



วว.

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-07/ย. 10 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเครื่องต้นแบบไบโอดีเซล จากน้ำมันสบู่ดำ



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-07

การวิจัยและพัฒนาสบูดำเป็นเชื้อเพลิงทดแทนอย่างครบวงจร

โครงการย่อยที่ 10

การพัฒนาเครื่องต้นแบบไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเครื่องต้นแบบไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ

โดย

ธนิศา สอนิเสวต

ยุทธนา ฐานมงคล

ชนากานต์ อาษาสุจริต

กษิต อสัมภินพงศ์

นัฐวี ตรีถนันท

เทพฤทธิ์ กัณหานนท์

วิษณุ ปั้นพันธุ์

อมรรัตน์ สื่อมโนธรรม

พิชัย วงศ์หาญ

ปิยนันท์ ศรีศิริ

บรรณาธิการ

นฤมล รื่นไวย์

ลิขิต หาญจางสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

วว., กรุงเทพฯ 2554

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นางเกษมศรี หอมชื่น)

ผู้ว่าการ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญรูป	ค
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	4
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	12
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	28
4. สรุปผลการทดลอง	46
5. ข้อเสนอแนะ	47
6. เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	52

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันสบู่ดำ	13
ตารางที่ 2. องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ	14
ตารางที่ 3. สภาวะการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในระดับห้องปฏิบัติการ	15
ตารางที่ 4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันสบู่ดำ	17
ตารางที่ 5. องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ	17
ตารางที่ 6. สภาวะการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทนความร้อนและความดันสูง	27
ตารางที่ 7. ชนิดและชั้นคุณภาพของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต	36
ตารางที่ 8. ปริมาณสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยา	37
ตารางที่ 9. สมดุลมวลสารสำหรับระบบผลิตไบโอดีเซล	42
ตารางที่ 10. คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบ	42

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. ชุดเครื่องมือผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในระดับห้องปฏิบัติการ	13
รูปที่ 2. ภาพระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำแบบ 2 มิติ	20
รูปที่ 3. ภาพระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำแบบ 3 มิติ	21
รูปที่ 4. เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ	22
รูปที่ 5. เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทนความร้อนและความดันสูง	26
รูปที่ 6. การแยกชั้นของกลีเซอรินและไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์	29
รูปที่ 7. การแยกชั้นของกลีเซอรินและไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์	29
รูปที่ 8. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์ต่อชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	30
รูปที่ 9. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	31
รูปที่ 10. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม	32
รูปที่ 11. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม	32
รูปที่ 12. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม	33
รูปที่ 13. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม	34
รูปที่ 14. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม	35
รูปที่ 15. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม	35

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 16. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมนอกลิเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ	37
รูปที่ 17. ร้อยละโดยน้ำหนักของไดกลิเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ	38
รูปที่ 18. ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลิเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ	38
รูปที่ 19. การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน ที่ได้จากการเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ	40
รูปที่ 20. Flow Chart การทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ	41
รูปที่ 21. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม	44
รูปที่ 22. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม	44
รูปที่ 23. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม	45

DEVELOPMENT OF PROTOTYPE FOR BIODIESEL PRODUCTION FROM JATROPHA

Thanita Sonthisawate, Yoothana Thanmongkol, Chanakan Asasutjarit, Kasidid Asumpinpong, Nattawee Teerananont, Thepparait Kunhanont, Vishnu Panphan, Amornrat Suemanotham, Pichai Wonghan and Piyanan Sreesiri

ABSTRACT

Jatropha is vegetation that can cultivate to any area of Thailand. Its extracted oil is non-edible oil, so jatropha is the other interested-alternative raw material for producing biodiesel. However, the physical and chemical properties of jatropha are concerned. Therefore, the produced biodiesel can meet the specification mandated by Department of Energy Business and can use safely with engine.

In laboratory-scale, using transesterification process with homogeneous and heterogeneous catalysts can produce biodiesel from jatropha oil. The optimum conditions for homogeneous catalysts are oil to methanol ratio 1 : 9, sodium hydroxide 0.5 wt% and reaction time 1 hour. For heterogeneous catalysts, oil to methanol ratio 1 : 12, calcium oxide 5 wt% and reaction time 1 hour. These two biodiesels can meet the specification.

