

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable) ที่สะอาดทำจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ หรือ จุลชีพ ซึ่งไบโอดีเซลผสมร้อยละ 5 – 20 นั้นสามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ การใช้ไบโอดีเซลผสมในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นเป็นที่ยอมรับกันในหลายๆ ประเทศรวมทั้งในประเทศไทยด้วย ดังนั้นไบโอดีเซลจึงเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหรือเป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยการนำน้ำมันพืชมาปรับสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกนั้นทำได้ 5 วิธีคือ

1. การใช้น้ำมันพืชโดยตรงกับเครื่องยนต์แทนน้ำมันปิโตรดีเซล
2. การผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียม
3. การนำน้ำมันพืชมาผ่านกระบวนการไมโครอิมัลชัน
4. กระบวนการแตกตัวน้ำมันพืชด้วยความร้อน
5. กระบวนการเปลี่ยนน้ำมันพืชให้เป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่

เอสเทอร์หรือทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ไบโอดีเซลได้กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้จากการใช้น้ำมันพืช ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกษตรที่สามารถผลิตได้เป็นอย่างดีในประเทศ ทำให้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศได้อย่างสมบูรณ์ทุกขั้นตอน นับตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ และเชื้อเพลิงไบโอดีเซลยังจัดเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่สะอาด และไม่ก่อให้เกิดมลพิษหลังการเผาไหม้ซึ่งช่วยรักษาสมดุลของระบบนิเวศในธรรมชาติ ในปัจจุบันในทางพาณิชย์ได้นำไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลออกจำหน่ายโดยมีอัตราส่วนการผสมที่ไม่ทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ สามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิดทั้งเติมโดยตรงและผสมลงในน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึงการผสมไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 5 ต่อ 95 หรือ B100 ซึ่งเป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100% เป็นต้น ไบโอดีเซลมีข้อได้เปรียบน้ำมันดีเซลคือสามารถเผาไหม้ได้อย่างหมดจดไม่มีเขม่าควันหลงเหลือให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และจุดวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้และการขนส่ง นอกจากนี้แล้วค่าซีเทนที่เป็นดัชนีบอกถึงคุณภาพการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง ยังมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล สมบัติทาง

กายภาพของไบโอดีเซลนอกจากค่าซีเทนแล้ว คุณสมบัติอื่นๆ เช่นความหนาแน่น ความหนืด แรงตึงผิว ความดันไอ ความเร็วเสียง ฯลฯ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การผลิต การขนส่ง การนำไปใช้งาน และการปรับปรุงและพัฒนาเชื้อเพลิงให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น การทราบสมบัติทางกายภาพมีประโยชน์อย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเร็วเสียงในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ และสร้างสมการทำนายความเร็วเสียงในไบโอดีเซลด้วยพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยเชื่อมโยงกับโครงสร้างกรดไขมันในไบโอดีเซล เป็นสมการที่มีรูปแบบไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการใช้งาน ลดขั้นตอนเวลา และพลังงานที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์เพื่อทราบสมบัตินี้ เหตุที่เลือกความเร็วเสียงในการศึกษาเนื่องจากความเร็วเสียงในไบโอดีเซลมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับการอัดแน่นของในห้องเผาไหม้ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และยังเกี่ยวเนื่องไปถึงการปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้สู่อากาศ และยังสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพอื่น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของความเร็วเสียงในไบโอดีเซล
2. เพื่อโยงสัมพันธ์ความเร็วเสียงของไบโอดีเซลกับพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ต่างๆ

ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะไบโอดีเซลที่ได้จากการเตรียมด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ เมทานอล และเอทานอล

ประโยชน์ที่ได้รับ

ด้านวิชาการ: งานวิจัยนี้สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่จะโยงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกรดไขมันองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชหรือไบโอดีเซลกับพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และความเร็วเสียงของไบโอดีเซล และสามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้เพื่อออกแบบควบคุมให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ด้านนโยบาย: การส่งเสริมให้ประชาชนปลูกพืชพลังงานสำหรับผลิตไบโอดีเซลโดยไม่พึ่งพึ่งปาล์มน้ำมันเพียงชนิดเดียว โดยการใช้น้ำมันพืชผสมแต่ยังคงมีสมบัติของเชื้อเพลิงที่เป็นไปตามมาตรฐานการค้า

นิยามศัพท์เฉพาะ

การประมาณ คือ การบอกขนาด จำนวน หรือปริมาณ ที่ไม่ต้องการละเอียดถี่ถ้วน เป็นเพียงการคาดคะเนจำนวนหรือปริมาณด้วยสายตาเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวัด เครื่องคำนวณ หรือการนับแต่อย่างใด

กรดไขมัน คือ เป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งโมเลกุลของกรดไขมันประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ซึ่งแสดงความเป็นกรดต่ออยู่กับสายของไฮโดรคาร์บอน กรดไขมันในอาหารมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ ประมาณ 4-24 อะตอม

เมทิลไบโอดีเซล คือน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ทำปฏิกิริยากับเมทิลแอลกอฮอล์ โดยอยู่ในรูปของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์

เอทิลไบโอดีเซล คือน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ โดยอยู่ในรูปของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์

พลังงานอิสระ คือ พลังงานที่อยู่ในของวัสดุ และมีลักษณะแปรเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือโมเลกุล (Entropy) ซึ่งระบบที่เกิดสมดุลนั้นจะมีค่าพลังงานอิสระที่น้อยที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เข้าใจในงานวิจัยเพิ่มมากขึ้น ผู้วิจัยได้รวบรวมองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอันเป็นประโยชน์ไว้ในบทนี้ ซึ่งเนื้อหาประกอบไปด้วย

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลิปิด

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล

ความเร็วเสียง

ความเร็วเสียงในไบโอดีเซลและแบบจำลองความเร็วเสียง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลิปิด

ไขมันหรือลิปิด (Lipid) เป็นสารชีวโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว (non-polar) ซึ่งจะแสดงสมบัติที่เกลียดน้ำ (Hydrophobicity) ทำให้ลิปิดสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) แต่ไม่ละลายในน้ำ และลิปิดอีกชนิดจะประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว (polar) ทั้งที่มีประจุหรือไม่มีประจุอยู่ในโครงสร้างด้วย ทำให้มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) ซึ่งลิปิดที่มีสมบัติสองอย่างนี้อยู่ด้วยกันจะเป็น Amphipathic Molecule หรือ แอมฟิไฟล์ (Amphiphiles) ลิปิดกลุ่มนี้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกลาง ทำให้ลิปิดที่เกลียดน้ำสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำได้ ตัวอย่างของลิปิดพวกนี้ได้แก่พวกฟอสโฟลิพิด เซอไรด์ สฟิงโกลิปิด (Sphingolipid) เป็นต้น ลิปิดบางชนิดอาจจะมีส่วนของโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเป็นชนิดสายตรง เช่น พวกกลีเซอไรด์ เทอริปिनอยด์ หรือ เป็นวงแหวน เช่น พวกสเตอรอยด์ ลิปิดเหล่านี้มีสมบัติเป็นกลาง (Neutral Lipids) มีความไม่ชอบน้ำสูงและมักจะรวมตัวกันเอง ลิปิดบางชนิดอาจจะอยู่รวมกับโปรตีน ได้แก่ ไลโปโปรตีน (Lipoprotein) ชนิดต่างๆ ในน้ำเลือด บางชนิดอยู่กับคาร์โบไฮเดรตเป็นโมเลกุลผสม พวกไกลโคลิพิด (Glycolipids) เป็นต้น

การจำแนกลิปิด

ลิปิดส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติ สามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ เช่น จำแนกตามลักษณะของสูตรโครงสร้างจะแบ่งลิปิดออกเป็น 5 ประเภท คือ เอสเตอร์ของกลีเซอรอล (Glycerol Ester) เอสเตอร์ของแอลกอฮอล์อื่นๆ สฟิงโกลิปิด (Sphingolipid) อนุพันธ์ของสเตอรอล (Sterol Derivative)

และอนุพันธ์ของเทอร์ปีน (Terpene Derivative) หรือการจำแนกกรดไขมันตามลักษณะความมีขั้ว และไม่มีขั้วในโมเลกุลออกเป็น 2 ชนิด คือ กรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) โมเลกุล จะมีความอิ่มตัว โดยคาร์บอนอะตอมจะเรียงต่อกันด้วยพันธะเดี่ยว (Single Bond) อย่างเดียว เช่น กรดพาล์มิติก (Palmitic Acid) มีคาร์บอน 16 ตัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีมากในธรรมชาติและพบใน ร่างกาย กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acids) เป็นกรดไขมันที่มีทั้งพันธะเดี่ยวและ พันธะคู่อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน อาจมีได้ตั้งแต่ 1 พันธะคู่ เรียกรวมกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monoenoic Fatty Acids) หรือ Monounsaturated fatty Acids) และ 2 พันธะคู่ขึ้นไป เรียกรวม กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyenoic Fatty Acids หรือ Polyunsaturated Fatty Acids) ทั้งนี้พันธะคู่ ในกรดไขมันต้องอยู่ห่างกัน 3 คาร์บอนดังนี้ $-CH=CH-CH_2-CH=CH-$ เสมอ ตัวอย่างกรดไขมันทั้ง ชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่พบได้ทั่วไปแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่พบได้ทั่วไปตามแหล่งสามัญต่างๆ

กรดไขมันอิ่มตัว		
กรดไขมัน	สูตร	แหล่งสามัญ
Acetic Acid	CH_3COOH	น้ำส้มสายชู
Butyric Acid	C_3H_7COOH	เนย
Caproic Acid	$C_5H_{11}COOH$	เนย
Caprylic Acid	$C_7H_{15}COOH$	เนย
Capric Acid	$C_9H_{19}COOH$	เนย น้ำมันมะพร้าว
Lauric Acid	$C_{11}H_{23}COOH$	น้ำมันมะพร้าว
Myristic Acid	$C_{13}H_{27}COOH$	น้ำมันมะพร้าว
*Palmitic Acid	$C_{15}H_{31}COOH$	สัตว์ และไขมันพืช
*Stearic Acid	$C_{17}H_{35}COOH$	สัตว์ และไขมันพืช
Arachidic Acid	$C_{19}H_{39}COOH$	น้ำมันถั่ว
Lignoceric Acid	$C_{23}H_{47}COOH$	สมอง และเนื้อเยื่อประสาท
Cerotic Acid	$C_{25}H_{51}COOH$	ซีผึ้งจากรังผึ้ง และไขมันจากขนแกะ
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
*Palmitoleic Acid	$C_{15}H_{29}COOH$	สัตว์และไขมันพืช
*Oleic Acid	$C_{17}H_{33}COOH$	สัตว์ ไขมันพืชและน้ำมันพืช
Linoleic Acid	$C_{17}H_{31}COOH$	น้ำมันลินสีด น้ำมันพืช
Linolenic Acid	$C_{17}H_{29}COOH$	น้ำมันลินสีด
Arachidonic Acid	$C_{19}H_{31}COOH$	สมองและเนื้อเยื่อประสาท

สารประกอบกลีเซอไรด์

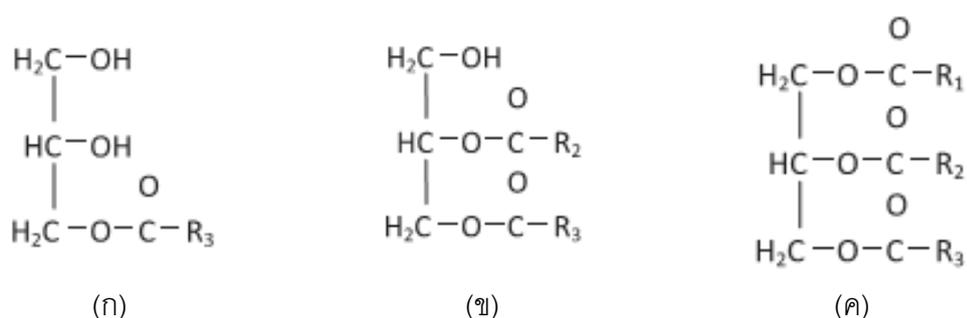
สารประกอบกลีเซอไรด์ เป็นลิพิดที่มีกรดไขมันจับกับกลีเซอรอลด้วยพันธะเอสเทอร์อาจเรียกว่า เอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) ส่วนกรดไขมันเรียกว่าหมู่อะซิล (Acyl Group, R-COO) แบ่งได้ตามจำนวนกรดไขมันที่มีอยู่ในโมเลกุล เช่น

โมโนกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบกลีเซอไรด์ที่มีหมู่อะซิล 1 หมู่อะซิลจับกับกลีเซอรอล โดยกรดไขมันอาจจะเกิดพันธะเอสเทอร์กับหมู่อัลคอกซิลของกลีเซอรอลได้ที่คาร์บอนตำแหน่ง 1 หรือ 2 อย่างใดอย่างหนึ่งจะได้ 1 - โมโนกลีเซอไรด์ (1 - monoglyceride) หรือ 2 - โมโนกลีเซอไรด์ (2 - monoglyceride)

ไดกลีเซอไรด์ เป็นสารประกอบกลีเซอไรด์ที่มีหมู่อะซิล 2 หมู่อะซิลจับกับกลีเซอรอลโดยพันธะเอสเทอร์ที่คาร์บอนที่ตำแหน่ง 1 และ 2 หรือตำแหน่ง 1 และ 3 ของกลีเซอรอล

ไตรกลีเซอไรด์ เป็นสารประกอบกลีเซอไรด์ที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน 3 ตัว โดยธรรมชาติพบว่ากรดไขมันทั้ง 3 ตัวอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ เช่น Palmitic Acid + 2 Oleic Acid หรือ 2 Palmitic Acid + Linoleic Acid หรือ Palmitic Acid + Stearic Acid + Oleic Acid ฯลฯ

โครงสร้างโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอไรด์ (ก) โมโนกลีเซอไรด์ (ข) ไดกลีเซอไรด์

และ (ค) ไตรกลีเซอไรด์ (Issariyakul & Dalai, 2014)

สารประกอบไตรกลีเซอไรด์หรือบางที่เรียกว่าไขมันเป็นกลาง (Neutral Fats) หรือไขมันแท้ (True Fats) ซึ่งจะประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปพบอยู่ในไขมันที่สะสมไว้ในเซลล์ของพืชและสัตว์ และในน้ำมันที่ใช้ปรุงอาหาร กลีเซอไรด์มีจุดหลอมเหลวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ไตรกลีเซอไรด์บางครั้งอาจเป็นของแข็งเรียกว่า "ไขมัน" หรือเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า "น้ำมัน (Oil)" เช่น ไตรกลีเซอไรด์ที่สกัดจากเมล็ดพืช ได้แก่ ข้าวโพด ถั่วเหลือง และเมล็ดดอกคำฝอย เป็นต้น ส่วนไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันหมู หรือน้ำมันพืชที่ผ่านกรรมวิธีเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เพื่อให้พันธะคู่ส่วนใหญ่กลายเป็นพันธะเดี่ยว ไตรกลีเซอไรด์มีฤทธิ์เป็นกลาง (Neutral Fat) เนื่องจากไม่มีหมู่ที่มีขั้วอยู่ในโมเลกุลเลย ไตรกลีเซอไรด์เมื่ออยู่ในน้ำจะไม่กระจายตัวเป็นไมเซลล์ (Micelle) เหมือนเกลือของกรดไขมัน แต่จะรวมตัวกันเองเป็นหยดน้ำมันลอยอยู่บนผิวน้ำ เนื่องจากมีความหนาแน่น (Density) ต่ำกว่าน้ำ กลีเซอไรด์เป็น Saponifiable Lipid สามารถละลายด้วยด่าง NaOH หรือ KOH ได้เกลือของกรดไขมัน หรือสบู่และกลีเซอรอล

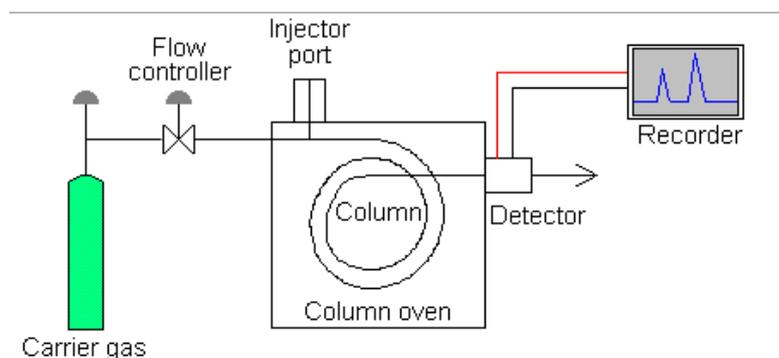
การแยกและการวิเคราะห์ลิปิดด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี

