

การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับ
พลังงานอัลตราโซนิก

**Preparation of Biodiesel from used Vegetable Oil by Transesterification Reaction and
Ultrasonic Energy**

จักรกฤษ ศรีระออ¹, สุขสมาน สังโยคะ¹, ธีรพันธ์ มาจันทร์², เฉลิมพร ทองพูน^{1*}
Chakkrit Sreera-or¹, Suksaman Sungyoka¹, Theeraphan Machan², Chalemporn Thongpoon^{1*}

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

² สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง อ.เมือง จ.เชียงราย 57100

โทรศัพท์โทรสาร 055-267054, 267106

¹ Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang Phitsanulok,
Phitsanulok 65000 Thailand

² School of Science, Mae Fah Luang University, Muang Chiang Rai, Chiang Rai 57100 Thailand

* E-mail : cthongpoon@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งใช้วิธีการกวนแบบธรรมดาพร้อมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก สารตั้งต้นของปฏิกิริยาประกอบด้วยน้ำมันพืชต่อเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:6 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไบโอดีเซลโดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 40 นาที วิธีนี้ให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96.65 นอกจากนี้ ได้พัฒนาการเตรียมไบโอดีเซลโดยประยุกต์ใช้พลังงานอัลตราโซนิกเป็นแหล่งพลังงานในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ความถี่ต่างกันที่ระดับ 6.60-33.33 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการวิจัย พบว่า ที่ระดับความถี่ 6.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยวิธีการกวนแบบธรรมดา คือร้อยละ 97.25

คำสำคัญ : น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว, ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน, เมทิลเอสเทอร์, ไบโอดีเซล พลังงานอัลตราโซนิก

Abstract

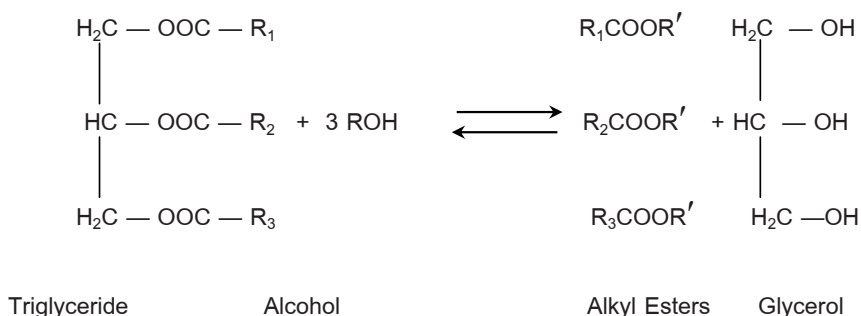
The propose of this research was to studied the optimum conditions for methyl esters synthesized from used vegetable oil by transesterification process under ultrasonic energy. The molar ratio of used vegetable oil : methanol (1:6) and NaOH 1% catalyst were used. Results were found that the reaction temperature of 60 °C and reaction time of 40 minutes, respectively are the optimum synthesis conditions. Methyl ester obtained from this condition gave 96.65 percent yield. Moreover, biodiesel preparation by transesterification and used of ultrasonic energy were developed. Ultrasonic energy frequency in the range of 6.60-33.33 kilohertz were also studied. The result found that at the frequency of 6.6 kilohertz gave the highest 97.25% methyl ester.

Keywords: used vegetable oil, transesterification reaction, methyl ester, biodiesel, ultrasonic energy

บทนำ

สถานการณ์ปัจจุบัน ประเทศไทยได้รับผลกระทบจากการปรับตัวของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2550 มีการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศมากถึง 20,627 ล้านบาท โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลที่ต้องใช้ในกิจกรรมภาคขนส่งมากถึง 75 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็น 49.3% ของปริมาณน้ำมันที่ใช้ภายในประเทศ และมีสัดส่วนการใช้สูงกว่าน้ำมันอื่นๆ (กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษเพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ทำให้มีหลายหน่วยงานได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้วัตถุดิบภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหาร มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้แทนดีเซล เรียกว่า “ไบโอดีเซล”

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำน้ำมันพืชต่าง ๆ และไขมันสัตว์ รวมทั้งน้ำมันที่ใช้แล้วจากการประกอบอาหาร มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) สมการดังภาพที่ 1 จากปฏิกิริยาทำการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันหรือไขมันให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (monoalkylester) โดยให้ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ซึ่งใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบเอสเทอร์ และได้กลีเซอริน (glycerine) เป็นผลพลอยได้ (by product) กลีเซอริน ที่ได้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ผงซักฟอก และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ (ชนิกานต์ เจริญงาม, 2547)