Biodiesel prototype consists of feeding raw material tanks, transesterification reactor, settling tank, washing unit and evaporating unit, also meet the specification using oil to methanol ratio 1 : 9, sodium hydroxide 0.66 wt%. The last experiment using high temp high pressure reactor (Parr reactor), can produce biodiesel that meet specification with oil to methanol ratio 1 : 45, temperature 300 degree Celsius and reaction time 1 hour.

การพัฒนาเครื่องต้นแบบไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

ชนิตา สนธิเสวต¹, ยุทธนา ฐานมงคล¹, ชนาภานต์ อาษาสุจริต¹,
กษิติศ อัสสัมภินพงศ์¹, ญัฐวี ตรีณานนท์¹, เทพฤทธิ์ กัณหานนท์¹, วิษณุ ปั่นพันธ์¹,
อมรรัตน์ ส้อมโนธรรม¹, พิชัย วงศ์หาญ¹ และ ปิยนันท์ ศรีศิริ¹

บทคัดย่อ

สบู่ดำเป็นพืชที่สามารถเพาะปลูกได้ทุกภูมิภาคของประเทศ และเป็นน้ำมันพืชที่ไม่ใช่เพื่อการบริโภค ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับคามสนใจ ในการส่งเสริมให้ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล. อย่างไรก็ตาม การนำน้ำมันสบู่ดำมาเป็นวัตถุดิบในผลิตไบโอดีเซล ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันสบู่ดำ เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดและสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้อย่างปลอดภัย.

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ อัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลเท่ากับ 1 : 9, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ส่วนสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ คือ อัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1:12, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้นำมาทดสอบคุณภาพพบว่า มีค่าผ่านมาตรฐาน.

เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำประกอบด้วย ชุดเตรียมและป้อนสำหรับ น้ำมันสบู่ดำและสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์, ชุดทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน, ชุดถังแยกกลีเซอริน, ชุดล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และชุดระเหยน้ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1:9, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.66 โดยน้ำหนัก ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยความร้อนและความดันสูง สามารถผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล เท่ากับ 1:45, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้นำมาทดสอบคุณภาพ พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐานเช่นเดียวกัน.

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

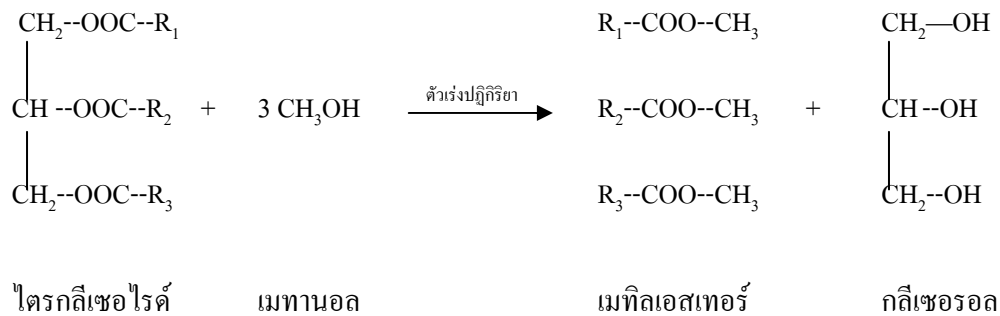
สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ จากการที่น้ำมันสบู่ดำเป็นน้ำมันที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ จึงไม่มีปัญหาเรื่องการแย่งวัตถุดิบเหมือนกับน้ำมันปาล์มเพื่อบริโภคและการผลิตเพื่อพลังงานทดแทน. น้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการบีบและกรองเพื่อกำจัดกากและตะกอนทิ้งแล้วนั้น สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์รอบต่ำ เช่น เครื่องจักรกลการเกษตรได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีใดๆ แต่คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำนั้น ยังไม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงได้. ดังนั้นจึงต้องนำน้ำมันสบู่ดำมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่ใช้ในการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหรือสารประกอบไตรกลีเซอไรด์, โดยใช้แอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ หรือไบโอดีเซล และกลีเซอริน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาดังกล่าว.

ในการวิจัยและพัฒนาเครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำนั้น มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน, ซึ่งมีขอบเขตของโครงการวิจัย ได้แก่ ศึกษาเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ, พัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันสบู่ดำ โดยการทดสอบตามมาตรฐานสากล. ทั้งนี้การวิจัยนี้มุ่งเน้น เพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และเป็นทางเลือกใหม่ของการประโยชน์จากน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งหน่วยงานที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรมไบโอดีเซลหรืออุตสาหกรรมด้านพลังงานทดแทน, กลุ่มเกษตรกรและชุมชนที่มีการเพาะปลูกสบู่ดำ และผู้สนใจทั่วไป.

1.2 ทฤษฎีและทบทวนเอกสาร

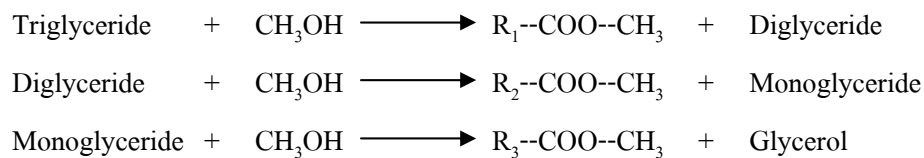
กระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันคือกระบวนการผลิตเอสเทอร์ของกรดไขมัน หรือที่รู้จักกันในชื่อของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เป็นองค์ประกอบหลัก. กระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือไบโอดีเซลและกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา. ดังสมการปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันหรือไขมันกับแอลกอฮอล์ ดังนี้.

ปฏิกิริยารวม



ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) โดยต้องการแอลกอฮอล์ 3 โมลต่อโมลของไตรกลีเซอไรด์ ตามปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry), ซึ่งจะได้ไบโอดีเซล 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล. แต่ในทางปฏิบัติจะใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย 3 ขั้นตอน ซึ่งจะมีสารกึ่งผลิตภัณฑ์ (intermediate) คือ ไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนดังสมการ (Freedman *et al.*, 1986).

ปฏิกิริยาย่อย



เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้น สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมาะสม คือมีความเป็นขั้วสูงและเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สุด, นอกจากนี้ยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดอื่น. อย่างไรก็ตาม การใช้แอลกอฮอล์อื่นๆ เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น เอทานอล ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรและมีความเป็นพิษน้อยกว่าเมทานอล แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานรองรับคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นการใช้แอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ จึงยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก.

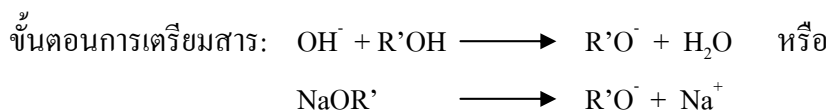
นอกจากแอลกอฮอล์ที่เป็นสารตั้งต้นแล้ว ตัวแปรหลักที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์นั้นได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีหลายชนิดด้วยกัน และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลักด้วยกันคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป.

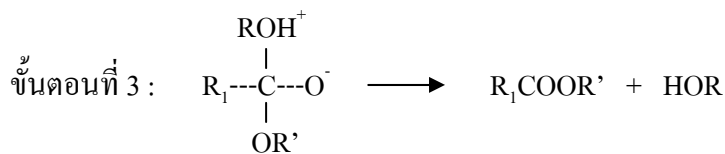
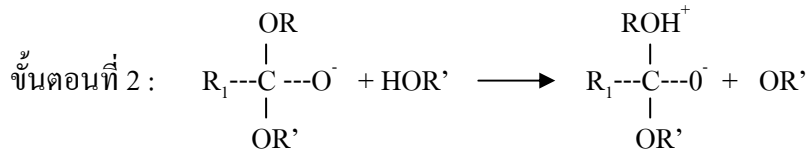
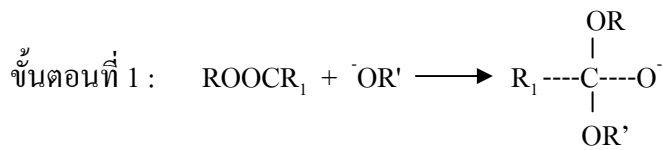
1.2.1 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

ปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถละลายได้เป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ทำให้ง่ายต่อการทำปฏิกิริยา. โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแบบเอกพันธ์ แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบด่าง ดังรายละเอียด.

❖ การผลิตไบโอดีเซลโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบด่าง (Base catalyzed process)

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้ (Ma *et al.*, 1999)





หมายเหตุ : R-OH คือ ไดกลีเซอไรด์

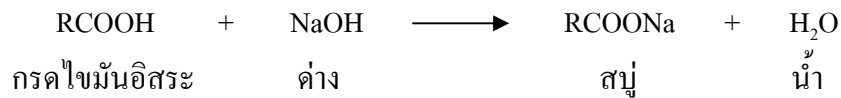
R₁ คือ กลุ่มอัลคิลที่มีสายโซ่โมเลกุลยาว,

R' คือ กลุ่มอัลคิลที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น

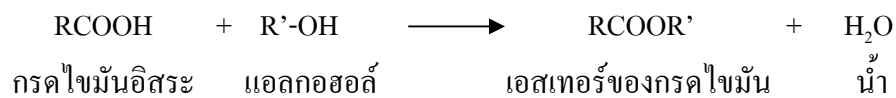
ในขั้นตอนก่อนเกิดปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่างจะละลายในแอลกอฮอล์ และเกิดการแตกตัวของแอลกอฮอล์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาได้เมทอกไซด์ไอออน ซึ่งเป็นไอออนลบของแอลกอฮอล์. จากนั้น เมทอกไซด์ไอออนจะเข้าไปจับที่อะตอมของคาร์บอนในหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็น tetrahedral intermediate ในขั้นตอนแรก. ในขั้นตอนที่สอง tetrahedral intermediate ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้ tetrahedral intermediate อีกโครงสร้างหนึ่ง และปล่อยเมทอกไซด์ไอออนออกมาจากปฏิกิริยา. ขั้นตอนสุดท้ายคือการจัดโครงสร้างของ tetrahedral intermediate เกิดเป็น เมทิลเอสเทอร์และไดกลีเซอไรด์.

❖ การผลิตไบโอดีเซลโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด (Acid catalyzed process)

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลนั้น จะใช้ในกรณีที่น้ำมันพืชตั้งต้นมีคุณภาพต่ำ ตัวอย่างเช่นน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วหรือน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง, ซึ่งกรดไขมันอิสระดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันได้ เมื่อใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. แต่กรดไขมันจะทำปฏิกิริยากับด่างเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นเกลือของกรดไขมัน หรือสบู่ ดังสมการ.



สบู่ที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ลดลงแล้ว ยังมีผลต่อขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลและขั้นตอนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์อีกด้วย. ขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์คือ เอสเทอร์ของกรดไขมันและน้ำ เมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังสมการ,



กรดที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ กรดซัลฟูริก.

1.2.2 การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันนั้น จะต้องประกอบด้วยขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ เพื่อแยกสารเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ภายหลังปฏิกิริยาลิ้นสุด. ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถละลายได้เป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ในที่นี้คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเป็นของแข็ง. ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ จึงสามารถลดขั้นตอนดังกล่าวซึ่งเป็นทางหนึ่งในการลดต้นทุนในการผลิต.

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เริ่มต้นมีรายงานการศึกษาโดยอตัน โถและคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมออกไซด์, โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต, โพแทสเซียมไฮโดรเจนซัลเฟต และซิงค์คาร์บอเนต มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน. โดยโพแทสเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุด แต่โพแทสเซียมคาร์บอเนตละลายได้ดีในของผสมที่ทำปฏิกิริยา. ในการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจึงเลือกใช้แคลเซียมออกไซด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกไซด์มีความเหมาะสมในการ

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์มากที่สุด โดยให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ในรูปเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 92.83 โดยน้ำหนัก. นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลมะพร้าวดิบ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 6 - 8.6 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช จะให้ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก.

Ngamcharussrivichai *et al.* (2008) รายงานว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มเมล็ดใน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างออกไซด์ของโลหะแคลเซียมและโลหะสังกะสี คือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก, อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 30 ต่อ 1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง), ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่ามากกว่าร้อยละ 94 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมและสังกะสีเป็น 0.25. สารประกอบออกไซด์สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอลีน, น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันดอกทานตะวัน.