แก๊สโครมาโตกราฟีมีบทบาทอย่างมากในงานวิจัยลิปิด ทั้งนี้เพราะลิปิดเป็นสารที่มีโพลาริตีต่ำ (ต่ำกว่าสารชีวโมเลกุลอื่นๆ) มีขนาดโมเลกุลไม่ใหญ่มากนัก ระเหยเป็นไอได้ง่ายจึงเหมาะต่อการใช้แก๊สโครมาโตกราฟีในการแยก เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ปัจจุบันได้พัฒนาไปมากให้ข้อมูลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือและทำทวนซ้ำได้ดี (Producibility) แก๊สโครมาโตกราฟีจึงใช้ทั้งด้านการวิเคราะห์เอกลักษณ์ (Identification) และวิเคราะห์ปริมาณ (Quantitation) ในส่วนหลักการทำแก๊สโครมาโตกราฟีของกรดไขมันชนิดเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Esters, FAMES) จะประกอบด้วยหลายขั้นตอนโดยเริ่มตั้งแต่การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) แล้วนำไปฉีด (Injection) ในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี เพื่อทำการแยก FAMES แต่ละชนิด หลังจากที่ยกเสิร์ฟเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบเอกลักษณ์และหาปริมาณของ FAMES ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะต้องมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการแยกได้สูงสุด (Eder, 1995)

หลักการทำงานของแก๊สโครมาโตกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีทั่วไปประกอบด้วยตู้อบ (Oven) สำหรับให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ ตัวฉีดสาร (Injector) คอลัมน์ เครื่องตรวจวัด (Detector) และเครื่องบันทึก (Recorder) เครื่องวัดจะตรวจวัดปริมาณสารที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์และแปลงเป็น

สัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าสู่เครื่องบันทึก โดยแผนภาพอย่างง่ายของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 แผนภาพแสดงเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Division, Wellbeing, & University)

เครื่องตรวจวัดของแก๊สโครมาโตกราฟเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนและสำคัญชนิดหนึ่งที่ขาดไม่ได้ เนื่องจากปริมาณสารที่ชะออกมาจากคอลัมน์นั้นมีปริมาณน้อย การเก็บรวบรวมเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีภายหลังจะยุ่งยากและไม่สะดวกอย่างยิ่ง เครื่องตรวจวัดของแก๊สโครมาโตกราฟทั่วไปจะเป็นแบบตรวจวัดผลต่าง (Differentiating Detector) และจัดแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ (1) เครื่องตรวจวัดที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นสาร พื้นที่ใต้พีคที่เครื่องจดบันทึกบันทึกไว้จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นสารที่ไหลผ่านเครื่องตรวจวัดและ (2) เครื่องตรวจวัดที่ตอบสนองต่ออัตราไหลของมวล พื้นที่ใต้พีคที่เครื่องจดบันทึกบันทึกไว้จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณมวลสารที่ไหลผ่านเครื่องตรวจวัด

ค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Number; SN)

ค่าสะaponนิฟิเคชันคือ จำนวนมิลลิกรัมของด่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในไขมัน หรือน้ำมัน (เรียกว่า ปฏิกิริยา Saponification) อย่างสมบูรณ์ จำนวน 1 กรัม ได้เป็นสบู่ ซึ่งเป็นเกลือของกรดไขมัน (Fatty Acid) 3 โมเลกุลและกลีเซอรอล โดยค่าสะaponนิฟิเคชันเป็นค่าที่บอกขนาดโมเลกุล หรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ หากน้ำมันที่มีค่าสะaponนิฟิเคชันสูงแสดงว่ากรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนมาก ดังนั้น จึงต้องใช้ด่างเป็นจำนวนมากในการไฮโดรไลซ์ ทำนองเดียวกันถ้าค่าสะaponนิฟิเคชันต่ำ แสดงว่ากรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของ

ไตรกลีเซอไรด์มีน้ำหนักโมเลกุลมาก จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนน้อย ทำให้ใช้ต่างน้อยในการทำปฏิกิริยา โดยค่าสะปอนนิฟิเคชันมีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล (M)

ค่าไอโอดีน (Iodine Value; IV)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมันหนัก 100 กรัม เป็นค่าที่บอกถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน ค่าไอโอดีนเป็นตัวชี้บ่งว่าไขมันหรือน้ำมันมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าไอโอดีนสูง แสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมากและจะเกิดการหืนชนิด Oxidative Rancidity ได้ง่ายด้วยการหาค่าของไอโอดีนโดยวิธีของฮานัส (Hanus) ใช้สารละลายไอโอดีนมาตรฐานในกรดอะซิติกที่มีไอโอดีนโบรไมด์ช่วยเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับไขมันตัวอย่างที่ทราบปริมาณที่แน่นอนซึ่งละลายในคลอโรฟอร์มหรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ทิ้งไว้ในที่มีระยะเวลาหนึ่ง ไตรไตรปริมาณไอโอดีนที่เหลือจากปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) โดยค่าไอโอดีนมีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล (M) และจำนวนพันธะคู่

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล

คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติได้มีมติให้ไบโอดีเซล หมายถึงเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีเกิดเป็นสารที่เรียกว่าเมทิลเอสเตอ์ หรือเอทิลเอสเตอ์ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ น้ำมันนี้ไม่มีส่วนผสมของปิโตรเลียม สลายได้ง่ายและปราศจากกำมะถัน ส่วนการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติมีมติให้ใช้คำเรียกว่าน้ำมันดีเซลมะพร้าวหรือน้ำมันดีเซลปาล์ม ขึ้นอยู่กับชนิดของประเภทน้ำมันที่นำมาผสม เช่น น้ำมันดีเซลมะพร้าวดิบ น้ำมันดีเซลมะพร้าวบริสุทธิ์ น้ำมันดีเซลปาล์มดิบ น้ำมันดีเซลปาล์ม บริสุทธิ์ เป็นต้น

การผลิตไบโอดีเซลเมื่อมีส่วนที่เป็นน้ำมันแล้วจะต้องอาศัยแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย การผลิตไบโอดีเซลทางการค้าจำเป็นต้องอาศัยความรู้และเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อให้การผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่าและสามารถผลิตเพื่อจำหน่ายทางการค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีวิธีการหลักๆ ดังนี้

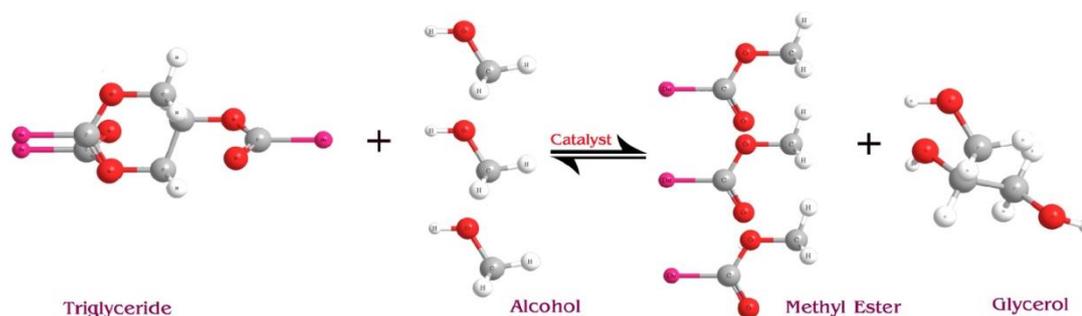
1. การทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์โดยใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)
2. การทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา หรือเรียกว่าการทำปฏิกิริยาในสภาวะเหนือวิกฤต (Super Critical)
3. ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ให้เป็นกรดไขมันและให้กรดไขมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นเอสเทอร์ หรือเรียกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นและมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน โดยที่เริ่มจากการนำน้ำมันที่สกัดได้มาให้ความร้อนจากนั้นเติมแอลกอฮอล์ปฏิกิริยาหรือแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ ที่มีคาร์บอน 1-8 อะตอมและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล โดยทั่วไปนิยมใช้เมทานอลและเอทานอลมากที่สุด การใช้เอทานอลมีข้อดีคือ ได้จากพืช ทำให้สามารถหาทดแทนได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การทำปฏิกิริยาต้องนำน้ำมันหรือไขมันมาผสมกับแอลกอฮอล์โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทันที จากนั้นนำไปปั่นกวนโดยกำหนดระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์จะได้สารละลายแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและชั้นล่างเป็นกลีเซอรอล นำชั้นบนไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกลั่น แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ จากนั้นนำไปกรองด้วยไซเดียมซัลเฟตเพื่อกำจัดน้ำหรือนำชั้นบนไปทำให้เจือจางด้วยอีเทอร์แล้วล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่น ตามลำดับ แล้วนำไปคูดน้ำออกด้วยไซเดียมคาร์บอเนตและระเหยตัวทำละลายออก จากนั้นหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ เอสเทอร์ของกรดไขมันและกรดไขมันชนิดต่างๆ ที่เหลืออยู่ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น HPLC, GC, TLC และ NMR (Fukuda, Kondo, & Noda, 2001; Jitputti et al., 2006; Fangrui Ma, Clements, & Hanna, 1999; Marchetti, Miguel, & Errazu, 2007; Meher, Vidya Sagar, & Naik, 2006; กองบรรณาธิการเทคนิค, 2548)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากในการผลิตไบโอดีเซล เป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ด้วยการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชให้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ ปกติปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์เกิดได้ค่อนข้างช้ามากและสามารถผันกลับได้

ดังนั้นในการทดลองโดยทั่วไปใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเป็นได้ทั้ง กรด เบส และเอนไซม์ และสัดส่วนปริมาณแอลกอฮอล์ตั้งต้นให้เกินความต้องการของระบบเพื่อกระตุ้นให้มีการเกิดปฏิกิริยาและปฏิกิริยาเลื่อนไปในทิศทางที่สังเคราะห์ผลิตภัณฑ์มากที่สุด การใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ของปฏิกิริยา จึงมีชื่อเรียกปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาทรานส์เมทิลเลชัน (Transmethylation) โดยการดำเนินไปของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Marchetti et al., 2007)

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาหมายถึงสารที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้วสารนั้นจะต้องได้กลับมาเท่าเดิม ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเสมอ โดยอาจจะมีส่วนร่วมโดยตรง หรือมีส่วนร่วมโดยอ้อมก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องได้กลับคืนมาเท่าเดิม กระบวนการที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปเรียกว่า กระบวนการคะตะไลซิส (Catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะแบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว หมายถึง ตัวเร่งที่อยู่ในวัฏภาคหรืออยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น เช่น เป็นของแข็งเหมือนกันหรือเป็นของเหลวเหมือนกัน

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคต่างจากสารตั้งต้น เช่นเมื่อสารตั้งต้นทั้งหมดเป็นก๊าซแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง หรือสารตั้งต้นเป็นของเหลวแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง เป็นต้น

และยังนิยมแบ่งตามสมบัติทางเคมีโดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด เช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ ในปัจจุบันใช้เพียงตัวเดียวคือ เอนไซม์ไลเปส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งควรใช้ทำปฏิกิริยากับเมทานอลหรือเอทานอล โดยน้ำมันที่ใช้จะเป็นชนิดใดก็ได้เช่น น้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันที่ใช้แล้วเป็นต้น ในขั้นตอนก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (NaOH, KOH) จะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของสารประกอบอัลคอกซี (Alcoxy) ก่อนแล้วจึงจะทำปฏิกิริยาต่อกับน้ำมัน ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบอัลคอกซีเป็นไปดังปฏิกิริยาเคมีในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีในการเตรียมสารอัลคอกซี (Marchetti et al., 2007)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนี้จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) ในปริมาณที่สูงด้วย (Fangrui Ma et al., 1999) ส่วนข้อจำกัดตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสคือ น้ำ และ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ในน้ำมันดิบ ถ้ามีน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในระบบของการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณมากจะทำให้มีสบู่ออกขึ้นแทนที่จะได้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ (Agarwal, 2007)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid Catalyst)

กรดที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิตคือน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมากแต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก อาจจะใช้เวลามากกว่า 1 วันกว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับกลีเซอไรด์ที่มี ส่วนประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวและน้ำในปริมาณสูงได้เช่น ในน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นต้น (Encinar, González, Rodríguez, & Tejedor, 2002; Fukuda et al., 2001) แต่ถ้าน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะทำให้กรดไขมันทำปฏิกิริยา เอสเทอริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์เกิดเป็นเอสเทอร์กับน้ำ และน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง (Ulf, Ricardo, & Rogério Matheus, 1998)

3. เอนไซม์ไลเปส (Lipase)

เอนไซม์ไลเปสถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น ไฮโดรไลซิสของ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) และ แอซิโดไลซิส (Acidolysis) ข้อดีของเอนไซม์ไลเปสคือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ไม่มีของเสียออกมาจากกระบวนการ ข้อเสียของเอนไซม์คือมีราคาค่อนข้างแพง (Fangrui Ma & Hanna, 1999)

4. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst)

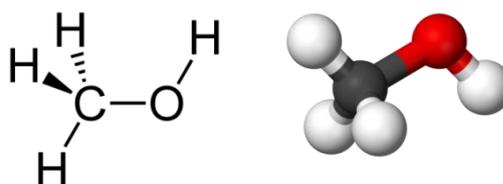
เป็นการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวในระบบ เช่น ZrO_2 , ZnO , KNO_3/ZrO_2 , KNO_3/KL , Zeolite เป็นต้น ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งในระบบที่มีน้ำในปฏิกิริยา (Kusdiana & Saka, 2004)

แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันคือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และ บิวทานอล โดยเฉพาะเมทานอลถูกใช้มากที่สุดเพราะมีราคาถูกอีกทั้งยังมีข้อดีในส่วนของสมบัติทางกายภาพและด้านเคมี คือ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีขั้ว ซึ่งสมบัติดังกล่าวของเมทานอลสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลได้อย่างรวดเร็วและสามารถละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ตามสัดส่วนของปฏิกิริยาเคมีพบว่าเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมล แอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 3 ต่อ 1 แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น แอลกอฮอล์ที่นิยมนำมาผลิตไบโอดีเซลมีอยู่ 2 ชนิดดังนี้

1. เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol)

เมทิลแอลกอฮอล์ หรือเมทานอล เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลายและใช้เป็นเชื้อเพลิงในธรรมชาติ เมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งเมทานอลจะระเหยออกสู่อากาศภายนอก แล้วสลายตัวได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เมทานอลมีสูตรเคมีคือ CH_3OH และมีโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเมทานอล

สมบัติทั่วไปของเมทานอลมีดังนี้

ชื่อตาม IUPAC Methanol

สูตรโมเลกุล CH_3OH

มวลโมเลกุล 32.05 g/ mol

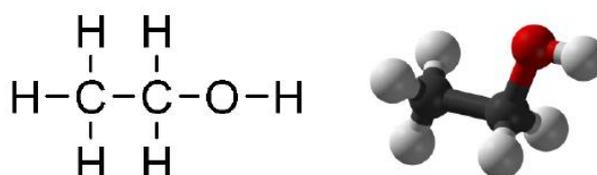
ความหนาแน่น 0.7918 g/cm³

จุดหลอมเหลว -97°C

จุดเดือด 64.7°C

2. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)

เอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอลเป็นของเหลวใสไม่มีสีแต่มีกลิ่นฉุน เป็นสารไวไฟ สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำหรือสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ได้ดี เอทานอล เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการนำเอาพืชมาหมักด้วยจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล จากนั้นจึงเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เอนไซม์หรือกรดบางชนิดช่วยย่อย สามารถทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ได้ด้วยการกลั่น โดยจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลนั้นมีหลายชนิด แต่ที่นิยมอย่างแพร่หลาย คือ ยีสต์ (Yeast) แต่ในปัจจุบันพบว่าแบคทีเรีย (Bacteria) สายพันธุ์ Zymomonas Mobilis ทำหน้าที่ผลิตเอทานอล ได้ดีกว่ายีสต์ แต่การนำแบคทีเรียมาใช้ค่อนข้างที่จะยาก เพราะโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คุ้นเคยกับยีสต์มากกว่า ทั้งนี้การผลิตเอทานอลนั้นยังสามารถทำได้โดยการสังเคราะห์ทางกระบวนการทางเคมีอีกด้วย เอทานอลมีสูตรเคมีคือ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ และมีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเอทานอล