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Srivastava and Prasad (1999 : 131)

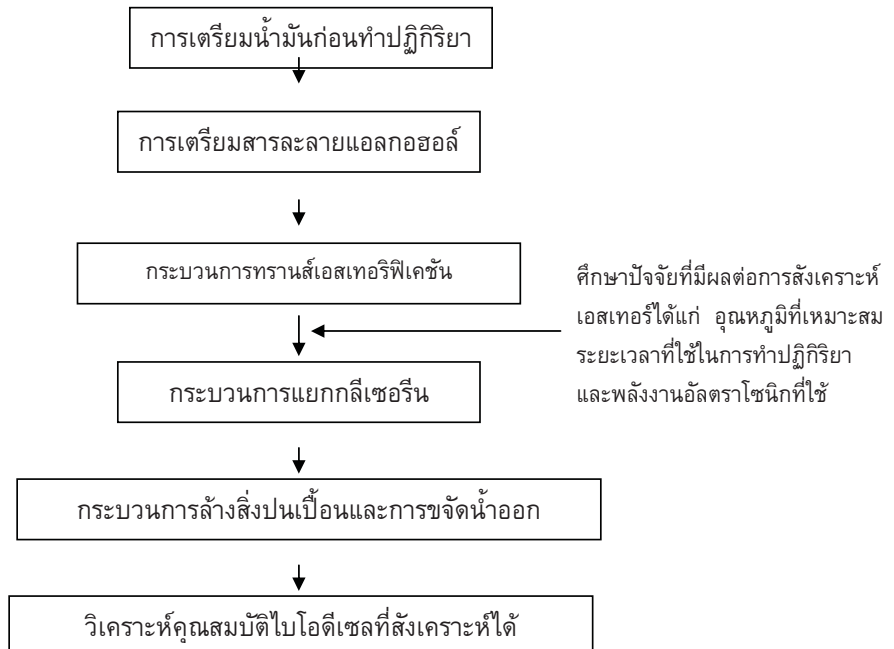
การนำน้ำมันพืชมาใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นผลผลิตจากพืชผลทางการเกษตรเมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่มีกำมะถันเจือปน ไม่มีสารก่อมะเร็ง (carcinogenic) มีความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายเพื่อการขนส่งและเนื่องจากไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูง ทำให้มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล ส่วนข้อเสีย พบว่า การที่ผลผลิตของพืชผลทางการเกษตรในแต่ละฤดูกาลมีความไม่แน่นอน และบางครั้งมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ อีกทั้งราคายังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก บางช่วงราคาผลผลิตจะสูง ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงมีการนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซล ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นการลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบในการผลิต เพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งโดยการนำมาผลิตพลังงานทดแทน และยังเป็น การลดความเสี่ยงในการนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาทำการใช้ซ้ำ เนื่องจากหากมีการนำกลับมาบริโภคใหม่จะส่งผลเสียต่อสุขภาพร่างกายผู้บริโภค อีกทั้งยังเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งปอด ความดันโลหิตสูง เป็นพิษต่อระบบประสาท ระบบภูมิคุ้มกันและอวัยวะสำคัญๆ รวมทั้งยังมีสารที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์อีกด้วย (มยุลี แซ่สง, 2550) อย่างไรก็ตามการนำเอาน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ มีปัญหาในการเก็บรวบรวม กรดไขมันอิสระที่สูงและการใช้น้ำมันไบโอดีเซล 100% กับเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันจะทำให้ชิ้นส่วนท่อทางต่างๆ ที่ทำจากยางธรรมชาติเปื่อยยุ่ยได้ เนื่องจากไบโอดีเซลนั้นมีคุณสมบัติเป็นสารชะล้างที่ดี

ปัจจุบันได้มีการผลิต ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยวิธีการกวน แต่ได้พบว่ามีปัญหาเกี่ยวกับการผสมกันระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์ และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างนาน (Hoang and others, 2009) ดังนั้น จึงมีการนำเอาพลังงานอัลตราโซนิกมาแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพลังงาน อัลตราโซนิก (ultrasonic energy) เป็นพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง ในปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น ทางด้านการแพทย์ ทางด้านอุตสาหกรรม และทางด้านพลังงานทดแทน ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิกความถี่ 19.7 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อพัฒนาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สั้นลงและให้ผลผลิตที่สูงขึ้น ได้มีการออกแบบทดลองเพื่อดูผลและปัจจัยที่มีต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ซึ่งผลของการใช้พลังงานอัลตราโซนิกในการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันพบว่าเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาสั้นลงและให้ผลผลิตที่สูงขึ้น นอกจากนั้นยังใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการกวนถึง 2 เท่า (Jianbing and others, 2006)

