KKU Engineering Journal

http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/

การทดสอบหาแผ่นขอบคมที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น

Verification for the optimum orifice plate for hydrodynamic cavitation biodiesel reactor

วีระยุทธ นนท์ชนะ*[1)] กุลเชษฐ์ เพียรทอง[1)] ประชาสันติ ไตยสุทธิ์[1)] และอิทธิพล วรพันธ์[2)]

Verayoot Nonchana*[1)], Kulachate Pianthong[1)], Prachasanti Thaiyasuit[1)] and Ittipon Worapun[2)]

[1)]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

[2)]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

Received July 2012

Accepted November 2012

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการทดสอบหาลักษณะแผ่นขอบคมที่เหมาะสม สำหรับถังปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยพื้นที่รูของแผ่นขอบคมต่อพื้นที่ของท่อ (β) อยู่ในช่วง 0 -0.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูอยู่ในช่วง 2 -5 มิลลิเมตร วัตถุดิบที่ใช้คือน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระร้อยละ 2.7 ทำปฏิกริยากับเมทานอลปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรและใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันด้านทางเข้าแผ่นขอบคม เท่ากับ 4.5 bar อุณหภูมิเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 45 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เพื่อนำมาวิเคราะห์หาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกส์เรโซแนนซ์ จากการทดลองพบว่าเมื่อ β เพิ่มขึ้นปริมาณการเกิดเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่การไหลมากขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ความดันเท่ากัน และที่ช่วง βใกล้เคียงกันแผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูมากกว่า จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า นอกจากนี้ในกรณีที่แผ่นขอบคมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อจำนวนรูของแผ่นขอบคมมากขึ้น จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นจากการศึกษานี้แผ่นขอบคมที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นได้ดีที่สุด เพื่อให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 96.5 ตามมาตรฐานของการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์คือ แผ่นขอบคมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 15 รู โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นที่สุดคือ 15 นาที

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล น้ำมันพืชใช้แล้ว ไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น แผ่นขอบคม

Abstract

This research article presents the verification testfor the optimum orifice plate configuration for hydrodynamic cavitation biodiesel reactor.The total area of orifice per overall pipe area (β) variesin the ranges of 0 - 0.12, while the orifice holes diameter are between 2 - 5 mm. The number of holes is varied depending on the β value. The raw

*Corresponding author. Tel.: +66-4535-3309; fax: +66-4535-3308

Email address: v.nonchana@gmail.com

material used in this study is the wasted cooking oil having free fatty acid of 2.7 %. Methanol of 20 % v/v and the catalyst concentration of 1% w/w of potassium hydroxyl are used. The inlet pressure of the orifice plate is fixed at 4.5 bars and the initial temperature is 45 °C. The reactiontimeis 60 minutes in each test. The sample is collected every 5 minutes to analyze for the percentage of methyl ester by the NMR analyzer. From results, the increase of β enhances the higher percentage of methyl ester conversion, due to the higher flow area and hence the higher reaction rate. Moreover, at the same β range, orifice plate which has more number of holes will provide better reaction rate. The optimum orifice plate for 96.5 % methyl ester according to the commercial standard is the 15 holesof 2 mm. diameter, with 15 minutes of reaction time.