Vyas *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันสนดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สามารถให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 84 คือ ปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลคือ 12 ต่อ 1, ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง, ความเร็วรอบของใบกวน 600 รอบต่อนาที, ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก.

สารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการระดับอุตสาหกรรมในปัจจุบันคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ ซึ่งมีข้อดีคือมีราคาถูกและจัดหาได้ง่าย, แต่มีข้อเสียคือต้องประกอบด้วยขั้นตอนการกำจัดสารเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ ก่อให้เกิดน้ำเสียและของเสีย ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชให้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์นั้น นอกจากคุณภาพของไบโอดีเซลที่ได้แล้ว, ราคาต้นทุนในการผลิตเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญ.

1.2.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยเมทานอลที่สภาวะวิกฤต (Supercritical methanol)

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สภาวะวิกฤตนั้น พบว่าเป็นกระบวนการที่ช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมี และลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี ยกตัวอย่าง เช่น การลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา, การลดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล เป็นต้น แสดงรายงานการวิจัย ดังนี้.

Kasim *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวด้วยเมทานอลที่สภาวะวิกฤตและใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายร่วม พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส, ความดัน 30 เมกะพาสคัล, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลปาล์ม 271 ต่อ 1, เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที ความบริสุทธิ์และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้คือร้อยละ 52.52 และ 51.28 โดยน้ำหนัก.

Song *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยเมทานอลที่สภาวะวิกฤต โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา, อุณหภูมิที่ 200-400 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลปาล์ม 3-80, เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 0.5-20 นาที พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลปาล์ม 30.

Yin *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเมทานอลที่สภาวะวิกฤต พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เมื่อทำปฏิกิริยาที่สภาวะดังต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลถั่วเหลือง 42 ต่อ 1, อุณหภูมิที่ 260-350 องศาเซลเซียส. และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง, อุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลถั่วเหลือง 24 ต่อ 1, จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียงแค่ 20 นาที.

Demirbas (2007) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอลที่สภาวะวิกฤต รายงานว่า ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้คือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลปาล์ม 41 ต่อ 1, อุณหภูมิ 252 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 นาที และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.

Saka and Kusdiana (2001) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรปด้วยเมทานอลที่สภาวะวิกฤต โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะอุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส, ความดัน 45-65 เมกะพาสคัล, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลปาล์ม 42 ต่อ 1, พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 350 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 240 วินาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการเปลี่ยนน้ำมันเมล็ดเรปให้กลายเป็นผลิตไบโอดีเซล.

ดังนั้น สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) จึงได้จัดทำโครงการศึกษาและวิจัยสารเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิจัยสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม, เพื่อใช้ในกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาและเพิ่มแหล่งพลังงานในประเทศ.

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

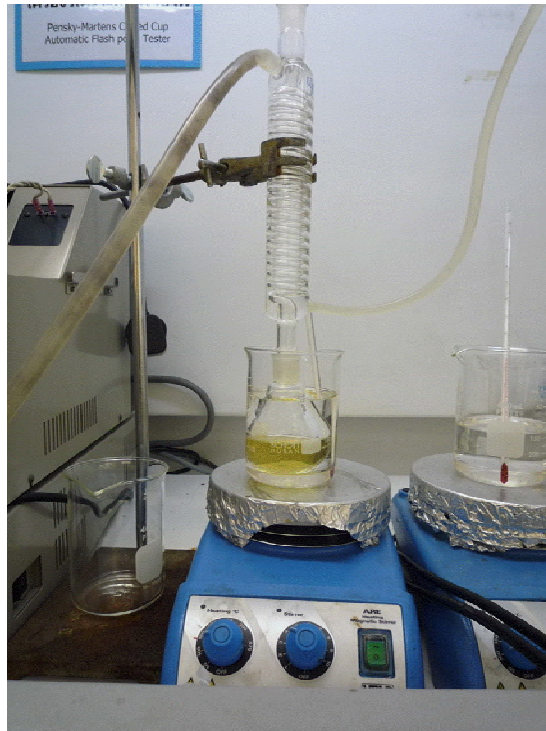
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ และการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องผลิตไบโอดีเซล มีรายละเอียดของวัสดุ, อุปกรณ์ และวิธีการ, ดังนี้.