จากปัญหาทางด้านสถานการณ์พลังงาน และปัญหาทางด้านมลภาวะที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดยนำมาผ่านกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก และเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่เตรียมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีรายละเอียดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

การเตรียมน้ำมันพืชก่อนทำปฏิกิริยา

การกรอง

นำน้ำมันที่ใช้แล้ว มากรองด้วยเครื่องกรองชนิดบุชเนอร์ เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนซึ่งอาจตกค้างจากการประกอบอาหารหรือการใช้งานอื่นๆ โดยใช้กระดาษกรองละเอียดเบอร์ 5 (ในกรณีใช้น้ำมันที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเป็นสารตั้งต้น ไม่ต้องกรอง)

การกำจัดกรดไขมันอิสระ (Neutralizing)

กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันวัตถุดิบ ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันวัตถุดิบควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เพราะการมีกรดไขมันอิสระในน้ำมันวัตถุดิบที่มากเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) น้อยลง (Ramsdhas and others, 2005) แต่สำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่มีค่าความเป็นกรดสูง (มากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อกรัม) จะต้องนำน้ำมันมาทำการลดค่าความเป็นกรดลง โดยให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Acid esterification) แล้ว

จึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Ramadhas and others, 2005)

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) เป็นตัวการสำคัญในการทำให้น้ำมันเหม็นหืน เก็บไว้ได้ไม่นาน เมื่อถูกความร้อนจะเกิดควันมากทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็วและมีสีคล้ำ การเกิดขึ้นของกลิ่นนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน ว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด กรณีที่มีกรดไขมันอิสระมาก จะเกิดการเหม็นหืนอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงจำเป็นต้องกำจัดกรดไขมันอิสระออก มีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 30 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำน้ำมันที่ต้องการกำจัดกรดไขมันอิสระปริมาตร 100 ml อุ่นให้มีอุณหภูมิ 80 °C เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30% โดยน้ำหนัก ปริมาตรที่ใช้ 2 ml
2. คนเพื่อให้เกิดการผสมกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระทำให้เกิดสบู่จากด้านล่างของภาชนะรอให้ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ (ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 80 °C) จนสบู่ที่เกิดขึ้นลอยตัวขึ้นมาด้านบนจนหมด
3. ปลอยให้เย็น แล้วจึงตักสบู่ที่ลอยขึ้นด้านบนออก ทำการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยทำซ้ำ 3 ครั้ง
4. ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระ หากยังเกิน 1% ให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30% โดยน้ำหนัก จนกว่ากรดไขมันอิสระมีค่าน้อยกว่า 1% หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำอุ่น อุณหภูมิ 60 °C ทำการล้างอย่างน้อย 3 รอบ เพื่อไม่ให้มีโซเดียมไฮดรอกไซด์หลงเหลืออยู่ในน้ำมัน
5. การขจัดน้ำที่เหลือออก โดยการให้ความร้อนกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาประมาณ 20 นาที หรือสังเกตจนกว่าน้ำมันที่ได้ไม่เกิดการแยกชั้น

การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

นำเมทานอล ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมทานอลต้องไม่มีน้ำเจือปนมากเกินไปกว่า 1% การเตรียมสารละลายทำได้โดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 กรัม ละลายใน เมทานอล 21.9 กรัม จะได้สารละลายแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ที่ระดับความเข้มข้นประมาณ 1% โดยน้ำหนัก

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันพืชที่กำจัดกรดไขมันอิสระแล้ว 100 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
2. อุ่นตัวอย่างน้ำมันให้มีอุณหภูมิประมาณ 60 °C
3. เติมสารละลายแอลกอฮอล์ ที่เตรียมไว้ 22.4 กรัม ลงไปในตัวอย่างน้ำมันช้าๆ (ทำการเติมให้หมดภายในเวลา 10 นาที)
4. ควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการทำปฏิกิริยาที่ 50 60 70 80 และ 90 °C ตามลำดับ
5. กวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงเป็นเวลาประมาณ 20 นาที ใช้อัตราการกวนปานกลาง (300 รอบ/นาที)
6. ศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 10 20 30 40 และ 50 นาที

การแยกกลีเซอริน

เมื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เสร็จแล้ว ให้นำตัวอย่างน้ำมันถ่ายลงในกรวยแยกเพื่อทำการแยกเอา กลีเซอริน ออกไป กลีเซอรินจะถูกถ่ายใส่ภาชนะโดยการถ่ายออกทางด้านล่างของกรวยแยกในขณะที่ยังร้อนอยู่ เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็น ชั้นกลีเซอรินจะแข็งตัวและจะไม่สามารถถ่ายออกได้