Keywords : Biodiesel, Used cooking oil, Hydrodynamic cavitation, Orifice

1. บทนำ

จากปัญหาเรื่องราคาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อทุกภูมิภาคทั่วโลก นอกจากนี้ยังมีความกังวลเกี่ยวกับเรื่องมลพิษจากการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) จึงได้มีการศึกษาและค้นคว้าหาพลังงานทางเลือกเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยมุ่งเน้นไปที่พลังงานทางเลือกที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด รวมทั้งมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ทั้งนี้ในกลุ่มพลังงานทางเลือกทั้งหลาย พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจในขณะนี้ เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันจากพืชหรือสัตว์ [1] โดยข้อดีของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์พบว่าปริมาณมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์ที่ปล่อยออกมา ได้แก่ ค่าควันดำและคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง [2] แต่ถึงอย่างไรก็ตามน้ำมันไบโอดีเซลก็ยังมีข้อด้อยอยู่บ้างในเรื่องคุณสมบัติการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel properties) โดยเฉพาะค่าความหนืดของน้ำมันที่มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจะส่งผลต่อการสเปร์ยของน้ำมันเชื้อเพลิงในหัวฉีดรวมไปถึงค่าความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลที่ทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่ามีจุดไหลเทต่ำกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งจะส่งผลทำให้การสตาร์ทเครื่องยนต์ติดได้ยากเมื่อสภาพอากาศเย็น และปริมาณ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จากการเผาไหม้ที่มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล [3] อย่างไรก็ตามน้ำมันไบโอดีเซลก็ยังได้รับความสนใจในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมในด้านการเป็นพลังงานที่สะอาด (Clean energy) และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมถึงการเป็นพลังงานงานที่ผลิตได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติ

ในปัจจุบันการผลิตและการนำน้ำมันไบโอดีเซลมาใช้งานยังประสบกับปัญหาหลายอย่างด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาด้านกระบวนการผลิต กล่าวคือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (ปั่นผสม) นั้นต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานและใช้พลังงานที่สูง เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของกระทรวงพลังงาน คือมีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ไม่ต่ำกว่า 96.5 [4] โดยพบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบดั้งเดิมขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 1 ชั่วโมง และใช้พลังงาน 500 W-h/kg ต่อรอบการผลิตซึ่งในกระบวนการผลิตที่ใช้เวลาและพลังงานมากก็จะส่งผลต่อต้นทุนของน้ำมันไบโอดีเซลด้วยและเมื่อเปรียบเทียบวิธีการผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการผลิตแบบอื่นๆ พบว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น (Hydrodynamic cavitation, HC)ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง30 นาทีและใช้พลังงาน 183W-h/kg ต่อรอบการผลิตในขณะที่การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบอัลตร้าโซนิคคาวิเทชั่น (Ultrasonic Cavitation, UC) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง10 นาที และใช้พลังงาน 250 W-h/kg ต่อรอบการผลิต [5] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า Cavitation yield (C_y) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ ยังพบว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นจะให้ค่า C_y มากกว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ อัลตร้าโซนิคคาวิเทชั่น

ถึง 10 เท่าด้วยกัน [6] เพื่อแก้ปัญหาด้านกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานและใช้พลังงานต่อรอบการผลิตที่สูงในปัจจุบันจึงได้มีการนำเอาวิธีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นและอัลตร้าโซนิคคาวิเทชั่นมาช่วยในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและช่วยทำให้ผลของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (Yield) มีค่าสูงขึ้นด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาอัลตร้าโซนิคคาวิเทชั่นมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชั่นซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันสบู่ดำ จากผลการทดลองพบว่าสามารถเร่งการทำปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นและได้ค่าร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้สูงขึ้น [7-9] แต่เมื่อเปรียบเทียบในด้านการขยายขนาดเพื่อการผลิตไบโอดีเซลในปริมาณมากๆแล้ว พบว่าถังปฏิกรณ์แบบอัลตร้าโซนิคคาวิเทชั่นซึ่งใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคเป็นแหล่งพลังงานและส่งผ่านให้ของเหลวเพื่อทำให้เกิดคาวิเทชั่นโดยคลื่นอัลตร้าโซนิคที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์ทางเคมี จะใช้คลื่นความถี่ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 10-100 kHz และเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นไปยังของเหลว ของเหลวจะส่งผ่านคลื่นดังกล่าวไปยังถังปฏิกรณ์ด้วย ถ้าถังปฏิกรณ์ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นพ้อง (Resonance) ของคลื่นอัลตร้าโซนิค ถังปฏิกรณ์ก็จะเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นเรื่องการขยายขนาดถังปฏิกรณ์แบบอัลตร้าโซนิคจึงมีข้อจำกัด [10] ในขณะที่ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นนั้นสามารถขยายและปรับเปลี่ยนรูปทรง ได้โดยไม่มีปัญหาเพราะใช้การไหลของของไหลผ่านแผ่นขอบคม (Orifices plate) เพื่อทำให้เกิดคาวิเทชั่น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงให้ความสนใจที่จะนำถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล จากข้อดีของถังปฏิกรณ์ดังที่กล่าวมา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการนำเอาไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นแบบแผ่นขอบคมมาช่วยในการผลิตไบโอดีเซลพบว่าเมื่อจำนวนรูของแผ่นขอบคมมากขึ้น ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นสูงขึ้น แต่ยังขาดข้อมูลและการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การไหลเส้นผ่าศูนย์กลางของรูแผ่นขอบคม และจำนวนรูของแผ่นขอบคม ต่อการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นเพื่อให้ได้ปริมาณร้อยละของไบโอดีเซลที่ได้สูงที่สุด ซึ่งจะได้นำเสนอในบทความนี้

