การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น
The Optimum Condition for Biodiesel Production from Fish Gut Oil by Tranesterification Procedure

อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล[1], วรพจน์ ศิริรักษ์[1] และ จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร[2]
[1]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
[2]สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทรศัพท์ 0-5372-9600-5 Fax 0-5372-9606-7
E-mail: jirapatpong119@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาเพื่อให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากที่สุดต่อหนึ่งรอบการผลิต การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลงานวิจัยนี้มีขั้นตอน คือ นำน้ำมันไส้ปลามาทำปฏิกิริยากับเมทานอล ด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานเอสเทอริฟิเคชั่น โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1.75 % กวนเพื่อเร่งปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมงอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 60-65 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนที่ 1 และตัวแปรที่ศึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้คือปริมาณเมทานอลโดยกำหนดสัดส่วนเชิงโมลเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาที่อัตราส่วน 1:1 1:3 1:5 1:7 และ 1:9 ตามลำดับ ขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กวนเพื่อเร่งปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 60-65 องศาเซลเซียส และจากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาที่ 1:1 อุณหภูมิในระหว่างทำปฏิกิริยาเป็น 60 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5 ชั่วโมง ได้ปริมาณเมสทิลเอสเทอร์มากที่สุดคือ 93.5%โดยน้ำหนัก ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ กรดไขมันอิสระ ค่าความถ่วงจำเพาะ จุดขุ่น ค่าความหนืด และจุดวาบไฟ โดยที่อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอลอัตราส่วน 1:1 พบว่ามีค่าตามมาตรฐานไบโอดีเซลที่กำหนดไว้

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล, น้ำมันไส้ปลา, เมธิลเอสเตอร์

Abstract

The objective of this research is to study the optimum condition for biodiesel production from fish gut oil to achieve the maximum methyl ester. The production biodiesel this research is use fish gut oil and methanol. The typical process called tranesterification. First step; to using sulfuric acid as catalyst at 1.75% reaction time for 0.5 hour and temperature rang 60-65°C. The research variable **is** methanol and fish gut oil was 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 and 1:9 respectively. After that using potassium hydroxide as catalyst 1%, reaction time for 3 hours and temperature rang 60-65 °C. The experiment results methanol and fish gut oil by mol was 1:1 at a temperature reaction at 60 °C and reaction time 0.5 hours. The maximum yield of methyl ester was 93.5%wt. The analysis of oil properties; ie, fatty acid, specific gravity, cloud point, viscosity and flash point from two types at ratio Oil: Methanol 1:1 was found that within biodiesel standard limits.

Keyword: Biodiesel, fish gut oil, methyl ester

1. บทนำ

ในปัจจุบันพบว่า วิกฤตการณ์ราคาน้ำมันได้เกิดขึ้นทั่วโลก ทำให้การหาพลังงานทดแทนอื่น มาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นเรื่องที่จำเป็น น้ำมันจากพืช หรือ ไบโอดีเซล จึงเป็นที่สนใจและศึกษาพัฒนาอย่างแพร่หลายและต่อเนื่อง ปัจจุบันได้มีการนำพืชหลายชนิดมาผลิตเป็นน้ำมัน เช่น อ้อย มันสำปะหลัง มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น [1] ไบโอดีเซลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม

เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล กระบวนการการผลิตไบโอดีเซลทำได้โดยนำไปผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น (Transesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริก ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจาก Triglycerides เป็น Organic Acid Esters เรียกว่าไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยา และเครื่องสำอาง ฯลฯ [2]

งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมขายปลาตามท้องตลาดที่มีมากจนล้นตลาดทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ส่งกลิ่นเหม็น น้ำเน่าเสีย โดยนำน้ำมันไส้ปลามาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชั่นเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นไบโอดีเซลในลำดับแรก แล้วจึงนำส่วนที่เหลือไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่นต่อ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะทำให้ทั้งกรดไขมันอิสระและ ไตรกรีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้หมดอันจะทำให้ปริมาณและผลผลิตและประสิทธิภาพการเกิดน้ำมันไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพดีขึ้นโดยการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะการเตรียมเป็นปัจจัยในการทดลองและเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปใช้ได้กับทุกตัวอย่าง และน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลาที่ผลิตได้นำไปทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นน้ำมันที่หาได้ง่ายมีใช้กันอย่างแพร่หลายในชุมชนและมีต้นทุนในการผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่ต่ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ น้ำมันเชื้อเพลิงที่จากน้ำมันพืชและสัตว์ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ หรือ เอทิลเอสเทอร์ ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากปิโตรเลียมสามารถใช้เป็นเชื่อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์