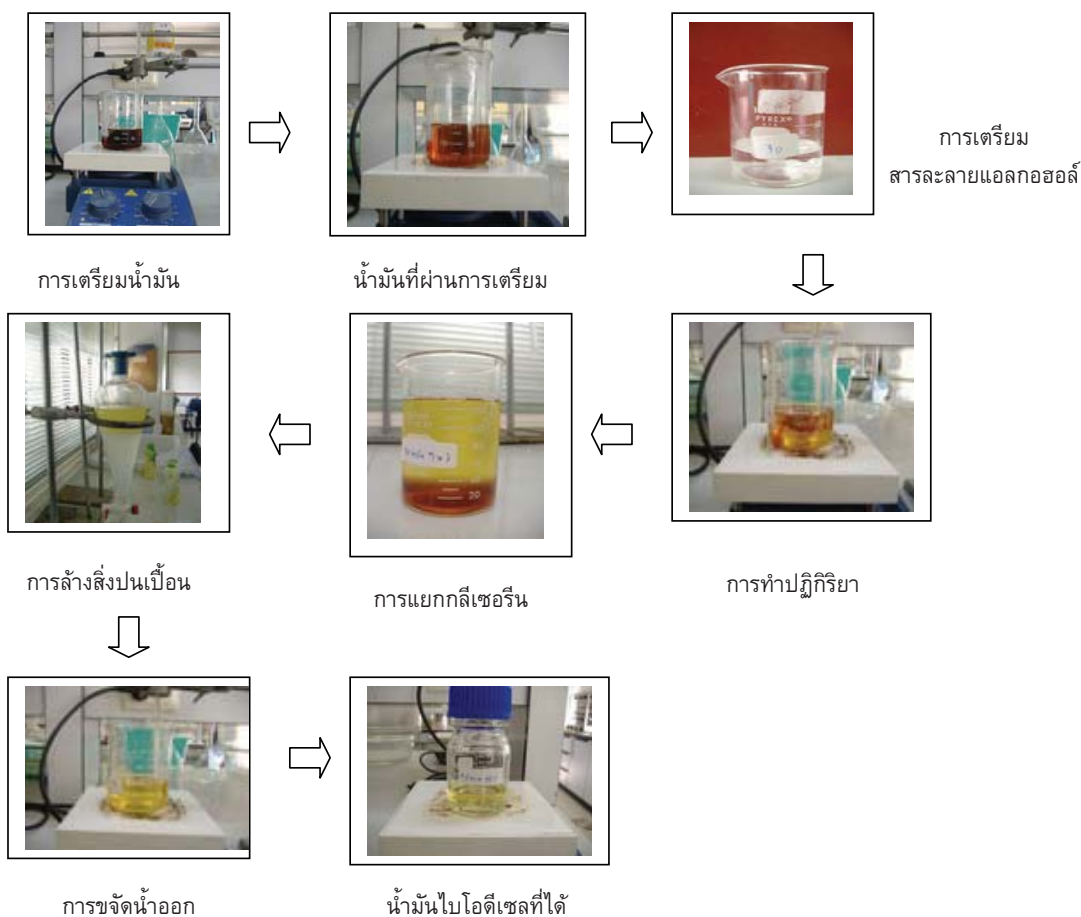
การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

นำตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาจัดสารปนเปื้อนออก เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดไขมันอิสระ กลีเซอรินที่ละลายอยู่ในชั้นของเมทิลเอสเทอร์ และเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยใช้น้ำอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 60°C ปริมาณ 100 ml ล้างตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ เขย่าเพื่อให้สารละลายทั่วถึง รอให้น้ำแยกชั้นออกจากเมทิลเอสเทอร์เป็นเวลาประมาณ 10-15 นาที จากนั้นถ่ายน้ำออกทางด้านล่างของกรวยแยก เติมน้ำอุ่นเพื่อล้างใหม่ ทำซ้ำประมาณ 3-4 ครั้ง เพื่อให้เมทิลเอสเทอร์มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

การจัดน้ำออกชั้นสุดท้าย

การจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออกทำโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที หรือสังเกตจนกว่าเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ใสไม่แยกชั้นแสดงให้เห็นว่าไม่มีน้ำเหลืออยู่ เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อวิเคราะห์หรือใช้งานต่อไป