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้คือน้ำมันพืชใช้แล้ว(Waste cooking oil) ที่เก็บรวบรวมจากร้านอาหารและจากบ้านเรือนของประชาชนในเขตจังหวัดอุบลราชธานีและเพื่อเป็นการควบคุมปัจจัยจากสารตั้งต้นในการทดลอง น้ำมันพืชใช้แล้วที่รวบรวมมาได้จะถูกนำมาเทรวมกันและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้จะถูกควบคุมให้มีค่ากรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ไม่เกิน 3% ค่ากรดไขมันอิสระหาโดยวิธีการไทเทรตตามมาตรฐาน ASTM (ASTM 3669D) โดยนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาทำการไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์0.1 นอร์มอลเพื่อหาค่ากรดไขมันอิสระ และคำนวณหาค่ากรดไขมันอิสระได้จากสมการที่ 1

$$\%FFA = \frac{V_{KOH} \times 56.1 \times 0.1}{m_{Oil} \times 2.19} \quad (1)$$

โดยที่ V_{KOH} คือปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร) และ m_{oil} คือน้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (กรัม)

จากการคำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่ากรดไขมันอิสระเท่ากับร้อยละ 2.7 ซึ่งสามารถใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เลยในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น

ในส่วนของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แบบ Commercial grade ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 และร้อยละ 90 ตามลำดับ

2.2 เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น

เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบแผ่นขอบคม โดยใช้ปั๊มเป็นอุปกรณ์เพิ่มความดันให้ของไหล ก่อนที่จะให้ของไหลไหลผ่านแผ่นขอบคมและไหลย้อนกลับเข้าสู่ถังพัก และถูกดูดโดยปั๊มต่อไป ความดันของของเหลวที่ออกจากปั๊มสามารถปรับได้โดยการปรับความเร็วรอบของปั๊ม แทนการใช้วาล์ววบายพาส

(By-pass valve) ในการปรับความดันเหมือนงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 11, 12] ทั้งนี้เพราะการปรับความดันโดยวิธีปรับความเร็วรอบ ทำให้ลดการสึกหรอและลดภาระการทำงานของชิ้นส่วนต่างๆในระบบ [13] และสามารถลดผลกระทบจากการเกิดคาวิเทชั่นในวาล์วบายพาส ซึ่งช่วยให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยลงนอกจากนี้ยังใช้ปั๊มหอยโข่งแบบแรงดันสูง (Multistage centrifugal pump) เป็นอุปกรณ์เพิ่มแรงดันให้กับของเหลวก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ โดยปั๊มที่ใช้เป็นแบบ Vertical multistage pump รุ่น MV - 8 มีแรงดันใช้งานสูงสุด 8 bar (น้ำเป็นสารทำงาน) ควบคุมอัตราการไหลและความดัน โดยการปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (Invertors) ซึ่งจะดูดสารตั้งต้นจากถังพักเป็นถังสเตนเลสเกรด SUS304 ปริมาตร 50 ลิตรซึ่งทำหน้าที่ในการพักของเหลวก่อนเข้าปั๊ม และรองรับของเหลวที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ รวมทั้งเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของของเหลว และสารตั้งต้นจากปั๊มจะถูกส่งไปยัง ชุดถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิคแบบแผ่นขอบคม เป็นส่วนที่สร้างการเกิดคาวิเทชั่น ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นท่อที่ติดตั้งแผ่นขอบคมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตรและด้านท้ายของถังปฏิกรณ์จะมีวาล์วควบคุมแรงดันทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันด้านท้ายน้ำ โดยการควบคุมอัตราการไหลของของเหลวก่อนเข้าสู่ถังพัก โดยแผนผังของเครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นแสดงดังรูปที่ 1

