

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลา

Grey Relational Analysis for Optimal Condition of Biodiesel Production Process from Fish Entrails

อำนวย คำบุญ^{1*} วรพจน์ ศิริรักษ์¹ พีรวัตร ลือสัก¹ เรืองฤทธิ์ ศิริรักษ์²

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย, เชียงราย, 57120

² สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ สำนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา, 56000

Amnouy Kumboon^{1*} Worapot Sirirak¹ Peerawat Luesak¹ Reungruthai Sirirak²

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Lanna Chiangrai, Chiangrai, 57120

² Department of Material Science, Faculty of Science, University of Phayao, Phayao, 56000

*Corresponding author E-mail: k_amnouy@hotmail.com

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลา โดยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ถูกนำมาใช้หาเงื่อนไขที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ร่วมกัน เพื่อให้ได้น้ำมัน ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ทางภาคเกษตร ในกระบวนการทดลองผลิตไบโอดีเซลใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การสังเคราะห์ไบโอดีเซลมี 4 พารามิเตอร์ที่ถูกศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนผสม เมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเร็วรอบการกวน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา สำหรับผลตอบสนองที่ต้องการทราบคือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ค่าเถ้าซัลเฟส และจุดวาบไฟ ผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่ส่วนผสมของ เมทานอล : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ส่วนผสม 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ไบโอดีเซลจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดนี้แสดงค่าปริมาณ FFA เท่ากับ 1.60 mg KOH/g Oil เถ้าซัลเฟส เท่ากับ 0.11% m/m และจุดวาบไฟเท่ากับ 162 °C ผลที่ได้สอดคล้องกับระดับที่มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกำหนด เมื่อทดลองใช้กับเครื่องยนต์ทางภาคเกษตรแล้วสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยเครื่องยนต์ไม่เกิดการดับหรือเกิดการกระตุก

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล พลังงานทางเลือก ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ไส้ปลา ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ABSTRACT

This research article aimed to investigate an optimal condition of biodiesel production from fish entrails oil. The grey relational analysis was used to find the suitable condition together with many objectives for efficient biodiesel sufficiently in agricultural engine application. Transesterification

reaction was applied in the biodiesel production experiment. The four factors of biodiesel synthesis were studied as follows; ratio of methanol to potassium hydroxide, stirring speed, reaction time and reaction temperature. The three responses were free fatty acid quantity (FFA), sulfated ash content and flash point. The results exhibited that the best condition of the biodiesel production is 3.0:130, 500 rpm, 60 minute and 60 °C for volume per weight ratio of methanol to potassium hydroxide, stirring speed, reaction time and reaction temperature, respectively. Hence, the biodiesel from this optimal condition showed 1.60 mg KOH/g Oil of FFA, 0.11% m/m of sulfated ash content and 162 °C of flash point. Moreover, these results were consistent with the special standard level of department of energy business. Therefore, the prepared biodiesel was applied in the agricultural engine after that the engine operated continuously with no shutdown or stumble.

Keyword: Biodiesel, alternative energy, grey relation, fish entrails oil, transesterification reaction

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงาน คิดเป็นมูลค่าสูงถึง 816,563 ล้านบาท ทำให้ภาครัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น ในปี 2561 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 9,680 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.3 โดยเฉพาะการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 2.48 [1] สอดคล้องกับในปัจจุบันน้ำมันมีราคาแพงขึ้น และมีปริมาณน้ำมันที่ลดลง ซึ่งนับวันจะมีความต้องการสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามสถานะเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในปี พ.ศ. 2585 คาดว่าน้ำมันปิโตรเลียมจะหมดไปในการแสวงหาเชื้อเพลิงและพลังงานจากทรัพยากรแหล่งใหม่ที่มีอยู่เพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม จากการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ภายในประเทศ โดยเฉพาะไบโอดีเซล ได้รับการส่งเสริมให้มีการผลิตสูงถึง 120.94 ล้านลิตรต่อปี เพื่อการนำพลังงานไปใช้งานภายในประเทศ 4.03 ล้านลิตรต่อวัน [2] และมีการส่งเสริมให้หลาย ๆ ภาคส่วนโดยเฉพาะในระดับชุมชนที่มีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [3-5] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของไบโอดีเซลด้วยสารเร่งปฏิกริยา เพื่อให้ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และมีความรวดเร็วมากขึ้น [6] ซึ่งในอดีตมีรายงานว่าการใช้

