดของแอลกอฮอล์ คือประมาณ 60 องศาเซลเซียส [8-9]

เมื่อใช้อุณหภูมิที่ต่ำประมาณอุณหภูมิห้อง (25 และ 30 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (สาหร่าย *คลอเรลล่า วูกาลิส*, *Chlorella vulgaris*) คือ 180:1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณของไบโอดีเซลจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคือ ร้อยละ 5 ถึง 10 หลังทำปฏิกิริยาโดยใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ 60 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตสูงถึง 95 อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียส ปริมาณของร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 81 ทั้งนี้อาจเพราะเมทานอลระเหยทำให้ลดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา [10] โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยาจะมีความดันกับระบบเล็กน้อย 2-3 ความดันบรรยากาศ เพื่อพยายามทำให้เมทานอลกลั่นตัวอยู่ในสถานะของเหลว

ให้มากที่สุด สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดวิกฤตของแอลกอฮอล์ (ประมาณ 240-270 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในระยะเวลาสั้น 15 นาที โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารตั้งต้นอยู่ในเฟสเดียวกันที่สภาวะดังกล่าวและประกอบกับสภาวะอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว [11-12] แต่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่ควรมีค่าสูงเกิน 300 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ และมีการเปลี่ยนจากไอโซเมอร์แบบ cis เป็น trans ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารตั้งต้นที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง [11]

2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

แอลกอฮอล์นั้นเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันถ้าตามสมการปฏิกิริยา (สมการที่ (1)) การทำปฏิกิริยาโดยเริ่มต้นที่น้ำมันปริมาณ 1 โมลจะใช้แอลกอฮอล์ปริมาณ 3 โมล แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน และเป็นการผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดในทิศทางของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

โดยทั่วไปการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันไม่มากนักซึ่งการทดลองของ Agarwal และคณะ [13] จะศึกษาช่วง 3:1 ถึง 10:1 ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จะพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 6:1 จะมีค่าผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดที่ร้อยละ 98.5 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 ซึ่งได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ร้อยละ 94.1 เพราะปริมาณของแอลกอฮอล์ส่งผลทำให้ความเข้มข้นรวมของสารตั้งต้นลดลงเกิดการเจือจางจึงทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลน้อยลง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 9:1 ทำให้การแยกกลีเซอรอลยากขึ้นอีกด้วย

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดนั้นจะใช้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับชนิดเบส จากการทดลองของ Soriano และคณะ [14] ที่สภาวะ 75 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 12:1 24:1 42:1 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ต่ำมากประมาณร้อยละ 20 และที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 24:1 จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ร้อยละ 86 และถ้าอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 42:1 จะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลงเพราะการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง

นอกจากนี้การใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาช้าลง และทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลในระยะเวลาที่เท่ากันลดลงจาก 90 เป็น 77 และ 70 เมื่อใช้เมทานอล เอทานอล และ โพรพานอล ตามลำดับ [15] โดยส่วนใหญ่แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือเมทานอล เพราะหาง่ายและราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นการเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นหลัก และปริมาณของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลอย่างมากต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนิยมกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า แต่ Ramadhas และคณะ [16] นำสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนทดลองศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.3-1 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 45 ± 5 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 9:1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.5 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด ประมาณร้อยละ 98 และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะอาจจะมีสบู่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

วิธีการ	สภาวะ			สิ่งเจือปน		เวลา (นาท)	ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	อัตราส่วนโดยโมล (เมทานอล: น้ำมัน)	กรดไขมันอิสระ	น้ำ			
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส	65	P^{sat}	12:1	มีผล	มีผล	180	95	[8]
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด	55	P^{sat}	6:1	มีผล	มีผล	30	100	[9]
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด	65	P^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	4,140	99	[17]
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	200	P^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	300	85	[18]
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	50	P^{sat}	1:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	480	96	[4]
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์	37	P^{sat}	5:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	3,600	94	[5]
สภาวะเหนือวิกฤต	255	P^{sat}	9:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	25	90	[6]
สภาวะเหนือวิกฤต	400	200	40:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	40	96	[7]

หมายเหตุ P^{sat} คือ ความดันไอ

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสแต่เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระปนเปื้อน โดยการทดลองที่ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเมื่อใช้ร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนักน้ำมันที่สภาวะอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 เมทานอลต่อไดเมทิลอีเทอร์ 1.76 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จะได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่มากที่สุด 95 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่ร้อยละ 4 [19]

