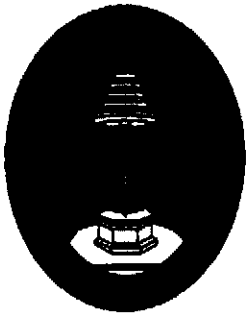


เอสเทอร์จากน้ำมันใช้แล้ว

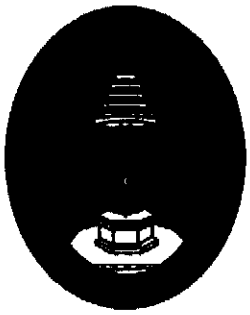
อัชมาน อาแด*

บทคัดย่อ

น้ำมันพืชที่ใช้แล้วหรือไขมันสัตว์ เมื่อผ่านกระบวนการทางเคมีเปลี่ยนให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล และประเทศไทยสามารถผลิตวัตถุดิบเองได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษา 1) อัตราส่วนน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอลในการเตรียม Methyl ester 2) วิธีการล้างทำความสะอาด Methyl ester และ 3) การทดสอบสมบัติ Methyl ester เบื้องต้น จากการทดลองทำปฏิกิริยา Transesterification ระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล ภายใต้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 55-60 ° ซ คนด้วยเครื่องคนแม่เหล็กที่ 1,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำมันใช้แล้วต่อเมทานอล 5 : 1 โดยปริมาตร ให้ผลิตภัณฑ์ Monomethyl ester ปริมาณร้อยละ 96 ของปริมาตรน้ำมันเริ่มต้น และ Glycerol เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ การล้าง Methyl ester ด้วยน้ำจำนวน 3 ครั้ง และ น้ำเกลือ 1 ครั้ง ทำให้ Methyl ester สะอาด และ ทดสอบสมบัติของ Methyl ester เบื้องต้น พบว่าการติดไฟดี ให้ปริมาณความร้อนสุทธิ 39,519 จูล/กรัม และ ความหนืดจลน์ 6.24 เซนติสโตกส์ เมื่อทดลองใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าให้ผลการสตาร์ทติด 2-5 ครั้ง และ อัตราสิ้นเปลืองเฉลี่ย 3.1 ชั่วโมง/ลิตร การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าให้กลิ่นไอ เสียจากการเผาไหม้คล้ายน้ำมันปาล์ม ปริมาณควันดำและเถ้าถ่านน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ดังนั้น Methyl ester จากน้ำมันใช้แล้วสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ และผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล เมทิลเอสเทอร์ น้ำมันที่ใช้ทอดแล้ว ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

* คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา เลขที่ 133 ถนน เทศบาล 3 อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000 อีเมลล์ : n_adair@hotmail.com



Methyl ester production from waste frying oil

Ajaman Adair*

Abstract

Used edible plants oil or animal fat have a potential to use as alternative and renewable sources of diesel fuel. The research objective is 1) to perform ratio of waste frying oil (WFO) and methanol 2) to wash and clean methyl ester and 3) to test of fuel property. The WFO was esterified with methanol in the presence of NaOH catalyst, at 55-60 °C with 1000 r/min stirring for 60 min.The working ratio WFO and methanol was established, It was found that 5 :1 by volume results in 96 % of yield . Washing and cleaning methyl ester by step using water and NaCl solution to give cleaned products. The fuel properties were tested and found that decreasing of viscosity 6.24 cSt, flammable, net capacity of heat 39,519 J/g. Machine test for number of starting was 2-5 times and fuel consumption was averaging 3.1 hour/liter. The environment concerns more friendly than petroleum diesel due to low black smoke and less carbon particulated. It can be concluded that biodiesel from WFO has a potential use as alternative diesel fuel and is better for the environment .

Keywords: Biodiesel Methyl ester Waste frying oil Transesterification

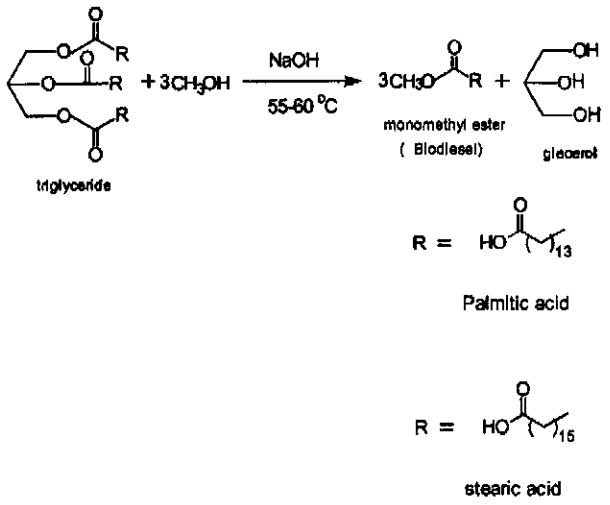
* Department of Science Faculty of Science Technology and Agriculture Yala Rajabhat University
133 Tesaban 3 road Muang Yala 95000. E-mail: n_adair@hotmail.com