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 90-98 [4],[7-12] อย่างไรก็ตาม น้ำมันวัตถุดิบที่เป็นน้ำมันจากพืชและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีจำนวนจำกัดและไม่เพียงพอสำหรับการผลิตไบโอดีเซลตามความต้องการและมีต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 70-90 หากต้องปลูกพืชเพื่อการผลิตน้ำมันเพิ่มเติม [8],[13-15] การแสวงหาแหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำมันที่ได้จากไขมันสัตว์สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้และมีศักยภาพสูงเช่นเดียวกันกับน้ำมันพืช [16-19]

จังหวัดเชียงรายและจังหวัดใกล้เคียงมีการประกอบธุรกิจการผลิตปลาสดค่อนข้างมาก และมีส่วนที่ต้องทิ้งไปเป็นไส้ปลาและไขมันปลาซึ่งมีปริมาณไม่น้อยกว่าวันละ 500 กิโลกรัม การนำไส้ปลาที่ต้องทิ้งไปนี้มาสกัดน้ำมันสำหรับการผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล จึงเป็นอีกแนวทางที่สามารถสร้างมูลค่าให้กับไส้ปลาเหลือทิ้ง อีกทั้งจากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบการศึกษาการใช้น้ำมันจากไส้ปลาในการผลิตไบโอดีเซล จึงทำให้ไม่ทราบพารามิเตอร์ที่ควรใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลา

โดยใช้หลักการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์แบบหลายผลตอบสนองร่วมกัน เพื่อให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนดสำหรับนำไปใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตร

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีส่วนการดำเนินงาน 2 ส่วนหลัก ที่สำคัญ โดย ส่วนแรกเป็นกระบวนการสกัดน้ำมันออกจากไส้ปลา และการทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลาที่ได้สำหรับการเตรียมน้ำมันวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองรายละเอียดการดำเนินงานกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1-2.2 ส่วนที่สอง เป็นกระบวนการทดลองผลิตไบโอดีเซลเพื่อให้ได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลตอบสนองด้านค่ากรด ไขมันอิสระ แก๊สซัลเฟสและจุดวาบไฟ ที่ดีที่สุดและอยู่ในระดับมาตรฐานกำหนด โดยในการผลิตรายละเอียดการดำเนินงานกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ต่อไป

2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันจากไส้ปลา

กระบวนการที่ใช้ในการสกัดน้ำมันออกจากไส้ปลาใช้กระบวนการเจียวแห้ง (Dry rendering) เพื่อแยกน้ำมันออกมาจากเศษไส้ปลาโดยการบดเพื่อลดขนาดเนื้อเยื่อไขมัน แล้วให้ความร้อนโดยตรง ความร้อนทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายและปล่อยน้ำมันออกมา ในเนื้อเยื่อไขมันมีความชื้น และความชื้นจะช่วยให้การไล่ความชื้นออกมาจากวัตถุดิบทำให้สามารถแยกกากไส้และน้ำมันออกจากกันได้ง่ายโดยในการเจียวสกัดน้ำมันในกระทะแต่ละครั้งใช้เวลา 60 นาที ปริมาณไส้ปลาครั้งละ 20 กิโลกรัม ด้วยไฟระดับปานกลาง ซึ่งลักษณะของไส้ปลาและการเจียวดังรูปที่ 1 (ก)และ(ข) จากนั้นกรองแยกน้ำมันออกจากกากไส้ปลาจะได้น้ำมันไส้ปลาดังรูปที่ 1 (ค)



(ก) ลักษณะไส้ปลา (ข) การเจียวสกัดน้ำมัน (ค) น้ำมันไส้ปลา

รูปที่ 1 การสกัดน้ำมันไส้ปลา

อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ได้ยังไม่สามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เนื่องจากยังสกปรกและมีกลีเซอรไรด์ในน้ำมันมาก ดังนั้นต้องนำน้ำมันที่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมากขึ้น ก่อนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลต่อไป

