

การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

Analysis of Methyl Ester and Ethyl Ester in Biodiesel from Crude Palm Oil by Gas Chromatography

ศักดิ์ชัยบดี ปิ่นศรีทอง^{1*} และ รุสนี กุลวิจิตร¹
Sakchaibordee Pinsritthong^{1*} and Roosanee Kulvijitra¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลของน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลและเอทานอลเกิดเป็นเอสเทอร์ชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์จำนวน 20 สารประกอบซึ่งสามารถตรวจพบในน้ำมันไบโอดีเซล โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ที่เป็นที่ยอมรับตามหลักการแยกของเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี การศึกษาความถูกต้องของการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลทำได้โดยการเตรียมสารมาตรฐานอ้างอิงความเข้มข้น 10 mg/mL ให้ได้ปริมาตรที่ถูกต้องโดยใช้ Piston pipette ร่วมกับการชั่งน้ำหนักสารมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า วิธีการดังกล่าวทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าการใช้ Piston pipette เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ได้สร้างสมการคำนวณผลการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ จากค่าความหนาแน่น 0.672 ± 0.002 g/mL ของสารมาตรฐานอ้างอิง ทำให้สามารถคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์รวมเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แต่ละสัดส่วนที่เกิดขึ้นในน้ำมันไบโอดีเซลที่ถูกผลิตขึ้นได้อย่างถูกต้อง เพื่อนำค่าไปใช้ในงานวิจัยหรือเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: น้ำมันไบโอดีเซล, เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์, เมทิลเอสเทอร์, เอทิลเอสเทอร์, GC-FID

Abstract

The research studies the analysis method of ester percentage in biodiesel from crude palm oil derived from the transesterification reaction with methanol and ethanol. The 20 compounds of methyl ester and ethyl ester can be detected in biodiesel. The study shows the efficiency of the analysis recognized according to the gas chromatography principle. The accuracy of the analysis of ester percentage in biodiesel can be made by the preparation of 10 mg/mL reference standard substance in the correct volume by the use of piston pipette together with the weighing of reference standard substance. The analysis results show that the aforementioned method made the analysis results more accurate than the use of piston pipette solely. Hence, the simple analysis result calculation equations are created for the analysis of ester quantity from 0.672 ± 0.002 g/mL density of reference standard substance, which can accurately calculate the analysis results of ester percentage combined with methyl ester and ethyl ester in the biodiesel production. Hereby, the results can be used for commercial or research purposes.

Keywords: biodiesel, ester percentage, methyl ester, ethyl ester, GC-FID

¹ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla, 90110

*Corresponding author: e-mail: Sakchaibordee.s@psu.ac.th

Received: 8 November 2018, Revised: 4 December 2018, Accepted: 15 December 2018, Published: 28 December 2018