2. 3 การดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละที่ได้ของน้ำมันไบโอดีเซล กับขนาดและจำนวนรูของแผ่นขอบคม

ทั้งนี้ในการออกแบบการทดลองจะทำการอ้างอิงโดยใช้ค่า β (สัดส่วนของพื้นที่ของรูแผ่นขอบคมรวมต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-5

$$\beta = \frac{A_{orifice}}{A_{pipe}} \tag{2}$$

โดยที่

$$A_{orifice} = \frac{\pi D^2{}_{orifice}}{4} \times n \tag{3}$$

$$A_{orifice} = \frac{\pi D^2{}_{pipe}}{4} \tag{4}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\beta = \left(\frac{D_{orifice}}{D_{pipe}} \right)^2 \times n \tag{5}$$

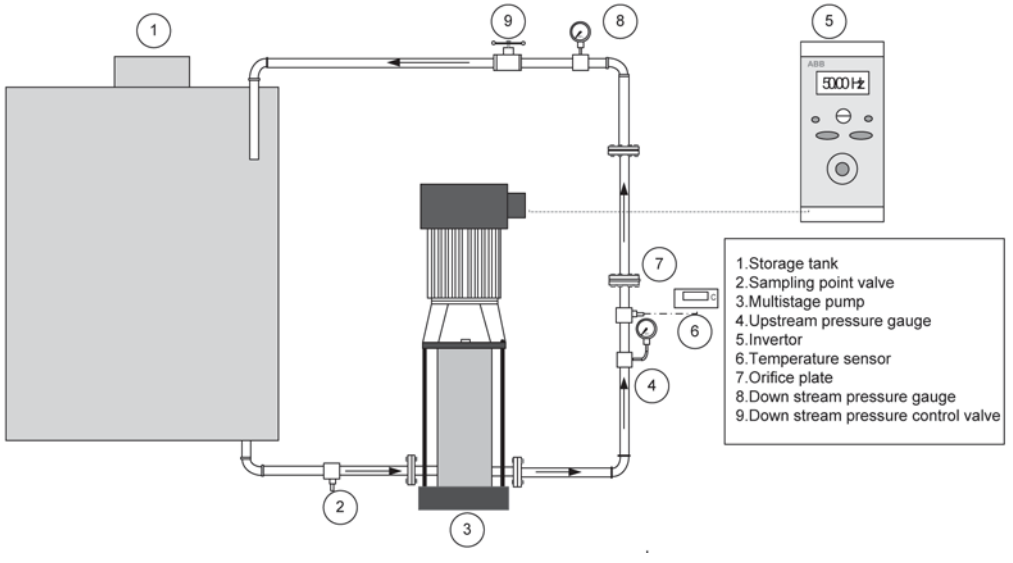
โดยที่ A_{pipe} คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ

$A_{orifice}$ คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นรูขอบคมรวม

D_{pipe} คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$D_{orifice}$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขอบคม

n คือจำนวนรูของแผ่นขอบคม

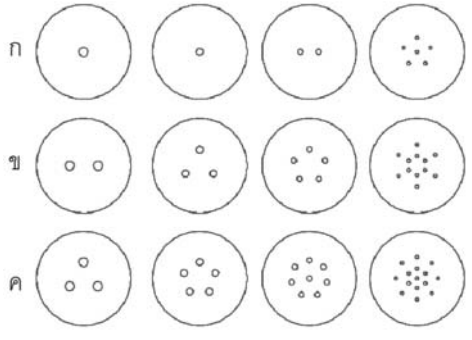


รูปที่ 1 ผังชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น (Hydrodynamic cavitation)