2.2 กระบวนการทำความสะอาดน้ำมัน

กระบวนการทำความสะอาดน้ำมันแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ประกอบด้วย ขั้นตอนการแยกกลีเซอรไรด์ ขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลา เพื่อการนำไปเข้ากระบวนการผลิตเป็นไบโอดีเซล

2.2.1 การแยกกลีเซอรไรด์และกากไส้ปลา

การแยกกลีเซอรไรด์เป็นขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยนำน้ำมันไส้ปลาวัตถุดิบจำนวน 10 ลิตร มาต้มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วเติมสารเร่งปฏิกิริยาลงไปในหม้อต้มโดยใช้เมทานอล (CH_3OH) ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ปริมาณ 60 กรัม แล้วต้มน้ำมันไส้ปลาด้วยเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนของกลีเซอรไรด์และสิ่งสกปรกอื่น ๆ จนเกิดการแยกชั้นดังรูปที่ 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเทแยกน้ำมันออกจากกลีเซอรไรด์จากการแยกได้ปริมาณน้ำมันไส้ปลาประมาณ 80% และกลีเซอรไรด์ 20% แล้วทำซ้ำกระบวนการนี้จนกว่าได้ปริมาณน้ำมันไส้ปลาเพียงพอสำหรับการทดลอง แล้วนำน้ำมันไส้ปลาที่ได้มาทำความสะอาดต่อไป



รูปที่ 2 การแยกกลีเซอรไรด์ในน้ำมันไส้ปลา

2.2.2 การล้างทำความสะอาดน้ำมันใส่ปลา

เมื่อได้น้ำมันที่ผ่านการแยกกลีเซอรไรด์แล้วนำน้ำมันมาเข้ากระบวนการล้างทำความสะอาดน้ำมันใส่ปลาซึ่งมีอยู่ 2 ลำดับขั้นตอน ประกอบด้วย การทำความสะอาดด้วยการกวนและการทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศ ดังรูปที่ 3 โดยในขั้นตอนแรกเริ่มจากการล้างทำความสะอาดด้วยการกวน โดยการเติมน้ำมันผสมน้ำสะอาดอัตราส่วน 1:1 ลงในถังกวนแล้วกวนน้ำและน้ำมันให้แตกตัวรวมเข้าด้วยกันเป็นระยะเวลา 10 นาที โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 300 รอบต่อนาที จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ให้น้ำมันแยกชั้นออกจากกันในถังกวน



(ก) การกวน



(ข) การเป่าอากาศ

รูปที่ 3 กระบวนการทำความสะอาดน้ำมัน

โดยน้ำจะเป็นตัวช่วยให้ตะกอนที่เหลืออยู่แยกออกจากน้ำมัน ทำให้น้ำมันที่ได้มีความสะอาดขึ้นเพื่อเป็นกรดระยะเวลาในการตกตะกอนในน้ำมัน [18] ปล่อยน้ำออกจากถังกวน ทำซ้ำกระบวนการเดิมเพื่อให้น้ำมันสะอาดมากขึ้นจนครบ 3 ครั้ง นำน้ำมันที่ได้จากการล้างไป

ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่น้ำออกจากน้ำมันแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ขั้นตอนที่สองการล้างทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศเข้าไปในถัง ด้วยการนำน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดด้วยการกวนมาทำความสะอาดอีกครั้งด้วยอัตราส่วนน้ำกับน้ำมัน 1:1 เป่าอากาศเข้าไปในถังเป็นระยะเวลา 15 นาที เพื่อให้ น้ำและน้ำมันเกิดการแตกตัวผสมเข้ากันได้ดีมากขึ้น แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับน้ำมันแยกน้ำออกจากน้ำมัน นำน้ำมันที่ได้ไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำน้ำมันวัดจุดเดือดตรวจวัดเบื้องต้นเฉพาะค่าที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ตรวจวัดตามมาตรฐาน EN 14103 มีค่าเฉลี่ย 97.8%wt และกรดไขมันอิสระ (Free Fatty acid : FFA) ตามมาตรฐาน ASTM D 664 มีค่าเฉลี่ย 8.6 mg KOH/g Oil ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้เป็นค่าที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดนี้ และยังไม่สามารถนำไปใช้งานจึงต้องดำเนินการสังเคราะห์เป็นไบโอดีเซลเพื่อให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นต่อไป