สมบัติทั่วไปของเอทานอลมีดังนี้

ชื่อตาม IUPAC Ethanol

สูตรโมเลกุล $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

มวลโมเลกุล 46.07 g/ mol

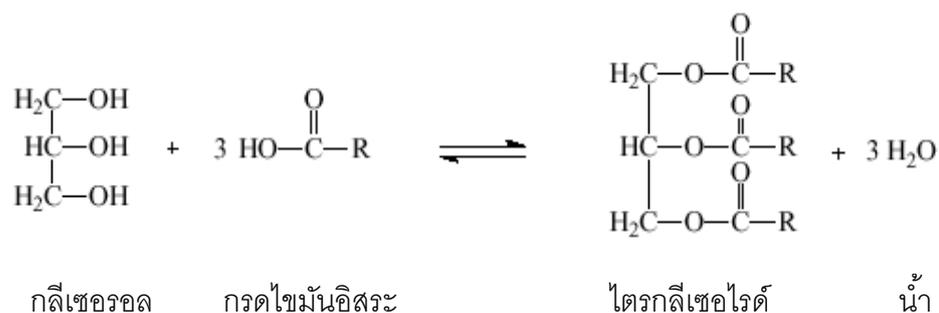
ความหนาแน่น 0.789 g/cm³

จุดหลอมเหลว -114.3°C

จุดเดือด 78.4°C

ไขมันและน้ำมัน

ไขมัน (Fat) และน้ำมัน (Oil) เป็นสารประกอบประเภทลิพิดที่พบในธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไขมันจะเป็นของแข็ง น้ำมันจะเป็นของเหลว ไขมันและน้ำมันทุกชนิดประกอบด้วยส่วนหนึ่งมาจากกลีเซอรอล และอีกส่วนหนึ่งมาจากกรดไขมัน ดังนั้นจึงเรียกไขมันและน้ำมันว่าไตรกลีเซอรอล หรือไตรกลีเซอไรด์ การเกิดไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเกิดไตรกลีเซอไรด์ (Ulf et al., 1998)

กรดไขมัน (Fatty Acid) คือกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ต่ออยู่กับสายของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ส่วนมากคาร์บอนต่อกันเป็นสายตรงไม่แตกกิ่งก้านและไม่คดเป็นวงปิด โมเลกุลที่เล็กที่สุดของกรดไขมันมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 4 กรดไขมันแบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) คือกรดไขมันที่โมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอน มีพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนจับกันด้วยพันธะเดี่ยวทั้งหมด

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) คือคือกรดไขมันที่โมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนมีพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนจับกันด้วยพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งพันธะโดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชหรือสัตว์แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช แสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช (Barnwal & Sharma, 2005)

ชนิดกรดไขมัน	Myristic	Palmitic	Stearic	Arachidic	Behenic	Lignocerie	Oleic	Linoleic	Linolenic	Erucic
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
ไขมัน/น้ำมัน	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน									
น้ำมันปาล์ม	0.2	45	4.5	0	0	0	40.2	0	10.1	0
น้ำมันข้าวโพด	0	12	2	0	0	0	45	0	41	0
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
น้ำมันลินซีด	0	5	2	0	0	0	20	0	18	55
น้ำมันถั่วลิสง	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
น้ำมันเมล็ดเรพ	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
น้ำมันงา	0	9	2	0	0	0	53	0	39	0
น้ำมันถั่วเหลือง	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชน้ำมันที่ให้ปริมาณน้ำมันสูงถึง 0.6 ถึง 0.8 ตันต่อไร่ต่อปีเป็นพืชที่มีศักยภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหารและอุตสาหกรรมพลังงาน น้ำมันปาล์มมีราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น น้ำมันปาล์มเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์และมีโครงสร้างเป็นกลีเซอรอลเชื่อมต่อกับกรดไขมันด้วยพันธะเอสเทอร์ โดยปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94 ถึงร้อยละ 96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ตัวอย่างน้ำมันปาล์มดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 น้ำมันปาล์ม

ปัจจัยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยา

ในการดำเนินไปของปฏิกิริยา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาค่าผลของวัตถุดิบ และสภาวะของกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ

การทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารตั้งต้นจะเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้นด้วย เพราะค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีแปรผันตรงกับอุณหภูมิดังสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) และสมการของอายริง (Eyring's Equation) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

สมการอาร์เรเนียส(Arrhenius Equation)

$$k = Ae^{\frac{Ea}{RT}} \quad (2.1)$$

เมื่อ	Ea	คือพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ของปฏิกิริยา
	R	คือค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คืออุณหภูมิ (K)
	k	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา
	A	คือ ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลสารตั้งต้น

สมการของอายริง (Eyring's Equation)

$$k = \frac{N_A h}{V} e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (2.2)$$

เมื่อ	N_A	คือเลขของอโวกาโด (Avogadro's Number)
	h	คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant)
	V	คือปริมาตรต่อโมล
	ΔG	คือ พลังงานอิสระ

โดยทั่วไปมักใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาใกล้จุดเดือดหรือไม่ควรเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์เพื่อป้องกันแอลกอฮอล์เดือด

Encinar (Encinar et al., 2002) ได้ทำปฏิกิริยาของเมทานอลกับน้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 32, 45 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าเวลาผ่านไป 6 นาทีเกิดเอสเทอร์มากที่สุดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปถึง 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณการเกิดเอสเทอร์เท่ากันแต่ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียสให้ค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย สรุปได้ว่าอุณหภูมิมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

Damoko และ Cheryan (Darnoko & Cheryan, 2000) ทำการศึกษาจลนศาสตร์ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม กับเมทานอลในสัดส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6 ต่อ 1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.2 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ทดลองที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตร 1 ลิตร พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงจะได้ค่าเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำความหนืดของน้ำมันน้อยลง ทำให้น้ำมันผสมกับเมทานอลได้ดี

Ma และ Hanna (Fangrui Ma et al., 1999) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์กับเมทานอล อัตราส่วนเชิงโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 6 ต่อ 1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณร้อยละ 1 (โดยมวลในน้ำมันถั่วเหลือง) ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ 33, 45 และ 60 องศาเซลเซียส ร้อยละผลผลิต (Yield) ได้เท่ากับ 64, 87 และ 94 ตามลำดับ

2. เวลา

จากรายงานส่วนใหญ่เรื่องของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมีการกลายเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น

Ma และคณะ (F. Ma, Clements, & Hanna, 1998) ทำการทดลองไขมันที่ได้จากวัวกับเมทานอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสในช่วง 1 นาทีแรก อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะค่อนข้างช้ามากซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากกระบวนการการผสมและแพร่ของสารตั้งต้น แต่หลังจากนาทีที่ 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นอย่างมาก ทำให้อัตราการผันกลับของปฏิกิริยาเร็วขึ้นเช่นกัน หลังจากนั้นความเร็วค่อยๆ ลดลงจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยปริมาณของผลผลิตสูงสุดที่นาทีที่ 15

Freedman และคณะ (Freedman, Pryde, & Mounts, 1984) ทดลองใช้น้ำมันจากพืช 4 ชนิด คือน้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดฝ้าย และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าเมื่อสุมตัวอย่างที่เวลา 1 ชั่วโมง อัตราการผันกลับของปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกันโดยน้ำมันทั้ง 4 ชนิดให้ผลผลิตในอัตราส่วนร้อยละ 93 ถึงร้อยละ 98 สรุปได้ว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

Galen และคณะ (Suppes, Dasari, Doskocil, Mankidy, & Goff, 2004) ศึกษาปัจจัยเวลาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากไขมันวัวทำปฏิกิริยากับเมทานอลในถังปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ามากในช่วงนาทีแรกเนื่องจากเกิดการผสมและละลายของเมทานอลเข้าไปในไขมัน แต่หลังจากนาทีแรกผ่านไปถึง 5 นาทีปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วมากและจะเสร็จสมบูรณ์ภายใน 15 นาที ในช่วงการเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาจะมีไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์อยู่ในปริมาณมาก จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น จนสิ้นสุดกระบวนการจะมีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์สูงกว่าไดกลีเซอไรด์

3. ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนิยมใช้อยู่ 3 ชนิดคือ กรด เบส และเอนไซม์ สำหรับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดเพราะถ้าใช้แบบเบสจะให้ผลผลิตต่ำและการแยกชั้นของไบโอดีเซลทำได้ยาก เนื่องจากเบสจะทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดเป็นสบู่

Ma และคณะ (F. Ma et al., 1998) พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดผลได้เร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด แต่หากน้ำมันที่ใช้มีปริมาณกรดไขมันสูงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดจะเหมาะสมกว่า

Formo (Formo, 1979) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะให้อัตราเร็วกว่าแบบกรดประมาณ 4,000 เท่าภายใต้สภาวะเงื่อนไขของปฏิกิริยาที่เหมือนกันที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ Ma และคณะ

(Fangrui Ma et al., 1999) พบว่าไซเตียมไฮดรอกไซด์และไซเตียมเมทอกไซด์ สามารถแสดงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมที่สุดประมาณร้อยละ 0.3 และ 0.5 (โดยน้ำหนักของไซวัว) ตามลำดับ

Gemma และคณะ (Vicente, Martínez, & Aracil, 2004) ได้ทดลองชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาประกอบด้วย ไซเตียม ไฮดรอกไซด์ โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ไซเตียมเมทอกไซด์ และโพลีเอทิลีนเมทอกไซด์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก) และอัตราการกวน 600 รอบต่อนาที พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เร่งได้ดีที่สุดตามลำดับคือ ไซเตียมไฮดรอกไซด์ โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ไซเตียมเมทอกไซด์ และ โพลีเอทิลีนเมทอกไซด์ ตามลำดับ

4. อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์

อัตราส่วนโมลของสารตั้งต้นถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่ง โดยมีผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตของอัลคิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอย่างมาก จากทฤษฎีสมดุลมวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometric Ratio) ต้องใช้แอลกอฮอล์ 3 โมลทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลแต่เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสามารถผันกลับได้จำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากขึ้น ในการทดลองของ Bradshaw และ Meuly (Bradshaw & Meuly, 1944) พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันพืช ที่เหมาะสมจะอยู่ช่วง 3.3 ถึง 5.25 ต่อ 1

Ney และ Southwell (Ney & Southwell, 1983) พบว่าอัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเรพ (Rapeseed) มีค่าเท่ากับ 6 ต่อ 1 จึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์กลับคืน (Recovery) มากที่สุด แต่ถ้าในน้ำมันพืชมีปริมาณกรดไขมันอิสระในปริมาณที่สูงจะต้องเพิ่มอัตราส่วนของโมลให้มากขึ้น

Freedman และคณะ (Freedman et al., 1984) กล่าวเกี่ยวกับอัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์กับน้ำพืชตั้งแต่ 1 ต่อ 1 ถึง 6 ต่อ 1 โดยใช้ น้ำมันพืช 4 ชนิด พบว่าอัตราส่วนที่ 6 ต่อ 1 ให้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด

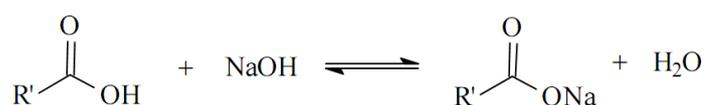
Crabbe และคณะ (Crabbe, Nolasco-Hipolito, Kobayashi, Sonomoto, & Ishizaki, 2001) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันปาล์มคือ 40 ต่อ 1 ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยมวล ต่อปริมาตร อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง ให้ผลิตภัณฑ์ร้อยละ 97

Kumar และคณะ (Kumar, Ravi, & Chadha, 2011) ทำการทดลองปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันน้ำมันกับเมทานอลทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนโมลตั้งแต่ 1 ต่อ 3, 1 ต่อ 6 และ 1 ต่อ 10 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1 ต่อ 6 เพราะที่อัตราส่วน 1 ต่อ 6 และ 1 ต่อ 10 ให้ผลต่างกันน้อยมาก

Meher และคณะ (Meher et al., 2006) ศึกษาผลของชนิดแอลกอฮอล์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของ เอทานอลและเมทานอล พบว่าความเร็วในการเกิดปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ความเร็วในการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล ใช้ เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ทำให้เกิดการแยกชั้นได้เร็วกว่า จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าอัตราส่วนโมลน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ 1 ต่อ 6

5. กรดไขมันอิสระ

กรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) กับแอลกอฮอล์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นคือสบู่ ทำให้ลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ผลของสบู่จะให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และสบู่ยังเป็นสารอิมัลซิฟิเคชันทำให้แยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ดังแสดงในภาพที่ 2.7



R' = carbon chain of the fatty acid

ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Ulf et al., 1998)

Canakci และ Van (Canakci & Van, 2001) พบว่าถ้าใช้น้ำมันดิบมีค่ากรดไขมันอิสระสูงเกินร้อยละ 3 ส่งผลต่อปฏิกิริยาโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้

Bradshaw และ Meuly (Bradshaw & Meuly, 1944) กล่าวว่านอกจากสารตั้งต้นที่ต้องปราศจากน้ำแล้วต้องปราศจากกรดไขมันอิสระด้วย โดยกรดไขมันอิสระต้องมีน้อยกว่าร้อยละ 0.5 จึงยอมรับได้

Ma และคณะ (F. Ma et al., 1998) กล่าวว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในไขมันวัวควรต่ำกว่าร้อยละ 0.55 โดยน้ำหนัก จึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

6. ความชื้น

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันเริ่มต้นไม่ควร มีน้ำปนอยู่เพราะน้ำเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids) ซึ่งจะไปก่อให้เกิดสบู่ ทำให้ลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อมีการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาควรที่จะมีการกำจัดน้ำออกก่อน

Agarwal (Agarwal, 2007) กล่าวว่าถ้ามีน้ำอยู่ในระบบในปริมาณมากและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง

Bradshaw และ Meuly (Bradshaw & Meuly, 1944) กล่าวว่าสารตั้งต้นที่ใช้โดยเฉพาะน้ำมันพืชต้องไม่มีความชื้น

Wright และคณะ (Wright et al., 1944) ได้ศึกษาและแสดงข้อสังเกตในทำนองเดียวกันว่า ถ้าความบริสุทธิ์ของ สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเบส ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นต้องปราศจากน้ำ และถ้ามีน้ำผสมอยู่เล็กน้อยจะต้องเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อชดเชยการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาไปกับการละลายหรือแตกตัวของปริมาณที่ปนเปื้อนด้วย

7. ความรุนแรงในการผสม

การศึกษากลกระทบบจากความรุนแรงในการผสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีการรายงานไว้ค่อนข้างน้อย

Ma และคณะ (Fangrui Ma et al., 1999) กล่าวว่าความรุนแรงในการผสมมีผลต่อปฏิกิริยาเฉพาะช่วงแรกเท่านั้น ในกรณีของไขมันวัว หลังจากระบบเกิดเป็นไปตามวัฏภาคเดียว ความรุนแรงของการผสมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sridharan และ Mathai (Sridharan & Mathai, 1974) ในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยา โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ไขมันสัตว์ ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส เป็นสารตั้งต้นทำให้ช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาดำเนินไปในระบบของเหลวสองวัฏภาคที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน ส่งผลให้อัตรา

การเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปค่อนข้างช้า โดยให้เหตุผลว่าการแพร่ระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองภูมิภาคไม่ดีพอ แต่หลังจากเกิดผลิตภัณฑ์แอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเกิดขึ้นแล้ว จะเป็นตัวกระตุ้นและชักนำให้ระบบแพร่กระจายระหว่างกันกลายเป็นภูมิภาคเดียว

ความเร็วเสียง

ความเร็วเสียง คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (298.15 เคลวิน) ได้ประมาณ 346 เมตรต่อวินาที และในอากาศที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสได้ประมาณ 343 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อยแต่ไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางได้เร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ส่วนความเร็วเสียงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$U = \sqrt{\frac{K_s}{\rho}} \quad (2.3)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วเสียง (Speed of Sound)

K_s คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (Coefficient of Stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเร็วเสียงในตัวกลางชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวกลาง	อัตราเร็ว (เมตรต่อวินาที)
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (0°C)	258
อากาศ	346
น้ำ	1,498
น้ำทะเล	1,531
แก้ว	4,540
อะลูมิเนียม	5,000
เหล็ก	5,200

ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นจะมีค่าความแข็งเกร็งไม่เท่ากับศูนย์ ทั้งในการบีบอัด หรือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volumetric Deformation) และ แรงเฉือน (Shear Deformation) โดยทำให้แต่ละวัสดุมีความเร็วเสียงที่แตกต่างกันไปจะขึ้นกับรูปแบบของคลื่นที่เดินทางในวัสดุ กรณีที่วัสดุมีความหนาเล็กกว่า ความยาวคลื่นสามารถคำนวณความเร็วเสียงได้จากสมการที่ (2.3)

$$U_{solid} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วเสียง (Speed of Sound)