ทั้งนี้ในการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยแบ่งช่วงค่า β ออกเป็น 3 ช่วงคือ $\beta < 0.04$, $0.04 < \beta < 0.08$ และ $0.08 < \beta < 0.12$ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผนขอบคมเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรตามลำดับโดยมีจำนวนรูดังแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะของแผ่นขอบคมแสดงดังในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนรูของแผ่นขอบคมที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูและ β ต่างๆ

	พื้นที่รูของแผ่นขอบคมต่อพื้นที่ท่อ (β)	เส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นขอบคม (มม.)			
		5	4	3	2
ก)	$\beta < 0.04$	1	1	2	6
ข)	$0.04 < \beta < 0.08$	2	3	5	12
ค)	$0.08 < \beta < 0.12$	3	5	8	15



รูปที่ 2 แผ่นขอบคมที่ใช้ในการทดลองจำแนกตามช่วงของ β ก) < 0.04 ข) $0.04 < \beta < 0.08$ ค) $0.08 < \beta < 0.12$

2.3.1 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น

ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากเครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น เริ่มจากเตรียมน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวน 10 ลิตร แล้วนำไปกรองเอาเศษอาหารที่ติดมากับน้ำมันออกและนำไปต้มให้น้ำมันพืชใช้แล้วมีอุณหภูมิ 45°C (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเริ่มต้น) จากนั้นทำการติดตั้งแผ่นขอบคมที่ต้องการศึกษา (รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1) บนหน้าแปลนของชุดถังปฏิกรณ์ และเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช และร้อยละ 20 โดยปริมาตรของน้ำมันพืชตามลำดับ (โดยการละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลจนเป็นเนื้อเดียวกัน) จากนั้นจึงเทลงไปผสมกับน้ำมันพืชใช้แล้วในถังพัก ทำการเปิดระบบปั๊มปรับตั้งค่าความดัน ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ คือความดันทางเข้า (P_u) 4.5 bar หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันครั้งละ 10 มล. ทุกๆ 5 นาทีลงในหลอดเก็บตัวอย่างจนครบ 60 นาที และนำไปแช่ในอ่างน้ำแข็งเพื่อหยุดการทำปฏิกิริยา จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมันที่เก็บไว้ไปวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละไบโอดีเซลที่ได้ (Yield) ในแต่ละตัวอย่าง โดยในการวิเคราะห์นั้นจะทำการดูดตัวอย่างที่อยู่ชั้นของไบโอดีเซล ที่อยู่เหนือชั้นของกลีเซอรีนไปทำการวิเคราะห์

2.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซล

ในการวิเคราะห์หาค่าร้อยละของปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค NMR[14] (Nuclear Magnetic Resonance) ด้วยเครื่อง สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น DMX 300 MHz และใช้ Chloroform-D ($CDCl_3$) เป็นตัวทำละลาย สำหรับการวิเคราะห์จะนำตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 0.2 มล.มาละลายกับตัวทำละลายปริมาณ 0.4 มล. จากนั้นย้ายไปยังหัววัดของเครื่อง NMR และทำการบันทึกสเปคตรัมที่อ่านได้ภายใต้อุณหภูมิห้อง ด้วย Tetramethylsilane (TMS) รวมทั้งบันทึกค่า Relaxation time ของแต่ละตัวอย่าง โดยการร้อยละของไบโอดีเซลที่ได้จะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของสัญญาณที่ 3.68 ppm (ไฮโดรเจนกลุ่ม methoxy ในเมทิลเอสเตอร์) และ 2.30 ppm (ไฮโดรเจนจากกลุ่มเมทิลีนของอนุพันธ์ของกรดไขมันทั้งหมด) ร้อยละของปริมาณไบโอดีเซล สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$C = 100 \times \frac{3A_{ME}}{2A_{CH_2}} \quad (6)$$

โดยที่ C คือ ร้อยละของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเมทิลเอสเตอร์ (ร้อยละของไบโอดีเซลที่ได้)