2.3 การทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

กระบวนการทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันชนิดเบสในการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล โดยมีพารามิเตอร์คงที่ได้แก่ ปริมาณน้ำมันใส่ปลา 10 ลิตร สำหรับพารามิเตอร์แปรผันที่ศึกษาประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ส่วนผสมสารเร่งปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มี 3 อัตราส่วนผสม ความเร็วรอบในการกวน 3 ระดับ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ระดับและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 3 ระดับ ซึ่งค่าระดับของพารามิเตอร์เหล่านี้กำหนดขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรมและนำข้อมูลมาทำการทดลองผลิตลงถูกเพื่อกำหนดค่าระดับพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบการทดลอง [18-19] ค่าระดับพารามิเตอร์แปรผันที่ศึกษาวิจัยนี้ดังตารางที่ 1 โดยส่วนผสมระหว่างเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แทนด้วยอักษร (A) และ ความเร็วรอบในการกวน แทนด้วยอักษร (B) เวลาในการทำปฏิกิริยาแทนด้วยอักษร (C)

และเวลาการทำปฏิกิริยาแทนด้วยอักษร (D) เมื่อกำหนดค่าระดับของพารามิเตอร์แล้วออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แปรผันและค่าระดับ

พารามิเตอร์แปรผัน	ค่าระดับ		
	1	2	3
ส่วนผสม เมทานอล (ลิตร) : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(กรัม) (A)	2.0:120	2.5:125	3.0:130
ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อนาที) (B)	300	400	500
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาท) (C)	50	60	70
อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส) (D)	60	65	70

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง Taguchi L9 มีจำนวนการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดลองแบบ Taguchi L9

ลำดับ	พารามิเตอร์			
	(A)	(B)	(C)	(D)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

สำหรับผลตอบสนองที่ต้องการทราบพิจารณาจากซึ่งค่าที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากการทบทวนวรรณกรรม ได้แก่ ค่าของปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเถ้าซัลเฟส จุลวาทไฟ เป็นค่าที่มีผลกระทบต่อสมบัติไบโอดีเซลค่อนข้างมาก [5],[14],[17] จึงเลือก

ผลตอบสนองทั้ง 3 สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ เมื่อได้น้ำมันจากการทดลองแล้วตรวจวัดผลค่าปริมาณ FFA ตามมาตรฐาน ASTM D664 การตรวจวัดจุลวาทไฟตามมาตรฐาน ASTM D93 และค่าเถ้าซัลเฟสตามมาตรฐาน ASTM D874 เมื่อได้ค่าผลตอบทั้งหมดตามตารางการทดลอง แต่เนื่องจากวิธีการ Taguchi มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหลายผลตอบรวมได้ ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบผลตอบหลายวัตถุประสงค์ร่วม สำหรับปัญหาที่มีผลตอบสนองหลายอย่าง ด้วยสมการที่ 1-7 [20] โดยการเปรียบเทียบอิทธิพลของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ระดับต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบสนองทั้งหมดในกระบวนการนั้น ๆ โดยมีเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational grade) เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เริ่มต้นจากการแปลงผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองข้อมูลดิบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (2)$$

เมื่อ $x_i^*(k)$ คือ การแปลงข้อมูลจากผลตอบสนองข้อมูลดิบลำดับที่ i จากการทดลอง k , $x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบของผลตอบสนองลำดับที่ i จากการทดลอง k , $\min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบที่เป็นของผลตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุดที่ได้จากการทดลอง k และ $\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบของผลตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด จากการทดลอง k โดยสมการที่ (1) ใช้ในการแปลงข้อมูล เมื่อกระบวนการหรือการทดลองนั้นต้องการผลตอบสนอง ในรูปแบบที่ยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้น (the larger-the-better) ส่วนสมการที่ (2) ใช้ในการแปลงข้อมูลเมื่อ