บทนำ

น้ำมันไบโอดีเซลเป็นสารจำพวกอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid alkyl ester) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของไตรกลีเซอไรด์ (น้ำมันพืชและไขมันสัตว์) กับสารแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เป็นต้น เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification reaction) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างกรด เอ็นไซม์ หรือของแข็ง โดยสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้น้ำมันไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Duttun, 2018) ปริมาณเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล ยิ่งมีค่าสูงแสดงถึงสารปนเปื้อนอื่น ๆ มีน้อย จึงได้มีการศึกษาการพัฒนาด้านมาตรฐานคุณภาพการใช้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์เพื่อการรับประกันสำหรับยานพาหนะที่จะต้องใช้งานกับน้ำมันไบโอดีเซลตั้งแต่ปี 1983 (Gasparini *et al.*, 2011; ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) หลังจากนั้นมาตรฐานระดับชาติของน้ำมันไบโอดีเซลหลายๆ มาตรฐานก็ออกตามกันมา สำหรับประเทศไทย โดยกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันฉบับปัจจุบันในปี 2556 (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2556) ซึ่งตามประกาศฉบับดังกล่าว มีการกำหนดค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นตัวบ่งชี้หนึ่งสำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล โดยอ้างอิงตามกรรมวิธีทดสอบตามมาตรฐานยุโรป มาตรฐาน EN 14103 ซึ่งกำหนดร้อยละต่ำสุดของเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันไว้ที่ 96.5% ซึ่งการวิเคราะห์ตามมาตรฐานนี้ สามารถวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ในตัวอย่างที่มีปริมาณเอสเทอร์ที่สูงกว่า 90% ได้ (w/w) (European Standard Norme Europeenne Europaische Norm, 2003) โดยในการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลโดยการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (Gas chromatograph-flame ionization detector, GC-FID) มีขอบเขตครอบคลุมในการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ของเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมัน (FAME) ซึ่งในประเทศไทยใช้วัตถุดิบหลักที่มีศักยภาพในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลคือ น้ำมันปาล์มดิบ เนื่องจากมีปริมาณน้ำมันต่อน้ำหนักผลปาล์มสูง (Maulidiyah *et al.*, 2017) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพบริสุทธิ์ หรือเป็นส่วนประกอบผสมในเชื้อเพลิงดีเซล หรือเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยในปัจจุบันมีความพยายามในการลดการใช้แอลกอฮอล์ตัวหลักที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของไบโอดีเซล ซึ่งคือเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลแทน เนื่องจากเมทานอลมีความเป็นพิษ (Toxicity) ทำให้เกิดอันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงานและเมทานอลทั้งหมดต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ (Kanjaikaw, *et al.*, 2018) ในขณะที่เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทยและเป็นวัตถุดิบที่ได้จากพืชจึงไม่ทำให้เกิดมลพิษกับผู้ปฏิบัติงาน (Nikhom and Tongurai, 2014) โดยการใช้เอทานอลทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันกับน้ำมันปาล์มดิบจะได้ไบโอดีเซลชนิดเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งหากโรงงานผลิตน้ำมันไบโอดีเซลใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว นักวิเคราะห์อาจจะสามารถประยุกต์วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน EN 14103 ได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากการใช้เอทิลเอสเทอร์ยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น เรื่องของการใช้พลังงานในการผลิตที่สูงกว่าและปัญหาค่าสภาพการละลายเอทิลเอสเทอร์ในกลีเซอรอลเมื่อเทียบกับเมทิลเอสเทอร์ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดการแยกชั้น (ชาคริต และคณะ, 2555) ผู้ผลิตบางรายจึงได้ศึกษาทางเลือกในการใช้แอลกอฮอล์ผสมทั้งชนิดเมทานอลและเอทานอลในสัดส่วนต่าง ๆ กัน เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ทำให้เอสเทอร์ที่เกิดขึ้นมีทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ โดยตามมาตรฐานการทดสอบ EN 14103 ได้กำหนดการหาเฉพาะเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเชิงมวลโดยใช้การเทียบกับสารละลายอ้างอิงที่ทราบความเข้มข้นและปริมาตร แล้วตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งกรณีที่เป็นเอสเทอร์ผสมทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ยังไม่มี การแสดงวิธีการทดสอบหรือการแปลผลข้อมูล จึงเป็นมูลเหตุให้ผู้วิจัยศึกษางานวิจัยฉบับนี้ เพื่อแสดงการเตรียมตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีความแม่นยำสูงขึ้นและแสดงวิธีการวิเคราะห์และแปลผลเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ที่มีทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อแสดงวิธีการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในไบโอดีเซลที่มีความแม่นยำสูงขึ้นไป
2. เพื่อเพิ่มศักยภาพการทดสอบเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ผสมซึ่งไม่ทราบค่าสัดส่วนปริมาณองค์ประกอบ
3. เพื่อแสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่มีส่วนผสมทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. **ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล:** ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็นตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้รับการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของน้ำมันปาล์มทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลและเอทานอลในสัดส่วนต่าง ๆ โดยสถานีวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2. **เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย:** การวิเคราะห์ปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ของน้ำมันไบโอดีเซลตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานใช้วิธีทดสอบเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (GC-FID) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง GC-FID ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6890 โดยสภาวะการทดสอบที่เหมาะสมในการแยกของสาร ดังตารางที่ 1

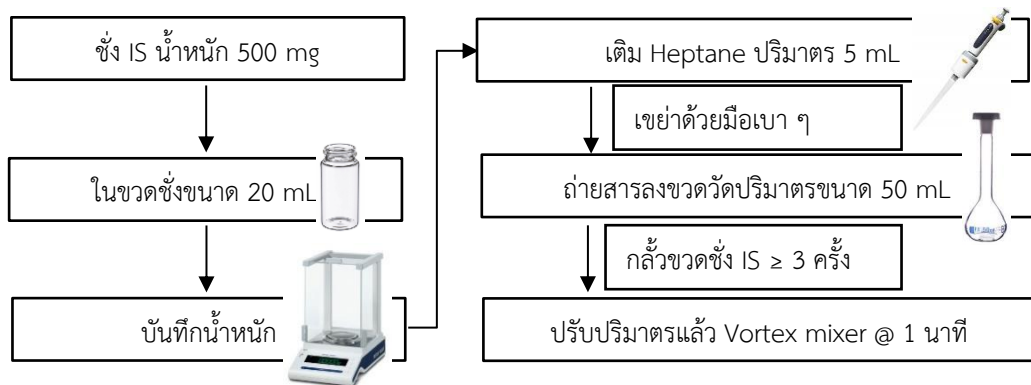
ตารางที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	ตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน		
อุณหภูมิหัวฉีด	290 °C	อุณหภูมิตัวตรวจวัด	250 °C
สัดส่วนสารเข้าคอลัมน์ (Split ratio)	50 : 1	อัตราไหลแก๊สเชื้อเพลิง (H ₂)	30 mL/min
อัตราไหลแก๊สพา (He)	1 mL/min	อัตราไหลแก๊สออกซิเจน (Air zero)	300 mL/min
อุณหภูมิห้อง	เริ่มต้น 210 °C คงที่ 12 นาที เพิ่มขึ้น 20 °C/min จนได้ 250 °C คงที่ 8 นาที	อัตราไหลแก๊ส Make up (N ₂)	25 mL/min
ชนิดคอลัมน์	Select for FAME (Length 30 m, I.D 0.32 mm, Film thickness 0.25 µm)		

3. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

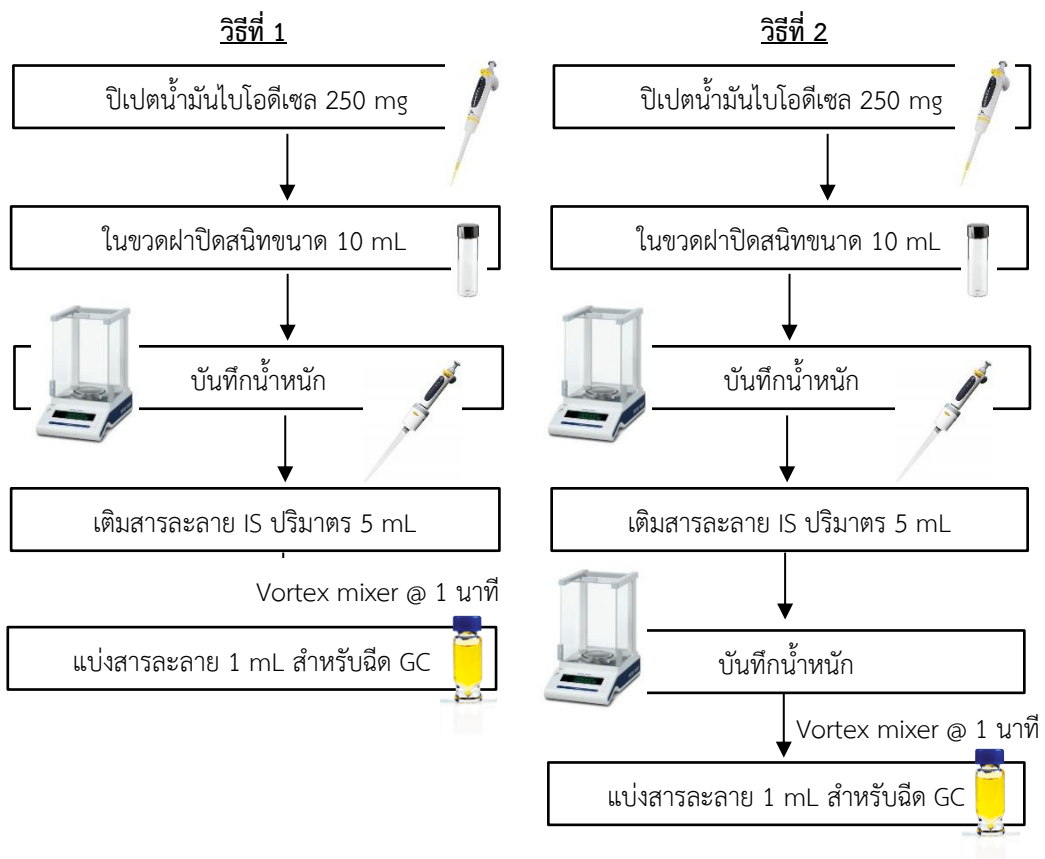
1) **สารเคมีที่ใช้** ตัวทำละลายคือ Heptane (HPLC grade) ซื้อมาจาก RCI Labscan (Bangkok, Thailand) สารละลายอ้างอิง (Internal standard, IS) คือ Methyl heptadecanoate; C17 สารมาตรฐานผสมเมทิลเอสเทอร์ จำนวน 20 สารประกอบ ซึ่งประกอบด้วยสารมาตรฐานเมทิลเอสเทอร์ได้แก่ Caprylic acid methyl ester (C8:0, ME), Nonanoic acid methyl ester (C9:0, ME), Capric acid methyl ester (C10:0, ME), Undecanoic acid methyl ester (C11:0, ME), Lauric acid methyl ester (C12:0, ME), Tridecanoic acid methyl ester (C13:0, ME), Myristic acid methyl ester (C14:0, ME), Pentadecanoic acid methyl ester (C15:0, ME), Palmitic acid methyl ester (C16:0, ME), Palmitoleic acid methyl ester (C16:1, ME), Stearic acid methyl ester (C18:0, ME), Oleic acid methyl ester (C18:1, ME), Linoleic acid methyl ester (C18:2, ME), Linolenic acid methyl ester (C18:3, ME), Arachidic acid methyl ester (C20:0, ME), Eicosenoic acid methyl ester (C20:1, ME), Behenic acid methyl ester (C22:0, ME), Erucic acid methyl ester (C22:1, ME), Lignoceric acid methyl ester (C24:0, ME), Selacholeic acid methyl ester (C24:1, ME) และสารมาตรฐานผสมเอทิลเอสเทอร์ จำนวน 8 สารประกอบ ซึ่งประกอบด้วยสารมาตรฐานเอทิลเอสเทอร์ได้แก่ Lauric acid ethyl ester (C12:0, EE), Myristic acid ethyl ester (C14:0, EE), Palmitic acid ethyl ester (C16:0, E), Palmitoleic acid ethyl ester (C16:1, EE), Stearic acid ethyl ester (C18:0, EE), Oleic acid ethyl ester (C18:1, EE), Linoleic acid ethyl ester (C18:2, EE), Arachidic acid ethyl ester (C20:0, EE) ทั้งหมดซื้อมาจาก Sigma-Aldrich (Steinheim, Germany)

2) การเตรียมสารละลาย IS อ่างอิงวิธีการตามมาตรฐาน EN 14103 ที่ระบุความเข้มข้น 10 mg/mL แสดงวิธีการเตรียมดังแผนภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วิธีการเตรียมสารละลาย IS

3) การเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล โดยเลือกตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลมาเป็นตัวแทนศึกษา 3 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ทดสอบโดยนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่านเตรียมตัวอย่าง 2 วิธี แสดงดังแผนภาพที่ 2 โดยวิธีที่ 1 เป็นการเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN 14103 และวิธีที่ 2 มีการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการชั่งน้ำหนักสารละลาย IS ที่เติมลงในตัวอย่าง



ภาพที่ 2 วิธีการเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

4) การวิเคราะห์ตัวอย่าง ทดสอบตามขั้นตอนของการใช้เครื่อง GC-FID โดยเริ่มโปรแกรมของการทดสอบสารมาตรฐานผสมเมทิลเอสเทอร์ สารมาตรฐานผสมเอทิลเอสเทอร์ และสารละลายตัวอย่าง น้ำมันไบโอดีเซล ตามลำดับ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบด้วยเครื่อง GC-FID แล้วจะได้สัญญาณโครมาโทแกรมของสารเอสเทอร์ จากนั้นวิเคราะห์ผลโดยการ Integrate พื้นที่ใต้พีคของสัญญาณของสารเอสเทอร์ โดยการระบุพีคของสารทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลโดยอ้างอิงจากพีคสัญญาณของสารมาตรฐานเมทิลเอสเทอร์และพีคสัญญาณเอทิลเอสเทอร์

4. ขั้นตอนหาปริมาตรที่แท้จริงของสารละลาย IS

เนื่องจากปริมาตรของสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL มีผลต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ที่ได้ ซึ่งจากการเติมสารละลาย IS ลงไปในตัวอย่างแต่ละครั้งหรือแต่ละผู้ปฏิบัติงานมักมีความคลาดเคลื่อน จึงได้มีการศึกษาทดลอง เพื่อหาปริมาตรที่แท้จริงของสารละลาย IS (V_{EI}) ที่เติมลงไปในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตามระเบียบวิธีวิจัย วิธีที่ 2 ในการเตรียมสารละลายตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล โดยได้ศึกษาหาความหนาแน่นของสารละลาย IS ด้วยการชั่งน้ำหนักสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL จำนวน 20 ครั้ง ในช่วงเวลาต่างกันเป็นเวลา 1 ปี (ความถี่ ≈ 2 ครั้ง/เดือน) จากค่าน้ำหนักเฉลี่ยจะนำมาคำนวณหาปริมาตรของสารละลาย IS ที่แท้จริงที่ถูกเติมลงไป ตัวอย่าง ดังสมการที่ 1

$$V_{EI} = \frac{W_V}{k} \dots\dots\dots\text{สมการที่ 1}$$

V_{EI} = ปริมาตรของสารละลาย IS (mL)
 W_V = น้ำหนัก Internal standard ในขวดตัวอย่าง (g)
 k = ค่าความหนาแน่นของสารละลาย IS (g/mL)

5. ขั้นตอนการสร้างสมการการคำนวณผล

สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลชนิด (FAME) ตามมาตรฐาน EN 14103 แสดงดัง สมการที่ 2

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2}$$

C = เปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)
 $\sum A$ = พื้นที่พีคของสัญญาณรวมของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ Caprylic acid (C8:0) ถึง Selacholeic acid (C24:1)
 A_{EI} = พื้นที่พีคของสัญญาณสารละลายอ้างอิง Methyl heptadecanoate (C17)
 C_{EI} = ความเข้มข้นของสารละลายอ้างอิง Methyl heptadecanoate(C17) (mg/mL)
 m = น้ำหนักของตัวอย่างในหน่วย mg

เมื่อเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับแอลกอฮอล์ทั้งชนิดเมทานอลและเอทานอล น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ในการคำนวณผลการวิเคราะห์สัดส่วนเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์ ที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม ผู้วิจัยได้สร้างสมการคำนวณแสดงดังสมการที่ 3 และสมการคำนวณผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์รวม แสดงดังสมการที่ 4

$$C_{FAEE} = \frac{((\sum A_{SUM}) - ((\sum A) - A_{EI})) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \dots\dots\dots\text{สมการที่ 3}$$

C_{FAEE} = เปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเอทิลเอสเทอร์ (%FAEE)
 $\sum A_{SUM}$ = พื้นที่พีคของสัญญาณรวมของเอสเทอร์ทั้งหมดตั้งแต่ Caprylic acid (C8:0) ถึง Selacholeic acid (C24:1)
 $C_{SUM} = C_{FAEE} + C$ สมการที่ 4
 C_{SUM} = เปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเอสเทอร์ทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซล

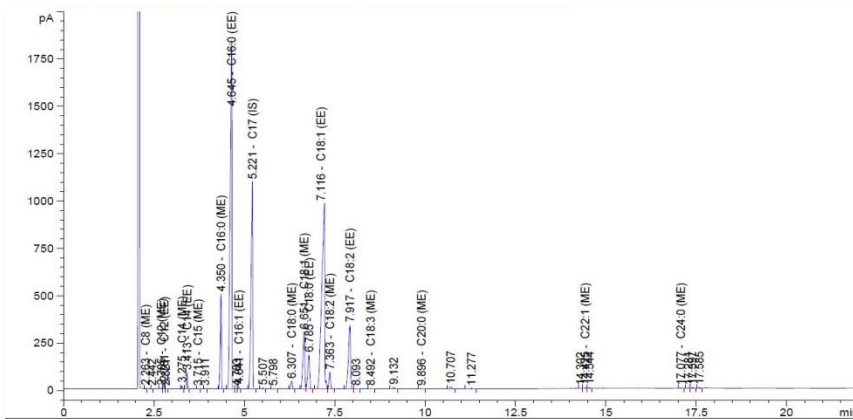
ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับแอลกอฮอล์ทั้งเมทานอลและเอทานอลในสัดส่วนต่างๆ กัน และตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-FID แสดงผลการวิจัยดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์เมื่อใช้สภาวะการทดสอบดังตารางที่ 1 ให้โครมาโทแกรมของตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล BIO_19 ดังภาพที่ 3 เมื่อวิเคราะห์พบว่าให้เปอร์เซ็นต์พื้นที่พีคเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ดังตารางที่ 2 ซึ่งให้สารประกอบเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ระบุพีคอ้างอิงจากพีคสัญญาณของสารมาตรฐานเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งจากพีคของสัญญาณของเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซลจำนวน 20 สารประกอบ พีคของสัญญาณสามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่อง GC-FID แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการแยกของสารประกอบของสารมาตรฐานทั้ง 29 สารประกอบ แสดงดังตารางที่ 2 และแสดงสัญญาณของชนิดของกรดไขมันที่ตรวจพบทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ 20 สารประกอบในตัวอย่าง BIO_19 ซึ่งเปอร์เซ็นต์พื้นที่พีคของสัญญาณดังกล่าวสอดคล้องกับชนิดกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม (Montoya, *et al.*, 2014) ข้อมูลในตารางแสดงเวลาที่สารถูกหน่วงอยู่ในคอลัมน์ (Retention time) โดยอ้างอิงจากสารมาตรฐานผสมเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ค่า Symmetry ของสัญญาณของพีค ซึ่งเป็นค่าแสดงความสมมาตรของพีคของสัญญาณเมทิลเอสเทอร์และพีคของสัญญาณเอทิลเอสเทอร์ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล โดยพีคของสัญญาณส่วนใหญ่มีค่าสมมาตรอยู่ในช่วง 1 – 2 ยกเว้นสัญญาณของพีคเอสเทอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเกิน 17% จะมีลักษณะของสัญญาณเป็น Tailing ได้แก่ พีคของสัญญาณ C16:0 (EE), C17 (IS) และ C18:2 (EE) ส่วนลักษณะสัญญาณของพีคเป็น Fronting คือ พีคของสัญญาณ C18:1 (EE) อย่างไรก็ตามสัญญาณของพีคไม่มีการซ้อนทับกับพีคของสัญญาณเอสเทอร์ก่อนหน้านี้หรือพีคของสัญญาณเอสเทอร์ถัดไป จนทำให้การแปลผลการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์มีความผิดพลาด สำหรับจำนวน Plate แสดงประสิทธิภาพของคอลัมน์อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งการแยกของสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำนวน Plate ที่ดีอยู่ในช่วง 20,000 – 540,000 plate (Constantinos, 2018; Harris, 1995) และ Resolution มีค่าเกิน 1.5 เกือบทุกสารประกอบ ซึ่งแสดงถึงการแยกของพีคของสัญญาณได้ชัดเจน โดยมีการซ้อนทับกันของพีคน้อยกว่า 0.15% ยกเว้นสัญญาณของพีค C16:1 (EE) และ C18:0 (EE) ที่มีค่า Resolution เท่ากับ 0.95 และ 1.37 ตามลำดับ แสดงการซ้อนทับกันของสัญญาณของพีคไม่เกิน 2.3% (Shimadzu, 2018) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การซ้อนทับที่ไม่เป็นอุปสรรคต่อการแปลผล



ภาพที่ 3 โครมาโทแกรมของเอสเทอร์ทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล (BIO_19)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของการแยกของสัญญาณสารเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