ในการใช้งานยังสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น คือของเหลวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) หรือสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) มักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สามารถทำการแยกออกได้ง่ายหลังการทำปฏิกิริยา [18]

2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อเปรียบเทียบจากตารางที่ 1 จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดจะใช้ช่วงระยะเวลา 300-4,140 นาที [17-18] ซึ่งนานกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสซึ่งมีช่วงระยะเวลา

30-180 นาที [8-9] เพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 95-100 และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์จะใช้ระยะเวลาสั้นถึง 480-3,600 นาที [4-5] ส่วนการทำปฏิกิริยาในสภาวะเหนือวิกฤตจะใช้ช่วงระยะเวลาสั้นที่สุดคือ 25-40 นาที [6-7]

2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายเข้าช่วยสามารถลดการใช้ของอุณหภูมิที่มีค่าสูง และลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, KOH) สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ 25 องศาเซลเซียส (ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องของประเทศเมืองหนาว) เมื่อใช้ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (TMBE) หรือไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) หรือไดเมทิลอีเทอร์ (DME) หรือเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ที่สภาวะการเข้าความถี่ 2.6 เฮิร์ตส์ เวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที อัตราส่วนโดยโมลตัวทำละลายต่อเมทานอลใช้น้อยที่สุดที่ต้องการให้สารละลายกัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายทั้งหมด

ไม่ต่างกันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [7] G. Madras, C. Kolluru, and R. Kumar, "Synthesis of biodiesel in supercritical fluids," *Fuel*, Vol. 83, No. 14–15, pp. 2029–2033, Oct., 2004.
- [8] X. Liu, H. He, Y. Wang, S. Zhu, and X. Piao, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst," *Fuel*, Vol. 87, No. 2, pp. 216–221, Feb., 2008.
- [9] M.Çetinkaya and F.Karaosmanoglu, "Optimization of Base-Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil," *Energy Fuels*, Vol. 18, No. 6, pp. 1888–1895, Nov., 2004.
- [10] M. K. Lam and K. T. Lee, "Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent," *Fuel Process. Technol.*, Vol. 110, pp. 242–248, Jun., 2013.
- [11] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 50, No. 4, pp. 923–927, Apr., 2009.
- [12] H. Imahara, E. Minami, S. Hari, and S. Saka, "Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol," *Fuel*, Vol. 87, No. 1, pp. 1–6, Jan., 2008.
- [13] M. Agarwal, G. Chauhan, S. P. Chaurasia, and K. Singh, "Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 43, No. 1, pp. 89–94, Jan., 2012.
- [14] N. U. Soriano Jr., R. Venditti, and D. S. Argyropoulos, "Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification," *Fuel*, Vol. 88, No. 3, pp. 560–565, Mar., 2009.
- [15] R. D. Micic, M. D. Tomic, F. E. Kiss, E. B. Nikolic-Djoric, and M. D. Simikic, "Influence of reaction conditions and type of alcohol on biodiesel yields and process economics of supercritical transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 717–726, Oct. 2014.
- [16] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Biodiesel production from high FFA rubber seed oil," *Fuel*, Vol. 84, No. 4, pp. 335–340, Mar., 2005.
- [17] B. Freedman, E. H. Pryde, and T. L. Mounts, "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Vol. 61, No. 10, pp. 1638–1643, Oct., 1984.
- [18] H. Sun, Y. Ding, J. Duan, Q. Zhang, Z. Wang, H. Lou, and X. Zheng, "Transesterification of sunflower oil to biodiesel on ZrO₂ supported La₂O₃ catalyst," *Bioresour. Technol.*, Vol. 101, No. 3, pp. 953–958, Feb., 2010.
- [19] G. Guan, K. Kusakabe, N. Sakurai, and K. Moriyama, "Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether," *Fuel*, Vol. 88, No. 1, pp. 81–86, Jan., 2009.
- [20] G. Guan, N. Sakurai, and K. Kusakabe, "Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents," *Chem. Eng. J.*, Vol. 146, No. 2, pp. 302–306, Feb., 2009.
- [21] R. Pena, R. Romero, S. L. Martínez, M. J. Ramos, A. Martínez, and R. Natividad, "Transesterification of Castor Oil: Effect of Catalyst and Co-Solvent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 48, No. 3, pp. 1186–1189, Feb., 2009.
- [22] Y. Alhassan, N. Kumar, I. M. Bugaje, H. S. Pali, and P. Kathkar, "Co-solvents transesterification of cotton seed oil into biodiesel: Effects of reaction conditions on quality of fatty acids methyl esters," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 84, pp. 640–648, Aug., 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้