กระบวนการหรือ การทดลองนั้นต้องการผลตอบสนองในรูปแบบที่ยิ่งมีค่า น้อยยิ่งดี (the smaller-the-better) สำหรับในการศึกษานี้ ผลตอบสนองเป็น ปริมาณ FFA และค่าเซลล์เฟส ที่ต้องการให้มีค่าน้อยยิ่งดี จึงใช้สมการที่ 2 ส่วนผลตอบสนองจุดวาบไฟต้องการให้มีค่ายิ่งมากยิ่งดีจึงใช้สมการที่ 1 สำหรับการแปลงข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ เมื่อแปลงผลตอบสนองอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แล้วจะนำค่าผลตอบสนองดังกล่าวมาคำนวณหา สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองกับผลตอบสนองอ้างอิง โดยสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta \min + \xi \Delta \max}{\Delta_{0,i}(k) + \xi \Delta \max} \quad (3)$$

เมื่อ $\xi_i(k)$ คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i จากการทดลอง k , ξ คือ สัมประสิทธิ์ความแตกต่างซึ่งมีค่า 0-1 และ $\Delta \min$, $\Delta \max$, $\Delta_{0,i}(k)$ หาได้จากสมการที่ 4, 5 และ 6

$$\Delta \min = \min_{j \in i} \min_k |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (4)$$

$$\Delta \max = \max_{j \in i} \max_k |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{0,j}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (6)$$

เมื่อ $\Delta_{0,i}(k)$ คือ ผลต่างระหว่างผลตอบสนองอ้างอิง $x_0^*(k)$ กับผลตอบสนองจากการทดลอง $x_i^*(k)$ โดยที่เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

เมื่อ γ_i คือ เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i จากจำนวน n การทดลอง ซึ่งเป็นการแปลงค่าเพื่อการวิเคราะห์ผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองหลายวัตถุประสงค์ร่วมกัน เพื่อสรุปผลการศึกษาวิจัย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองมาตรวจวัดค่าของผลตอบสนองทั้ง 3 เพื่อให้ทราบถึง ค่าของปริมาณ FFA ค่าค่าเซลล์เฟส และจุดวาบไฟ ผลจากการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 3 ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่การทดลองที่ 1 ปริมาณสัดส่วนผสมของเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และความเร็วรอบในการกวนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าระดับต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าผลตอบสนองที่ไม่ดี เนื่องจากน้ำมันวัตถุดิบที่ได้ก่อนการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์และปริมาณกรดไขมันอิสระที่สูง ซึ่งกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลและเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณเบสตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณลดลงไป อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดสบู่และน้ำซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการเปลี่ยนน้ำมันวัตถุดิบให้เป็นไบโอดีเซลให้มีความบริสุทธิ์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้น้อยกว่าการทดลองอื่น ๆ ที่มีเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และความเร็วรอบในการกวนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าระดับพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ มีแนวโน้มที่ทำให้ได้ค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่ดีขึ้น โดยในการทดลองที่ 9 แสดงค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่มีแนวโน้มดีกว่าการทดลองอื่น ๆ จากการเพิ่มปริมาณสัดส่วนผสมของเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และจำนวนรอบในการกวน ซึ่งคาดว่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 เป็นพารามิเตอร์ที่อาจจะ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองสำหรับงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์

ตารางที่ 3 ผลการทดลองจากวิธีการ Taguchi L9 และการแปลงค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์

ลำดับที่	ค่าผลตอบสนองจากการทดลอง			ค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์		
	FFA (mg KOH/ g Oil)	กรดไขมัน (%) m/m	จุดวาบไฟ (°C)	FFA (0-1)	กรดไขมัน (0-1)	จุดวาบไฟ (0-1)
1	3.18	0.071	145	0.0000	0.0000	0.0000
2	3.10	0.062	148	0.0510	0.1500	0.1875
3	3.11	0.065	146	0.0446	0.1000	0.0625
4	2.97	0.042	151	0.1338	0.4833	0.3750
5	2.76	0.038	153	0.2675	0.5500	0.5000
6	2.67	0.043	152	0.3248	0.4667	0.4375
7	2.35	0.014	158	0.5287	0.9500	0.8125
8	2.03	0.011	161	0.7325	1.0000	1.0000
9	1.61	0.012	160	1.0000	0.9833	0.9375