2.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ในระดับห้องปฏิบัติการ

2.2.1 วัสดุ และ สารเคมี

2.2.1.1 วัสดุ

- หลอดแก้วชนิดสาร พร้อมชุดหัวกรองเหล็ก ขนาด 20 และ 50 มล.
- กระจายกรองสำหรับชุดหัวกรองเหล็ก ขนาด 0.6 ไมครอน และ 0.8 ไมครอน.
- ขวดก้นกลม และขวดรูปหยดน้ำ ขนาด 50 มล.
- บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250, 500 มล.
- กระบอกตวง ขนาด 50, 100 มล.
- ขวดเก็บสารตัวอย่าง ขนาด 24, 50 มล.
- ชุดเครื่องแก้วความแน่นไอระเหย.
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PB602-5 ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand) จำกัด.
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand) จำกัด.
- ชุดอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน; เครื่องกวนและให้ความร้อนแบบแม่เหล็กหมุน (Magnetic Stirrer/hot plate) ของบริษัท ชัชรีย์โฮลดิ้ง จำกัด (รูปที่ 1), ชุดอุปกรณ์ความแน่นไอระเหยของเมทานอลด้วยน้ำเย็น และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ รุ่น TC-200 ของบริษัท Brookfield จำกัด.
- เครื่องระเหย และเครื่องทำน้ำเย็น ของบริษัท BUCHI จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC 2010 ของบริษัท SHIMADZU จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำ ของบริษัท Methrom จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของบริษัท Methrom จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์ค่ากรดของบริษัท Mettler จำกัด.



รูปที่ 1. ชุดเครื่องมือผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำในระดับห้องปฏิบัติการ.

2.2.1.2. สารเคมี

- ❖ น้ำมันสุปุดำ ของบริษัท น้ำมันสุปุดำไทย จำกัด.

ก่อนการผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยน โครงสร้างของน้ำมันสุปุดำ ให้กลายเป็นไบโอดีเซล โดยใช้แอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยานั้น, จำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันสุปุดำ เพื่อนำมาพิจารณาถึงความเหมาะสมและศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล. โดยรายละเอียดในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 1 และ 2, ตามลำดับ.

ตารางที่ 1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันสุปุดำ

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	น้ำมันสุปุดำ
ค่าเสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ อุณหภูมิ 110 °ซ., ชั่วโมง	EN14112	7.20
น้ำ, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN ISO 12937	0.10
ความหนืด ที่ อุณหภูมิ 40 °ซ., เซนติสโตกส์	ASTM D 445	35.14
ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ASTM D 664	2.29

ตารางที่ 2. องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ

ชนิดของกรดไขมัน	น้ำมันสบู่ดำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Palmitic acid (C16:0)	14.85
Stearic acid (C18:0)	7.43
Oleic acid (C18:1)	47.65
Linoleic acid (C18:2)	29.80
Linolenic acid (C18:3)	0.19
Arachidic acid (C20:0)	0.08

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำคำนวณได้จากองค์ประกอบของกรดไขมันที่วิเคราะห์ได้จากตารางข้างต้น โดยมีน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณเท่ากับ 864.

- ❖ เมทานอล ของบริษัท LABSCAN จำกัด.
- ❖ ตัวเร่งปฏิกิริยา
 - แคลเซียมออกไซด์ ของบริษัท UNILAB จำกัด.
 - ซิงค์คาร์บอเนต ของบริษัท Fluka จำกัด.
 - ซิงค์ออกไซด์ ของบริษัท AnalaR จำกัด.
 - โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ของบริษัท Merck จำกัด.
 - โซเดียมไฮดรอกไซด์ ของบริษัท LABSCAN จำกัด.
 - โพแทสเซียมคาร์บอเนต ของบริษัท UNILAB จำกัด.
 - โพแทสเซียมไฮโดรเจนซัลเฟต ของบริษัท Merck จำกัด.
 - โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ของบริษัท Carlo Erba จำกัด.

