

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง
ของไส้ท่อผสมแบบสถิตสำหรับกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์
EFFECT OF LENGTH-TO-DIAMETER RATIO OF MIXING ELEMENTS
FOR METHYL ESTER PRODUCTION PROCESS

วันรับ: 5 มีนาคม 2563
วันแก้ไข: 9 เมษายน 2563
วันตอบรับ: 15 เมษายน 2563

กฤษกร พงศ์รักธรรม^{1*} และ กฤษ สมนึก¹
Kritsakorn Pongraktham^{1*} and Krit Somnuk¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding author e-mail: kritsakorn.p@hotmail.com



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างท่อผสมแบบสถิตหลายรูปแบบด้วยระบบการพิมพ์สามมิติ โดยศึกษาความดันสูญเสียและความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จากการไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตสองรูปแบบ คือ Kenics Static Mixer (KSM) และ Lightnin Static Mixer (LSM) ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยเปรียบเทียบผลกับการไหลผ่านท่อเปล่า (Plug Flow Reactor: PFR) จากการศึกษาความดันสูญเสียของการไหลผ่านท่อผสมแบบต่างๆ พบว่า ท่อผสมแบบสถิตรูปแบบที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.0 จะต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่าท่อผสมแบบเดียวกันแต่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า อีกทั้งท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM ต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่า KSM และ PFR เพื่อเอาชนะความดันตกคร่อมระหว่างท่อผสม ส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอลเท่ากับ 23.81 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11.8 g.l⁻¹ ที่อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 25 l.h⁻¹ และมีอุณหภูมิเริ่มต้น 50°C พบว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลงตามอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นของท่อผสม โดยความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 45.04 wt.% เมื่อสารผสมไหลผ่านท่อผสมรูปแบบ LSM ตามมาด้วย KSM และ PFR สำหรับการทดลองเบื้องต้นนี้การขึ้นรูปไส้ท่อผสมแบบสถิตด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติสามารถช่วยลดต้นทุนในการจัดสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบสถิตชนิดโลหะ และสามารถใช้เพื่อผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชนได้

คำสำคัญ: เมทิลเอสเทอร์, ท่อผสมแบบสถิต, น้ำมันปาล์ม, อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง



Abstract

The objective of this research was to design and form the static mixer reactors by the 3D-printer. The pressure drop and purities of methyl ester was then studied when the fluid flowed through Kenics Static Mixer (KSM) and Lightnin Static Mixer (LSM). The Length-to-Diameter Ratios (L/D) of mixing elements in the tube were studied the conversion of methyl esters to compare with the results from the Plug Flow Reactor (PFR). The results showed that the both types of static mixer with 1.0 of L/D ratio required a highest pumping power requirement to overcome the pressure drop. Moreover, the pumping power requirement in the LSM type required more than KSM and PFR types. In the biodiesel production by using the 3D-printed static mixer reactors, they were used to produce the methyl ester from Refined Palm Oil (RPO) under the condition was 23.81 vol.% methanol and 11.8 g.l⁻¹ KOH at 25 l.h⁻¹ flow rate and 50°C initial temperature of RPO. The results showed that the methyl ester purities had increased when the L/D ratio of mixing elements decreased. For preliminary experiment, the methyl ester purity of 45.04 wt.% obtained when LSM static mixer type was used followed by KSM and PFR types, respectively. Therefore, the use of 3D-printed static mixer can reduce the cost of construction when compared with a metal static mixer reactor, and can be used for biodiesel production in the community scale.

Keywords: Methyl Ester, Static Mixer, Palm Oil, Length-to-Diameter Ratio



บทนำ

จากปัญหาราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี ทั้งนี้ในประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบเพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอกับความต้องการในปัจจุบันจากการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนมาใช้แทนน้ำมันปิโตรเลียมพบว่า ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ โดยที่ไบโอดีเซลนั้นมีคุณสมบัติในการเผาไหม้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ (Somnuk, Prasit, Phanyusoh, & Prateepchaikul, 2018) การผลิตไบโอดีเซลทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยนำน้ำมันพืช

เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันดอกทานตะวัน รวมไปถึงน้ำมันทอดใช้แล้ว มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบในน้ำมัน เช่น ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ให้เปลี่ยนเป็นเอสเทอร์ (Ester) (Leung, Wu, & Leung, 2010) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีทั้งกระบวนการแบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำให้ต้องใช้เงินลงทุน แรงงาน และพื้นที่ติดตั้งที่มากกว่า อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระบวนการแบบกะนั้นก็มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ (Thakur, Vial, Nigam, Nauman, & Djelveh, 2003) ในส่วนของกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) แต่หากเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต (Static Mixer) มีข้อดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบ CSTR คือใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่า สิ้นเปลืองพลังงานและใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า (Ghanem, Lemenand, Della Valle, & Peerhossaini, 2014)

โดยลักษณะหรือรูปแบบของท่อผสมของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตนั้นมีความสำคัญต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากท่อผสมที่มีรูปแบบซับซ้อนจะช่วยเพิ่มความรุนแรงในการผสม (Mixing Intensity) ปฏิกิริยาจึงดำเนินไปข้างหน้าได้รวดเร็วมากขึ้น (Niseng, Somnuk, & Prateepchaikul, 2014) ลักษณะการผสมภายในท่อผสมแบบสถิตชนิดเกลียว เมื่อของไหลไหลผ่านเกลียวแต่ละอัน ของไหลจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน หลังจากนั้นสารผสมจะไหลผ่านส่วนโค้งของเกลียวเกิดการหมุนตัว และไหลกลับมายังศูนย์กลางท่อหรือไหลหมุนในแนวรัศมี ความโค้งของเกลียว เมื่อของไหลไหลผ่านแต่ละเกลียวจะทำให้ทิศทางการไหลของของไหลสลับกันไประหว่างซ้ายและขวาจนของไหลผสมกันได้สมบูรณ์ขึ้น (Ghanem, Lemenand, Della Valle, & Peerhossaini, 2014) มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผสมวัฏภาคต่างๆ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตหลายรูปแบบอย่างกว้างขวางเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดเวลาในการผสมให้สั้นลง เช่น Sungwornpatansakul, Hiroi, Nigahara, Jayasinghe, & Yoshikawa (2013) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันข้าวโพดด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่างกันสองแบบ คือ แบบใบกวนเปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่องซึ่งใช้ท่อผสมแบบสถิตแบบบิดเกลียว โดยกำหนดให้อัตราส่วนโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์อยู่ที่ 4.3 : 1 กับ 6 : 1 จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อดูขนาดของหยดเมทานอลในน้ำมันและใช้เทคนิค Gas Chromatography Equipped with Flame Ionization Detector (GC-FID) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซล พบว่า เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตมีประสิทธิภาพที่ดีในการผสมระหว่างน้ำมันกับเมทานอล จนทำให้หยดของเมทานอลมีขนาดเล็กกระจายตัวในน้ำมันพืชได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบใบกวน ซึ่งมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมและลดระยะเวลาการผสมในปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลได้

ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตจึงคุณภาพสูงกว่าการใช้แบบใบกวน และ Meng et al. (2016) ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลความหนืดสูง (High-viscosity Fluid) ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ Kenics Static Mixer (KSM) เปรียบเทียบกับท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ Lightnin Static Mixer (LSM) โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) พบว่าท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM ทำให้ของไหลผสมเข้าด้วยกันได้ดีกว่าท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ KSM ที่เงื่อนไขการไหลเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความรุนแรงในการผสมได้โดยการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ให้กับของไหล

ในงานวิจัยนี้เสนอการขึ้นรูปไส้ท่อผสม (Mixing Element) ประเภท LMS และ KSM ด้วยระบบการพิมพ์สามมิติ (3D-printer) เนื่องจากปัญหาของไส้ท่อผสมเกรดอุตสาหกรรมที่สั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งขึ้นรูปจากโลหะสแตนเลสนั้นมีราคาสูง และรูปแบบของไส้ท่อผสมที่มีความซับซ้อนขึ้นรูปได้ยาก การขึ้นรูปไส้ท่อผสมด้วยการพิมพ์สามมิติจึงช่วยลดต้นทุนในการจัดซื้ออุปกรณ์ โดยมีต้นทุนในการจัดสร้างประมาณ 120 บาทต่อเมตร ซึ่งมีราคาถูกกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศถึง 1,000 เท่า อีกทั้งยังขึ้นรูปได้ง่ายกว่า มีขนาดเล็ก เหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชนมากกว่า และศึกษาการประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่กำลังการผลิตขนาดเล็ก รวมทั้งน้ำมันพืชที่ใช้แล้วซึ่งรวบรวมได้จากชุมชนบริเวณโดยรอบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตประเภท LMS, KSM และ PFR ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตจากระบบการพิมพ์สามมิติถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจากกลีเซอรอลเป็นเมทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง



วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างท่อผสมแบบสถิตหลายรูปแบบด้วยระบบการพิมพ์สามมิติซึ่งเหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในระดับชุมชน
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตสองรูปแบบ คือ รูปแบบ KSM และรูปแบบ LSM โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้ท่อผสม (L/D) ต่างกัน ที่อัตราการไหลตั้งแต่ 12 L.h^{-1} จนถึง 60 L.h^{-1}
3. เพื่อศึกษาความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตที่สร้างจากระบบการพิมพ์สามมิติ เปรียบเทียบกับการไหลผ่านท่อกลวง (PFR) ที่กำลังการผลิต 25 L.h^{-1}



วิธีดำเนินการวิจัย

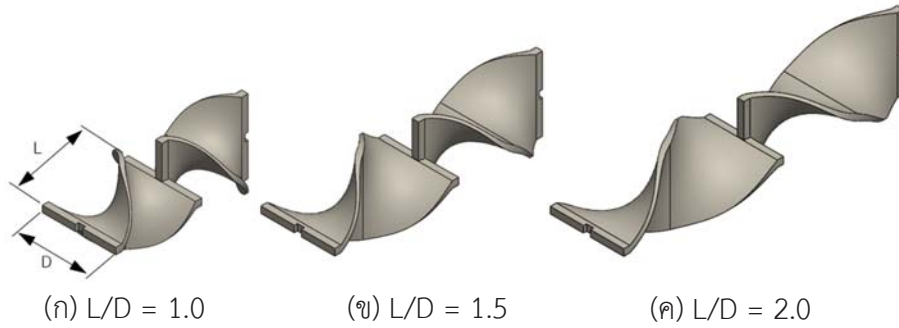
วัสดุและอุปกรณ์

น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (Refined Palm Oil) ถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอผสมแบบสติกที่สร้างจากระบบการพิมพ์สามมิติ ซึ่งน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mean Molecular Weight) เท่ากับ 840.7 g.mol^{-1} นั้นประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ 97.55 wt.% ไดกลีเซอไรด์ 1.87 wt.% โมโนกลีเซอไรด์ 0.35 wt.% และกรดไขมันอิสระ 0.23 wt.% มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.90 ที่อุณหภูมิ 30°C ส่วนสารเคมีอื่นๆ ในปฏิกิริยาประกอบด้วยเมทานอล (MeOH) ความบริสุทธิ์ 99.8% และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความบริสุทธิ์ 95% ซึ่งจะถูเตรียมให้เป็นสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ (CH_3KO) ก่อนการทำปฏิกิริยา

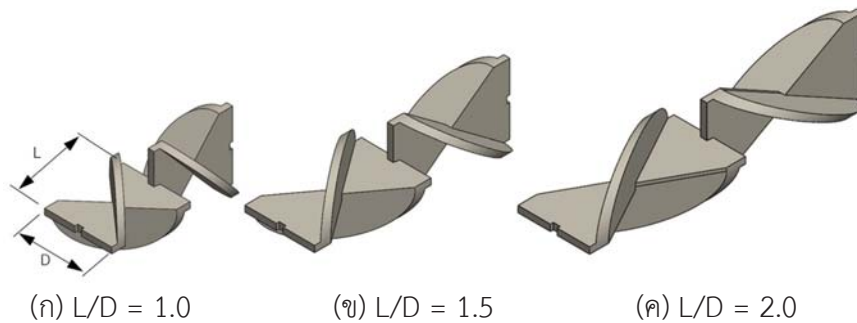
เครื่องปฏิกรณ์ทอผสมแบบสติก

รูปทรงของไส้ทอผสมแบบสติกนั้นถูกเขียนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และขึ้นรูปทีละชั้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (Model: Creator pro, FlashForge) ใช้พลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene: ABS) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ในการขึ้นรูปทอผสม โดยใช้อุณหภูมิของหัวฉีดเท่ากับ 235°C และอุณหภูมิฐานรองพิมพ์เท่ากับ 100°C จากนั้นจึงประกอบไส้ทอแต่ละชั้นด้วยกาวเพื่อสร้างทอผสมแบบสติกสองรูปแบบคือ KSM และ LSM เพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ซึ่งทั้งสองรูปแบบนั้นมีความหนาของไส้ทอเท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Length-to-Diameter Ratio: L/D) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 และถูกติดตั้งในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 มิลลิเมตร