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ลำดับที่	ค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์			สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์			เกรตความสัมพันธ์แบบเกรย์
	FFA (0-1)	กรดไขมัน (0-1)	จุดวาบไฟ (0-1)	FFA	กรดไขมัน	จุดวาบไฟ	
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
2	0.0510	0.1500	0.1875	0.3451	0.3704	0.3810	0.3654
3	0.0446	0.1000	0.0625	0.3435	0.3571	0.3478	0.3495
4	0.1338	0.4833	0.3750	0.3660	0.4918	0.4444	0.4340
5	0.2675	0.5500	0.5000	0.4057	0.5263	0.5000	0.4773
6	0.3248	0.4667	0.4375	0.4255	0.4839	0.4706	0.4599
7	0.5287	0.9500	0.8125	0.5148	0.9091	0.7273	0.7170
8	0.7325	1.0000	1.0000	0.6515	1.0000	1.0000	0.8838
9	1.0000	0.9833	0.9375	1.0000	0.9677	0.8889	0.9522

ด้านเวลาในการทำปฏิกิริยาและพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาทำอยู่ในระดับ 2 และ ระดับ 1 มีค่าเท่ากับ 60 นาที และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่กล่าวถึงเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และเป็นช่วงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลที่เหมาะสม [8],[21-23] จึงทำ

ให้มีแนวโน้มลดค่าปริมาณของ FFA ค่ากรดไขมันลดลง และมีจุดวาบไฟที่สูงขึ้น จากนั้นแปลงค่าผลตอบสนองทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบ 0-1 ตามสมการที่ 1 และ 2 ค่าระดับที่เรียงลำดับดังตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าระดับที่หาได้ในตารางที่ 3 มาหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ตามสมการที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า 5 เป็นน้ำหนัก

ของตัวแปรซึ่งในงานวิจัยนิยมส่วนใหญ่ใช้เท่ากับ 0.5 ดังนั้นในการให้น้ำหนักในงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.5 เช่นกัน เนื่องจากได้ให้ความสำคัญกับผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองในระดับที่เท่า ๆ กันเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แล้ว นำค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มาหาค่าเกรดความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7 สำหรับการหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 เมื่อนำค่าเกรดความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์ของการทดลอง Taguchi L9 ในตารางที่ 2 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของแต่ละพารามิเตอร์และค่าระดับต่าง ๆ ในแต่ละการทดลองออกมาซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ดังตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$\gamma(A) = 0.33333 + 0.36546 + 0.34950 = 0.34943$$

$$\gamma(B) = 0.33333 + 0.43407 + 0.71704 = 0.49481$$

สำหรับค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์อื่น ๆ สามารถคำนวณหาได้ด้วยวิธีการเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของแต่ละพารามิเตอร์ที่ระดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 5 เมื่อได้ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แล้วเลือกค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละพารามิเตอร์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองมากที่สุดและค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ พารามิเตอร์ (A) และ (B) มีค่าอยู่ในระดับ 3 ส่วนพารามิเตอร์ (C) ที่ค่าอยู่ในระดับ 2 และพารามิเตอร์ (D) อยู่ในระดับ 1 โดยพารามิเตอร์ A มีค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่ 0.85102 เป็นค่ามากที่สุดแสดงว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันมากที่สุด กล่าวคือพารามิเตอร์ A มีการปรับเปลี่ยนค่าระดับไปเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าของผลตอบสนองทั้ง 3 มีการแปรเปลี่ยนค่าไปจากเดิม ทำให้แนวโน้มค่าประสิทธิภาพของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่อนข้างมาก จากผลตอบสนองอ้างอิง ดังนั้นพารามิเตอร์ A จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้มีความเหมาะสมสำหรับ

การปรับเปลี่ยนค่าเมื่อต้องการให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ สำหรับพารามิเตอร์ B C และ D แสดงค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันที่ไม่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อปรับเปลี่ยนค่าระดับของพารามิเตอร์ B หรือ C หรือ D จะส่งผลให้เกิดการแปรเปลี่ยนของค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันในระดับที่แตกต่างจากผลตอบสนองอ้างอิงที่พอ ๆ กัน