Retention time	สารประกอบเอสเทอร์			ประสิทธิภาพการแยก		
	ชื่อสารประกอบ	ชื่อย่อ	%พื้นที่พีค	Symmetry	Plate	Resolution
2.263	Caprylic acid methyl ester	C8:0 (ME)	0.03	0.84	34,669	4.71
2.305	Nonanoic acid methyl ester	C9:0 (ME)	-	-	-	-
2.399	Capric acid methyl ester	C10:0 (ME)	-	-	-	-
2.528	Undecanoic acid methyl ester	C11:0 (ME)	-	-	-	-
2.705	Lauric acid methyl ester	C12:0 (ME)	0.05	1.86	69,451	6.84
2.781	Lauric acid ethyl ester	C12:0 (EE)	0.17	1.08	84,675	1.91
2.945	Tridecanoic acid methyl ester	C13:0 (ME)	-	-	-	-
3.275	Myristic acid methyl ester	C14:0 (ME)	0.14	1.11	87,619	10.51
3.413	Myristic acid ethyl ester	C14:0 (EE)	0.71	1.13	88,906	3.06
3.715	Pentadecanoic acid methyl ester	C15:0 (ME)	0.03	0.97	59,546	5.65
4.35	Palmitic acid methyl ester	C16:0 (ME)	5.82	1.6	72,945	7.51
4.573	Palmitoleic acid methyl ester	C16:1 (ME)	-	-	-	-
4.645	Palmitic acid ethyl ester	C16:0 (EE)	29.89	4.21	40,394	3.75
4.841	Palmitoleic acid ethyl ester	C16:1 (EE)	0.12	1.04	106,014	0.95
5.221	Heptadecanoic acid methyl ester	C17 (ME)	17.08	3.41	57,528	5.17
6.307	Stearic acid methyl ester	C18:0 (ME)	0.62	1.16	89,627	6.05
6.651	Oleic acid methyl ester	C18:1 (ME)	5.36	1.76	75,223	3.79
6.785	Stearic acid ethyl ester	C18:0 (EE)	3.20	1.6	77,139	1.37
7.116	Oleic acid ethyl ester	C18:1 (EE)	27.79	0.17	20,786	2.23
7.363	Linoleic acid methyl ester	C18:2 (ME)	1.30	1.13	133,129	1.77
7.917	Linoleic acid ethyl ester	C18:2 (EE)	6.66	2.2	86,563	5.87
8.492	Linolenic acid methyl ester	C18:3 (ME)	0.03	1.03	107,926	4.01
9.896	Arachidic acid methyl ester	C20:0 (ME)	0.05	0.99	110,737	6.65
10.486	Eicosenoic acid methyl ester	C20:1 (ME)	-	-	-	-
13.416	Arachidic acid ethyl ester	C20:0 (EE)	-	-	-	-
14.167	Behenic acid methyl ester	C22:0 (ME)	-	-	-	-
14.425	Erucic acid methyl ester	C22:1 (ME)	0.04	1.03	508,089	27.93
17.077	Lignoceric acid methyl ester	C24:0 (ME)	0.02	1.06	542,352	31.32
17.479	Selacholeic acid methyl ester	C24:1 (ME)	-	-	-	-

2. การศึกษาหาปริมาณที่แท้จริงของสารละลาย IS

จากการชั่งน้ำหนักของสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL เพื่อหา k แสดงผลดังตารางที่ 3 ซึ่งผลการศึกษาค่า k ที่ได้ สามารถคำนวณน้ำหนักของสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ปริมาตร 5 mL ดังสมการที่ 1 ซึ่งทำให้ได้ทราบค่าปริมาตรที่แท้จริงของสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ที่เติมลงไปในตัวอย่งน้ำมันไบโอดีเซล

ตารางที่ 3 ค่า k ที่ได้จากการทดลอง ($n = 20$)

k	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/mL) \pm SD
Internal standard	0.672 \pm 0.002

3. ผลศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์จากการเติมสารละลาย IS ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล 2 วิธี ผลที่ได้แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์รวมดังตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ 1 ตามมาตรฐาน EN 14103 ที่ใช้เพียง Piston pipette แล้วแทนค่าปริมาตร (V_{E1}) สารละลาย IS เท่ากับ 5 mL ในสมการที่ 2 และ 3 ผลการคำนวณของปริมาณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเอสเทอร์รวมในสมการที่ 4 มี

การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์มดิบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) สูงกว่า และให้ผลของการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเอสเทอร์รวมต่ำกว่า เมื่อเทียบกับวิธีที่ 2 ที่เพิ่มการชั่งน้ำหนัก เพื่อหาปริมาตรที่แท้จริงของสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ปริมาตร 5 mL ที่ถูกเติมลงไปในตัวอย่งน้ำมันไบโอดีเซลด้วยสมการที่ 1 ก่อน แล้วจึงใช้ค่าปริมาตรที่แท้จริงที่ได้แทนค่าของปริมาตร (V_{EI}) ในสมการที่ 2 และ 3 และคำนวณผลเปอร์เซ็นต์เชิงมวลของเอสเทอร์รวมในสมการที่ 4 แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ในตัวอย่งน้ำมันไบโอดีเซลจากการเติมสารละลาย IS 2 วิธี (ผู้ทดสอบ=3)

ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
BIO_A	94.180 \pm 1.017	96.813 \pm 0.297
BIO_B	93.96 \pm 1.046	95.760 \pm 0.269
BIO_C	94.86 \pm 0.806	96.493 \pm 0.390

4. การศึกษาตัวอย่งน้ำมันไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์เชิงมวลในน้ำมันไบโอดีเซลที่มีเอสเทอร์ทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แสดงตัวอย่างการคำนวณของ BIO_19 injection ที่ 1 และผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจริงดังตารางที่ 5 ที่ใช้สมการคำนวณ 1 – 4 ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์แยกตามชนิดเอสเทอร์ที่ผสมอยู่ได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางให้กับกลุ่มผู้ผลิต/นักวิจัยที่ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยการใช้สารตั้งต้นเอทานอลแทนเมทานอลในการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสามารถใช้สมการคำนวณดังกล่าวหาปริมาณเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลได้ต่อไป ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$V_{EI} = \frac{3.42 \text{ g}}{0.672 \text{ g/mL}}, \quad V_{EI} = 5.09 \text{ mL}$$

$$C = \frac{(6249.01 - 3489.55)}{3489.55} \times \frac{10.01 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 5.09 \text{ mL}}{250.27 \text{ mg}} \times 100\%$$

$$C = 16.099 \% \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$C_{FAEE} = \frac{((20252.80 - (6249.01 - 3489.55)) - 3489.55)}{3489.55} \times \frac{10.01 \text{ mg/mL} \times 5.09 \text{ mL}}{250.27 \text{ mg}} \times 100\%$$

$$C_{FAEE} = 81.699 \% \text{m/m}$$

$$C_{SUM} = 81.699 + 16.099, \quad C_{SUM} = 97.798 \% \text{m/m}$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์รวม เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ (Injection = 3 ซ้ำ)