E คือ มอดูลัสของยัง (Young's Modulus)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

ในกรณีที่วัสดุมีความหนาใหญ่กว่าความยาวคลื่นทำให้ความยาวคลื่นเสียงจะเดินทางได้เร็วกว่า และจะคำนวณโดยการแทนค่ามอดูลัสของยังด้วยมอดูลัสคลื่นหน้าราบ (Plane Wave Modulus) ซึ่งหาได้จากมอดูลัสของยังและอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) สามารถคำนวณความเร็วเสียงได้จากสมการที่ (2.4)

$$U_{solid(thick)} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad (2.4)$$

เมื่อ E คือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus)

ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

ดังนั้นสำหรับคลื่นตามขวางค่ามอดูลัสของยัง (E) จะถูกแทนด้วยค่ามอดูลัสของแรงเฉือน (G)

$$U_{solid} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.5)$$

เมื่อ E คือ มอดูลัสของยัง (Young's Modulus)

G คือ มอดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus)

ความเร็วเสียงในของเหลว

พฤติกรรมของของเหลวจะมีความแข็งเกร็งต่อแรงอัดเท่านั้นแต่จะไม่มี ความแข็งเกร็งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วเสียงในของเหลวสามารถคำนวณได้จาก

$$U_{fluid} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.6)$$

เมื่อ K คือ มอดูลัสของการอัดแอเดียแบติก (Adiabatic Bulk Modulus)

ความเร็วเสียงในก๊าซ

ในก๊าซค่า K สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$K = \kappa \cdot p \quad (2.7)$$

เมื่อ K คือ ดัชนีแอเดียแบติก (Adiabatic index) หรือใช้สัญลักษณ์ γ
 p คือ ความดัน

ดังนั้นความเร็วเสียงในก๊าซสามารถคำนวณได้โดย

$$U_{gas} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} \quad (2.8)$$

กรณีก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

$$U_{gas} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas Constant)

k คือ ค่าดัชนีแอเดียแบติก (Adiabatic Index)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

ความเร็วเสียงในไบโอดีเซลและแบบจำลองความเร็วเสียง

ความเร็วเสียงเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้โดยตรง โดยเป็นสมบัติที่กำหนดระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิงและระยะเวลาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล (Freitas, Paredes, Daridon, Lima, & Coutinho, 2013) การวัดความเร็วเสียงในของเหลวมีหลากหลายวิธีแตกต่างกันไปตามระเบียบวิธีมาตรฐาน และในปัจจุบันได้มีการศึกษาการทำนายค่าความเร็วเสียงในของเหลวจากสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีความซับซ้อนและความถูกต้องแม่นยำแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามสมการสำหรับการทำนายความเร็วเสียงในเอทิลไบโอดีเซลยังมีจำนวนน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเร็วเสียงในเอทิลไบโอดีเซล ด้วยการโยงสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีกับความเร็วเสียงด้วยกฎควมรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน (Martin, 1950) เนื่องจากกฎดังกล่าวเป็นการอธิบายผลของพลังงานอิสระของโครงสร้างโมเลกุลที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกายภาพของสาร โดยคาดหวังว่าสมการที่ได้สามารถประมาณค่าความเร็วเสียงของไบโอดีเซลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.4 ระเบียบวิธีสำหรับการทำนายความเร็วเสียงในเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันและเมทิลไบโอดีเซล

Estimation	Method description	Suggested applicable temperature range (°C)	Relative experiment	AAD%
Daridon et al. (2013)	Group contribution method	10-100	27	0.10%
Huber et al. (2009)	Equation of state approach	5-60	14	0.40%
Freitas et al. (2013)	Modified Auerbach's relation	15-70	44	0.59%
Tat et al. (2003)	Linear relationships	20-100	-	-

ตารางที่ 2.4 ระเบียบวิธีสำหรับการทำนายความเร็วเสียงในเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันและเมทิลไบโอดีเซล (ต่อ)

Estimation	Method description	Suggested applicable temperature range (°C)	Relative experiment	AAD%
Lopes et al. (2014)	Van Dael model (Van Dael & Vangeel, 1969)	15-80	21	0.38%
	Nomoto model (Nomoto, 1958)		21	0.29%
	Schaaff's collision factor theory (Schaafs, 1963)		21	0.29%
	Junjie (Junjie, 1984)		21	0.29%

ความสัมพันธ์ความเร็วเสียงและพลังงานอิสระ

การอัดตัวแบบไอเซนทรอปิก (κ_s) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Newton Laplace :

$$\kappa_s = \frac{1}{U^2 \rho} \quad (2.10)$$

เมื่อ U คือความเร็วเสียง (m/s)

ρ คือความหนาแน่น (g/cm³)

เวลาคลายความเค้น (τ) เป็นเวลาของค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่ชนอะตอมแล้วอะตอมยอมรับพลังงานนั้นพอดีสามารถคำนวณจาก

$$\tau = \frac{4}{3} k_s \eta \quad (2.11)$$

เมื่อ η คือความหนืดไดนามิกส์ (mPa s)

เวลาคลายความเค้นสัมพันธ์กับพลังงานอิสระ และแปรผันตามอุณหภูมิสามารถแสดงในรูปสมการ Eyring Salt ดังนี้

$$\frac{1}{\tau} = \frac{KT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G}{KT}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ

$$1.38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ $6.626070040 \times 10^{-34} \text{ J s}$

นำสมการที่ (2.10) และ (2.11) แทนในสมการที่ (2.12) และจัดรูปได้สมการที่ (2.13)

$$\frac{u^2}{T} = \left(\frac{4K}{3h} \mu\right) \exp\left(\frac{-\Delta G}{KT}\right) \quad (2.13)$$

เมื่อ μ คือความหนืดจลน์ (cSt) หาได้จากความสัมพันธ์ $\mu = \eta/\rho$

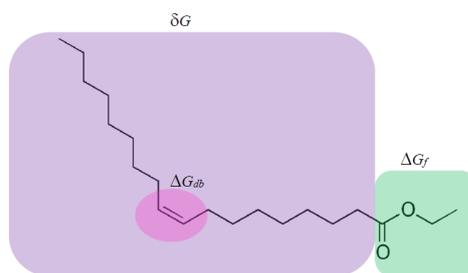
จัดรูปสมการใหม่เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไว้ฝั่งซ้ายมือตามสมการที่ (2.14)

$$\ln\left(\frac{u^2}{\mu T}\right) = \ln(A) - \frac{\Delta G}{KT} \quad (2.14)$$

เมื่อ $A = \frac{4K}{3h}$

ความสัมพันธ์ความเร็วเสียงในเอสเทอร์กรดไขมันกับพลังงานอิสระ

สมบัติทางกายภาพของเอสเทอร์กรดไขมันในที่นี้จะยกตัวอย่างโมเลกุลของเอทิลเอสเทอร์กรดไขมัน (FAEE) มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับโครงสร้างโมเลกุลทั้งความยาวของไฮโดรคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่สามารถแสดงความสัมพันธ์จากกฎควรรวมพลังงานอิสระโดยพิจารณาจากโครงสร้าง FAEE ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเอทิลเอสเทอร์กรดไขมันกับพลังงานอิสระ

โครงสร้างโมเลกุลของ FAEE ประกอบด้วย $CH_3-(CH_2)_{z-1}-f$ ซึ่งมาร์ติน(Martin, 1950) ได้แบ่งกลุ่มโครงสร้างในโมเลกุลที่แตกต่างออกเป็น f , CH_2 และ CH_3 เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สดังสมการที่ (2.15)

$$\Delta G = \Delta G_f + \Delta G_1 + \Delta G_2 \dots + \Delta G_z \quad (2.15)$$

เมื่อ $\Delta G_1 \dots \Delta G_z$ คือพลังงานอิสระของกลุ่มเมทิลีน (Methylene) และเมทิล (Methyl) ซึ่งเป็นกลุ่มมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นสามารถทำการเฉลี่ยให้อยู่ในรูป δG สมการที่ (2.15) ลดรูปลงได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\Delta G = \Delta G_f + z\delta G \quad (2.16)$$

เมื่อ ΔG_f คือพลังงานอิสระของสารสมมติที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับศูนย์หรือจะเรียกสั้นๆว่าพลังงานอิสระที่เกิดจากกลุ่มฟังก์ชัน
 δG คือพลังงานควมรวมอิสระของการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งคาร์บอนอะตอม
 z คือจำนวนอะตอมคาร์บอนในสายไฮโดรคาร์บอน

สำหรับการประมาณความหนืดจลน์ทำการขยายสมการที่ (2.16) ด้วยเอนทัลปี (H) และเอนโทรปี (S) แทนในสมการที่ (2.14) และได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\ln\left(\frac{u^2}{\mu T}\right) = \ln(A) - \frac{\Delta H_f}{KT} + \frac{\Delta S_f}{K} - \frac{z\delta H}{KT} + \frac{z\delta S_f}{K} \quad (2.17)$$

จัดกลุ่มใหม่ได้ดังนี้

$$\ln\left(\frac{u^2}{\mu T}\right) = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a &= \ln(A) + \frac{\Delta S_f}{R} & b &= \frac{\Delta S_f}{R} \\ c &= -\frac{\Delta H_f}{R} & d &= -\frac{\partial H}{R} \end{aligned}$$

สำหรับโมเลกุลที่มีพันธะคู่ (Double Bond(s); n_d) Sansa-ad et al. (Chanida Sansa-ard, 2011) เสนอผลของพันธะคู่กับพลังงานอิสระควมรวมของพันธะคู่ (ΔG_{db}) รวมโดยขยายความสัมพันธ์สมการที่ (2.16) ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\Delta G = \Delta G_f + z\delta G + n_d \Delta G_{db} \quad (2.19)$$

สำหรับการประมาณความหนืดจลน์ทำการขยายสมการที่ (2.19) ด้วยเอนทัลปี (H) และเอนโทรปี (S) แทนในสมการที่ (2.14) และได้ดังสมการที่ (2.20)

$$\ln\left(\frac{u^2}{\mu T}\right) = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} + en_d + \frac{fn_d}{T} \quad (2.20)$$

$$\text{เมื่อ } e = -\frac{\Delta H_{db}}{R} \quad f = \frac{\Delta S_{db}}{RT}$$

ความเร็วเสียงในของเหลวผสมหรือน้ำมันไบโอดีเซล

พลังงานอิสระของการไหลของไบโอดีเซลคือผลรวมของพลังงานอิสระย่อยในเอทิลเอสเทอร์กรดไขมัน (FAEE) ในองค์ประกอบที่ผสมกันอยู่ ซึ่งนำสมการที่ (2.21) แทนลงในสมการที่ (2.14) ได้สมการสำหรับประมาณค่าความเร็วเสียงในไบโอดีเซล

$$\Delta G_{Biodiesel} = \sum_{i=1}^n y_i \Delta G_i \quad (2.21)$$

เมื่อ y_i คือ สัดส่วนโดยโมลหรือมวลของ (FAEE)_i ในองค์ประกอบไบโอดีเซล

ΔG_i คือ พลังงานอิสระของการกลายเป็นไอของ (FAEE)_i

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Daridon et al. (Daridon, Coutinho, Ndiaye, & Paredes, 2013b) ทำการทดลองวัดความเร็วเสียงใน FAME บริสุทธิ์ทั้งแบบชนิดอิมิตัวและชนิดไม่อิมิตัว โดยใช้เทคนิคเอ็กโค (Echo technique) ที่ความถี่ 3 MHz ที่อุณหภูมิ 298.15-373.15 K ในการศึกษาได้เสนอระเบียบวิธีการทำนายความเร็วเสียงใน FAME ด้วยวิธีผลของกลุ่มโครงสร้างทางเคมี (Group contribution method) โดยเปรียบเทียบวิธีการแบ่งกลุ่มโครงสร้าง 3 วิธี พบว่าวิธีการแบ่งกลุ่มโครงสร้างทางเคมีที่ใช้ในการทำนายความเร็วเสียงของ FAME ที่มีความแม่นยำสุดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.1%

Lopes et al. (Lopes et al., 2014) ได้ทดลองวัดความเร็วเสียงใน FAME ทั้งแบบชนิดอิมิตัวและชนิดไม่อิมิตัวรวมถึงความเร็วเสียงในไบโอดีเซล 6 ชนิดด้วยคลื่นความถี่สูงที่อุณหภูมิ 298.15-353.15 K และได้นำผลการทดลองเปรียบเทียบกับสมการทำนายความเร็วเสียงของไบโอดีเซล 6 สมการ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของทั้ง 6 สมการอยู่ในช่วง 0.27-0.91%

Freitas et al. (Freitas et al., 2013) ได้ทดลองวัดความเร็วเสียงใน FAME และไบโอดีเซล 10 ชนิดโดยใช้เทคนิคเอ็กโค (Echo technique) ที่อุณหภูมิ 298.15-373.15 K และได้เสนอสมการในการทำนายความเร็วเสียงในไบโอดีเซล (สมการที่ (2.22)) โดยพัฒนาสมการของ Auerbach ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเสียงกับแรงตึงผิว จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วเสียงจากสมการที่พัฒนามักับผลการทดลองพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 1.64%

$$U = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot 6.33 \times 10^{-10}} \right)^{\left(\frac{2}{3} C \right)} \quad (2.22)$$

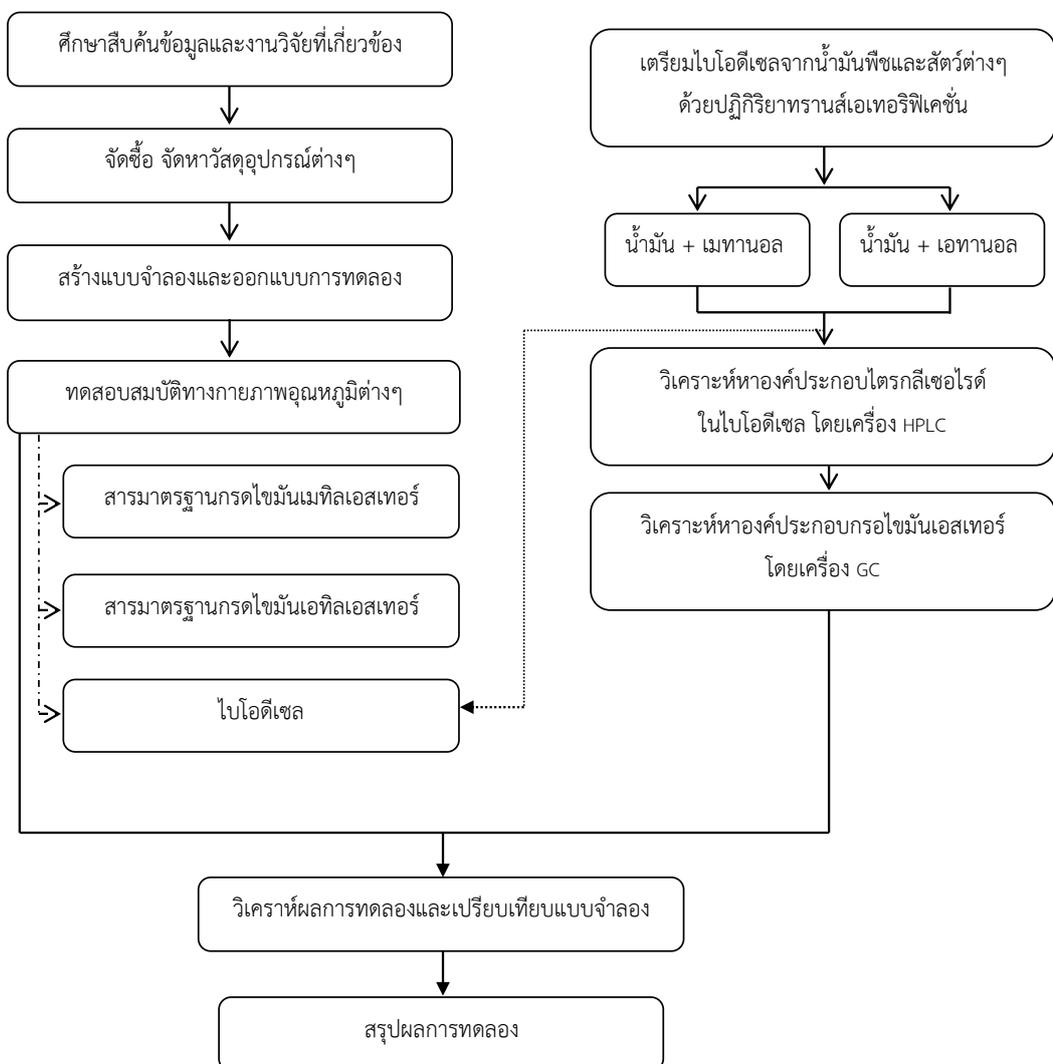
เมื่อ γ และ C คือ แรงตึงผิวและค่าคงที่ตามลำดับ