2.1.3 วิธีการทดลอง

2.1.3.1 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ นั้นได้ทำการศึกษานิตของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. เริ่มต้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการนำน้ำมันสบู่ดำมาผสมกับสารเมทอกไซด์ (สารประกอบที่เกิดจากการผสมระหว่างเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา) ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส โดยตัวแปรในการศึกษานี้คือ อัตราส่วน

โดยโมล ของน้ำมันต่อเมทานอล, ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.

2.1.3.2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธพันธุ์

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ จะแตกต่างจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง จะสามารถลดขั้นตอนในการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ลงได้. เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น, ดังนั้นจึงสามารถกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นได้. แต่ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นได้นั้น จะมีผลให้แยกผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันได้ยาก. ดังนั้น เมื่อผลิตไบโอดีเซลแล้ว ต้องนำไบโอดีเซลที่ได้มาล้างด้วยน้ำอุ่นเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปนเปื้อนอยู่ในไบโอดีเซล.

ในการทดลองนี้ จะทำการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ต่างๆ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์, แคลเซียมออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4, ซิงค์คาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส. โดยตัวแปรในการศึกษานี้คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล, ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.

ตารางที่ 3. สถานะการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำในระดับห้องปฏิบัติการ

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt %)	เวลาที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที)
1. แคลเซียมออกไซด์	12 : 1	10	180
2. ซิงค์คาร์บอเนต	12 : 1	10	180
3. แคลเซียมออกไซด์ผสมซิงค์- ออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4	12 : 1	10	180
4. ซิงค์ออกไซด์	12 : 1	10	180
5. โพแทสเซียมคาร์บอเนต	12 : 1	10	180
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์	12 : 1	10	180
7. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	12 : 1	10	180

ตารางที่ 3. (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt %)	เวลาที่ใช้ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที)
8. แคลเซียมออกไซด์	12 : 1	10	60
9. แคลเซียมออกไซด์	12 : 1	10	300
10. แคลเซียมออกไซด์	12 : 1	5	180
11. แคลเซียมออกไซด์	12 : 1	1	180
12. แคลเซียมออกไซด์	9 : 1	10	180
13. แคลเซียมออกไซด์	6 : 1	10	180
14. โซเดียมไฮดรอกไซด์	12 : 1	0.5	60
15. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	12 : 1	0.5	60
16. โซเดียมไฮดรอกไซด์	9 : 1	0.5	60
17. โซเดียมไฮดรอกไซด์	6 : 1	0.5	60
18. โซเดียมไฮดรอกไซด์	9 : 1	0.75	60
19. โซเดียมไฮดรอกไซด์	9 : 1	1	60
20. โซเดียมไฮดรอกไซด์	9 : 1	0.5	45
21. โซเดียมไฮดรอกไซด์	9 : 1	0.5	30

2.2 การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

2.2.1 วัสดุและสารเคมี

2.2.1.1 วัสดุ

- กรวยแยก ขนาด 500 และ 1000 มล.
- บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 500 และ 2000 มล.
- ขวดเก็บสารตัวอย่าง ขนาด 500 และ 1000 มล.
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PB602-5 ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand)

จำกัด

- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand)

จำกัด.

- เครื่องกวนและให้ความร้อนแบบแม่เหล็กหมุน (Magnetic Stirrer/hot plate)

ของบริษัท ชัยชัยโฮลดิ้ง จำกัด.

- ชุดอุปกรณ์ควบแน่นไอระเหยของเมทานอลด้วยน้ำเย็น และอ่างน้ำควบ

อุณหภูมิ รุ่น TC-200 ของบริษัท Brookfield จำกัด.

- เครื่องระเหย และเครื่องทำน้ำเย็น ของบริษัท BUCHI จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC 2010 ของบริษัท SHIMADZU

จำกัด.

- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำ ของบริษัท Methrom จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของบริษัท Methrom

จำกัด.

- เครื่องวิเคราะห์ค่ากรด ของบริษัท Mettler จำกัด.