บทนำ

การพัฒนาประเทศภาคเศรษฐกิจ ด้านที่อยู่อาศัย การสื่อสารและเทคโนโลยี การเกษตรกรรม การขนส่ง ธุรกิจการค้าและบริการ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องใช้พลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงหลัก ในช่วงเดือนมิถุนายน 2552 ถึงมิถุนายน 2553 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทั้งหมด ปริมาณ 6,400 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ มีการนำเข้าปริมาณ 4,888 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 76 ในขณะที่การผลิตมีปริมาณ 5,666 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปมีการผลิตน้ำมันดีเซลร้อยละ 46 ของการผลิตน้ำมันทั้งหมด (1) เนื่องจากน้ำมันดีเซลใช้เป็นเชื้อเพลิงสำคัญในการคมนาคมขนส่ง การผลิตไฟฟ้า การเกษตรและการแปรรูปสินค้าเกษตร จากการสำรวจแหล่งสำรองน้ำมันของโลก ณ สิ้นปี 2540 มีปริมาณ 164,966 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งคาดว่าจะใช้ได้ 42 ปี สำหรับประเทศไทยมีปริมาณน้ำมันสำรองปริมาณ 17 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ คาดว่าจะใช้ได้ 30 ปี (2) เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีปริมาณจำกัดถ้าปริมาณการใช้น้ำมันยังอยู่ในระดับเดิมหรือ เพิ่มสูงขึ้น และ ไม่มีการค้นพบแหล่งสำรองน้ำมันแห่งใหม่ ประเทศไทยต้องประสบกับวิกฤตการณ์การขาดแคลนพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมได้ในอนาคต ด้วยเหตุนี้ทางภาครัฐและเอกชนจึงได้ร่วมกันคิดค้นเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อใช้แทนน้ำมันดีเซลและ น้ำมันเบนซิน ทางเลือกที่เหมาะสมและทำได้สำหรับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรม คือไบโอดีเซลและเอทานอล (3) เนื่องจากสามารถผลิตวัตถุดิบเองได้

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ซึ่งสามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ อาจใช้โดยตรงหรือผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สามารถจำแนกไบโอดีเซลได้ 3 ประเภทคือ 1) ไบโอดีเซล (Straight vegetable oil) ด้วยการใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรงเติมในเครื่องยนต์ดีเซล 2) ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie / Kero mix) เป็นการผสมน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล 3) ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ (Alkyl ester) เป็นความหมายของไบโอดีเซลที่ใช้ในปัจจุบัน โดยการใช้น้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ทำปฏิกิริยา Transesterification กับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (3-6) แอลกอฮอล์ที่ปราศจากน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับ NaOH หรือ KOH ได้เกลือเมทอกไซด์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส คนให้ผสมกันเป็นเวลา 60 นาที ได้ Monoalkyl ester ของกรดไขมันเป็นผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 1 ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม และสามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้โดยไม่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดมลพิษ ย่อยสลายได้ ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถัน และไม่มีสารก่อมะเร็ง (7-9) และกลีเซอรอล เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป

นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1893 รูดอลฟ์ ดีเซล วิศวกรชาวเยอรมัน ได้ประดิษฐ์คิดค้นเครื่องยนต์ดีเซลลูกสูบเดี่ยวและได้ทดลองใช้ไบโอดีเซลเป็นครั้งแรกที่ประสบความสำเร็จ หลังจากนั้นอีก 5 ปี ดีเซลได้ทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองอีกครั้งในงานเวิร์ลแฟร์ ที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ดีเซลเชื่อว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากถั่วเหลืองเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลในอนาคต (10)



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล

ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการใช้ไบโอดีเซลเป็นจำนวนมากในประเทศแถบทวีปแอฟริกาใต้ กับรถยนต์ขนาดใหญ่ รถบรรทุก เพื่อการขนส่งยุทธปัจจัยรวมทั้ง ลำเลียงอาหาร เครื่องอุปโภคบริโภค และอาวุธยุทโธปกรณ์ทางการทหาร จนกระทั่งในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายรวมถึงในประเทศไทยด้วย

จากโครงการสำรวจน้ำมันพืชใช้แล้วทั่วประเทศพบศักยภาพนำมาผลิตไบโอดีเซล 74 ล้านลิตรต่อปี (11) โดยเฉพาะน้ำมันปาล์มเหลือใช้จากการประกอบอาหารเนื่องจากสามารถผลิตในพื้นที่ราคาต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันจากถั่วเหลือง ในจังหวัดยะลา ปัตตานี นราธิวาส ไก่ทอดเป็นอาหารที่ประชาชนนิยมบริโภค มีร้านจำหน่ายจำนวนไม่น้อยกว่า 500 ร้าน แหล่งน้ำมันที่ใช้ในการทอดไก่ส่วนใหญ่ คือน้ำมันปาล์มและการทอดไก่จะมีไขมันจากไก่ส่วนหนึ่งละลายออกมานับเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำมันหรือไขมันมีผลทำให้เพิ่มความหลากหลายในแหล่งของคาร์บอนอะตอมด้วย เนื่องจากไขมันไก่มีกลิ่นเหม็นทำให้ต้องเททิ้งไป ดังนั้นการนำน้ำมันพืชเหลือใช้หรือไขมันที่เป็นเอสเทอร์โมเลกุลขนาดใหญ่มาเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Monoalkyl ester โมเลกุลเล็ก จะทำให้สมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม (9-11) ในการทดลองทำปฏิกิริยา Transesterification อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอลมีความสำคัญต่อปริมาณ Alkyl ester ที่ได้ ในการใช้กับเครื่องยนต์จริงความสะอาดของ Alkyl ester มีผลต่อเครื่องยนต์และไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปาล์มทอดไก่น่าจะมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีกว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างเดียวหรือไขมันไก่เพียงอย่างเดียว