จากขั้นตอนของกระบวนการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วในการทดลองครั้งนี้สามารถสรุปได้เป็นแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาคือ 50 60 70 80 และ 90 °C โดยควบคุมสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันให้เท่ากับ 6 : 1 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตลอดการศึกษา

ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการศึกษาครั้งนี้คือ 10 20 30 40 และ 50 นาที โดยควบคุมสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันให้เท่ากับ 6 : 1 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 °C

การใช้พลังงานอัลตราโซนิกเพิ่มปริมาณผลผลิต

ใช้สภาวะการทดลองที่ให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด โดยวิธีการกวนแบบธรรมดา มาทำการเตรียมเมทิลเอสเทอร์ โดยการใช้พลังงานอัลตราโซนิกเป็นแหล่งพลังงานทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงสุด เปรียบเทียบผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้กับวิธีการกวนแบบธรรมดา

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซล

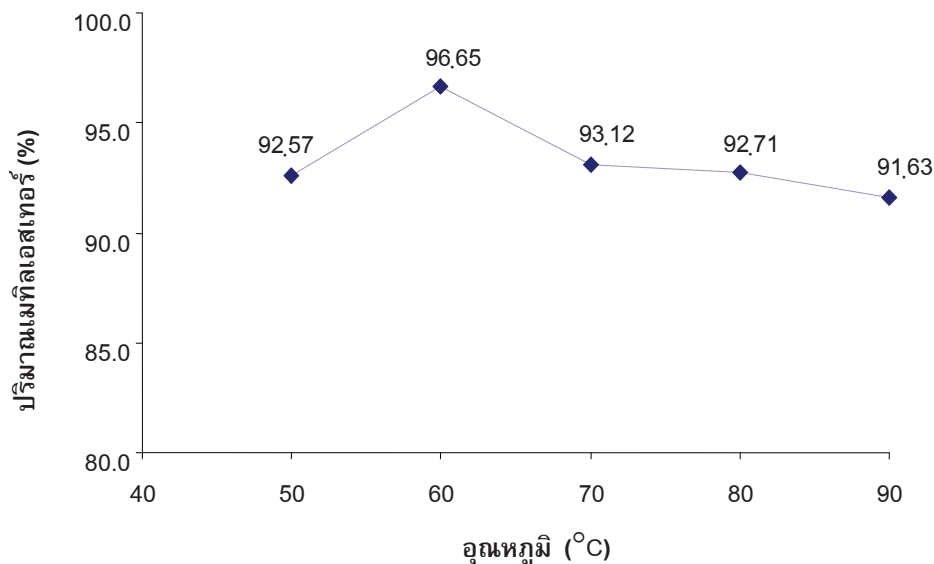
นำน้ำมันไบโอดีเซลที่เตรียมจากพลังงานอัลตราโซนิกที่ให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซล เช่น ความหนาแน่น ค่าความหนืด และจุดวาบไฟ โดยใช้วิธี Standard Test Method for Density (ASTM D1298) แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่เตรียมได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซล

ผลการศึกษา

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ($50 - 90^{\circ}\text{C}$) โดยใช้อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH) ที่ 1:6:1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 50°C ถึง 60°C จะให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นและมีปริมาณสูงสุดคือ 96.65% ที่อุณหภูมิ 60°C ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60°C จะส่งผลให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง (ภาพที่ 4)

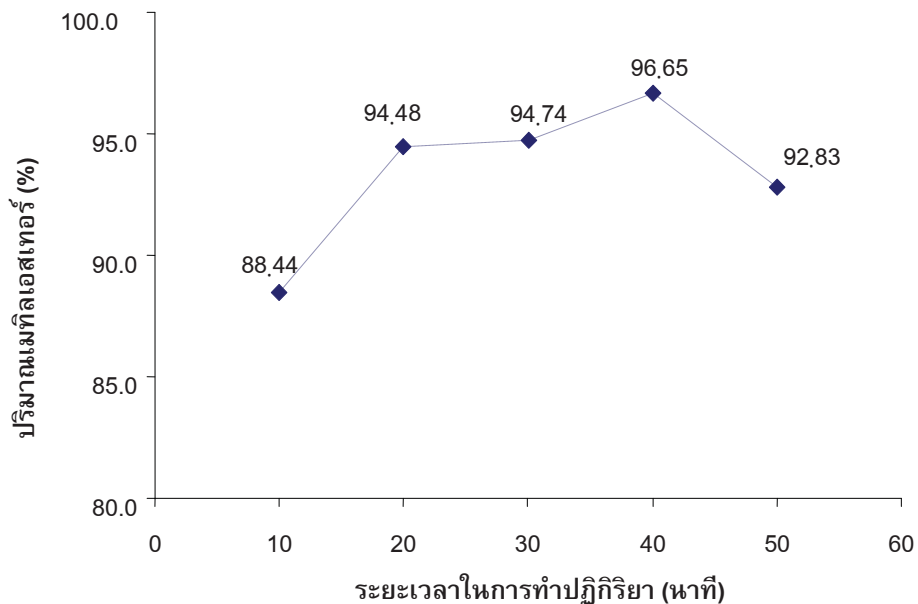
ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของมาและแฮนนา (Ma and Hanna, 1999) ที่ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอุณหภูมิ และในงานวิจัยส่วนใหญ่แนะนำที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทานอล (64.7°C) ซึ่งอยู่ในช่วง $60-70^{\circ}\text{C}$ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอลและช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นได้อย่างดีอีกด้วย



ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

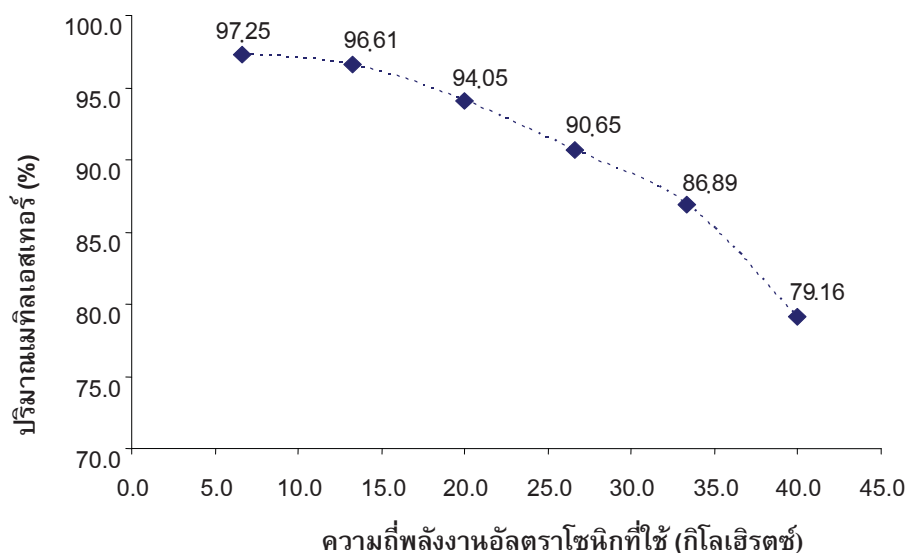
ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10 20 30 40 และ 50 นาที โดยใช้อัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง น้ำมันต่อเมทานอล ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH) ที่ 1:6:1 และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C พบว่า ที่เวลา 40 นาที จะให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดคือ 96.65% และ หลังจากเวลา 40 นาที พบว่า ผลผลิตร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ จะลดลง (ภาพที่ 5) ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้นั่นเอง



ภาพที่ 5 แสดงผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเตอร์

ผลของการใช้พลังงานอัลตราโซนิก

จากสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเตอร์โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 40 นาที จากการศึกษาการใช้พลังงานอัลตราโซนิกที่ระดับความถี่ต่างๆ เพื่อเพิ่มผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ พบว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ปริมาณผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเตอร์สูงที่สุดคือ 97.25 ผลการทดลองในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงผลของความถี่พลังงานอัลตราโซนิกที่มีต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C มีอัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH) คือ 1:6:1 และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานาน 40 นาที เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงพบว่า ค่าความหนาแน่น ความหนืด และจุดวาบไฟ ของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วงมาตรฐานของไบโอดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากมาตรฐานของไบโอดีเซล (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน DIN V 51606 และ ASTM PS 121

คุณสมบัติ	MECHANICAL STIRRING	ULTRASONIC POWER	DIN V 51606	ASTM PS 121
ความหนาแน่น (g/ml)	0.88	0.88	0.87-0.90	0.88
ความหนืด (mm ² /s)	4.58	4.58	3.50-5.00	1.90-6.00
จุดวาบไฟ (°ซ)	170	170	100	100-170

ชนิดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

จากการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันร่วมกับพลังงานอัลตราโซนิก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบชนิดของเมทิลเอสเทอร์ที่พบในไบโอดีเซลที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) ผลการวิจัยพบเมทิลเอสเทอร์ทั้งหมด 10 ชนิด รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดเป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชที่ใช้ประกอบอาหาร และน้ำมันพืชแต่ละยี่ห้อ ก็จะมีชนิดของเมทิลเอสเทอร์ที่แตกต่างกันไป จึงทำให้ชนิดของเมทิลเอสเทอร์ที่พบในแต่ละสภาวะแตกต่างกันซึ่งไม่มีผลต่อปริมาณของผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่เตรียมได้