ทอผสมแบบสติกรูปแบบ KSM มีลักษณะเป็นแผ่นบิดเกลียวทำมุม 180° และวางตั้งฉากกับทอผสมชั้นถัดไป โดยทิศทางการบิดของเกลียวจะถูกวางให้หมุนตามเข็มนาฬิกา สลับกับทวนเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ (Somnuk, Soysuwan, & Prateepchaikul, 2019) ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนทอผสมแบบสติกรูปแบบ LSM เกิดจากการต่อแผ่นครึ่งวงรีสองแผ่นเข้าด้วยกัน และมีแผ่นรูปสามเหลี่ยมเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองด้าน โดยวางให้ตั้งฉากกับทอผสมชั้นถัดไป และให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา สลับกับตามเข็มนาฬิกาไปเรื่อยๆ (Regner, Östergren, & Trägårdh, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ท่อผสมแบบสเถิตรูปแบบ KSM ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 มิลลิเมตร
และมีความหนา 2 มิลลิเมตร

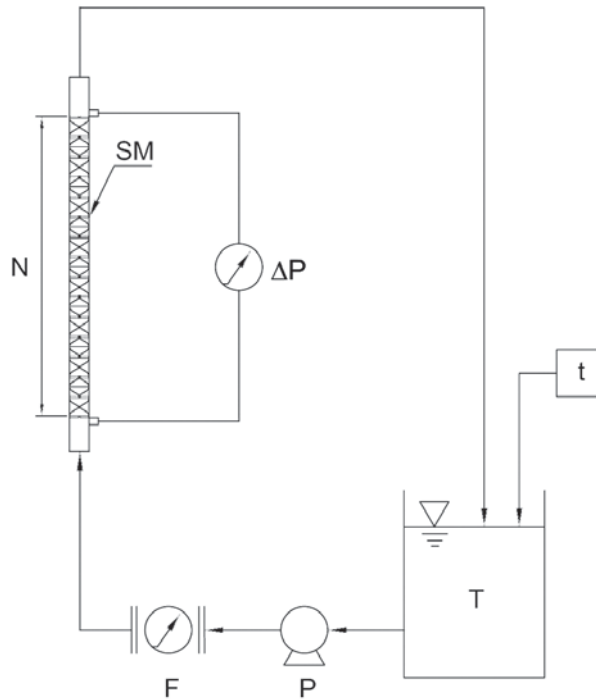


รูปที่ 2 ท่อผสมแบบสเถิตรูปแบบ LSM ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 มิลลิเมตร
และมีความหนา 2 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสเถิตหลายรูปแบบ

รูปที่ 3 ได้แสดงแผนผังการวัดความดันสูญเสียจากการไหลของน้ำผ่านท่อผสมแบบสเถิตรูปแบบ KSM และ LSM จำนวนไส้ท่อผสม 15 ชิ้นเปรียบเทียบกับ การไหลผ่านท่อเปล่าที่อัตราการไหลตั้งแต่ 12 l.h^{-1} จนถึง 60 l.h^{-1} (เลขเรย์โนลด์ประมาณ 220 ถึง 1,100 เมื่อคำนวณจากท่อเปล่าที่น้ำอุณหภูมิ 30°C) โดยท่อผสมแบบสเถิตจะถูกบรรจุอยู่ในท่อแก้วความยาว 1 เมตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 24 มิลลิเมตร จากนั้นป้อนน้ำไหลผ่านท่อผสมแบบสเถิตด้วยปั้มน้ำ (Model: DME 27-10, Grundfos Alldos) โดยอัตราการไหลจะใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ (Hall Effect Sensor) (Model: YF-S401) ส่วนผลต่างความดันจะใช้อุปกรณ์วัดความดันชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) มาใช้วัดค่าในการทดลอง นอกจากนี้ยังใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Model: Uno R3, Arduino) เป็นตัวควบคุมอุปกรณ์วัด คำนวณและส่งผลการวัดมายังคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เปรียบเทียบต่อไป