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษา 1) หาอัตราส่วนน้ำมันปาล์มทอดไก่ต่อเมทานอล ที่ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด 2) วิธีการล้างทำความสะอาด methyl ester ด้วยน้ำ 3) การทดสอบสมบัติทางกายภาพของ methyl ester เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพไบโอดีเซลให้สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม (9-13) ที่ใช้กับเครื่องดีเซลหมุนช้าและหมุนเร็ว โดยปราศจากข้อสงสัย

วิธีการ

ในการทดลองเตรียม Alkyl ester จากน้ำมันปาล์มทอดไก่มีกระบวนการสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ 1) การทำปฏิกิริยา Transesterification 2) การแยกชั้นระหว่าง Alkyl ester หรือ Biodiesel กับ glycerol 3) การล้าง alkyl ester ด้วยน้ำ ในกระบวนการเปลี่ยนจากไตรกลีเซอไรด์โมเลกุลใหญ่เป็น Monoalkyl ester โมเลกุลเล็ก โดยใช้ anh.

MeOH ภายใต้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผสมให้เข้ากัน 60 นาที อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแยกเป็น 2 ส่วน ชั้นบนคือ Methyl ester หรือ Biodiesel และชั้นล่างคือ Glycerol นำชั้น Methyl ester ล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เช่น เมทานอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ Glycerol

น้ำมันปาล์มทอดไก่ที่ใช้ในปฏิกิริยาการเตรียม methyl ester เป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดไก่ไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อละลายไขมัน กรองแบบธรรมดาด้วยการใช้ผ้าขาวบนกรวยกรองเพื่อเอาตะกอนหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ใช่น้ำมันหรือไขมันออก นำน้ำมันที่ผ่านการกรองเบื้องต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดน้ำออก น้ำมันปาล์มทอดไก่ที่ได้มีลักษณะทางกายภาพ คือ สีเหลืองใส นำมาทำปฏิกิริยา Transesterification กับ $CH_3O^-Na^+$ ซึ่งเตรียมได้จากการใช้ anh. MeOH จำนวน 1 ลิตร กับ NaOH น้ำหนัก 16 กรัม คนด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กจนละลายหมด ในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนน้ำมันปาล์มทอดไก่ต่อ $CH_3O^-Na^+$ ที่ 4 : 1 , 4.5 : 1 , 5 : 1 , 5.5 : 1 และ 6 : 1 ที่อัตราส่วน 4 : 1 ใช้ปริมาณน้ำมันใช้แล้ว 100 มิลลิลิตร แล้วเพิ่มตามลำดับ โดยมีลำดับขั้นตอน 3 ขั้นดังนี้

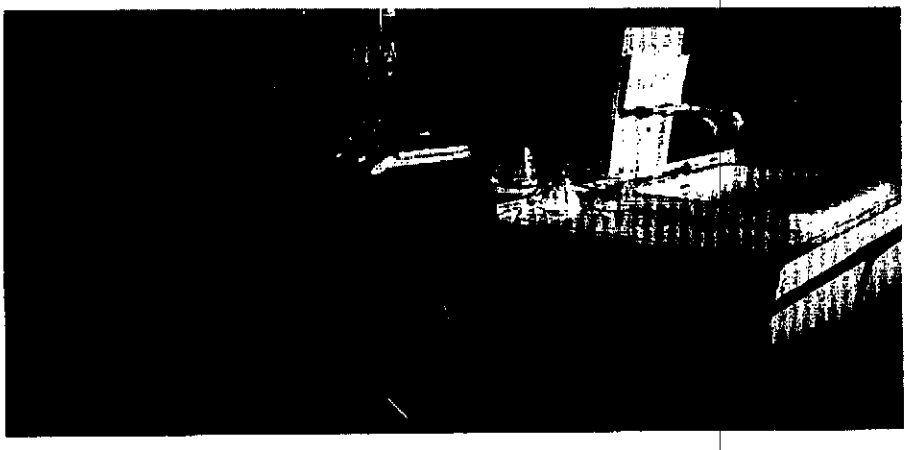
1. นำน้ำมันปาล์มทอดไก่มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส

2. นำ $CH_3O^-Na^+$ ใส่ในกรวยแยกขนาด 250 มิลลิเมตร หยดลงในน้ำมันอย่างช้า ๆ คนด้วยเครื่องกวนระบบแม่เหล็ก ที่ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที

3. เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา วางให้ผลิตภัณฑ์แยกชั้น และชั้นบนคือ Methyl ester หรือ Biodiesel ชั้นล่าง คือ Glycerol