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้เข้าใจการศึกษาค่าความเร็วเสียงของไบโอดีเซลกับพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้รวมขั้นตอนการวิจัยและวิธีการแบบจำลองไว้ในบทนี้

ขั้นตอนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนการทำงานดังนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ข้อมูลการทดลอง

ในการศึกษานี้ใช้ผลการทดลอง Lopes et al.[9], Freitas et al.[10] และ Huber et al. [11] สำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ และเมทิลไบโอดีเซล ส่วนผลการทดลองของ Freitas et al. (Freitas et al., 2013) สำหรับกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์และเอทิลไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การหาค่าเฉลี่ยจำนวนอะตอมคาร์บอน (z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่ ($n_{d(ave)}$)

ในการศึกษาองค์ประกอบกรดไขมันในไบโอดีเซล ถ้าพิจารณาในรูปของจำนวนอะตอมคาร์บอนของกรดไขมันและจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย จะทำให้สมการที่ (2.20) สะดวกในการพิจารณามากยิ่งขึ้นซึ่งคำนวณจากองค์ประกอบกรดไขมันตามวิธีของ Phankosol et al.(Phankosol, Sudprasert, Lilitchan, Aryasuk, & Krisnangkura, 2014) ดังสมการที่สมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$z_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i z_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (3.1)$$

$$n_{d,ave} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i n_{d,i}}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (3.2)$$

เมื่อ x_i คือสัดส่วนโดยโมลหรือมวลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

การหาค่าคงที่ในสมการที่ (2.20)

ค่าคงที่ในสมการที่ (2.10) หาด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรตามวิธี Phankosol et al.(Phankosol et al., 2014) การวิเคราะห์การถดถอยพหุ (Multiple regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่ทำนายตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว เช่น ต้องการทำนายค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซล(Y) โดยใช้ตัวทำนาย 3 ตัว ประกอบด้วย อุณหภูมิ (X_1) ความยาวโซ่อะตอมคาร์บอนของกรดไขมัน (X_2) และจำนวนพันธะคู่ในสายโซ่อะตอมคาร์บอนของกรดไขมัน (X_3) เป็นต้น ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุนั้น จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นจำนวนทั้ง 3 ตัวกับตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันเช่นใด สมการทั่วไปของการถดถอยพหุแสดงดังสมการที่ (3.3)

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + \varepsilon_i \quad (3.3)$$

เมื่อ	Y	คือตัวแปรตาม
	x_1, x_2, \dots, x_p	คือตัวแปรต้น
	b_1, b_2, \dots, b_p	คือค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย
	ε_i	คือค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยในการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ตามเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ip-1} \\ \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{ip-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ip-1} & \sum_{i=1}^n X_{ip-1}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{ip-1}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ip-1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i1}Y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ip-1}Y_i \end{bmatrix}$$

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (AAD (%))

$$AAD(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{U_{\text{exp}} - U_{\text{cal}}}{U_{\text{exp}}} \right| \quad (3.4)$$

โดยที่ γ_{exp} คือค่าจากผลการทดลองที่มีนำเสนอ γ_{cal} คือค่าที่ได้จากการคำนวณ และ N คือจำนวนของจุดข้อมูล

ค่าเอนเอียง (Bias (%))

$$Bias(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\gamma_{\text{exp}} - \gamma_{\text{cal}}}{\gamma_{\text{exp}}} \right] \quad (3.5)$$

ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: σ_x)

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{N} \quad (3.6)$$

เมื่อ σ และ N คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard Deviation) และจำนวนข้อมูลตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

จากการดำเนินการศึกษาวิจัยได้รวบรวมผลการศึกษา ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของความเร็วเสียงในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ และการโยงสัมพันธ์ความเร็วเสียงในไบโอดีเซลกับพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลของโครงสร้างทางเคมีต่อความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และเมทิลไบโอดีเซล

ผลของโครงสร้างทางเคมีต่อผลความเร็วเสียงในกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์กับและเอทิลไบโอดีเซล

ผลของโครงสร้างทางเคมีต่อความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และเมทิลไบโอดีเซล

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.20) พบว่ายังมีผลของความหนืดจลน์ในสมการ ซึ่งในการประมาณค่าจำเป็นต้องทราบค่าความหนืดจลน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้ยากต่อการใช้งาน เพื่อให้สมการที่ (2.20) สามารถประมาณค่าได้ง่ายขึ้นในงานวิจัยนี้จะประยุกต์สมการการที่นำเสนอโดย Phankosol et al. ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$\ln \mu = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} + en_d + \frac{fn_d}{T} \quad (4.1)$$

จากความสัมพันธ์สมการที่ (4.2) แทนสมการที่ (2.20) และ (4.1) พร้อมจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (4.3)

$$\ln \left(\frac{U^2}{T} \right) = \ln \left(\frac{U^2}{\mu T} \right) + \ln \mu \quad (4.2)$$

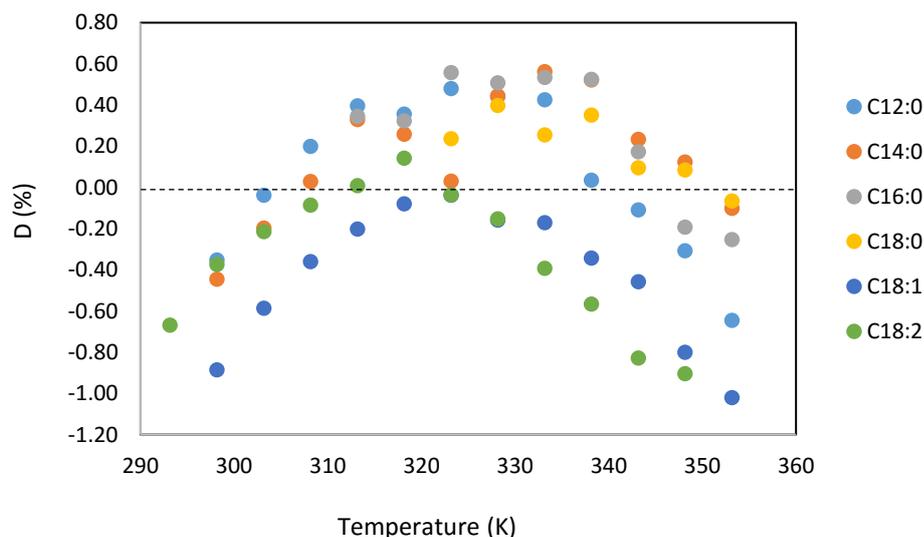
$$\ln \left(\frac{U^2}{T} \right) = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} + en_d + \frac{fn_d}{T} \quad (4.3)$$

ความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์

ทำการหาค่าคงที่ในสมการที่ (4.3) หาด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรตามวิธี Phankosol et al.(Phankosol et al., 2014) เมื่อแทนค่าคงที่ในสมการแล้วได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 5.3908 + 0.01975z + \frac{932.23}{T} - \frac{1.399z}{T} + 0.1009n_d - \frac{28.99n_d}{T} \quad (4.4)$$

ประมาณค่าความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ด้วยสมการที่ (4.4) เทียบกับผลการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 5-80°C แสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อน (D(%)) พบว่ามีการกระจายตัวทั้งฝั่งค่าบวกและลบ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAD (%)) และค่าเอนเอียง (Bias (%)) มีค่าเท่ากับ 0.35% และ -0.06 ตามลำดับ

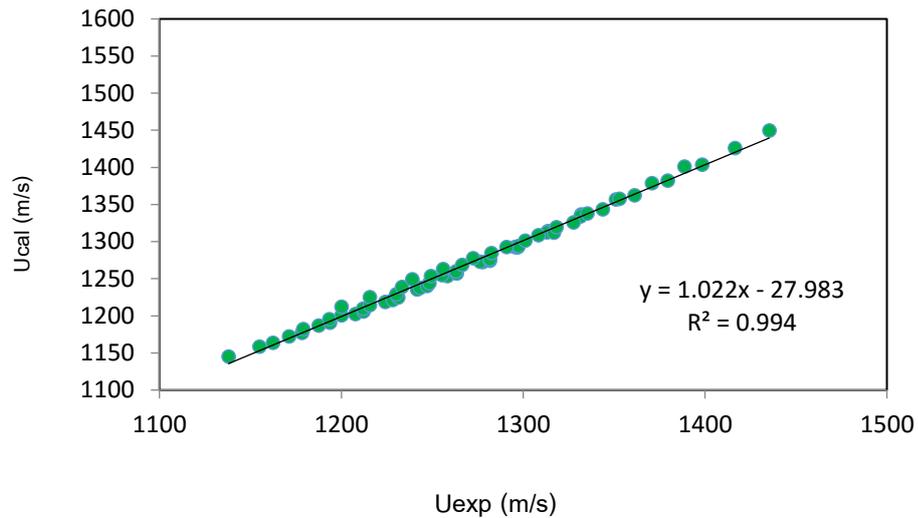


ภาพที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ด้วยสมการที่ (4.4) เทียบกับผลการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 298.25-353.15K

ตารางที่ 4.1 ความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ที่ประมาณด้วยสมการที่ (4.4) (m/s)

Fatty acids		Temperature (K)											
z	nd	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15	323.15	328.15	333.15	338.15	343.15	348.15	353.15
12	0	1336.62	1314.09	1292.81	1272.72	1253.70	1235.70	1218.64	1202.45	1187.08	1172.47	1158.57	1145.34
		(-0.32)	(-0.04)	(0.05)	(0.40)	(0.36)	(0.64)	(0.48)	(0.43)	(0.04)	(-0.11)	(-0.21)	(-0.64)
14	0	1356.90	1334.13	1312.63	1292.32	1273.10	1254.90	1237.66	1221.29	1205.75	1190.99	1176.94	1163.57
		(-0.44)	(-0.20)	(0.01)	(0.33)	(0.26)	(0.03)	(0.45)	(0.56)	(0.52)	(0.14)	(0.12)	(-0.10)
16	0	1377.49	1354.47	1332.75	1312.22	1292.80	1274.41	1256.97	1240.43	1224.73	1209.80	1195.60	1182.08
		-	-	-	(0.36)	(0.32)	(0.60)	(0.51)	(0.53)	(0.53)	(0.17)	(-0.19)	(-0.25)
18	0	1398.39	1375.13	1353.17	1332.42	1312.80	1294.21	1276.59	1259.87	1244.00	1228.91	1214.56	1200.89
		-	-	-	-	-	(0.24)	(0.40)	(0.26)	(0.35)	(0.10)	(0.09)	(-0.07)
18	1	1400.95	1378.76	1357.80	1337.98	1319.23	1301.47	1284.63	1268.65	1253.47	1239.04	1225.31	1212.24
		(-0.80)	(-0.99)	(-0.33)	(-0.15)	(-0.08)	(-0.04)	(-0.16)	(-0.17)	(-0.34)	(-0.46)	(-0.80)	(-1.02)
18	2	1403.53	1382.40	1362.44	1343.56	1325.70	1308.77	1292.72	1277.49	1263.01	1249.25	1236.16	1403.53
		(-0.37)	(-0.28)	(-0.16)	(0.01)	(0.14)	(-0.04)	(-0.30)	(-0.39)	(-0.57)	(-0.83)	(-0.90)	(-0.37)

เมื่อวาดกราฟระหว่างความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์จากการประมาณด้วยสมการที่ (4.4) กับการทดลอง แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรงมีค่า จุดตัดแกน ความชัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มรค่าเท่ากับ -27.98, 1.02, 0.994 และ 8.50 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 ความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์จากการประมาณด้วยสมการที่ (4.4) กับการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 298.25-353.15K

ความเร็วเสียงในเมทิลไบโอดีเซล

เมทิลไบโอดีเซลคือสารผสมของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ซึ่งจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบและแหล่งที่มา ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และ ความเร็วเสียง เป็นต้น

สำหรับการประมาณความเร็วเสียงของเมทิลไบโอดีเซลด้วยสมการที่ (4.4) ต้องทำการคำนวณซ้ำหลายรอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกการแทนค่าจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ยตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) แทนในสมการที่ (4.4) ได้ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งสามารถลดขั้นตอนและเวลาในการคำนวณได้

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 5.3908 + 0.01975z_{ave} + \frac{932.23}{T} - \frac{1.399z_{ave}}{T} + 0.1009n_{d,ave} - \frac{28.99n_{d,ave}}{T} \quad (4.5)$$

องค์ประกอบกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ของเมทิลโบไอดีเซลจำนวน 18 ชนิด ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่ามีช่วงของค่า z_{ave} และ $n_{d,ave}$ เท่ากับ 17.13-17.96 และ 0.62-1.53 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของ z_{ave} และ $n_{d,ave}$ มีค่าเท่ากับ 17.63 and 1.14 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการประมาณด้วยสมการที่ (4.5) แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่ามีค่า AAD (%) เท่ากับ 0.36% เมื่อวาดกราฟค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ (4.5) กับผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง มีค่า จุดตัดแกน ความชัน สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ปลายค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.418, 1.000, 0.991 and 4.791 ตามลำดับ

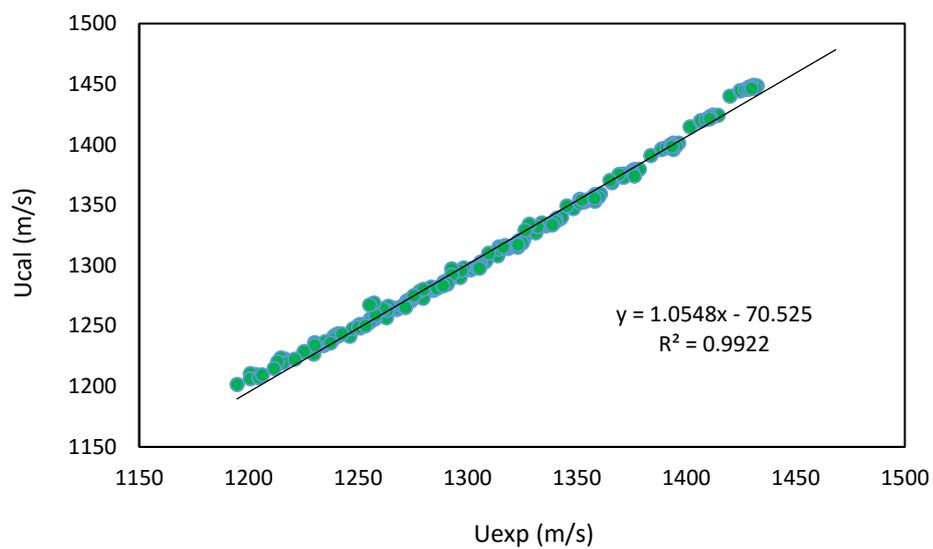
ผลของค่า z_{ave} และ $n_{d(ave)}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียงในเมทิลโบไอดีเซล

เพื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียงเทียบกับค่า z และ n_d โดยทำการอนุพันธ์สมการที่ (4.5) เทียบกับค่า z และ n_d ได้ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ

$$\left(\frac{d \ln \left(\frac{u^2}{T} \right)}{dz} \right)_{n_d, T} = 0.01975 - 1.399 \frac{1}{T} \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{d \ln \left(\frac{u^2}{T} \right)}{dn_d} \right)_{z, T} = 0.1009 - 28.99 \frac{1}{T} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.6) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเสียงเทียบกับ z เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าผลของจำนวนอะตอมคาร์บอนส่งผลให้ความเร็วเสียงมีอัตราลดลง $1.399 \text{ (K m/s) \cdot (Carbon numbers)}^{-1}$ เมื่อพิจารณาผลของ n_d ที่ส่งผลต่อความเร็วเสียงตามสมการที่ (4.7) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพบว่าผลพันธะคู่ส่งผลต่อค่าความเร็วเสียงลดขึ้นตามอุณหภูมิด้วยอัตรา $28.99 \text{ (K m/s) (Number of double bonds)}^{-1}$



ภาพที่ 4.3 ความเร็วเสียงในเมทิลไปโอดีเซลจากการประมาณด้วยสมการที่ (4.5) กับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 298.25-353.15K