ที่	ชื่อตัวอย่าง	%Ester \pm SD	%FAME \pm SD	%FAEE \pm SD
1	BIO_1	95.760 \pm 0.060	19.100 \pm 0.050	76.660 \pm 0.070
2	BIO_2	96.970 \pm 0.020	19.850 \pm 0.010	77.120 \pm 0.020
3	BIO_3	95.900 \pm 0.020	20.910 \pm 0.020	74.980 \pm 0.020
4	BIO_4	96.950 \pm 0.020	16.360 \pm 0.060	80.590 \pm 0.010
5	BIO_5	92.250 \pm 0.020	18.410 \pm 0.010	73.840 \pm 0.030
6	BIO_6	99.240 \pm 0.060	18.310 \pm 0.170	80.920 \pm 0.110
7	BIO_7	98.810 \pm 0.040	12.080 \pm 0.030	86.720 \pm 0.050
8	BIO_8	99.430 \pm 0.020	11.900 \pm 0.020	87.530 \pm 0.020
9	BIO_9	99.690 \pm 0.030	23.470 \pm 0.020	76.220 \pm 0.080
10	BIO_10	99.180 \pm 0.020	27.163 \pm 0.003	72.010 \pm 0.020
11	BIO_11	97.050 \pm 0.010	19.241 \pm 0.003	77.810 \pm 0.010
12	BIO_12	98.210 \pm 0.020	56.779 \pm 0.001	41.430 \pm 0.020
13	BIO_13	98.710 \pm 0.010	87.870 \pm 0.010	10.840 \pm 0.010
14	BIO_14	99.590 \pm 0.080	99.590 \pm 0.080	0.000 \pm 0.000



ตารางที่ 5 (ต่อ)

ที่	ชื่อตัวอย่าง	%Ester \pm SD	%FAME \pm SD	%FAEE \pm SD
15	BIO 15	99.230 \pm 0.010	34.810 \pm 0.001	64.410 \pm 0.010
16	BIO 16	99.240 \pm 0.010	10.743 \pm 0.003	88.500 \pm 0.010
17	BIO 17	99.020 \pm 0.020	9.657 \pm 0.002	89.360 \pm 0.020
18	BIO 18	98.890 \pm 0.010	9.757 \pm 0.001	89.130 \pm 0.010
19	BIO 19	97.760 \pm 0.020	16.100 \pm 0.010	81.656 \pm 0.004
20	BIO 20	98.312 \pm 0.004	9.489 \pm 0.004	88.823 \pm 0.007
21	BIO 21	98.570 \pm 0.010	9.367 \pm 0.002	89.210 \pm 0.010
22	BIO 22	98.690 \pm 0.050	7.590 \pm 0.030	91.090 \pm 0.020
23	BIO 23	98.580 \pm 0.010	9.062 \pm 0.004	89.520 \pm 0.020
24	BIO 24	97.290 \pm 0.040	9.320 \pm 0.002	87.970 \pm 0.040
25	BIO 25	96.740 \pm 0.010	10.100 \pm 0.001	86.650 \pm 0.010
26	BIO 26	97.250 \pm 0.010	60.010 \pm 0.004	37.240 \pm 0.010
27	BIO 27	97.450 \pm 0.010	70.220 \pm 0.020	27.230 \pm 0.010
28	BIO 28	98.200 \pm 0.020	97.060 \pm 0.020	1.140 \pm 0.004
29	BIO 29	98.480 \pm 0.020	98.130 \pm 0.010	0.350 \pm 0.002
30	BIO 30	97.570 \pm 0.003	36.310 \pm 0.010	61.260 \pm 0.010
31	BIO 31	97.540 \pm 0.010	34.570 \pm 0.010	62.960 \pm 0.010
32	BIO 32	98.509 \pm 0.010	3.901 \pm 0.010	94.608 \pm 0.010
33	BIO 33	98.357 \pm 0.010	3.402 \pm 0.001	94.955 \pm 0.010
34	BIO 34	97.252 \pm 0.010	3.815 \pm 0.002	93.437 \pm 0.010
35	BIO 35	97.940 \pm 0.001	2.600 \pm 0.002	95.330 \pm 0.002