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

ระดับ	พารามิเตอร์			
	(A)	(B)	(C)	(D)
1	0.34943	0.49481	0.55904	<u>0.58763</u>
2	0.45713	0.57554	<u>0.58391</u>	0.51416
3	<u>0.85102</u>	<u>0.58723</u>	0.51463	0.55580

อย่างไรก็ตามในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้ง B C และ D เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาค่าให้สอดคล้องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเช่นกัน จึงจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่เป็นไปตามความต้องการ ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์นี้แสดงค่าระดับที่เหมาะสมถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้ค่าผลตอบสนองที่มีหลายวัตถุประสงค์ร่วมกันที่ดีที่สุด นั่นคือเงื่อนไข ส่วนผสม เมทานอล : โพรเพนไฮดรอกไซด์ ที่ส่วนผสม 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเงื่อนไขดังกล่าวมาทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลจากการทดลองซ้ำมีค่าปริมาณ FFA เท่ากับ 1.60 mg KOH/g Oil ค่าที่ได้มีค่าต่ำเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24] แต่ยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้คุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนต้องมีค่า FFA ไม่เกิน 0.8 mg KOH/g Oil ตามมาตรฐาน ASTM D664

แต่สำหรับค่าเถ้าซัลเฟสที่ได้มีค่า 0.011% m/m และจุดวาวไฟ 162°C ผลดังกล่าวสอดคล้องกับระดับมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้ ค่าเถ้าซัลเฟสไม่เกิน 0.02% ตามมาตรฐาน ASTM D874 และจุดวาวไฟไม่ต่ำกว่า 120°C ตามมาตรฐาน ASTM D93

4. สรุปผลการทดลอง

ได้ปลาสามารถนำมาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ด้วยเงื่อนไขของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่มีส่วนผสมของ เมทานอล : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที และเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนาทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่ดีได้ค่าของปริมาณ FFA ที่มีปริมาณต่ำการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงหรือฟองสบูเกิดขึ้นได้ต่ำ ทำให้การจุดติดและเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้นแต่ก็ยังไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดสำหรับค่าเถ้าซัลเฟสและจุดวาวไฟ มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน จากทดลองใช้กับเครื่องยนต์ทางทะเลแล้วสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยเครื่องยนต์ไม่เกิดการดับหรือเกิดการกระตุก อย่างไรก็ตามการพัฒนาใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากปลาให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นควรมีการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ เพิ่มเติมดังเช่น การศึกษาเพื่อลดค่ากรดไขมันให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การเปรียบเทียบกระบวนการทำปฏิกิริยาสารผสมชนิดอื่นสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ราคาประหยัดและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านปลาสามสองพี่น้องบ้านหนองหลวง ต.เวียงชัย อ.เวียงชัย จ.เชียงราย ที่อนุเคราะห์ให้ปลาสำหรับการศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. (2561, ตุลาคม 19). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือน มกราคม-กันยายน พ.ศ. 2561. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/download/state_61/front%20page_sep.pdf.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2561, ธันวาคม 1). ข้อมูลการใช้ไบโอดีเซลประจำเดือน ปี 2561. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47882&filename=Biodiesel.
- [3] H. Omidvarborna, A. Kumar and D. Kim, "NOx emissions from lowtemperature combustion of biodiesel," *Fuel Process Technol*, vol. 140, pp. 113-118, 2015.
- [4] W. Roschata, T. Siritanon, T. Kaewpuang, B. Yoosuk and V. Promarak, "Economical and green biodiesel production process using river snail shells-derived heterogeneous catalyst and co-solvent method", *Bioresource Technology*, vol. 209, pp. 343-350, 2016.
- [5] I. Atadashi Musa, "The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process". *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, no.11, pp. 21-31, 2016.
- [6] M. Babaki, M. Yousefi, Z. Habibi, M. Mohammadi and J. Brask, "Effect of water, organic solvent and adsorbent contents on production of biodiesel fuel from canola oil catalyzed by various lipases immobilized on epoxy-functionalized silica as low cost biocatalyst," *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, vol. 120, pp. 93-99, 2015.