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล

Biodiesels	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	Othre	Z_{ave}	$nd_{(ave)}$
Soy B(S) (Freitas et al., 2013)	0.1076	0.0007	0.0394	0.2296	0.5353	0.0702	0.0172	17.83	1.52
Rapeseed (R) (Freitas et al., 2013)	0.0522	0.0020	0.0162	0.6211	0.2107	0.0695	0.0283	17.96	1.27
Palm (P) (Freitas et al., 2013)	0.4245	0.0013	0.0402	0.4192	0.0980	0.0009	0.0159	17.13	0.62
SR (Freitas et al., 2013)	0.0890	0.0015	0.0276	0.4182	0.3751	0.0702	0.0184	17.86	1.39
PR (Freitas et al., 2013)	0.2309	0.0017	0.0302	0.5292	0.1547	0.0308	0.0225	17.54	0.94
SP (Freitas et al., 2013)	0.2556	0.0011	0.0404	0.3313	0.3172	0.0358	0.0186	17.54	1.08
SPR (Freitas et al., 2013)	0.1907	0.0014	0.0330	0.4274	0.2808	0.0468	0.0200	17.63	1.14
Sun flower (SF) (Freitas et al., 2013)	0.0640	0.0009	0.0422	0.2390	0.6416	0.0012	0.0111	17.90	1.53
Soybean + Rapeseed (GP) (Freitas et al., 2013)	0.1057	0.0013	0.0266	0.4105	0.3667	0.0710	0.0183	17.82	1.37
Soy A (Freitas et al., 2013)	0.1704	0.0000	0.0373	0.2863	0.5045	0.0000	0.0000	17.66	1.30
Cotton (Lopes et al., 2014)	0.2498	0.0000	0.0266	0.1848	0.5294	0.0000	0.0093	17.46	1.24
Beef tallow (Lopes et al., 2014)	0.1700	0.0000	0.0941	0.3124	0.4185	0.0000	0.0050	17.64	1.15
Poultry fat (Lopes et al., 2014)	0.2556	0.0000	0.0783	0.3634	0.2932	0.0000	0.0094	17.45	0.95
Yellow grease1 (Lopes et al., 2014)	0.1190	0.0000	0.1443	0.7246	0.0121	0.0000	0.0000	17.76	0.75
Yellow grease2 (Lopes et al., 2014)	0.2857	0.0000	0.1307	0.4660	0.0892	0.0000	0.0283	17.32	0.64
Cotton (Lopes et al., 2014)	0.2676	0.0000	0.0281	0.1789	0.5160	0.0000	0.0001	17.46	1.22
Commercial sample A (Huber, Lemmon, Kazakov, Ott, & Bruno, 2009)	0.1390	0.0000	0.0870	0.3020	0.3800	0.0900	0.0000	17.72	1.33
Commercial sample B (Huber et al., 2009)	0.1470	0.0000	0.1210	0.3530	0.3100	0.0660	0.0000	17.71	1.17

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของความเร็วเสียงในเมทิลไบโอดีเซลที่ประมาณด้วย ระเบียบวิธีต่างๆ

Biodiesel	Van Dael ^a	NMT ^a	Collision theory ^a	MC1 ^a	MC2 ^a	JJ ^a	IMP ^a	Eq. (4.5)
Soy B(S) (Freitas et al., 2013)	0.31	0.22	0.22	0.23	0.4	0.24	0.22	0.33
Rapeseed (R) (Freitas et al., 2013)	0.34	0.27	0.26	1.86	0.99	0.28	0.26	0.34
Palm (P) (Freitas et al., 2013)	0.51	0.28	0.33	0.62	0.70	0.30	0.31	0.50
SR (Freitas et al., 2013)	0.42	0.34	0.34	1.01	0.25	0.35	0.33	0.37
PR (Freitas et al., 2013)	0.45	0.27	0.30	1.24	0.12	0.29	0.29	0.41
SP (Freitas et al., 2013)	0.40	0.21	0.24	0.59	0.39	0.23	0.22	0.38
SPR (Freitas et al., 2013)	0.46	0.29	0.31	1.02	0.08	0.31	0.30	0.39
Sun flower (SF) (Freitas et al., 2013)	0.37	0.31	0.31	0.69	0.07	0.32	0.31	0.41
Soybean + Rapeseed (GP) (Freitas et al., 2013)	0.31	0.22	0.22	0.82	0.08	0.24	0.22	0.35
Soy A (Freitas et al., 2013)	0.42	0.32	0.34	0.54	0.36	0.34	0.33	0.38
Cotton (Lopes et al., 2014)	0.24	0.14	0.15	0.58	1.49	0.15	0.14	0.22
Beef tallow (Lopes et al., 2014)	0.2	0.14	0.14	0.63	0.34	0.14	0.14	0.29
Poultry fat (Lopes et al., 2014)	0.29	0.14	0.17	0.58	0.5	0.15	0.15	0.13
Yellow grease1 (Lopes et al., 2014)	0.22	0.2	0.20	2.78	1.55	0.2	0.2	0.26
Yellow grease2 (Lopes et al., 2014)	0.18	0.11	0.10	0.95	0.30	0.10	0.10	0.20
Cotton (Lopes et al., 2014)	0.64	0.49	0.54	0.14	0.96	0.52	0.51	0.32

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของความเร็วเสียงในเมทิลโบไฮดีเซลที่ประมาณด้วย ระเบียบวิธีต่างๆ (ต่อ)

Biodiesel	Van Dael ^a	NMT ^a	Collision theory ^a	MC1 ^a	MC2 ^a	JJ ^a	IMP ^a	Eq. (4.5)
Commercial sample A (Huber et al., 2009)	0.45	0.39	0.4	0.74	0.08	0.41	0.39	0.79
Commercial sample B (Huber et al., 2009)	0.43	0.37	0.37	1.12	0.32	0.38	0.37	0.82
Overall AAD%	0.38	0.28	0.30	0.91	0.42	0.29	0.27	0.36

^a calculate by Lopes et al. (Lopes et al., 2014)

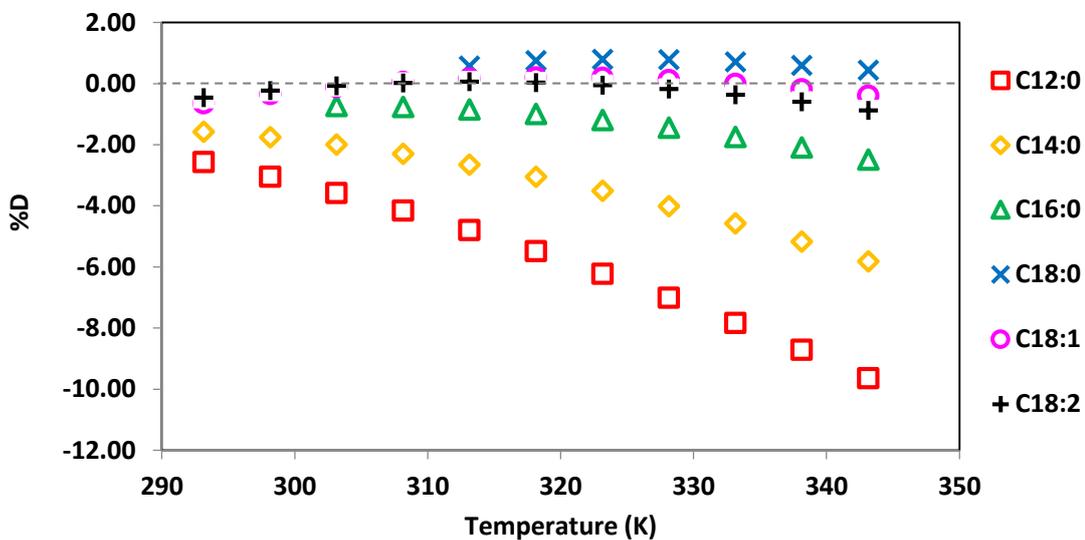
ผลของโครงสร้างทางเคมีต่อความเร็วเสียงในกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์และเอทิลไบโอดีเซล

ความเร็วเสียงในกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์

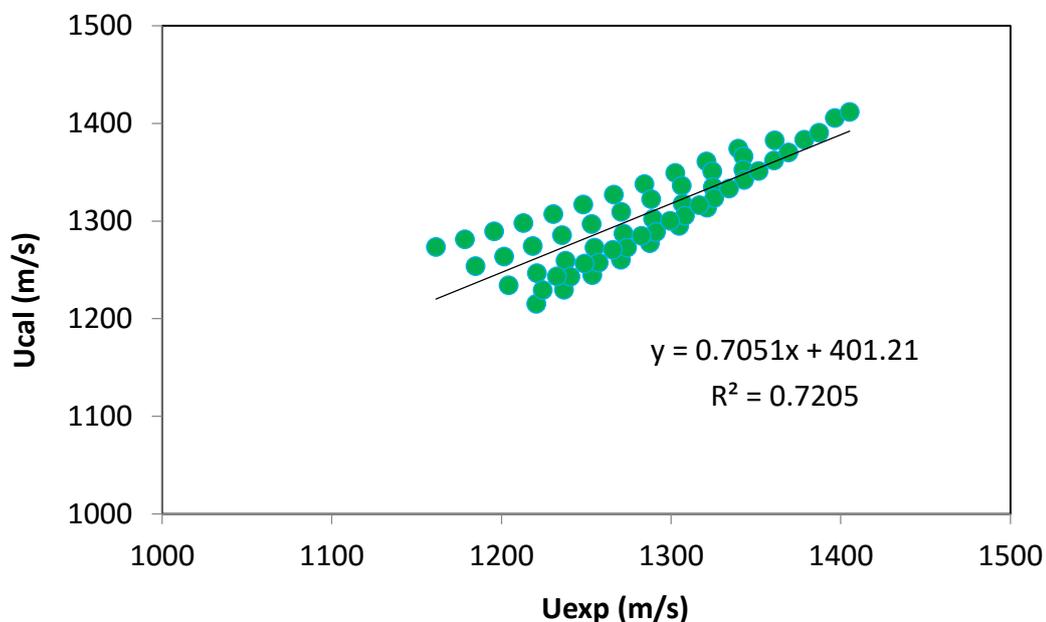
ทำการหาค่าคงที่ในสมการที่ (4.3) หาด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรตามวิธี Phankosol et al. (Phankosol et al., 2014) เมื่อแทนค่าคงที่ในสมการแล้วได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 8.3667 - 0.1434z + \frac{96.56}{T} + \frac{43.8575z}{T} + 0.1084n_d - \frac{29.28n_d}{T} \quad (4.8)$$

การทำนายความเร็วเสียงใน FAEE ด้วยสมการที่ (4.8) ชนิดอิมิต์และไม่อิมิต์เทียบกับผลการทดลองของ Freitas et al. (Freitas et al., 2013) ในช่วงอุณหภูมิ 293.15-343.15 K แสดงการกระจายตัวร้อยละค่าความคลาดเคลื่อน (D(%)) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปที่ 4.4 มีการกระจายตัวทั้งฝั่งค่าบวกและลบ เมื่อคำนวณค่า Bias มีค่าเท่ากับ -1.85% แสดงให้ทราบว่าค่าจากการทำนายส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าการทดลอง โดยช่วงค่า AD เท่ากับ 0.00-2.05 และค่า AAD เท่ากับ 0.56 % เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการทำนายด้วยสมการที่ (4.8) กับการทดลอง ได้กราฟความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรงมีค่า จุดตัด ความชัน สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เท่ากับ -4.261, 1.003, 0.975 และ 0.012 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 ร้อยละความคลาดเคลื่อน (D(%)) จากการทำนายความเร็วเสียงใน FAEE ด้วยสมการที่ (4.8) เทียบกับผลการทดลอง ในช่วงอุณหภูมิ 293.15-343.15 K



ภาพที่ 4.5 ผลการทำนายความเร็วเสียงของ FAEE จากสมการที่ (4.8) กับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 293.15 - 343.15 K

ตารางที่ 4.5 ผลการทำนายความเร็วเสียงของ FAEE จากสมการที่ (4.8) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลการทดลอง

FAEEs	T (K)	Uexp (m/s)	Ucal (m/s)	D (%)
C12:0	293.15	1339.55	1373.99	-2.51
	298.15	1320.91	1361.19	-3.05
	303.15	1302.49	1349.11	-3.58
	308.15	1284.26	1337.71	-4.16
	313.15	1266.16	1326.93	-4.80
	318.15	1248.26	1316.74	-5.49
	323.15	1230.54	1307.10	-6.22
	328.15	1213.00	1297.97	-7.00
	333.15	1195.61	1289.33	-7.00
	338.15	1178.43	1281.13	-7.84
343.15	1161.44	1273.37	-8.72	
C14:0	293.15	1361.05	1382.50	-1.38
	298.15	1342.6	1366.19	-1.76
	303.15	1324.34	1350.79	-2.00
	308.15	1306.23	1336.23	-2.30
	313.15	1288.32	1322.46	-2.65
	318.15	1270.61	1309.42	-3.05
	323.15	1253.08	1297.06	-3.51
	328.15	1235.76	1285.34	-4.01
	333.15	1218.51	1274.22	-4.57
	338.15	1201.52	1263.66	-5.17
343.15	1184.74	1253.63	-5.81	

ตารางที่ 4.5 ผลการทำนายความเร็วเสียงของ FAEE จากสมการที่ (4.8) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลการทดลอง (เคลวิน) (ต่อ)

FAEEs	T (K)	Uexp (m/s)	Ucal (m/s)	D (%)
C16:0	303.15	1324.65	1352.47	-0.73
	308.15	1324.67	1334.76	-0.76
	313.15	1306.9	1318.00	-0.85
	318.15	1289.33	1302.13	-0.99
	323.15	1271.96	1287.10	-1.19
	328.15	1254.78	1272.83	-1.44
	333.15	1237.76	1259.29	-1.74
	338.15	1220.91	1246.43	-2.09
	343.15	1204.31	1234.20	-2.48
C18:0	313.15	1321.203	1313.56	0.58
	318.15	1304.71	1294.89	0.75
	323.15	1287.43	1277.21	0.79
	328.15	1270.34	1260.45	0.78
	333.15	1253.46	1244.54	0.71
	338.15	1236.80	1229.43	0.60
	343.15	1220.46	1215.07	0.44
C18:1	293.15	1396.59	1405.66	-0.65
	298.15	1378.54	1383.28	-0.34
	303.15	1360.67	1362.16	-0.11
	308.15	1342.98	1342.22	0.06
	313.15	1325.49	1323.37	0.16
	318.15	1308.17	1305.52	0.20
	323.15	1291.03	1288.61	0.19
	328.15	1274.04	1272.58	0.11
	333.15	1257.24	1257.36	-0.01

ตารางที่ 4.5 ผลการทำนายความเร็วเสียงของ FAEE จากสมการที่ (4.8) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลการทดลอง (เคลวิน) (ต่อ)

FAEEs	T (K)	U _{exp} (m/s)	U _{cal} (m/s)	D (%)
	338.15	1240.64	1242.91	-0.18
	343.15	1224.26	1229.16	-0.40
C18:2	293.15	1405.24	1411.64	-0.46
	298.15	1387.18	1390.33	-0.23
	303.15	1369.28	1370.22	-0.07
	308.15	1351.56	1351.22	0.03
	313.15	1334.05	1333.25	0.06
	318.15	1316.7	1316.24	0.04
	323.15	1299.47	1300.12	-0.05
	328.15	1282.49	1284.83	-0.18
	333.15	1265.67	1270.31	-0.37
	338.15	1249.03	1256.53	-0.60
	343.15	1232.62	1243.42	-0.88

ความเร็วเสียงในเอทิลโบไอดีเซล

สำหรับการประมาณความเร็วเสียงของเอทิลโบไอดีเซลด้วยสมการที่ (4.8) ต้องทำการคำนวณซ้ำหลายรอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกการแทนค่าจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ยตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) แทนในสมการที่ (4.8) ได้ดังสมการที่ (4.9) ซึ่งสามารถลดขั้นตอนและเวลาในการคำนวณได้

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 8.3667 - 0.1434z_{ave} + \frac{96.56}{T} + \frac{43.8575z_{ave}}{T} + 0.1084n_{d,ave} - \frac{29.28n_{d,ave}}{T} \quad (4.9)$$

ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมองค์ประกอบ FAEE ของเอทิลโบไอดีเซลจากวัตถุดิบ 4 ชนิด ไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่าช่วงค่า z_{ave} และ $n_{d(ave)}$ เท่ากับ 17.17-17.70 และ 0.66-1.47 ตามลำดับ จาก

การทำนายความเร็วเสียงในเอทิลไบโอดีเซลด้วยสมการที่ (4.9) เทียบกับผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าช่วงค่า AD และค่า AAD เท่ากับ 0.01-1.28% และ 0.31% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลการศึกษาของ Freitas et al.(Freitas et al., 2013) โดยใช้ Wada's group contribution method(Daridon, Coutinho, Ndiaye, & Paredes, 2013a) ในการทำนายความเร็วเสียงในไบโอดีเซลพบมีค่า AAD ที่สูงกว่าสมการที่ (4.9) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าสมการที่นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าอีกทั้งในการใช้งานยังไม่ยุ่งยากซับซ้อนและไม่ต้องทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพชนิดอื่นประกอบการทำนาย เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการทำนายด้วยสมการที่ (4.9) กับการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.7 ได้กราฟความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรงมีค่า จุดตัด ความชัน สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เท่ากับ 32.11, 0.977, 0.994 และ 0.168 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบเอทิลเอสเทอร์กรดไขมันของเอทิลไบโอดีเซล (สัดส่วนโดยมวล)