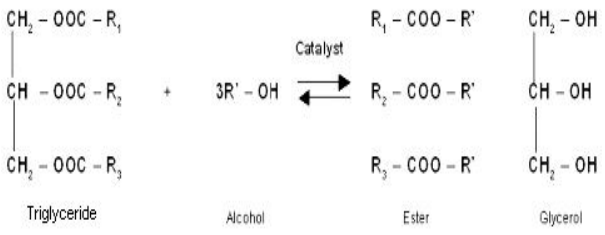
ประเภทของไบโอดีเซล

แบ่งออกได้ 3 ประเภท (ที่มา: กลุ่มสงเสริมการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร)

1. **น้ำมันพืชหรือน้ำมันไขมันสัตว์** ไบโอดีเซลประเภทนี้ได้แก่ น้ำมันพืชแท้ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู น้ำมันไก่ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมี และไม่นำมาดัดแปลงสมบัติของน้ำมันอีก

2. **น้ำมันแบบผสม** ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าซ น้ำมันดีเซล เพื่อให้ได้คุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

3. **ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์** เป็นกระบวนการที่ยุ่งยาก ซึ่งต้องผ่านกระบวนการที่เรียกว่า (Tranesterrification) โดยการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้เอสเทอร์



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่น

3. ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การลดกรดไขมันอิสระด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

เป็นการลดกรดไขมันอิสระให้เหลือประมาณ 3% เพื่อที่จะให้น้ำมันสามารถทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยากับน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้ว เนื่องจากเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไขมันได้ง่ายกว่าเอทานอล [3] และใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1.75 % สำหรับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาใช้ช่วงอุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส กวนเพื่อเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โดยทำการทดลองหาอัตราส่วนของเมทานอลที่เหมาะสมในการลดกรดไขมันอิสระโดยทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้วที่อัตราส่วน 1:1 1:3 1:5 1:7 และ 1:9 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้วจากขั้นตอนที่ 1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาใช้ช่วงอุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส กวนเพื่อเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกแยกเป็นสองชั้น ชั้นบนเป็นอัลคิลเอสเตอร์ ส่วนชั้นล่างเป็นกลีเซอรีน

การทดสอบคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล

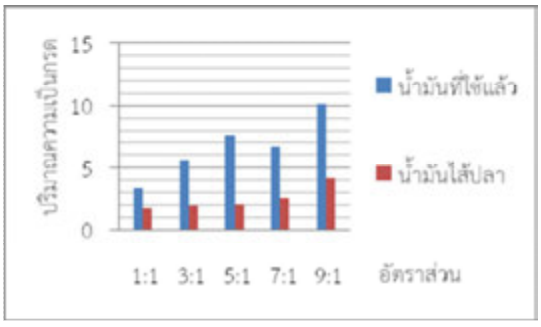
การทดสอบหาคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐานไบโอดีเซลมาตรฐานไบโอดีเซล(ASTM D6751) เช่น ค่าความเป็นกรด ปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าความหนืด ค่าความถ่วงจำเพาะ จุดขุ่นตัว และจุดวาบไฟ เป็นต้น โดยทำการเทียบมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ขั้นตอนที่ 1 การลดกรดไขมันอิสระด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 หรือขั้นตอนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชั่น พบว่าเมื่อนำน้ำมันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาแยกทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง น้ำมันดิบจะแยกเป็นสองชั้นดังรูปที่ 1ชั้นบนเป็นน้ำมันดิบกับเอสเตอร์ ส่วนชั้นล่างเป็นกลีเซอรีนกับสิ่งเจือปน จากนั้นแยกกลีเซอรีนและสิ่งเจือปนออกเหลือแต่ชั้นของน้ำมันดิบกับเอสเตอร์ เพื่อที่จะนำส่วนที่เหลือไปทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 2 การแยกชั้นของกลีเซอรีนกับชั้นของน้ำมันดิบและเอสเตอร์