ตารางที่ 2 ชนิดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

ชนิดของ เมทิลเอสเทอร์	อุณหภูมิ(°C)					ระยะเวลา (min)					ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)					
	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	6.6	13.3	20.0	26.6	33.3	40.0
Myristate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Palmitate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Palmitoleate	✓						✓	✓				✓				
Stearate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cis-9-oleic	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Linoleate	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Linolate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Arachiate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Behenoate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lignocerate	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓

วิจารณ์และสรุปผล

จากการศึกษา สามารถสรุปและอภิปรายผลการวิจัย ได้ดังนี้

การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยการกวนแบบธรรมดา พบว่า ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ อุณหภูมิที่ศึกษาคือ 50 60 70 80 และ 90 °C โดยมีสัดส่วนเชิงโมลน้ำมันต่อเมทานอลที่อัตราส่วนโมล 1 : 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 50 °C ถึง 60 °C ทำให้ ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นและมีปริมาณสูงสุดคือ 96.65% ที่ 60 °C ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60 °C จะส่งผลให้ผลผลิต ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Hui and other.(1996) ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อผลผลิต เมทิลเอสเทอร์โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงขึ้นกับอุณหภูมิ และในงานวิจัยส่วนใหญ่แนะนำให้อุณหภูมิใกล้เคียง

กับจุดเดือดของเมทานอล (64.7°C) ซึ่งอยู่ในช่วง $60 - 70^{\circ}\text{C}$ ภายใต้ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอลและช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารตั้งต้น นอกจากนั้นยังพบว่า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ ระยะเวลาที่ศึกษาคือ 10 20 30 40 และ 50 นาที โดยมีสัดส่วนเชิงโมลน้ำมันต่อ เมทานอลต่อ ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH) ที่ 1:6:1 และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60°C พบว่าที่เวลา 40 นาที ให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดคือ 96.65% และหลังจาก 40 นาทีผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Ma and Hanna.(1996) ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อ ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันพบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อผลผลิตร้อยละเมทิลเอส เทอร์ที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้และ อัตราเร็วในการเปลี่ยนน้ำมันเป็นน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาซึ่ง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะเกิดอย่างรวดเร็วในช่วง 1-5 นาทีของการทำปฏิกิริยาจากนั้นการ ปฏิกิริยาจะค่อยๆ ช้าลง

การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยการ กวนแบบธรรมดา ร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก พบว่าความถี่ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณ ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากการ เตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยการกวนแบบ ธรรมดา คือที่อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ได้ทำการทดลองโดยใช้พลังงานอัล ตราโซนิกความถี่ต่างๆ เพื่อเพิ่มผลผลิต พบว่า ที่ความถี่ 6.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ปริมาณผลผลิตร้อยละ เมทิลเอสเทอร์สูงสุดคือร้อยละ 97.25 ที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของคาเมน (Camen., 2005) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชโดยใช้แอลกอฮอล์ สายโซ่คาร์บอนสั้น มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสร่วมกับพลังงานอัลตราโซนิกที่ความถี่ 28 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จากการใช้พลังงานอัลตราโซนิกพบว่าเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะสั้นลงกว่าวิธีการ กวนธรรมดา 10-40 นาที และใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง 2-3 เท่า สัดส่วนโมลระหว่าง แอลกอฮอล์กับน้ำมันพืชมีค่า 6:1 ซึ่งแอลกอฮอล์ที่เป็นสายโซ่ตรงจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ในขณะที่ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary) และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ (tertiary) จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา นานถึง 60 นาที การใช้พลังงานอัลตราโซนิกความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ช่วยลดระยะเวลาการ เกิดปฏิกิริยาลงได้ 10-20 นาที ขณะที่เมื่อใช้พลังงานอัลตราโซนิกความถี่ 28 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ ผลผลิตมากกว่าประมาณ 98-99% แต่จะใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานกว่า ในขณะที่ พลังงานอัลตราโซนิกความถี่สูงกว่านี้จะไม่มีความจำเป็นในการใช้เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ของกรดไขมัน เนื่องจากจะทำให้เกิดความผิดปกติในกระบวนการ การเปลี่ยนแปลงจากไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์

คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยการกวนแบบธรรมดา ร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก ไบโอดีเซลที่เตรียมได้มีคุณสมบัติอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานตามข้อกำหนด DIN V 51606 ซึ่งเป็น