ทั้งนี้ไม่ได้ทำการวัดความดันสูญเสียของการผลิตไบโอดีเซลอันเนื่องมาจากปัญหาการกัดกร่อนและการอุดตันเมื่อใช้อุปกรณ์วัดผลต่างความดัน



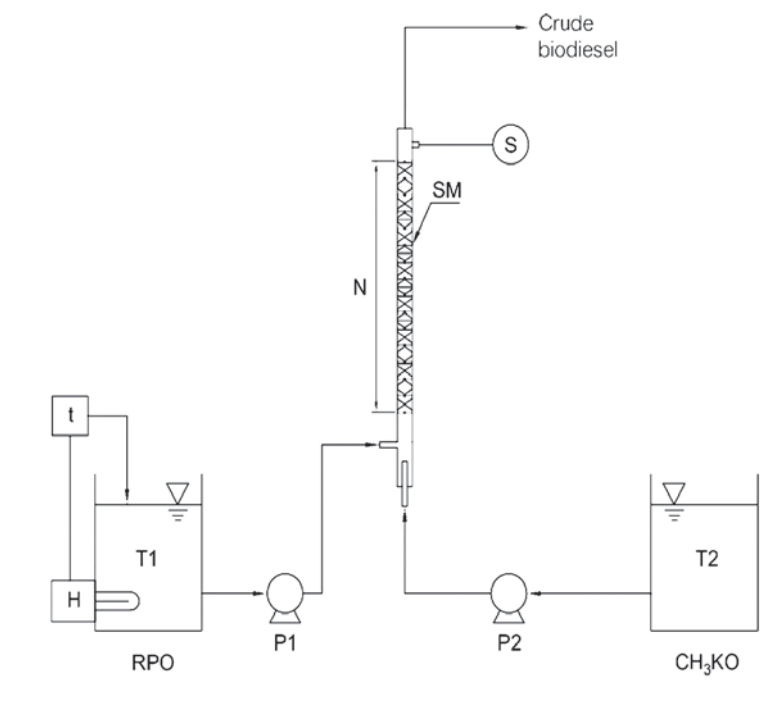
T: ถังน้ำ, t: อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ, P: ปั๊ม, F: อุปกรณ์วัดอัตราการไหล, ΔP : อุปกรณ์วัดผลต่างความดัน, SM: ท่อผสมแบบสเถิต และ N: จำนวนไส้ท่อผสมแบบสเถิต

รูปที่ 3 แผนผังของการทดสอบความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสเถิตหลายรูปแบบ

ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องโดยใช้ท่อผสมแบบสเถิตหลายรูปแบบเป็นเครื่องปฏิกรณ์

รูปที่ 4 ได้แสดงแผนผังการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์โดยใช้ท่อผสมแบบสเถิตรูปแบบต่างๆ ที่ขึ้นรูปด้วยระบบการพิมพ์สามมิติเป็นเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิ 50°C ด้วยฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์พร้อมกับการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ (CH_3KO) จากนั้นน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ที่อุ่นแล้วจะถูกปั๊มด้วยปั๊มสารเคมี (P1, Model: DDA 30-4, Grundfos Alldos) เข้าไปในท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 มิลลิเมตร ที่บรรจุท่อผสมแบบสเถิตรูปแบบต่างๆ ไว้จำนวน 15 ชิ้น ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 25 l.h^{-1} ให้เข้าไปผสมกับสารละลาย

โพแทสเซียมเมทอกไซด์โดยใช้ปั๊มสารเคมี (P2, Model: DDA 17-7, Grundfos Alldos) ด้วยเงื่อนไขปริมาณเมทานอลเท่ากับ 23.81 vol.% หรือที่อัตราการไหลเท่ากับ 5.95 l.h^{-1} และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11.8 g.l^{-1} โดยใช้ท่อผสมแบบสติดรูปแบบต่างๆ เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำการเก็บตัวอย่างปริมาณ 30 มิลลิลิตร ที่ทางออกของท่อผสม และตัวอย่างเหล่านั้นจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำอุ่นเพื่อกำจัดกลีเซอรอล ตัวเร่งปฏิกิริยา และเมทานอลที่ตกค้าง ในตัวอย่างออกไปเพื่อเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบต่างๆ องค์ประกอบของไบโอดีเซลสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบผิวบาง (Thin Layer Chromatography with Flame Ionization Detection: TLC-FID)