4. แยกชั้น Methyl ester ออกจากชั้น Glycerol และนำ Methylester จากอัตราส่วนที่ให้ร้อยละ Methylester มากที่สุดมาใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ดังนั้นชั้น Methyl ester ที่ได้ยังไม่สามารถใช้ได้เพราะมีสิ่งปนเปื้อนจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สมบูรณ์เช่น เมทานอล NaOH หรือ Glycerol ที่เกิดจากการแยกชั้นไม่ดี จึงต้องผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการทำให้บริสุทธิ์

ในการทดลองนี้ใช้วิธีการล้างโดยใช้ suction flask ขนาด 1 ลิตร จำนวน 4 ใบ ต่อกันด้วยสายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ใบที่ 1 และ 2 เป็นน้ำกลั่น ใบที่ 3 เป็นสารละลายเกลือแกง และ ใบที่ 4 เป็นน้ำกลั่น ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการล้าง Methyl ester ด้วยน้ำ

5. นำ Methyl ester มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออกเหลือเฉพาะส่วน Methyl ester ซึ่งสะอาดและสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ Methyl ester ที่ผ่านการล้างและให้ความร้อนนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่นการติดไฟ การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน หาค่าความหนืดจลน์ และทดลองใช้จริงกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้า

การติดไฟ ทดลองโดยใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์ขนาดปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใช้ด้ายเป็นไส้ตะเกียง เติม Methyl ester หรือ น้ำมันแต่ละชนิดปริมาณ 5 มิลลิลิตร จุดไฟ บันทึกผลการติดไฟลักษณะเปลวไฟ สีควันไฟ กลิ่นไหม้ควันไฟและเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จนน้ำมันหมด การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่องอิเล็กโตรฟิสิโอโลยีตามมาตรฐาน ASTM D2015 (14) ที่ทำการเทียบเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อนจากอิเล็กโตรฟิสิโอโลยีด้วยสารมาตรฐานกรดเบนโซอิก (C_6H_5COOH) และทำการวิเคราะห์พลังงานความร้อนโดยมีขั้นตอน ดังนี้ 1) ตัวอย่างน้ำมันเติมใน crucible ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิก (Digital balance , Model AT 400 METTLER TOLEDO) ความละเอียด 0.0001 กรัม 2) นำตัวอย่างเติมใน Ignition terminal ซึ่งต่อวงจรจุดระเบิด โดยมีเส้นลวด และเส้นด้ายยาว 6 และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว electrode ของวงจรจุดระเบิดแล้วบรรจุในตัวเติมก๊าซออกซิเจนโดยเติมน้ำกลั่นลงไป 1 มิลลิลิตร 3) ทำการเติมก๊าซออกซิเจนในตัวเติมออกซิเจน 30 บาร์ แล้วทดสอบวงจรจุดระเบิด 4) นำตัวเติมก๊าซออกซิเจนบรรจุใน vessel ที่บรรจุน้ำกลั่น และมีขาตั้งรองรับตัวเติมก๊าซออกซิเจนอยู่ โดยให้น้ำหนักรวมของ Vessel และ น้ำกลั่นเท่ากับ 2.8 กิโลกรัม 5) ตรวจสอบอุณหภูมิของ Water jacket และ Vessel โดยที่อุณหภูมิต้องเท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส จึงทำการจุดระเบิดได้ 6) ทำการป้อนข้อมูลให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อสั่งไปยังเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน ให้ทำการจุดระเบิดอัตโนมัติ โดยใช้เวลา 10-15 นาที จึงจะได้ข้อมูลค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันออกมา 7) นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมทั้งดีเซลธรรมดาและดีเซลพิเศษ

การวิเคราะห์หาความหนืด ได้ทดลองหาความหนืดในรูป Kinematic Viscometry มีหน่วยเป็น Centi Stokes โดยใช้วิธี ASTM D 445 (14) มีขั้นตอนการทดลอง คือ 1) นำ Methyl ester ใส่ใน Viscometer ด้วยปริมาตรที่แน่นอนตามขนาดของ Viscometer ที่ใช้ 2) นำไปแช่ใน Viscometer bath เวลา 30 นาที 3) ปล่อยให้ Methyl ester ไหลอย่างอิสระผ่านหลอดแก้วเล็ก ๆ เริ่มจับเวลาเมื่อ Head level ของ Methyl ester ไหลถึงจุดจับเวลา Start mark และหยุดเมื่อถึงจุด Stop mark 4) นำเวลาที่ได้ คูณด้วย Viscometer constant ค่าที่ได้คือ Kinematic viscometer

การทดลองนำ Methyl ester ด้วยการใช้งานจริงโดยทำการทดสอบการสตาร์ทติดและอัตราสิ้นเปลืองเลือกใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบ ระบายความร้อนด้วยน้ำ ปริมาตรกระบอกสูบ 709 ลูกบาศก์เซ็นติเมตร ยี่ห้อ คูโบต้า รุ่น RT 140 ขนาด 14 แรงม้า (15) ติดกับเครื่องไถนาชนิดเดินตาม ใช้เวลาในการทดสอบ 5 วัน ใช้ไบโอดีเซล 10 ลิตร เติมวันละ 2 ลิตร บันทึกจำนวนครั้งการสตาร์ทติดเครื่องยนต์เมื่อเริ่มต้นของการใช้งาน และ เวลาที่ใช้ในการทำงานในแต่ละวันตามตารางโดยเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