(Freitas et al., 2013)

Ethyl biodiesel	Mass fraction of FAEE							z_{ave}	$n_{d(ave)}$
	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	Other		
soybean	0.1092	0.0008	0.0293	0.2745	0.5265	0.0496	0.0101	17.81	1.48
sunflower	0.0566	0.0009	0.0311	0.3532	0.5446	0.0028	0.0109	17.92	1.45
soybean+sunflower	0.1181	0.0016	0.0323	0.2753	0.499	0.0587	0.0151	17.79	1.45
palm	0.3867	0.0015	0.0449	0.4451	0.1029	0.0026	0.0164	17.18	0.66

ตารางที่ 4.7 ผลการทำนายความเร็วเสียงในเอทิลไบโอดีเซลเทียบกับผลการทดลองของ Freitas et al. (Freitas et al., 2013) (m/s)

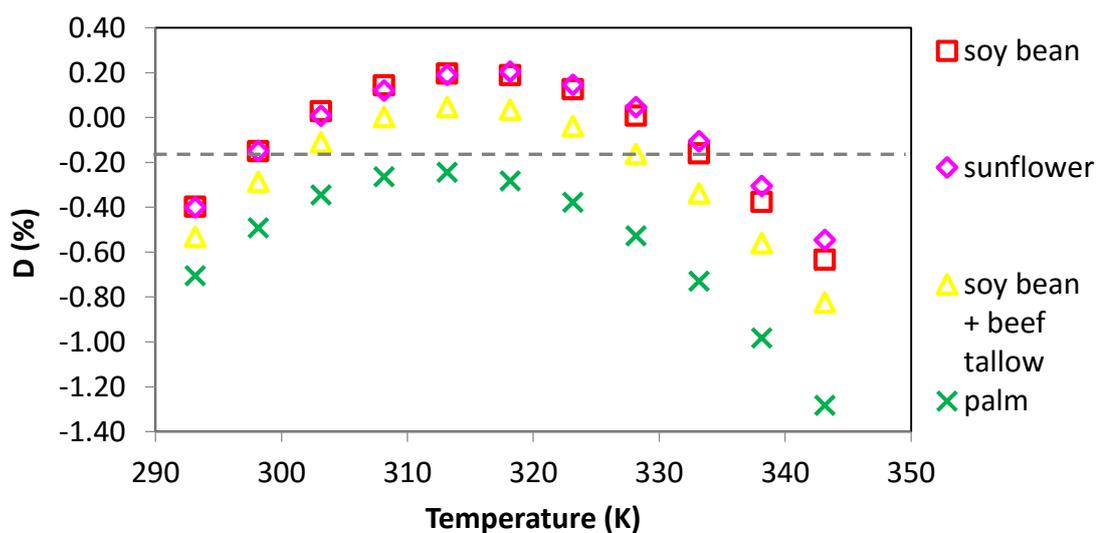
Ethyl-Biodiesel	Temperature (K)	Speed of sound (m/s)	
		Eq. 4.9	%D
soy bean	293.15	1407.68	-0.40
	298.15	1386.16	-0.15
	303.15	1365.85	0.03
	308.15	1346.67	0.14
	313.15	1328.52	0.20
	318.15	1311.35	0.19
	323.15	1295.07	0.13
	328.15	1279.64	0.01
	333.15	1264.98	-0.16
	338.15	1251.06	-0.38
	343.15	1237.83	-0.63
AAD(%)			0.22
Sunflower	293.15	1408.02	-0.40
	298.15	1386.27	-0.15
	303.15	1365.74	0.01
	308.15	1346.36	0.12
	313.15	1328.02	0.19
	318.15	1310.67	0.21
	323.15	1294.22	0.15
	328.15	1278.63	0.05
	333.15	1263.82	-0.11
	338.15	1249.76	-0.3
	343.15	1236.39	-0.54
AAD(%)			0.20

ตารางที่ 4.5 ผลการทำนายความเร็วเสียงในเอทิลไบโอดีเซลเทียบกับผลการทดลองของ Freitas et al. (Freitas et al., 2013) (m/s) (ต่อ)

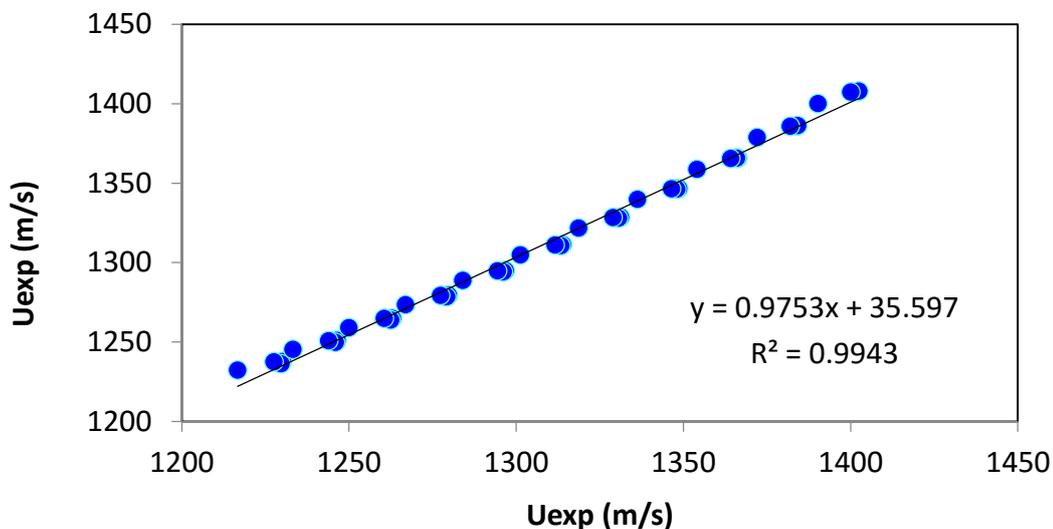
Ethyl-Biodiesel	Temperature (K)	Speed of sound (m/s)	
		Eq. 4.9	%D
soy bean+beef tallow	293.15	1408.02	-0.57
	298.15	1386.27	-0.31
	303.15	1365.74	-0.12
	308.15	1346.36	0.01
	313.15	1328.02	0.07
	318.15	1310.67	0.07
	323.15	1294.22	0.01
	328.15	1278.63	-0.10
	333.15	1263.82	-0.26
	333.15	1263.82	-0.26
	338.15	1249.76	-0.47
	343.15	1236.39	-0.72
AAD (%)			0.25
Palm	293.15	1400.05	-0.70
	298.15	1378.80	-0.49
	303.15	1358.74	-0.34
	308.15	1339.80	-0.26
	313.15	1321.88	-0.24
	318.15	1304.92	-0.28
	323.15	1288.84	-0.38
	328.15	1273.6	-0.53
	333.15	1259.13	-0.73
	338.15	1245.38	-0.98
343.15	1232.31	-1.28	
AAD(%)			0.56

ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAD(%)) จากการทำนายเทียบกับผลการทดลอง

Ethyl-Biodiesel	AAD (%)		
	Eq. 4.9	Wada 1	Wada 2
soybean	0.22	0.81	0.31
sunflower	0.20	0.65	0.26
soybean+sunflower	0.25	0.60	0.46
palm	0.56	0.30	0.75
Overall	0.31	0.59	0.45



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อน (D(%)) ของเอทิลไบโอดีเซลจากสมการที่ (4.9) เทียบกับการทดลอง ในช่วงอุณหภูมิ 293.15 - 343.15 K



รูปที่ 4.7 ผลการทำนายความเร็วเสียงจากสมการที่ (4.9) กับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 293.15 - 343.15 K

ผลของค่า z_{ave} และ $n_{d(ave)}$ ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียงในเอทิลไปโอดีเซล

เพื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียงเทียบกับค่า z และ n_d โดยทำการอนุพันธ์สมการที่ (4.8) เทียบกับค่า z และ n_d ได้ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ

$$\left(\frac{d \ln \left(\frac{u^2}{T} \right)}{dz} \right)_{n_d, T} = -0.1434 + 43.8575 \frac{1}{T} \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{d \ln \left(\frac{u^2}{T} \right)}{dn_d} \right)_{z, T} = 0.1084 - 29.28 \frac{1}{T} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.10) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเสียงเทียบกับ z เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าผลของจำนวนอะตอมคาร์บอนส่งผลให้ความเร็วเสียงมีอัตราลดลง $43.875 \text{ (K m/s)} \cdot (\text{Carbon numbers})^{-1}$ จนถึงที่อุณหภูมิ 305.84 K ทำให้สมการที่ (4.10) มีค่าเท่ากับศูนย์

แสดงให้เห็นถึงความยาวของโมเลกุลที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียง ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลของ n_d ที่ส่งผลต่อความเร็วเสียงตามสมการที่ (4.11) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพบว่าผลพันธะคู่ส่งผลต่อค่าความเร็วเสียงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วยอัตรา $29.28 \text{ (K m/s) (Number of double bonds)}^{-1}$

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วเสียงในกรดไขมันเอสเทอร์บริสุทธิ์และไบโอดีเซลกับตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของความเร็วเสียง และการโยงสัมพันธ์ความเร็วเสียงในกรดไขมันเอสเทอร์บริสุทธิ์และไบโอดีเซลกับพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ต่างๆ สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

สรุปผลการศึกษา

จากการโยงสัมพันธ์ความเร็วเสียงในกรดไขมันเอสเทอร์และไบโอดีเซลกับโครงสร้างทางเคมีหรือองค์ประกอบของกรดไขมัน จากกฎควมรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน โดยวิธีที่นำเสนอสามารถประมาณค่าความเร็วเสียงในกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ด้วยค่าจำนวนอะตอมคาร์บอน (z) และจำนวนพันธะคู่ (n_d) สำหรับการประมาณค่าความเร็วเสียงในเมทิลไบโอดีเซล และเอทิลไบโอดีเซลสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย (z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ($n_{d(ave)}$) ซึ่งให้ความแม่นยำเช่นเดียวกัน ความสัมพันธ์ที่นำเสนอมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาปรับปรุงการทำนายสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชในอนาคตและสมบัติอื่นๆที่คล้ายคลึงกัน สมการที่ใช้ในการประมาณความเร็วเสียงสรุปได้ดังนี้

ความเร็วเสียงกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์และเมทิลไบโอดีเซล

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 5.3908 + 0.01975z_{ave} + \frac{932.23}{T} - \frac{1.399z_{ave}}{T} + 0.1009n_{d,ave} - \frac{28.99n_{d,ave}}{T} \quad (5.1)$$

ความเร็วเสียงกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์และเอทิลไบโอดีเซล

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 8.3667 - 0.1434z_{ave} + \frac{96.56}{T} + \frac{43.8575z_{ave}}{T} + 0.1084n_{d,ave} - \frac{29.28n_{d,ave}}{T} \quad (5.2)$$

การใช้งานสมการนอกช่วงอุณหภูมิ 5-80°C อาจทำให้ความแม่นยำต่ำลงได้

ข้อเสนอแนะ

ควรเพิ่มการศึกษากลุ่มของกรดไขมันที่มีโครงสร้างพิเศษที่ส่งผลต่อความเร็วเสียงและเชื่อมโยงกับกฎควมรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน เช่นในน้ำมันละหุ่ง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233-271. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Barnwal, B. K., & Sharma, M. P. (2005). Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(4), 363-378. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.007>
- Bradshaw, G. B., & Meuly, W. C. (1944). US patent 2 Patent No.
- Canakci, M., & Van, G. J. (2001). Biodiesel Production from Oils and Fats with High Free Fatty Acids. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 24(6), 1429-1436.
- Chanida Sansa-ard, K. A., Supathra Lilitchan, and Kanit Krisnangkura. (2011). Free Energy Contribution to Gas Chromatographic Separation of Petroselinate and Oleate Esters. *Chromatography Research International*, 2011, 9 pages.
- Crabbe, E., Nolasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K., & Ishizaki, A. (2001). Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. *Process Biochemistry*, 37(1), 65-71. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00178-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00178-9)
- Daridon, J.-L., Coutinho, J. A. P., Ndiaye, E. H. I., & Paredes, M. L. L. (2013a). Novel data and a group contribution method for the prediction of the speed of sound and isentropic compressibility of pure fatty acids methyl and ethyl esters. *Fuel*, 105, 466-470. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.083>
- Daridon, J.-L., Coutinho, J. A. P., Ndiaye, E. H. I., & Paredes, M. L. L. (2013b). Novel data and a group contribution method for the prediction of the speed of sound and isentropic compressibility of pure fatty acids methyl and ethyl esters. *Fuel*, 105(0), 466-470. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.083>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Damoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(12), 1263-1267. doi:10.1007/s11746-000-0198-y
- Division, B., Wellbeing, F. o. H. a., & University, S. H. Gas chromatography. Retrieved from <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/chrom/gaschrm.htm>
- Eder, K. (1995). Gas Chromatographic analysis of fatty acid methyl esters. *Journal of Chromatography B.*, 671, 113-131.
- Encinar, J. M., González, J. F., Rodríguez, J. J., & Tejedor, A. (2002). Biodiesel Fuels from Vegetable Oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. Oils with Ethanol. *Energy & Fuels*, 16(2), 443-450. doi:10.1021/ef010174h
- Formo, M. W. (1979). *Physical Properties of Fats and Fatty Acid* (4 ed. Vol. 1). New York: John Wiley and Sons.
- Freedman, B., Pryde, E. H., & Mounts, T. L. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61(10), 1638-1643. doi:10.1007/BF02541649
- Freitas, S. V. D., Paredes, M. L. L., Daridon, J.-L., Lima, Á. S., & Coutinho, J. A. P. (2013). Measurement and prediction of the speed of sound of biodiesel fuels. *Fuel*, 103(0), 1018-1022. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.082>
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405-416. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)
- Huber, M. L., Lemmon, E. W., Kazakov, A., Ott, L. S., & Bruno, T. J. (2009). Model for the Thermodynamic Properties of a Biodiesel Fuel. *Energy & Fuels*, 23(7), 3790-3797. doi:10.1021/ef900159g
- Issariyakul, T., & Dalai, A. K. (2014). Biodiesel from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 446-471.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Jitputti, J., Kitiyanan, B., Rangsunvigit, P., Bunyakiat, K., Attanatho, L., & Jenvanitpanjakul, P. (2006). Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 116(1), 61-66. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2005.09.025>
- Kumar, G. R., Ravi, R., & Chadha, A. (2011). Kinetic Studies of Base-Catalyzed Transesterification Reactions of Non-edible Oils To Prepare Biodiesel: The Effect of Co-solvent and Temperature. *Energy & Fuels*, 25(7), 2826-2832. doi:10.1021/ef200469u
- Kusdiana, D., & Saka, S. (2004). Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*, 91(3), 289-295. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00201-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00201-3)
- Lopes, A. F. G., Talavera-Prieto, M. d. C., Ferreira, A. G. M., Santos, J. B., Santos, M. J., & Portugal, A. T. G. (2014). Speed of sound in pure fatty acid methyl esters and biodiesel fuels. *Fuel*, 116(0), 242-254. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.044>
- Ma, F., Clements, L. D., & Hanna, M. A. (1998). The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1261-1264.
- Ma, F., Clements, L. D., & Hanna, M. A. (1999). The effect of mixing on transesterification of beef tallow. *Bioresource Technology*, 69(3), 289-293. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00184-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00184-9)
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1-15. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2007). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1300-1311. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.006>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Martin, A. J. P. (1950). Partition Chromatography. *Annual Review of Biochemistry*, 19(1), 517-542. doi:doi:10.1146/annurev.bi.19.070150.002505
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Ney, M. J., & Southwell, P. H. (1983). *In Ester from Rapeseed Oil as Diesel Fue*. Paper presented at the In: Proc. Vegetable Oil as Diesel Fuel Seminar III, Northern Agricultural Energy Center.
- Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K., & Krisnangkura, K. (2014). Estimation of surface tension of fatty acid methyl ester and biodiesel at different temperatures. *Fuel*, 126(0), 162-168. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.054>
- Sridharan, R., & Mathai, J. M. (1974). Transesterification Reaction. *Journal of Scientific and Industrial Reserch*, 33, 177-187.
- Suppes, G. J., Dasari, M. A., Doskocil, E. J., Mankidy, P. J., & Goff, M. J. (2004). Transesterification of soybean oil with zeolite and metal catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 257(2), 213-223.
- Ulf, S., Ricardo, S., & Rogério Matheus, V. (1998). Transesterification of vegetable oils: a review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 9(3).
- Vicente, G., Martínez, M., & Aracil, J. (2004). Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology*, 92(3), 297-305.
- Wright, H. J., Segur, J. B., Clark, H. V., Coburn, S. K., Langdon, E. E., & DuPuis, R. N. (1944). A report on ester interchange. *Oil & Soap*, 21(5), 145-148.
- กองบรรณาธิการเทคนิค. (2548). ไบโอดีเซล - พลังงานทดแทนช่วยชาติ. เครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม, 22(256), 154-163.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย (z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ($n_{d(ave)}$)