T1: ถังเก็บน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์, T2: ถังเก็บสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์, H: ฮีตเตอร์, t: อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, P1: ปั๊มน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์, P2: ปั๊มสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์, S: จุดเก็บตัวอย่างไบโอดีเซล, SM: เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสติด และ N: จำนวนไส้ท่อผสมแบบสติด

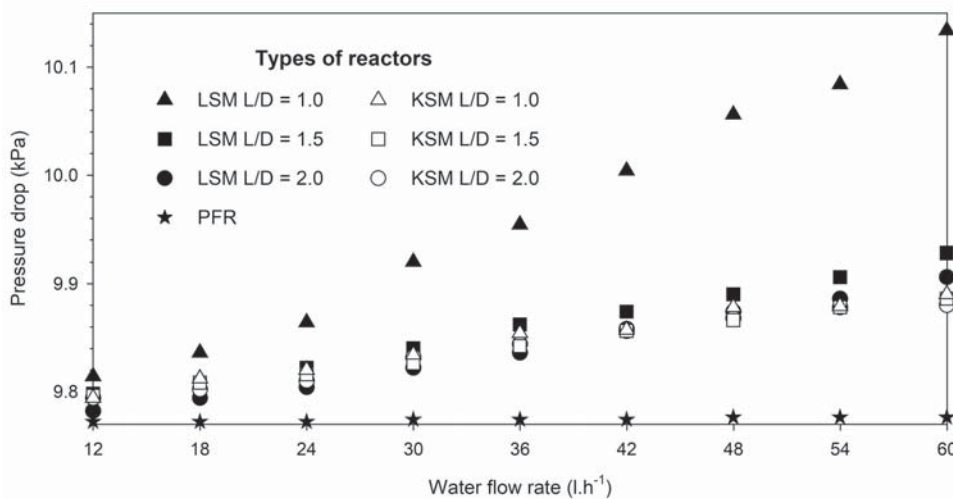
รูปที่ 4 แผนผังของการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสติดหลายรูปแบบ



ผลการวิจัย

ผลการวัดความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิต

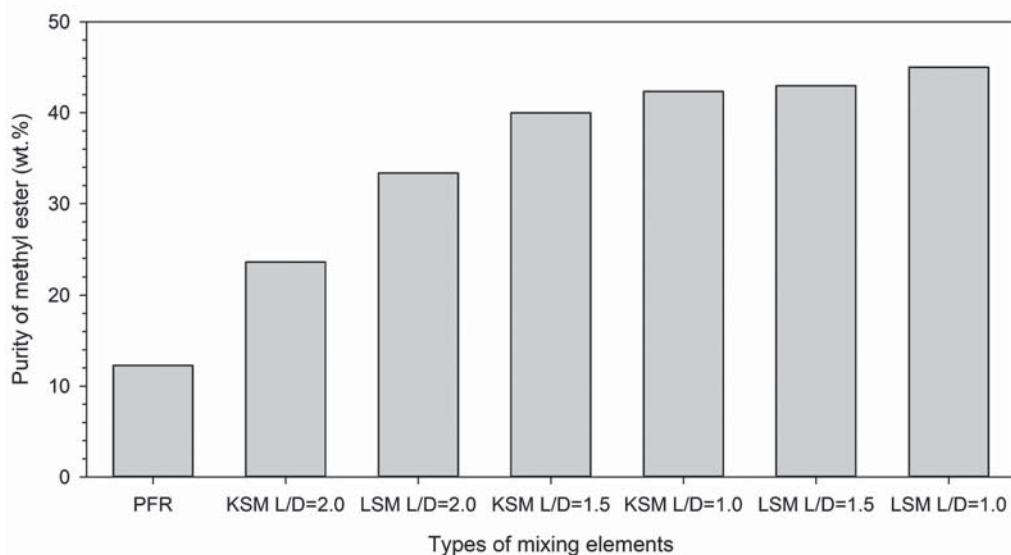
รูปที่ 5 ได้แสดงความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตสองรูปแบบ (KSM และ LSM) จำนวนท่อผสม 15 ชิ้น ด้วยอัตราการไหล 12 l.h^{-1} จนถึง 60 l.h^{-1} เปรียบเทียบกับความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อกลวง (PFR) เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเท่ากับ 60 l.h^{-1} พบว่าท่อผสมแบบสถิตประเภท LSM มีค่าความดันสูญเสียสูงสุดเท่ากับ 3.58% เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 1.0 และค่าความดันสูญเสียจะลดลงเท่ากับ 1.53% และ 1.33% เมื่อ L/D เท่ากับ 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ส่วนท่อผสมแบบสถิตประเภท KSM มีค่าความดันสูญเสียน้อยกว่าประเภท LSM จากผลการทดลองพบว่า ค่าความดันสูญเสียมีค่าลดลงเท่ากับ 1.12%, 1.12% และ 1.02% เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะทำให้ความดันสูญเสียภายในท่อเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อีกทั้งท่อผสมแบบสถิตรูปแบบที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 1.0 จะต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่าท่อผสมแบบเดียวกันแต่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า ส่วนท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM จะมีความดันสูญเสียมากกว่าแบบ KSM จึงต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่าเพื่อเอาชนะความดันตกคร่อมระหว่างท่อผสม