ผล

Methyl ester หรือ Biodiesel สามารถเตรียมได้จากน้ำมันปาล์มทอดไก่โดยทำปฏิกิริยา Transesterification กับ Anh. MeOH ภายใต้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 60 นาที ในการทดลองใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ให้ผลิตภัณฑ์ Methyl ester (ตารางที่ 1) และพบว่าอัตราส่วนน้ำมันทอดไก่ต่อเมทอกไซด์ 5 : 1 ให้ปริมาณ Methyl ester เฉลี่ยร้อยละ 96 ของปริมาณน้ำมันเริ่มต้นซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณ Methyl ester สูงสุด และนำมาผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีการล้างน้ำจำนวน 4 ครั้ง ทำให้ลักษณะทางกายภาพของ Methyl ester ที่ได้คือ สีเหลืองใส และ นำ Methyl ester ที่ได้ไปทดสอบการสตาร์ทติด อัตราสิ้นเปลือง วิเคราะห์หาปริมาณความร้อนสุทธิ วิเคราะห์หาความหนืดจลน์ และการทดลองใช้จริงกับเครื่องยนต์

ตารางที่ 1 ร้อยละ Methyl ester จากปฏิกิริยา transesterification ที่อัตราส่วนต่างๆ

น้ำมัน ต่อ Methoxide	% methyl ester (เฉลี่ย)
4 : 1	79
4.5 : 1	95
5 : 1	96
5.5 : 1	88
6 : 1	91

ในการทดลองการติดไฟใช้ Methyl ester จาก น้ำมันปาล์มทอดไก่ที่ให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด ที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว ข้อมูลจากการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 Methyl ester ให้การติดไฟดี เปลวไฟสีส้ม ช่วงแรกของการติดไฟไม่มีควันดำเมื่อการเผาไหม้ผ่านไปเริ่มมีควันดำ และใช้เวลาในการติดไฟ 34 นาที ซึ่งน้อยกว่า Methyl ester จากน้ำมันปาล์มอย่างเดียวที่ใช้เวลาในการเผาไหม้ 37 นาที แต่ยังพบว่าใช้เวลาในการติดไฟนานมากเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่ใช้เวลาในการเผาไหม้เพียง 17 นาที อย่างไรก็ตาม Methyl ester จากน้ำมันปาล์มทอดไก่เมื่อติดไฟนาน ๆ มีควันสีดำ ไม่มีกลิ่น เถ้าถ่านมีน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมนั้นคือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

ปริมาณความร้อนจากเครื่องอิเล็กโตรฟิสิโอโลยี ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ผลปรากฏว่าปริมาณความร้อนสุทธิของ Methyl ester จากน้ำมันปาล์มทอดไก่เท่ากับ 39,519 จูลต่อกรัม ซึ่งมากกว่า Methyl ester จากน้ำมันปาล์มที่ให้ปริมาณความร้อนสุทธิเท่ากับ 39,107 จูลต่อกรัม แต่ยังน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลชนิดพิเศษที่มีค่าความร้อนสุทธิเท่ากับ 47,662 จูลต่อกรัม ซึ่งมากกว่า Methyl ester จากน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันปาล์มทอดไก่

Methyl ester หรือไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทอดไก่มีความหนืดลดลง เท่ากับ 6.24 เซนติสโตกส์ เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าความหนืดเท่ากับ 88.6 เซนติสโตกส์ และใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 4.1 เซนติสโตกส์ (ตารางที่ 4) ในขณะที่ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งประกาศไว้ในราชกิจจานุเบกษา 2548 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต้องไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5.0 เซนติสโตกส์ (16-17)

ในการทดสอบการสตาร์ทติดพบว่าในวันที่ 1 ของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทอดไก่ (BPC100)แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมใช้จำนวน 2 ครั้งจึงสตาร์ทติดซึ่งเป็นตัวเลขที่น้อยที่สุดที่ได้จากการทดลอง เมื่อใช้งานจนน้ำมันหมด

ตารางที่ 2 ลักษณะการติดไฟและผลต่อสภาวะแวดล้อมเบื้องต้น

ชนิดน้ำมัน	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
ไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มทอดไก่	ติดไฟ เปลวไฟสีส้ม ไม่มีควันดำในช่วงแรก ใช้เวลาในการติดไฟ 34 นาที เมื่อติดไฟนานๆมีควันสีดำ ไม่มีกลิ่น เถ้าถ่านมีน้อย
ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม	ติดไฟ เปลวไฟสีส้ม ไม่มีควันดำ ใช้เวลาในการติดไฟ 37 นาที กลิ่นไหม้เหมือนน้ำมันพืช เถ้าถ่านมีน้อย
น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม	ติดไฟดี เปลวไฟสีส้มแดง ควันสีดำมาก กลิ่นเหม็น ติดไฟเร็ว ใช้เวลา 17 นาที เมื่อเผาไหม้เสร็จจะมีเถ้าถ่านสีดำเหมือนฝุ่นตามพื้นห้องเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 3 ปริมาณความร้อนจากเครื่องอิเล็กโตรฟิสิโอโลยี (Bomb calorimeter)