ตารางที่ ก องค์ประกอบของกรดไขมัน

C z:n _d	z	n _d	Mole Fraction (x _i)	z x _i	n _d x _i
Caprate, C10:0	10	0	0.0000	0.00	0.00
Laurate, C12:0	12	0	0.0000	0.00	0.00
Myristate, C14:0	14	0	0.0000	0.00	0.00
Palmitate, C16:0	16	0	0.1754	2.81	0.00
Palmitoleate, C16:1	16	1	0.0000	0.00	0.00
Stearate, C18:0	18	0	0.0375	0.68	0.00
Oleate, C18:1	18	1	0.2848	5.13	0.28
Linoleate, C18:2	18	2	0.5023	9.04	1.00
Linolenate, C18:3	18	3	0.0000	0.00	0.00
Arachidate, C20:0	20	0	0.0000	0.00	0.00
Gadoleate, C20:1	20	1	0.0000	0.00	0.00
Behenate, C22:0	22	0	0.0000	0.00	0.00
Erucate, C22:1	22	1	0.0000	0.00	0.00
Lignocerate, C24:0	24	0	0.0000	0.00	0.00
		Σ	1.0000	17.65	1.29

จากตารางที่ ก พบว่าค่าจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย (z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ($n_{d(ave)}$) เท่ากับ 17.65 และ 1.29 ตามลำดับ

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเร็วเสียง

การทำนายค่าความเร็วเสียงของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 293.15 เคลวิน ประกอบไปด้วย 2 วิธีดังนี้

1. การคำนวณความเร็วเสียงด้วยสมการที่ (4.8)

$$\ln\left(\frac{U^2}{T}\right) = 8.3667 - 0.1434Z + \frac{96.56}{T} + \frac{43.8575z}{T} + 0.1084n_d - \frac{29.28n_d}{T}$$

$$U = \exp\left[8.3667 - 0.1434z + \frac{96.56}{T} + \frac{43.8575z}{T} + 0.1084n_d - \frac{29.28n_d}{T}\right] \times T$$

ตาราง ข การคำนวณความเร็วเสียงด้วยสมการที่ (4.8)

FAEEs		U (ms ⁻¹)
Eethyl Octanoate	C8:0	1357.11
Eethyl Caprate	C10:0	1365.52
Eethyl Laurate	C12:0	1373.99
Eethyl Myristate	C14:0	1382.50
Eethyl Palmitate	C16:0	1390.07
Eethyl Palmitoleate	C16:1	1397.00
Eethyl Stearate	C18:0	1399.69
Eethyl Oleate	C18:1	1405.66
Eethyl Linoleate	C18:2	1411.64
Eethyl Linolenate	C18:3	1417.66
Eethyl Arachidate	C20:0	1408.37
Eethyl Gadoleate	C20:1	1414.37
Eethyl Behenate	C22:0	1417.10
Eethyl Erucate	C22:1	1423.13
Eethyl Lignocerate	C24:0	1425.88

ความเร็วเสียงของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 293.15 เคลวินประเมินบน
สัดส่วนโดยมวล

$$\begin{aligned}
 U &= (1357.11)(0)+(1365.52)(0)+(1373.99)(0)+(1382.50)+(0.007)+(1391.07)(0.1092) \\
 &\quad +(1397.00)(0.0008)+(1399.69)(0.0293)+(1405.66)(0.2745)+(1411.64)(0.5265) \\
 &\quad +(1417.66)(0.0496)+(1408.37)(0.0029)+(1414.37)(0.0018)+(1417.10)(0.0037) \\
 &\quad +(1423.13)(0)+(1425.88)(0.00099) \\
 &= 1407.682 \text{ ms}^{-1}
 \end{aligned}$$

ร้อยละความคลาดเคลื่อน (D)

$$D = \frac{(1402.1 - 1407.682)}{(1402.1)} = -0.40\%$$

2. การคำนวณความเร็วเสียงด้วยสมการที่ (4.9) โดยใช้ค่า (z_{ave}) และ ($n_{d(ave)}$) เท่ากับ
17.80 และ 1.47 ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
 \ln\left(\frac{U^2}{T}\right) &= 8.3667 - 0.1434(17.80) + \frac{96.56}{293.15} + \frac{43.8575(17.80)}{293.15} + 0.1084(1.47) - \frac{29.28(1.47)}{293.15} \\
 &= 1407.682 \text{ ms}^{-1}
 \end{aligned}$$

ร้อยละความคลาดเคลื่อน (D)

$$D = \frac{(1402.1 - 1407.682)}{(1402.1)} = -0.40\%$$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายสุริยา พันธุ์โกศล
วัน เดือน ปีเกิด	31 ธันวาคม 2529
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยโสธรพิทยาคม ปีการศึกษา 2548
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2553
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2555
ระดับปริญญาเอก	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2556
ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย	มูลนิธิการศึกษาเขต 100 ปี ทุนวิจัย วช. ประจำปีงบประมาณ 2559 ทุนวิจัยนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2559

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

วารสารในนานาชาติ

1. Krisnangkura, K., Aryusuk, K., Phankosol, S. and Lilitchan, S., and, 2016, “Energy Additivity Approaches to QSPR Modeling in Estimation of Dynamic Viscosity of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesel”, Journal of the American Oil Chemists Society, Vol. -, No. -, pp. -. (IF: 1.602)

2. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K. and Krisnangkura, K., 2015, "An empirical equation for estimation of kinematic viscosity of fatty Acid methyl ester and biodiesel", Journal of the American Oil Chemists Society, Vol. 92, No. 7, pp. 1051-1061. (IF:1.602)
3. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K. and Krisnangkura, K., "Estimation of Density of Biodiesel", Energy & Fuel. Vol. 28, No. 7, pp. 4633-4641. (IF:2.733)
4. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K. and Krisnangkura, K., 2014, "Estimation of Surface Tension of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesel at Different Temperatures", Fuel, Vol. 126, pp. 162-168. (IF:3.406)

วารสารในประเทศ

1. สุรียา พันธุ์โกศล และคณิต กฤษณังกูร, 2558, "การประมาณแรงตึงผิวของไบโอดีเซลจากค่าสะพานนิฟิเคชันและค่าไอโอดีน", วิจัยพลังงาน, สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, หน้า 57-68. (TCI 2)
2. สุรียา พันธุ์โกศล นิชาภัส สิริสุข และติณณภพ จุ่มอิน, 2558, "แนวทางเชิงประจักษ์สำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นและความหนืดของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ" 2015วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม, สาขาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม, กรุงเทพมหานคร, หน้า1-7.
3. นพนันต์ เมืองเหนือ ติณณภพ จุ่มอิน และสุรียา พันธุ์โกศล, 2558, "การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับพิสูจน์เอกลักษณ์ของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และการคำนวณสมบัติเชื้อเพลิงของเอทิลไบโอดีเซล", ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, กรุงเทพมหานคร, หน้า 136-143. (TCI 2)
4. นฎกร สิริมงคลกาล สุรียา พันธุ์โกศล แก้วกันยา สุดประเสริฐ กรณ์กนก อายุสุข และคณิต กฤษณังกูร, 2558, "การประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ", ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, กรุงเทพมหานคร, หน้า 127-135. (TCI 2)

5. สุริยา พันธุ์โกศล ตติณณภพ จุ่มอิน และคณิต กฤษณ์งกูร, 2559, “การประมาณแรงตึงผิวของน้ำมันพืชด้วยกฎควบรววมพลังงานอิสระ”, วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, 12 หน้า (ตอบรับ) (TCI 1)
5. สุริยา พันธุ์โกศล ตติณณภพ จุ่มอิน และคณิต กฤษณ์งกูร, 2559, “การประมาณแรงตึงผิวของน้ำมันพืชด้วยกฎควบรววมพลังงานอิสระ”, วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, 12 หน้า (ตอบรับ) (TCI 1)
6. นันทชัย ปัจจุบัน สุริยา พันธุ์โกศล* แก้วกันยา สุดประเสริฐ วรรณกนก อายุสุข และคณิต กฤษณ์งกูร, 2559, “ความสัมพันธ์ความหนืดและความหนาแน่นของเอทิลไบโอดีเซลจากกฎควบรววมพลังงานอิสระ”, วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, 16 หน้า (ตอบรับ) (TCI 1)

รายงานการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ

1. Natakron Sirimongkolgal, Kaokanya Sudapraser and Suriya Phankosol, “Correlation of vapor pressure of biodiesel and its saponification number and iodine value at various temperatures” The 1st Industrial Technology International Research Conference 2015, 21-22 July 2015, Phrakhon Rajabhat University, Bangkok.
2. Nantachai Patjuban, Kaokanya Sudapraser and Suriya Phankosol, “Predicting dynamic viscosity of ethyl biodiesels from its saponification numbers and iodine values”, The 1st Industrial Technology International Research Conference 2015, 21-22 July 2015, Phrakhon Rajabhat University, Bangkok.
3. Phankosol, S. and Krisnangkura, K., 2015, “Estimation Density and Viscosity of Ethyl-Biodiesel from Saponification Number and Iodine Values”, The 10th Annual Siam Physics Congress 2015: SPC2015, May 20-22, Sheraton Grande Sukhumvit Hotel, Bangkok, Thailand.
4. Muangnuea, N., Sudaprasert, K., Chum-in, T., Saengthip, S. and Phankosol, S., 2015, “Development of a Computer Program for Calculation Physical and Chemical Properties of Biodiesel Via Ethanolysis”, The 8th Silpakorn University International Conference on Academic Research and Creative Arts: Integration of Art and Science, February 12-13, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand, pp. 168.

5. Saengthip, S., Sri-Ngernyung, L., Chum-in, T., Muangnuea, N. and Phankosol, S., 2015, "Development of a Computer Program for Gas Chromatographic Identification of Alkyl Esters", The 8th Silpakorn University International Conference on Academic Research and Creative Arts: Integration of Art and Science, February 12-13, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand, pp. 169.
6. Phankosol, S. and Krisnangkura, K., 2015, "Estimation density of biodiesel produced by ethanolysis", Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON2015), January 21-23, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 601-603.
7. Phankosol, S. and Krisnangkura, K., 2014, "Estimation kinematic viscosity of biodiesel produced by ethanolysis", 6th International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference, December 17-19, Prajaktra Design Hotel, UdonThani, Thailand.

รายงานการประชุมทางวิชาการในประเทศ

1. สุรียา พันธุ์โกศล และติณณภพ จุ่มอิน, "แนวทางเชิงประจักษ์สำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นและความหนืดของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ", การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1 เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชาติ, 11 กรกฎาคม 2558, วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม, กรุงเทพฯ
2. ศุภกิจ บุตรน้ำเพชร, ปวีตวงษ์ บำรุงพันธ์ และสุรียา พันธุ์โกศล, "การศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเพื่อการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาหุงต้มแก๊สปิโตรเลียมเหลว", การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1 เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชาติ, 11 กรกฎาคม 2558, วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม, กรุงเทพฯ
3. ศิริกาญจนา แซ่จ้อ, ติณณภพ จุ่มอิน, อำนวย เดชชัยศรี และสุรียา พันธุ์โกศล, "การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการประมาณค่าสมบัติเชิงเคมของไบโอดีเซล", การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1 เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชาติ, 11 กรกฎาคม 2558, วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม, กรุงเทพฯ
4. ชนัญชิตา สายชุมดี และสุรียา พันธุ์โกศล, "การจัดการพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในเขตจังหวัดสมุทรสาคร" การประชุมวิชาการ

- เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11, 17-19 มิถุนายน 2558, โรงแรมบางแสน เฮอริเทจ, ชลบุรี
5. นงนุช สิริมงคลกาล, สุรียา พันธุ์โกศล, แก้วกัญญา สุดประเสริฐ, กรณ์กนก อายุสุข และคณิต กฤษณังกูร, “การประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11, 17-19 มิถุนายน 2558, โรงแรมบางแสน เฮอริเทจ, ชลบุรี
 6. นันทชัย ปัจจุบัน, สุรียา พันธุ์โกศล, แก้วกัญญา สุดประเสริฐ, กรณ์กนก อายุสุข และคณิต กฤษณังกูร, “การประมาณความหนืดและความหนาแน่นของเอทิลไบโอดีเซล” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11, 17-19 มิถุนายน 2558, โรงแรมบางแสน เฮอริเทจ, ชลบุรี
 7. ดิณฑภพ จุ่มอิน, นันทรัตน์ สุขปัญญา, อริย์พงศ์ อารีเวชศรีมงคล และสุรียา พันธุ์โกศล, “การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการจำลองและระบุเอกลักษณ์ของกรดไขมันที่มีแอลกอฮอล์สายยาวเป็นองค์ประกอบ”, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 93-99
 8. นันทชัย ปัจจุบัน, สุรียา พันธุ์โกศล, แก้วกัญญา สุดประเสริฐ, กรณ์กนก อายุสุข และคณิต กฤษณังกูร, “การทำนายค่าความดันไอของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ”, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 100-106
 9. ศุภกิจ บุตรน้ำเพชร, ปวีตวงศ์ บำรุงพันธ์ และสุรียา พันธุ์โกศล, “การศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเพื่อการผลิตไฟฟ้า ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาหุงต้มแก๊สปิโตรเลียมเหลว”, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 119-124
 10. ประเสริฐศักดิ์ เต๋ยปีย์, ยุวดี บังสุข, รุจิกาญจน์ ปองดอกฟ้า และสุรียา พันธุ์โกศล, “การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบสำหรับบริโภคในภาวะฉุกเฉิน”, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 316

11. อาทิตย์ คงราชี่, อัศวิน ฉายสกุล, ปฐม เริงหิรัญ และสุริยา พันธุ์โกศล, “การจัดสรรพนักงานสำรวจอุบัติเหตุเพื่อปรับปรุงการให้บริการกรณีศึกษา””, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 328
12. พีรเวทย์ เศรษฐภัทรทวี, รพีชา กรุดยิม, มโนสิทธิ์ เหวารักษา และสุริยา พันธุ์โกศล, “การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการทำนายอาการเสียของแอร์”, การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ อุตสาหกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3, 10 พฤษภาคม 2558, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียนม, ชลบุรี, หน้า 347
13. Sitthisuk, N., Sudaprasert, K., Phankosol, S., Aryasuk, K. and Krisnangkura, K., 2014, “Correlation of Biodiesel Viscosity to Its Surface Tension” The 40th Congress on Science and Technology of Thailand, December 2-4, Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, pp. 1035-1014
14. Kampasri, J., Sudaprasert, K., Phankosol, S., Aryasuk, K. and Krisnangkura, K., 2014, “Thermodynamic Relationship Between Dynamic and Kinematic Viscosities of Biodiesel” The 40th Congress on Science and Technology of Thailand, December 2-4, Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, pp. 1035-1014.
15. Chum-in, T., Sudaprasert, K., Phankosol, S., Aryasuk, K., and Krisnangkura, K., 2014, “Development of Computer Program for Calculation of Biodiesel Properties”, The 40th Congress on Science and Technology of Thailand, December 2-4, Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, pp. 975-982.
16. Chum-in, T., Sudaprasert, K., Phankosol, S., Aryasuk, K., and Krisnangkura, K., 2014, “Development of Computer Program for Calculation of Biodiesel Properties”, The 40th Congress on Science and Technology of Thailand, December 2-4, Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, pp. 975-982.
17. Pantong, N., Phankosol, S., Sudaprasert, K. and Krisnangkura, K., 2012, “Kinetic of Trans-ethylation of Palm Oil in a Continuous Reactor”, The 38th Congress on Science and Technology of Thailand, October 17-19, The Empress Hotel, Chiang Mai, pp. 114.

18. Phankosol, S., Pantong, N., Sudaprasert, K. and Krisnangkura, K., 2012, "Kinetic of Transmethylation of Palm Oil in a Continuous Reactor", The 38th Congress on Science and Technology of Thailand, October 17-19, The Empress Hotel, Chiang Mai , pp. 114.