รูปที่ 5 ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตรูปแบบต่างๆ

ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตรูปแบบต่างๆ

เพื่อศึกษาประเภทของไส้ท่อผสม (Mixing Element) ต่อการเกิดปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซล โดยสังเกตจากค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตทั้ง 2 รูปแบบ คือ KSM และ LSM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องไหลผ่านท่อกลวง (PFR) ด้วยเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ 25 l.h^{-1} อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ใช้ปริมาณเมทานอลเท่ากับ $23.81 \text{ vol.}\%$ และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11.8 g.l^{-1} สามารถเปลี่ยนโครงสร้างกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มเป็นเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $45.04 \text{ wt.}\%$ เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM ที่มีอัตราส่วน $L/D = 1.0$ ตามมาด้วยท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM ($1.5 \text{ of } L/D$), KSM ($1.0, 1.5 \text{ of } L/D$), LSM ($L/D = 2.0$), KSM ($L/D = 2.0$) และ PFR ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลงตามอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นของท่อผสม อีกทั้งท่อผสมแบบสถิตรูปแบบ LSM ยังทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด ตามมาด้วย KSM และ PFR ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความดันสูญเสียที่อัตราการไหล 60 L.h^{-1} กับความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบต่างๆ

ชนิดของ เครื่อง ปฏิกรณ์	อัตราส่วนความยาว ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ของไส้ท่อผสม (L/D)	ความดัน สูญเสีย (kPa)	ความดันสูญเสีย ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ การไหลผ่านท่อเปล่า	ความบริสุทธิ์ ของเมทิลเอสเทอร์ (wt.%)
ท่อเปล่า (PFR)	-	9.78	-	12.28
KSM	1.0	9.89	1.12%	42.36
	1.5	9.89	1.12%	40.00
	2.0	9.88	1.02%	23.61
LSM	1.0	10.13	3.58%	45.04
	1.5	9.93	1.53%	42.98
	2.0	9.91	1.33%	33.40



อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ไส้ท่อผสมแบบสลิตจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการจัดสร้างอุปกรณ์ อีกทั้งยังขึ้นรูปได้ง่ายกว่า มีขนาดเล็ก และเหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชนมากกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศที่มีราคาสูง โดยเปรียบเทียบลักษณะการไหลของของไหลผ่านไส้ท่อผสมรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มความรุนแรงในการผสมของไส้ท่อผสมเมื่อพิจารณาลักษณะรูปร่างของไส้ท่อผสม พบว่าท่อผสมแบบสลิตรูปแบบ LSM นั้นมีรูปร่างของไส้ท่อผสมซับซ้อน ไม่โค้งรับกับการไหล ของไหลจึงไหลชนผนังของไส้ท่อผสม เกิดการหมุนตัว และผสมของไหลให้เข้ากันได้รุนแรงกว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จึงสูงกว่าท่อผสมรูปแบบ KSM แต่ส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียมาก จึงต้องใช้กำลังปั๊มสูงกว่าในการขับของไหลให้ไหลผ่านท่อผสม ส่วนไส้ท่อผสมรูปแบบ KSM มีลักษณะเป็นแบบบิดเกลียว ซึ่งโค้งรับกับการไหลในแนวแกนและแนวรัศมี ความรุนแรงในการผสมจึงน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของไส้ท่อผสมทั้งสองรูปแบบ พบว่ายิ่งอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้ท่อนั้นสูง ของไหลจะไหลผ่านท่อผสมได้ยากขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาตรของของไหลต่อความยาวไส้ท่อลดลง จึงทำให้ความรุนแรงในการผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น แต่ก็ส่งผลให้มีความดันสูญเสียเกิดขึ้นสูงกว่าเช่นกัน (Meng et al., 2016)