ชนิดน้ำมัน	**พลังงานความร้อน (J/g)**	
	ค่าเฉลี่ย[1]	S.D.[2]
ไบโอดีเซลน้ำมันปาล์ม	39,107	8.0
ไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มทอดไก่	39,519	65.0
ดีเซลธรรมดา	42,986	92.5
ดีเซลพิเศษ	47,662	89.0

[1]ค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

[2]คำนวณได้จาก S.D. = $\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N-1}}$

เมื่อ S.D. คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน X คือ ข้อมูลจากการทดลอง

$\bar{X}$ คือ ข้อมูลจากการทดลองเฉลี่ย N-1 คือ จำนวนครั้งการทดลอง

ตาราง 4 ความหนืดจลน์ของ Methyl ester

ชนิดน้ำมัน	ความหนืดจลน์ที่อุณหภูมิ 40 °C (cSt.)
น้ำมันปาล์ม	88.6
ไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มทอดไก่	6.24
น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม	4.1

ตารางที่ 5 ทดสอบการสตาร์ทติดเครื่องและอัตราสิ้นเปลือง

วันที่ทดลอง	จำนวนครั้งที่สตาร์ท ชนิดน้ำมัน		เวลาใช้งานชั่วโมง ต่อปริมาตรน้ำมัน 1 ลิตร	
	BPC 100	D100	BPC100	D100
1	2	1	4.1	4.5
2	2	2	3.8	4.3
3	5	1	3.3	4.4
4	3	1	2.1	3.4
5	2	1	2.2	3.5
สรุป	2-5	1-2	เฉลี่ย 3.1	4.02

จำนวน 2 ลิตร ใช้เวลาในการทำงานมากที่สุด 8 ชั่วโมง และใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 4.2 ชั่วโมง เนื่องจากงานไถและตามด้วยการคราด ในขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมการสตาร์ทติด ติดได้ใน 1 ครั้งการสตาร์ท โดยส่วนใหญ่และอัตราสิ้นเปลืองน้อยสุดใช้เวลา 6.8 ชั่วโมง ตารางที่ 5

วิจารณ์

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันใช้แล้วกับเมทานอลปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสำคัญเพราะหมายถึงต้นทุนที่ใช้ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาจะเลือกเงื่อนไขปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์ปริมาณมากที่สุดและมีปริมาณผลิตภัณฑ์ข้างเคียงน้อยที่สุด หรือทำให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต้องปราศจากน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากการมีน้ำปนเปื้อนอยู่มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ นั้นคือเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) กลายเป็นกรดไขมันอิสระแทน Methyl ester ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางอย่างของน้ำมันต่ำ นอกจากนี้ในการทำปฏิกิริยาต้องใช้เมทานอลมากเกินพอเพื่อไม่ให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เหลือในปฏิกิริยา ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดสบู่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ Methyl ester น้อยทำให้สิ้นเปลือง ดังนั้นการเตรียมโซเดียมเมทอกไซด์จะทำทันทีพร้อมๆกับการให้ความร้อนกับน้ำมันปาล์มทอดไก่จนถึงอุณหภูมิและเงื่อนไขอื่นที่กำหนด

น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการประกอบอาหาร ให้ความอบอุ่นต่อร่างกาย ให้แสงสว่าง นับเป็นแหล่งพลังงานที่เป็นภูมิปัญญาเดิมที่มนุษย์รู้จักการใช้ในยุคแรก เมื่อมนุษย์รู้จักใช้น้ำมันจากปิโตรเลียมทำให้การใช้น้ำมันจากพืชเป็นเชื้อเพลิงไม่มีความสำคัญเหมือนยุคแรก ๆ กระทั่งยุคปัจจุบันปริมาณน้ำมันจากปิโตรเลียมลดน้อยลง มนุษย์ต้องหาแหล่งพลังงานทดแทน ทำให้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กลับมามีความสำคัญอีกครั้ง เนื่องจากสามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ โดยเฉพาะทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลในภาคการเพาะปลูกการเกษตรกรรม อุตสาหกรรมการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร ยานยนต์ขนส่งและอื่น ๆ (18) เนื่องจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มีสมบัติบางอย่างที่สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม มีการทดลองใช้น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้แทน

ดีเซลหมุนเร็ว (19) พบว่าสามารถใช้ได้ แต่มีปัญหาตามมาคือการอุดตันของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพราะน้ำมันพืชเป็นกลีเซอไรด์เอสเทอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1) กลีเซอรอล และ 2) กรดไขมัน ดังนั้นการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เอสเทอร์ขนาดใหญ่เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ขนาดเล็กด้วยการทำปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอริฟิเคชันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติ ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมมากขึ้น น้ำมันปาล์มทอดไก่ทำปฏิกิริยากับเมทานอลที่ปราศจากน้ำ มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 5 : 1 โดยปริมาตร ให้ผลิตภัณฑ์สูงถึงร้อยละ 96 ทั้งนี้เพราะว่าการใช้น้ำมันปาล์มทอดไก่นั้น แหล่งไตรกลีเซอไรด์คือจากพืชและสัตว์ ที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันน้ำมันจากพืชมีโครงสร้างที่ยึดกันแน่นกว่าไขมันจากสัตว์ เมื่อโมเลกุลของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ผสมกันกันทำให้ความหนาแน่นลดลง ผลการกีดกัน (steric effect) ในการเกิดปฏิกิริยาน้อย มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีผลิตภัณฑ์ปริมาณสูง

เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนสำคัญขั้นต่อไปคือการตั้งให้แยกชั้นระหว่างชั้นเมทิลเอสเทอร์กับชั้นกลีเซอรอลต้องใช้เวลา 12 ชั่วโมงหรือมากกว่าทั้งนี้เพราะว่าการแยกชั้นไม่ดีมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยและมีกลีเซอรอลปนเปื้อนอาจมีผลต่อสมบัติบางอย่างของเมทิลเอสเทอร์และเป็นปัญหาต่อการใช้งานได้ เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการแยกชั้นยังไม่สามารถใช้ได้ทันที ทั้งนี้เพราะอาจมีสารอื่นปนเปื้อนเช่นเมทานอล และอื่นๆ เนื่องจากสารปนเปื้อนกระจายอยู่ทั่วไปทั้งในชั้นเมทิลเอสเทอร์ และ ชั้นกลีเซอรอล ชั้นเมทิลเอสเทอร์ต้องผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดก่อนและการล้างด้วยการให้ไบโอดีเซลไหลผ่านน้ำหลาย ๆ ครั้ง สามารถขจัดสิ่งตกค้างได้ ในการล้างต้องทำด้วยความระมัดระวังเพราะอาจทำให้ชั้นไบโอดีเซลและน้ำเกิดสภาวะอิมัลชันได้ แนวทางในการแก้ปัญหาคือการเติมเกลือแกงในน้ำ ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างน้ำทำความสะอาดติดไฟดีกว่าน้ำมันปาล์มทั้งนี้เพราะเมทิลเอสเทอร์ปีนเอสเทอร์ขนาดเล็กและไวต่อปฏิกิริยาการสันดาปมากว่าไตรกลีเซอไรด์ อย่างไรก็ตามความไวต่อปฏิกิริยาการสันดาปของเมทิลเอสเทอร์น้อยกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมที่มีปริมาณกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (20-21) ความหนืดลดลงใกล้เคียงน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ทั้งนี้การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์โมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นโมโนเมทิลเอสเทอร์โมเลกุลขนาดเล็กทำให้ความเป็นอิสระต่อกันของโมเลกุลมากกว่า ความหนืดจึงน้อยกว่าน้ำมันพืช แต่พบว่าความหนืดมากว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพราะว่าในกระบวนการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันไม่ได้เกิดปฏิกิริยาทั้งหมด มีกรดไขมันบางชนิดที่อยู่ในรูปไขมันอิสระทำให้สามารถเกิดพันธะ ไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ทำให้ความหนืดมีค่ามากขึ้น และน้ำมันดีเซลเป็นแหล่งไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลเล็ก ไม่มีขั้วหลาย ๆ ชนิดรวมกันและไม่มีพันธะไฮโดรเจนต่อกันระหว่างโมเลกุล และที่สำคัญที่สุดคือไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทอดไก่มีปริมาณความร้อนจากเครื่องอิเล็กโตรฟิสิโอโลยีมากว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ทั้งนี้เพราะการมีไขมันไก่เป็นส่วนผสมทำให้มีความหลากหลายของแหล่งคาร์บอนอะตอมจึงมีผลต่อปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นและมากกว่าปริมาณความร้อนจากไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มอย่างเดียว อย่างไรก็ตามแต่เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมแล้วค่าความร้อนที่ได้ต่ำกว่ามาก โดยเฉพาะเทียบกับน้ำมันดีเซลพิเศษเนื่องจากไบโอดีเซลไม่มีส่วนผสมของกำมะถันเหมือนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม นับเป็นข้อดีของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลทำให้ควันดำและเถ้าถ่านน้อยทำให้ดีต่อ

สภาวะแวดล้อม ดังนั้นแนวทางการพัฒนาคุณภาพของไบโอดีเซลในขั้นต่อไปทำให้สามารถนำมาแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ในอนาคตโดยปราศจากข้อสงสัย

โดยสรุป Methyl ester หรือไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มทอดไก่สามารถเตรียมได้โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลภายใต้เงื่อนไขปฏิกิริยาที่มีเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่ง เช่นเดียวกับการเตรียมเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม หรือแหล่งน้ำมันอื่นๆ ทั่วไป และ Methyl ester มีสมบัติทางเคมีและกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมซึ่งสามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ กลายเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญสำหรับประเทศไทยที่สามารถผลิตวัตถุดิบได้ อย่างไรก็ตามการใช้ไบโอดีเซลยังมีปัญหาบางอย่างที่ทำให้ผู้บริโภคไม่มั่นใจในเรื่องของประสิทธิภาพการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในการใช้งานจริง การพัฒนาคุณภาพของไบโอดีเซลให้มีคุณภาพใกล้เคียงน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมแล้วสร้างภาพลักษณ์ใหม่ในการใช้ไบโอดีเซล สามารถช่วยประเทศชาติให้พ้นวิกฤติด้านน้ำมันในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เวคิน นพนิตย์ The Professional Associates of Thailand และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่อ่านและวิพากษ์นิพนธ์ต้นฉบับ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินบำรุงการศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาชายแดนภาคใต้ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