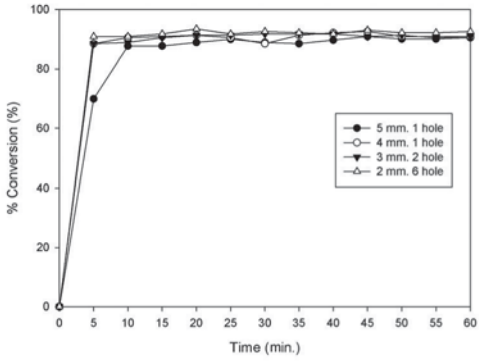
A_{ME} คือ พื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนของเมทิลเอสเตอร์

A_{CH_2} คือ พื้นที่ใต้กราฟของโปรตอนของเมทิลลีน

3.ผลการทดลองและวิจารณ์

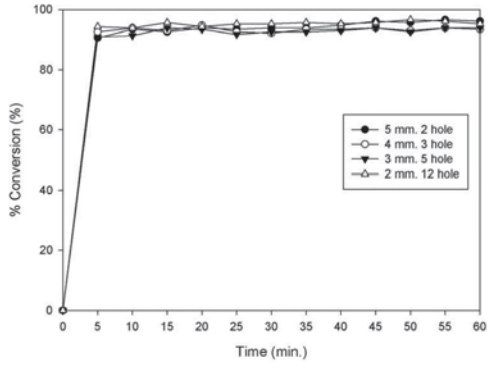
3.1 ผลของพื้นที่รูของแผ่นขอบคมต่อพื้นที่ของท่อ (β) ต่อร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล

จากผลการวิเคราะห์หาร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลในแต่ละช่วง β สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลในแต่ละช่วงเวลาของการทำปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 3-5



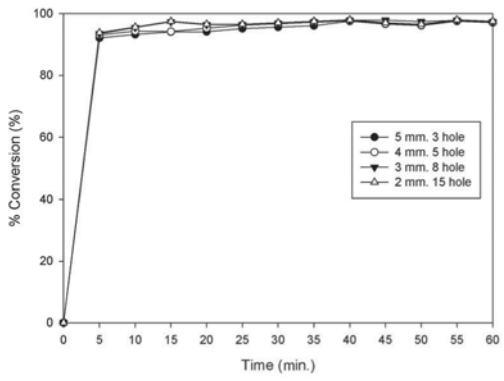
รูปที่ 3 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล ของแผ่นขอบคมในช่วง $\beta < 0.04$

จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล ของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น โดยใช้เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตรและ KOH ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแผ่นขอบคมในช่วง $\beta < 0.04$ ซึ่งเป็นแผ่นขอบคมที่มีพื้นที่การไหลใกล้เคียงกันพบว่าแผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูมากกว่า จะมีร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าแผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูน้อยกว่า โดยพบว่าร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลสูงสุดประมาณ ร้อยละ 92 โดยใช้เวลาถึง 60 นาที



รูปที่ 4 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล ของแผ่นขอบคมในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$

จากรูปที่ 4 คือร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล ของแผ่นขอบคมในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$ นั้นมีแนวโน้มเดียวกับผลของแผ่นขอบคมในช่วง $\beta < 0.04$ แต่มีค่าสูงกว่าทุกๆ แผ่น โดยมีร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลสูงสุดประมาณร้อยละ 96.6 จากแผ่นขอบคมแบบ 2 มิลลิเมตร 12 รู ที่เวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที



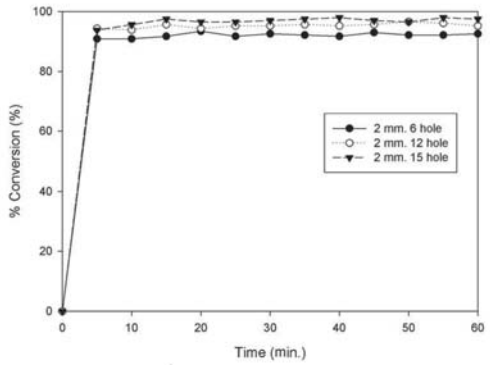
รูปที่ 5 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล ของแผ่นขอบคมในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$