รูปที่ 3 ปริมาณค่าความเป็นกรด

จากรูปที่ 3 เมื่อใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้วที่อัตราส่วนสูงขึ้นจะมีแนวโน้มความเป็นกรดเพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนที่มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดคืออัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลา 1:1 ซึ่งค่าความเป็นกรดไม่เกินมาตรฐาน

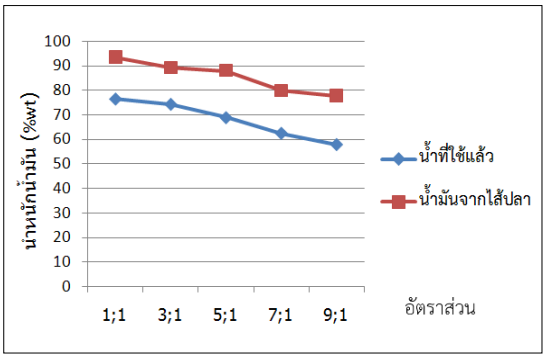
ที่กำหนดไว้คือ 3% อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง ระยะเวลาพักในการแยกชั้น 3 ชั่วโมง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้แล้วที่มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดคือ อัตราส่วน 1:1

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

เมื่อนำน้ำมันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส กวนเพื่อเร่งปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง ระยะเวลาพักในการแยกชั้น 3 ชั่วโมง พบว่าชั้นบนเป็นอัลคิลเอสเตอร์ ส่วนชั้นล่างเป็นกลีเซอรีนซึ่งสามารถแยกออกได้โดยวิธีปล่อยออกมาจากกรวยแยก จากนั้นนำเอสเตอร์ที่ได้ไปทำการล้างน้ำ เพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้างในเนื้อเอสเตอร์ออก สำหรับน้ำที่นำมาล้างใช้น้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการล้างประมาณ 3-4 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างใส เมื่อทำการล้างน้ำเสร็จแล้วนำเอสเตอร์ที่ได้ไปต้มเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จึงจะได้ไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่เหลือใช้ และนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปทดสอบหาคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง

ปริมาณน้ำมันเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชั่นและทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น ผลการทดลองพบว่าปริมาณไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้วมีปริมาณน้ำมันลดลงตามอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันทั้งสองชนิดเนื่องจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีน้อยกว่าปริมาณเมทานอลโดยคิดเป็นสัดส่วนโดยโมลจึงทำให้ได้ปริมาณน้ำมันที่น้อย ซึ่งปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มากที่สุดคือน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลาที่อัตราส่วนเมทานอลต่อนำมันไส้ปลาอัตราส่วน 1:1 คิดเป็น 93.5% โดยน้ำหนักจากน้ำมันไส้ปลา 50 กรัม แสดงดังรูปที่ 4

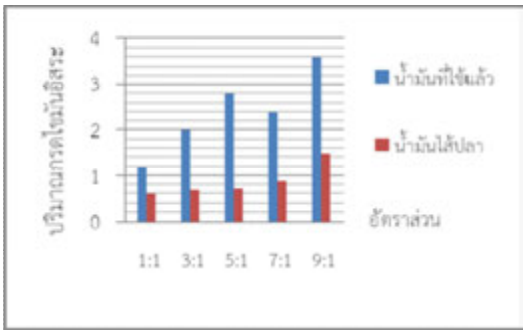


รูปที่ 4 ปริมาณน้ำมันเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น

การทดสอบคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง

การทดสอบปริมาณกรดไขมันอิสระ

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าปริมาณค่าของกรดไขมันอิสระของน้ำมันไส้ปลาจะมีปริมาณค่าของกรดไขมันอิสระน้อยกว่าน้ำมันที่ใช้แล้ว ซึ่งค่ากรดไขมันอิสระมีค่าสูงจะมีผลต่อการกัดกร่อนของเครื่องยนต์เมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 5 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