เอกสารอ้างอิง

1. .....ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือนมิถุนายน 2553.[cite 2011 April 1] Available from : http://www.energysavingmedia.com/news/page.php?a=10...
2. .....สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย. 2542. .[cite 2011 April 17] Available from : http://www.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html...
3. .....พลังงานทดแทน เอทานอลและไบโอดีเซล. คณะกรรมาธิการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. สำนักพิมพ์แปลน พริ้นติ้ง จำกัด. กรุงเทพมหานคร, 7-7, 2545. [cite 2011 September 17] Available from : http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/Index.php?option=com...id...
4. อัชมาน อาแด:, ไบโอดีเซล (biodiesel) พลังงานทางเลือกจากพืชในท้องถิ่น. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์งบบำรุงการศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ปีการศึกษา 2550. 30 หน้า, 2551.
5. Gemma, V., Mercedes, M. and Jose´, A. : Integrated Biodiesel production : a comparison of difference homogeneous catalyst system. Bioresource Technology 92 : 297-305, 2004.

6. Alcantara, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M.J., Navarro, A. : Catalytic Production of Biodiesel from Soy Beam Oil, Used Frying Oil and Tallow. Biomass and bioenergy 18 : 515-527. 2000.
7. Fangrui, M. and Milford, A. H. : Biodiesel Production : a Review . Bioresource Technology 70 : 1-15. 1999.
8. Filiz, K. : Vegetable Oil Fuels : A Review Energy Resource , 21 : 221-231, 1999.
9. Guo, Y., Leung,Y. C. and Koo, C. P. : A Clean Biodiesel Produced from Recycle Oils and Grease trap Oils. Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities, 16 Dec 2002 Hongkong. 2002.
10. Saifuddin, N and K. H. : Chua Production of Ethyl Ester (Biodiesel) from Used Frying Oil : Optimization of Transesterification Process Using Microwave Irradiation. Malaysian Journal of Chemistry 6(1) : 077-082, 2004.
11. ชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร. เครื่องผลิตไบโอดีเซล CMU2. สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 19 หน้า. 2546.
12. Peterson, C. L., Feldman, M., Korus, R. and Auld, D. L. : Batch Type Trans-eterification Process for Winter Rape Oil. Applied Engineering In Agriculture 7(6) : 711-716. 1991.
13. Muniyappa, P.R., Brammer, S. C., Nouridini, H. : Improved Conversion of Plant Oils and Animal Fats into Biodiesel and Co-products. Bioresource Technol, 56 : 19-24. 1996.
14. .....Heating value ASTM D 2015 : American Society for Testing and Material., Philadelphia. pp.66-85, 1986. .[cite 2011 April 27] Available from : http://www.fischer-tropsch . org/doe/doe-reports/93255-T1,parts E1-H65.pdf.
15. .....คู่มือเครื่องยนต์คูโบต้า รุ่น RT บริษัท สยามคูโบต้า อุตสาหกรรม จำกัด กรุงเทพมหานคร 57 หน้า. 2547. [cite 2011 April 25] Available from : http://www.minsen.co.th/engine-kubota-rt.html.
16. รติกร อลงกรณ์โชติกุล. สมบัติของไบโอดีเซลที่เราต้องการ.วารสารวิทยาศาสตร์ 61(2) : 143-147, 2550.
17. Achanai, B., Nattawut, C and Kowit, P. : Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil Using Mixed Alcohol System. KMITL science Jounal. 8(2) : 59-63.2008.
18. Roger A. Korus., Dwight S. H.,Narendra, B., Charles L.Peterson, and David C. : Transesterification Process to Manufacture Ethyl ester of Rape Oil. Department of Chemical Engineering University of Idaho, Moscow, ID 83843[cite 2011 April 1] Available from : http://www.ps survival.com/PS/Biodiesel / Rape-seed oil-conversion_2001.pdf...

19. Saifuddin, N. : Talal F.Y., Javaid, S. I. and Halim, M. Performance and Emission from a Commercial High Speed Diesel Engine Fueled with Waste Cooking Oil (Palm Oil) Methyl Ester.Second World Engineering Conference, Kucing, Sarawak, Malaysia. 2002.

20. ธนากร ด้วงมุขพะเนา,เกียติก้อง สุวรรณกิจ, สุบงกช โตไพบูลย์และนุวงศ์ ชลคุป. ผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว: กรณีศึกษาการใช้งานระยะยาว 2,000 ชั่วโมง และการตรวจสอบเครื่องยนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 1-9. 2552. [cite 2011 April 1] Available from : http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT 23 / topic/file/AEC-023361/pdf...

21. ชญานนท์ แสงมณี และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง. ปริมาณควันดำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซชีวมวลร่วมกับน้ำมันไบโอดีเซล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 1-8. 2552. [cite 2011 April 1] Available from : http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT 23 / topic/file/AEC-024040/pdf...