และรูปที่ 5 ซึ่งแสดงเป็นร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลของแผ่นขอบคมในช่วง$0.08 < \beta < 0.12$ นั้นมีแนวโน้มเดียวกับผลของแผ่นขอบคมในช่วง β อื่นๆ แต่มีร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าช่วงอื่นๆ ทุกค่า และพบว่ามีค่ามากกว่าร้อยละ 96.5 ในทุกๆ แผ่นขอบคม โดยแผ่นขอบคมแบบ 2 มิลลิเมตร 15 รู ใช้เวลาสั้นที่สุดคือ 15 นาที และพบว่าร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลเข้าสู่ภาวะสมดุลในระยะเวลา 15- 20 นาที

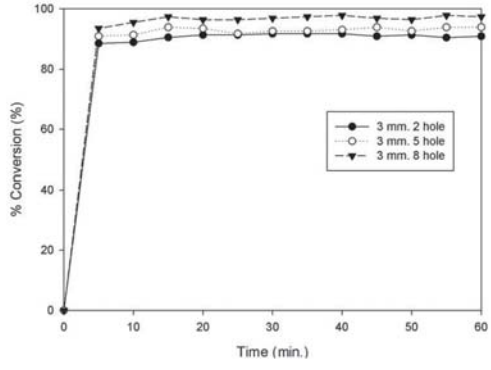
จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่ม β มากขึ้น ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลมีแนวโน้มสูงขึ้นและใช้เวลาสั้นลง ทั้งนี้สาเหตุที่แผ่นขอบคมที่มี β ใกล้เคียงกันถ้ามีจำนวนรูมากกว่าจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่านั้น เพราะว่าลำของของไหลที่ออกจากแผ่นขอบคมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า จึงมีโมเมนตัมน้อยกว่าจึงทำให้ระยะการเกิดคาวิเทชั่นสั้นกว่า รวมทั้งจำนวนรูที่มากกว่าทำให้พื้นที่ในการเกิดคาวิเทชั่นมีการกระจายตัวที่ดีกว่า ทำให้สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยที่มีพื้นที่การไหลใกล้เคียงกัน

3.2 ผลของจำนวนรูของแผ่นขอบคมต่อ ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซล

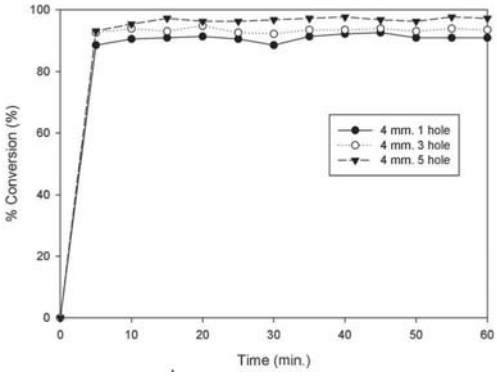
จากผลร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NMR เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ กับจำนวนรูของแผ่นขอบคมแต่ละขนาดจะได้ดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9



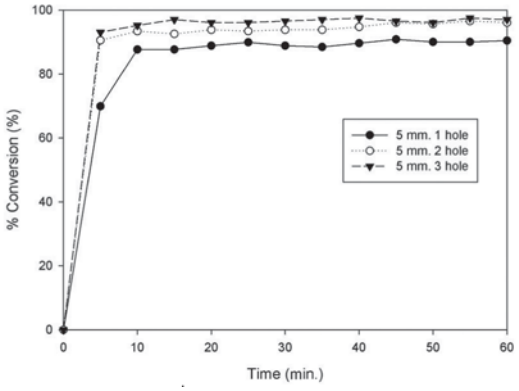
รูปที่ 6 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลของแผ่นขอบคมขนาด D เท่ากับ 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 7 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลของแผ่นขอบคมขนาด D เท่ากับ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 8 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลของแผ่นขอบคมขนาด D เท่ากับ 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลของแผ่นขอบคมขนาด D เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังรูปที่ 6-9 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบแผ่นขอบคมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันเมื่อจำนวนรูของแผ่นขอบคมมากขึ้นจะให้ร้อยละไบโอดีเซลที่ได้สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Amit Pal *et al.* [11] ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรู จะทำให้พื้นที่การไหลของแผ่นขอบคมมากขึ้นดังในสมการที่ 5 จึงทำให้ของไหลในระบบเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้นในระยะเวลาเท่ากันเมื่อเทียบกับแผ่นขอบคมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันแต่มีจำนวนรูน้อยกว่า