การทดสอบค่าความหนืด

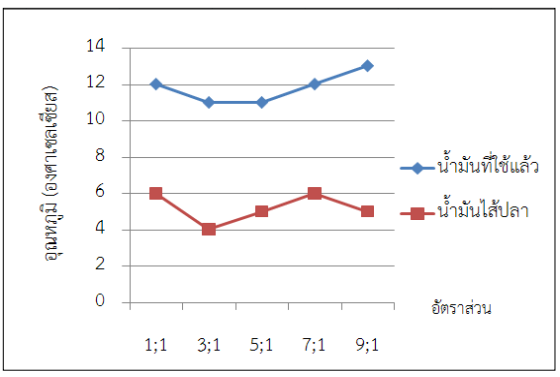
ค่าความหนืดมีผลต่อการฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้มีผลต่อการเผาไหม้ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่เป็นวัตถุดิบและยังแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากไส้ปลาและน้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าไม่แตกต่างซึ่งอยู่ในช่วง 2.4-3.2 cSt และเมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลมาตรฐานจะมีค่าอยู่ในช่วง 3.5-5.0 cSt

ค่าความถ่วงจำเพาะ

เมื่อทำการการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิด ทุกอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 800-900 Kg/cm^3 ที่อัตราส่วนโดยมาตรฐานไบโอดีเซลกำหนดไว้ไม่เกิน 860-900 Kg/cm^3

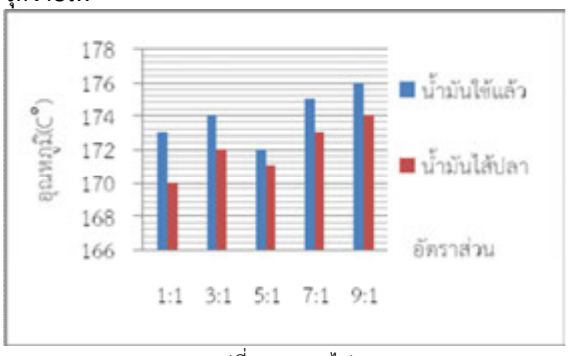
จุดขุ่นตัว



รูปที่ 6 แสดงค่าจุดขุ่นตัว

จากรูปที่ 6 แสดงค่าจุดขุ่นตัว พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลามีค่าต่ำกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วทุกอัตราส่วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4-6 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลต่อการรักษาสภาพน้ำมันไบโอดีเซล

จุดวาบไฟ



รูปที่ 7 จุดวาบไฟ

จากรูปที่ 7 อุณหภูมิจุดวาบไฟของน้ำมันที่ใช้แล้วและน้ำมันไส้ปลามีจุดวาบไฟใกล้เคียงกัน สามารถติดไฟในอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส ขึ้นไปแสดงว่าเมทานอลมีปริมาณตกค้างอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณน้อย ซึ่งมาตรฐานกำหนดให้ค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส

5. สรุปผลการทดลอง

จากการหาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันทั้งสองชนิดพบว่าที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันไส้ปลาที่อัตราส่วน 1:1 ได้ปริมาณน้ำมันสูงที่สุด โดยกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1.75 %โดยน้ำหนัก และ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1%โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดพบว่า คุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดมีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ แต่ในงานวิจัยนี้จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันบางค่าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงจะสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตรกำลังต่ำเพื่อลดต้นทุนของเกษตรกร

6. กิตติกรรมประกาศ

- สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
- สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

7. การอ้างอิง

[1] สุภกร บุญยืน และคณะ. (2553). "อิทธิพลของกรดไขมันอิสระต่อการผลิตไบโอดีเซล". วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 18. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

[2] ธรรมศักดิ์ พันธ์แสนศรี และ อนุกูล จันทร์แก้ว. (2553). "การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กในการทำงานจริงโดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง". รายงานผลการวิจัย. มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[3] A.S. Ramadhas, S. Jayaraj and C. Muraleedharan., 2005. Biodiesel Production from High FFA Rubber Seed Oil Fuel, *Vol. 84*, pp. 335-340.

[4] M. Canakci, G.J. Van., 2001. Biodiesel Production from Oils and Fats with high free fatty acids" *Trans ASAE, Vol. 24*.

[5] A.S. Ramadhas, C. Muraleedharan, S. Jayaraj, 2005. Performance and Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Methyl Esters of Rubber Seed Oil. *Renewable Energy, Vol 30*, pp. 1789-1800.

[6] Cherng Yuan Lin, Hsiu An Lin, 2006. Diesel Engine Performance and Emission Characteristics of Biodiesel Produced by the Peroxidation Process. *Fuel, Vol 85*, pp. 298-305.