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลที่มีทั้งเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออนเซชันให้ประสิทธิภาพการแยกของพีคที่ดี พีคของสัญญาณส่วนใหญ่ให้ความสมมาตร จำนวน Plate ของสัญญาณเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าสูง การแยกของพีคของสัญญาณชัดเจน และเนื่องจากการเติมสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ปริมาตร 5 mL เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล ดังนั้นการเติมสารละลาย IS ความเข้มข้น 10 mg/mL ให้ได้ปริมาตร 5 mL จึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งวิธีการเติมสารละลาย IS ในตัวอย่างโดยใช้ Piston pipette ร่วมกับการชั่งน้ำหนัก แสดงให้เห็นผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ที่ถูกต้องมากกว่าการเติมสารละลาย IS ลงในตัวอย่างโดยใช้ Piston pipette เพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ และสิ่งที่สำคัญสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ได้แสดงค่าความหนาแน่นและมีขั้นตอนการบันทึกน้ำหนักของสารละลาย IS ที่เติมโดยใช้ Piston pipette ทำให้ง่ายในการคำนวณหาปริมาตรที่แท้จริงของสารละลาย IS ในตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ Piston pipette ในการดูดสารให้ได้ปริมาตรที่ต้องการของแต่ละผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างมีความเบี่ยงเบนที่สูง ดังนั้นในการปฏิบัติงานนักวิจัย/ผู้ผลิตควรดำเนินการอย่างระมัดระวังและรวดเร็วเพื่อลดความผิดพลาดของความเข้มข้นจากการระเหยของ Heptane ที่เป็นตัวทำละลายของสารละลาย IS โดยงานวิจัยนี้นักวิจัย/ผู้ผลิตที่ต้องการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลสามารถปฏิบัติตามวิธีการได้ง่าย รวมทั้งแสดงวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์เชิงมวลเอสเทอร์ โดยสามารถคำนวณผลการวิเคราะห์แยกชนิดของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ได้ ทำให้นักวิจัย/ผู้ผลิตทราบปริมาณของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ที่ผสมกันได้อย่างถูกต้องและง่ายสำหรับการควบคุมคุณภาพของการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซลที่มีเอสเทอร์ทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ วิธีการที่นำเสนอนี้นักวิจัยที่สนใจด้านพลังงานทดแทนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ทำได้ง่าย

เนื่องจากได้แสดงวิธีการเตรียมตัวอย่าง การกำหนดสภาวะการทดสอบ การคำนวณ และการแปลผลไว้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ หรือเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์ หรือเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ผสม ทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลได้ และจากผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลผสมเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล จำนวนทั้งหมด 35 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่ได้เมื่อเทียบตามเกณฑ์กำหนดมาตรฐานของ น้ำมันไบโอดีเซลของประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ซึ่งกำหนดร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์จาก กรดไขมันไว้คือ มีค่าเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ไม่ต่ำกว่า 96.5% นั้น พบว่า ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านตามเกณฑ์ กำหนดมีจำนวน 32 ตัวอย่างและไม่ผ่านตามเกณฑ์กำหนดมีจำนวน 3 ตัวอย่าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ชาคริต ทองอุไร ผู้อำนวยการสถานีวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้โอกาสในการทำวิจัยร่วม พร้อมทั้งการให้คำปรึกษาแนะนำตลอดการวิจัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฬาลักษณ์ พัฒนศักดิ์ภิญโญ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนให้บุคลากรของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ได้มีการพัฒนาความรู้ต่อยอด งานประจำสู่งานวิจัย เพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านวิชาการจากหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชาคริต ทองอุไร อนุช ้วยสุวรรณ และ รวมพร นิคม. 2555. เทคโนโลยีไบโอดีเซล (Biodiesel Technology) ฉบับปฏิบัติการจริง. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน 2556 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์และกรดไขมัน. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=371. (สืบค้นเมื่อ กันยายน 2018)
- ศูนย์บริการวิชาการที่ 3. 2553. เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ. [Online]. Available: <http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf>. (สืบค้นเมื่อ กันยายน 2018)
- Constantinos, E. 2018. Chromatographic Separations. [Online]. Available: http://195.134.76.37/applets/AppletChrom/App1_Chrom2.html. (Retrieved Oct, 2018)
- Duttun, J.A. 2018. The Reaction of Biodiesel: Transesterification. [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/684>. (Retrieved Nov, 2018)
- European Standard Norme Europeenne Europaische Norm 2003. In Fat and oil derivatives - Fatty Acid Methyl Esters (FAME) - Determination of ester and linolenic acid methyl ester contents, Vol. EN 14103.
- Gasparini, F., de O. Lima, J.R., Ghani, Y.A., Hatanaka, R.R., Sequinel, R., Flumignan, D.L. and J.E. de Oliveira. 2011. EN 14103 adjustments for biodiesel analysis from different raw materials, including animal tallow containing C17 Bioenergy Technology (BE):101-108.
- Harris, D.C. 1995 Quantitative Chemical Analysis. New York: Freeman and Company.
- Kanjaikaw, U., Tongurai, C., Chongkhong, S. and K. Prasertsit. 2018. Two-step esterification of palm fatty acid distillate in ethyl ester production: Optimization and sensitivity analysis. Renewable Energy 119:336-344.
- Maulidiyah, Nurdin, M., Fatma, F., ; Natsir, M. and D. Wibowo. 2017. Characterization of methyl ester compound of biodiesel from industrial liquid waste of crude palm oil processing. Analytical Chemistry Research. 12: 1-9.
- Montoya, C., Cochard, B., Flori, A., Cros, D., Lopes, R., Cuellar, T., Espeout, S., Syaputra, I., Villeneuve, P., Pina, M., Ritter, E., Leroy, T. and N. Billotte. 2014. Genetic Architecture of Palm Oil Fatty Acid Composition in Cultivated Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Compared to Its Wild Relative *E. oleifera* (H.B.K) Cortés. PLOS ONE 9(5): e95412.
- Nikhom, R. and C. Tongurai. 2014. Production development of ethyl ester biodiesel from palm oil using a continuous deglycerolisation process. Fuel 117:926-931.
- Shimadzu, C. 2018. About Resolution, Part 1. [Online]. Available: <https://www.shimadzu.com/an/hplc/support/lib/ctalk/resol-1.html>. (Retrieved Oct, 2018)