4.สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการศึกษาหาแผ่นขอบคมที่เหมาะสม สำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น ได้เป็น 5 ข้อดังนี้

1) เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่นสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดี โดยสามารถทำให้ร้อยละผลที่ได้ของไบโอดีเซลมากกว่า 96.5 โดยใช้เวลา 15 นาที

2) เมื่อเปรียบเทียบแผ่นขอบคมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดรวมใกล้เคียงกัน เมื่อมีจำนวนจำนวนรูมากกว่า จะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นได้ดีกว่า

3) เมื่อเปรียบเทียบแผ่นขอบคมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน แผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูมากกว่า จะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นได้ดีกว่า

4) แผ่นขอบคมที่มีค่า β มากกว่าจะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นได้ดีกว่า

5) การทดลองนี้พบว่าแผ่นขอบคมที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิคคาวิเทชั่น ในช่วง $\beta < 0.12$ คือ แผ่นขอบคมขนาดรู 2 มิลลิเมตรจำนวน 15 รู

ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแยกชั้นและล้างน้ำได้ตามปกติ โดยที่ร้อยละของเอสเทอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และในการออกแบบแผ่นขอบคม ต้องออกแบบให้แผ่นขอบคม อยู่ในช่วงที่มีการเกิดคาวิเทชั่นเท่านั้น ถ้าเพิ่มช่วงของ β ขึ้นไปอีกอัตราการเร่งปฏิกิริยาเคมีอาจสูงขึ้น จนกระทั่งแผ่นขอบคมอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดคาวิเทชั่น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน (RSEC) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] T K. Biodiesel - Alternative fuel makes inroads but hurdles remain. INFORM 7. 1996: 801-29.

[2] Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology. 1999 ;70(1): 1-15.

[3] Ayhan D. Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy Policy. 2007; 35(9): 4661-70.

[4] Department of Energy Business, The Preferences and quality of the Biodiesel methyl esters of fatty acids. Dapartment of Energy Business Amounuement 2000; 124: 7-10 (In Thai).

[5] Ji J, Wang J, Li Y, Yu Y, Xu Z. Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. Ultrasonics. 2006; 44, Supplement(0): e411-e4.

[6] Kelkar MA, Gogate PR, Pandit AB. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. Ultrasonics Sonochemistry. 2008; 15(3): 188-94.

[7] Worapun I, Pianthong K, Thaiyasuit P. Optimization of biodiesel production from crude palm oil using ultrasonic irradiation assistance and response surface methodology. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2012; 87(2): 189-97.

[8] Worapun I, Pianthong K, Thaiyasuit P. Two step biodiesel Production from Crode *Jatropha curcas* L.Oil using Ultrasonic Irradiation Assisited. Journal of Oleo Science. 2012; 61(4).

[9] Worapun I, Thaiyasuit P, Pianthong K. Ultrasonic Irradiation Assisted Synthesis of Biodiesel from Crude Palm Oil Using Response Surface Methodology. SWU Engineering Journal. 2011; 6(1): 16-3.

[10] Gogate PR, Pandit AB. Sonochemical reactors: scale up aspects. Ultrasonics Sonochemistry. 2004; 11(3-4): 105-17.

[11] Pal A, Verma A, Kachhwaha SS, Maji S. Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. Renewable Energy. 2010; 35(3): 619-24.

[12] Gogate PR, Mujumdar S, Pandit AB. Sonochemical reactors for waste water treatment: comparison using formic acid degradation as a model reaction. Advances in Environmental Research. 2003; 7(2): 283-99.

[13] Hellmann DH, Rosenberger H, Tusel EF. Saving of energy and cost in seawater desalination with speed controlled pumps. Desalination. 2001; 139(1-3): 7-19.

[14] Gelbard G, Bṙs O, Vargas R, Vielfaure F, Schuchardt U. 1H nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol. Journal of the American Oil Chemists' Society. 1995; 72(10): 1239-41.