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความดันสูญเสียและความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสลิตรูปแบบต่างๆ ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันและขึ้นรูปด้วยระบบการพิมพ์สามมิติเพื่อลดต้นทุนในการสร้างไส้ท่อผสม อีกทั้งยังเหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชนมากกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง โดยเปรียบเทียบผลกับการไหลผ่านท่อเปล่า (PFR) จะเห็นได้ว่ายิ่งอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งท่อผสมแบบสลิตรูปแบบที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.0 จะต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่าท่อผสมแบบเดียวกันแต่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า อีกทั้งท่อผสมแบบสลิตรูปแบบ LSM ต้องใช้กำลังปั๊มมากกว่าเพื่อเอาชนะความดันตกคร่อมระหว่างท่อผสม ส่วนความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลงตามอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นของท่อผสม โดยความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าสูงที่สุดในรูปแบบ LSM ตามมาด้วย KSM และ PFR มีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์น้อยที่สุด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสลิตรูปแบบต่างๆ จำนวนไส้ท่อผสม 15 ชิ้น และมีระยะเวลาที่สารผสมทำปฏิกิริยาภายในท่อผสมเพียงประมาณ 35 วินาที เมื่อคำนวณจากอัตราการไหลของน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์เท่ากับ 25 L.h^{-1} ผสมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหล 5.95 L.h^{-1} หากต้องการให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สอดคล้องตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน จะต้องเพิ่มจำนวนไส้ท่อผสมให้มีความยาวมากขึ้น และในการนำผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ไส้ท่อผสมแบบสลิตนี้ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านอื่นๆ เช่น การบำบัดน้ำเสีย การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกรดไขมันอิสระสูง และการผสมเชื้อเพลิงอิมัลชัน เป็นต้น โดยของไหลที่ใช้จะต้องมีอุณหภูมิไม่เกินจุดหลอมเหลวของไส้ท่อผสมซึ่งขึ้นรูปจากวัสดุพลาสติก ABS และจะต้องไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนไส้ท่อผสม



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากสัญญาเลขที่ ENG62010645 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- Ghanem, A., Lemenand, T., Della Valle, D., & Peerhossaini, H. (2014). Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods - a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(2), 205-228.
- Leung, D., Wu, X., & Leung, M. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083-1095.
- Meng, H.-B., Song, M.-Y., Yu, Y.-F., Jiang, X.-H., Wang, Z.-Y., & Wu, J.-H. (2016). Enhancement of laminar flow and mixing performance in a Lightnin static mixer. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(3), 1-21.
- Niseng, S., Somnuk, K., & Prateepchaikul, G. (2014). Optimization of base-catalyzed transesterification in biodiesel production from refined palm oil via circulation process through static mixer reactor. *Advanced Materials Research*, 931-932, 1038-1042.
- Regner, M., Östergren, K., & Trägårdh, C. (2006). Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers - a numerical study. *Chemical Engineering Science*, 61(18), 6133-6141.
- Somnuk, K., Prasit, T., Phanyusoh, D., & Prateepchaikul, G. (2018). Continuous methyl ester production with low frequency ultrasound clamps on a tubular reactor. *Biofuels*, 1-7.
- Somnuk, K., Soysuwan, N., & Prateepchaikul, G. (2019). Continuous process for biodiesel production from palm fatty acid distillate (PFAD) using helical static mixers as reactors. *Renewable Energy*, 131, 100-110.
- Sungwornpatansakul, P., Hiroi, J., Nigahara, Y., Jayasinghe, T., & Yoshikawa, K. (2013). Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing. *Fuel Processing Technology*, 116, 1-8.
- Thakur, R., Vial, C., Nigam, K., Nauman, E., & Djelveh, G. (2003). Static mixers in the process industries - a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(7), 787-826.