เกณฑ์มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับทั้งในยุโรปและเอเชีย ไบโอดีเซลที่เตรียมได้มีความหนาแน่นของน้ำมัน 0.88 g/ml ค่าความหนืดของน้ำมัน 4.58 mm²/s และจุดวาบไฟ 170 °C สามารถนำไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานจึงไม่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์

การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการกวนแบบธรรมดา ร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก พบว่าสามารถให้ผลผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าวิธีการกวนแบบธรรมดา คือ 97.25% เนื่องจากการเกิด อิมัลซิฟิเคชัน(emulsification) ระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันได้ดีกว่าวิธีการกวนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีที่นำเสนอนี้ให้ผล การทดลองโดยมีร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าวิธีที่มีการรายงานมาก่อน และยังลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาได้ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการเตรียมไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันโดยใช้ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ ผลิตไบโอดีเซล	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อัตราส่วน	เวลาที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละ ผลผลิต	Reference
soy bean oil	CaO	1:6:1	60	93.00	Masato and others
palm oil	KOH	1:6:1	90	96.00	Alamu and others
palm oil	CaO,	1:6:1	60	94.20	Chawalit and others
sunflower oil	CeO ₂	1:6:1	60	96.10	Umer and others.
used vegetable oil	NaOH	1:6:1	90	89.80	Xiangmei and others.
*used vegetable oil	NaOH	1:6:1	40	96.65	Present work
**used vegetable oil	NaOH	1:6:1	40	97.25	Present work

* เตรียมโดยวิธีการกวน

** เตรียมโดยวิธีการกวนร่วมกับการใช้พลังงานอัลตราโซนิก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน แผนพลังงานทดแทน กระทรวงพลังงาน ภายใต้โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับการใช้ห้องปฏิบัติการ สารเคมี และวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่สนับสนุนค่าตีพิมพ์ผลงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมธุรกิจ กระทรวงพลังงาน. (2551). สถิติการจัดหาและจัดจำหน่าย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.doeb.go.th/index1.asp/information/infor_provide.html.
- ชนิกานต์ เกลิมงาม. (2547). การสังเคราะห์เอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว.โครงการงานปัญหาพิเศษทางเคมี ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- มยุลี แซ่สง. (2550). การสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว โดย กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน. โครงการงานปัญหาพิเศษทางเคมี ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- Alamu O.J, Wanheed M.A and Jekayinfa S.O. (2008). Effect of ethanol–palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield. *Fuel*. 87, pp. 1529-1533.
- Carmen Stavarache, M.Vinatoru, R.Nishimura and Y.Maeda. (2005). Fatty acids Methyl - esters From vegetable oil by means of Ultrasonics energy. *Ultrasonics Sonochemistry*. 12, pp. 367- 372.
- Chawalit Ngamcharussrivichai, Prangsinan Totarat and Kunchana Bunyakiat. (2008). “Ca and Zn mixed oxide as a heterogeneous base catalyst for transesterification of palm oil,” *Applied catalysis A: General*. 341(1-2) : 77-85.
- Hoang D.H, Nguyen T. D, Kenji O, Rokuro N, Yasuaki M. (2009). Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field. *Renewable Energy*. 34, pp. 766-768.
- Hui Xu, Wenlei Xie, Hong Peng and Ligong Chen. (1996). Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as solid base catalyst. *Applied Catalysis A: General*. 300, pp. 67-74.
- Jianbing Ji, Jianli Wang, Yongchao Li, Yunliang Yu and Zhichao Xu. (2006). “Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitations,” *Ultrasonics*. 44 : 411-414.
- Ma Fangrui and Hanna Milford A. (1999). “Biodiesel production : a review,” *Bioresource Technology*. 70 : 1-15.
- Masato Kouzu, Takekazu Kasuno and Jusuke Hidaka. (2007). “Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production,” *Fuel*. 87(12) : 2798 – 2806.
- O.J. Alamu, M.A. Wanheed, S.O. Jekayinfa. (2008). “Effect of ethanol–palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield,” *Fuel*. 87 : 1529-1533.
- Ramadas, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleecharan. (2005). Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 84: 335-340.
- Srivastava and Prasad. (1999). Triglycerides-based diesel fuel, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 4, pp. 111-133.
- Umer Rashid, Farooq Anwar, Boyan R. Moserand and Samia Ashraf. (2008). “Production of sunflower oil methyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis,” *Biomass and Bioenergy*. 32 : 1202 – 1205.
- Xiangmei Meng, Guanyi Chen and Youghong Wang. (2008). “Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test,” *Fuel Processing Technology*. 89(9) : 851 – 857.