- [7] รุ่งทิพย์ ชัยเดช, “การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์,” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2557.
- [8] วุฒิชัย รสชาติ และ จาณียา ชันชะลิด, “กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, หน้า 94-106, 2561.
- [9] วุฒิชัย รสชาติ, เทอดเกียรติ แก้วพวง, บุญญวัฒน์ อยู่สุข, และ วินิช พรหมอารักษ์, “การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา,” ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7*, 12-14 พฤศจิกายน 2557.
- [10] W. Asri Kawentar and A. Budiman, “Synthesis of Biodiesel from Second-Used Cooking Oil,” *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 190-199, 2013.
- [11] N. Banerjee, R. Ramakrishnan and T. Jash, “Biodiesel production from used vegetable oil collected from shops selling fritters in Kolkata,” *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 161 – 165, 2014.
- [12] ปัญญา มณีจักร์, “การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่ร่วมกับถ่านกัมมันต์,” *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558*, 28 มกราคม 2558.
- [13] M. Charoenchaitrakool and J. Thienmethangkoon, “Statistical optimization for biodiesel production from waste frying oil through two-step catalyzed process,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 11, pp. 112-118, 2011.
- [14] J. Escobar, E. Lora, O. Venturini, E. Yanez, E. Castillo and O. Almazan, “Biofuels: Environment, technology and food security,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 16-17, pp. 1275-1287, 2009.
- [15] S. Martinez, R. Romero, R. Natividad and J. Gonzalez, “Optimization of biodiesel production from sunflower oil by transesterification using $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ and methanol,” *Catalysis Today*, vol. 220, no. 222, pp. 12-20, 2014.
- [16] LLC for the National Biodiesel Board Centrec Consulting Group. (2014, September 10) “Biodiesel demand for animal fat and tallow generates an additional revenue stream for the livestock industry”. [Online]. Available: <https://biodiesel.org/docs/default-source/news---supporting-files/animal-fats-and-tallow-bd-demand-impact-report.pdf?sfvrsn=2>
- [17] M. da Cunha, L. Krause, M. Moraes, C. Faccini, R. Jacques, S. Almeida, M. Rodrigues and E. Caramão, “Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale,” *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no.14, pp. 570-575, 2009.
- [18] D. Leung, X. Wu and M. Leung, “A review on biodiesel production using catalyzed transesterification,” *Applied Energy*. Vol. 87 no. 14, pp. 1083-1095, 2010.
- [19] อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์, ชลาลัย จันทร์ยอด, ปัทมาพร อินทร์พรหม และ วัฒนฤดี อึ้งมงคลชัย, “การผลิตไบโอดีเซลจากไขมันวัวด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส,” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, เล่มที่ 25, ฉบับที่ 11, หน้า 89-98, 2559.

- [20] A. Acir , M. Emin Canlı, İ. Ata and R. Çakıroğlu,
“Parametric optimization of energy and exergy
analyses of a novel solar air heater with grey
relational analysis,” *Applied Thermal
Engineering*, vol. 122, pp. 330-338, 2017.
- [21] F. Ma, L. Clements and M. Hanna, “The
effects of catalyst, free fatty acids and water
on transesterification of beef tallow,”
Transactions of the ASAE, vol. 41, pp. 1261-
1264, 1998.
- [22] K. Thiruvengadaravi, J. Nandagopal, V. Sathya
Selva Bala , S. Dinesh Kirupha, P. Vijayalakshmi
and S. Sivanesan, “Kinetic study of the
esterification of free fatty acids in non-edible
Pongamia pinnata oil using acid catalyst,”
Indian Journal of Science and Technology,
vol. 2, pp. 20–24., 2009.
- [23] M. Berrios, J. Siles, M. Martin and A. Martin, “A
kinetic study of the esterification of free fatty
acids (FFA) in sunflower oil,” *Fuel*, vol. 86, pp.
2383–2388., 2007.
- [24] สุภกร บุญยืน , สมลักษณ์ เรืองสุทธินฤภาพ , จิรดา
สิงขรัตน์ และ นภัทร ทวีกาญจน์, “อิทธิพลของกรด
ไขมันอิสระ ต่อการผลิตไบโอดีเซล,” *วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, เล่มที่ 18, ฉบับที่ 12,
หน้า 37-41, 2553.