2.2.1.2. สารเคมี

- ❖ น้ำมันสบู่ดำ ของบริษัท น้ำมันสบู่ดำไทย จำกัด.
- ❖ เมทานอล ของบริษัท ไทย เอ็มซี จำกัด.
- ❖ ตัวเร่งปฏิกิริยา – โซเดียมไฮดรอกไซด์ ของบริษัท AGC CHEMICALS จำกัด

แสดงดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันสบู่ดำ

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	น้ำมันสบู่ดำ
ค่าเสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ อุณหภูมิ 110 °ซ., ชั่วโมง	EN14112	6.62
น้ำ, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN ISO 12937	0.11
ความหนืด ที่ อุณหภูมิ 40 °ซ., เซนติสโตกส์	ASTM D 445	35.14
ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ASTM D 664	11.29

ตารางที่ 5. องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ

ชนิดของกรดไขมัน	น้ำมันสบู่ดำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Palmitic acid (C16:0)	14.99
Stearic acid (C18:0)	5.89
Oleic acid (C18:1)	40.12
Linoleic acid (C18:2)	37.57
Linolenic acid (C18:3)	0.18
Arachidic acid (C20:0)	0.17

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำคำนวณได้จากองค์ประกอบของกรดไขมันที่วิเคราะห์ได้จากตารางข้างต้น โดยมีน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณเท่ากับ 864.

ระบบผลิตที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องต้นแบบนี้ประกอบด้วยระบบการผลิตหลัก 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาและขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์. แผนภาพกระบวนการผลิตของเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล แสดงในรูปที่ 2, โดยประกอบด้วยอุปกรณ์หลักจำนวน 15 ชิ้น รายละเอียดของกระบวนการผลิตมีดังนี้.

2.2.2 การออกแบบและสร้างเครื่อง

เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำกำลังการผลิต 100 ลิตรต่อวัน มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เป็นเครื่องต้นแบบในการสาธิตการผลิตไบโอดีเซล ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก สามารถผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านมาตรฐาน ให้กับชุมชนที่มีวัตถุประสงค์เป็นน้ำมันพืชในปริมาณไม่มากนัก และนำมาใช้เองได้ในชุมชน. ในการออกแบบเพื่อให้ได้กำลังการผลิตตามที่ต้องการนั้น จึงต้องพิจารณาส่วนที่มีความสำคัญและใช้เป็นตัวหลักในการออกแบบ. ในที่นี้ได้แก่ ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งอ้างอิงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน, โดยมีรายละเอียดดังนี้:

- ❖ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ.
- ❖ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที.
- ❖ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล คือ 1 ต่อ 9,
หรืออัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล คือ 3 ต่อ 1
หรืออัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอล คือ 2.67 ต่อ 1.

กำหนดให้ อัตราการป้อน น้ำมันสบู่ดำ คือ 5.34 ลิตรต่อชั่วโมง,

ดังนั้น อัตราการป้อน สารประกอบเมทอกไซด์ คือ 2 ลิตรต่อชั่วโมง.

จากข้อมูลข้างต้น สามารถคำนวณหาปริมาตรของถังปฏิกรณ์ได้ โดยอาศัยสมการดังนี้,

$$\theta = \frac{V}{F}$$

โดยที่ θ คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

V คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์

F คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น

ซึ่ง

$$\begin{aligned} V &= \theta \times F \\ &= 0.5 \times (5.34 + 2) \\ &= 3.67 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ คือ $3.67 \times 1.4 = 5.138$ หรือประมาณ 5 ลิตร.

เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุด้านั้น มีความจำเป็นต้องเน้นการออกแบบให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อขนย้ายและนำไปสาธิตในพื้นที่ต่างๆ. ดังนั้นปริมาตรของถังวัตถุดิบทั้งสองได้แก่ ถังเก็บน้ำมันสุญุดำและถังเก็บเมทอกไซค์ จึงออกแบบให้มีความจุ 10 ลิตร, ซึ่งถังดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ในภายหลัง เพื่อลดภาระของผู้ดำเนินการผลิตที่จะต้องเติมสารตั้งต้นบ่อยครั้ง. โดยการลดหรือเพิ่มขนาดถังทั้งสองไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้ำมันแต่อย่างใด.

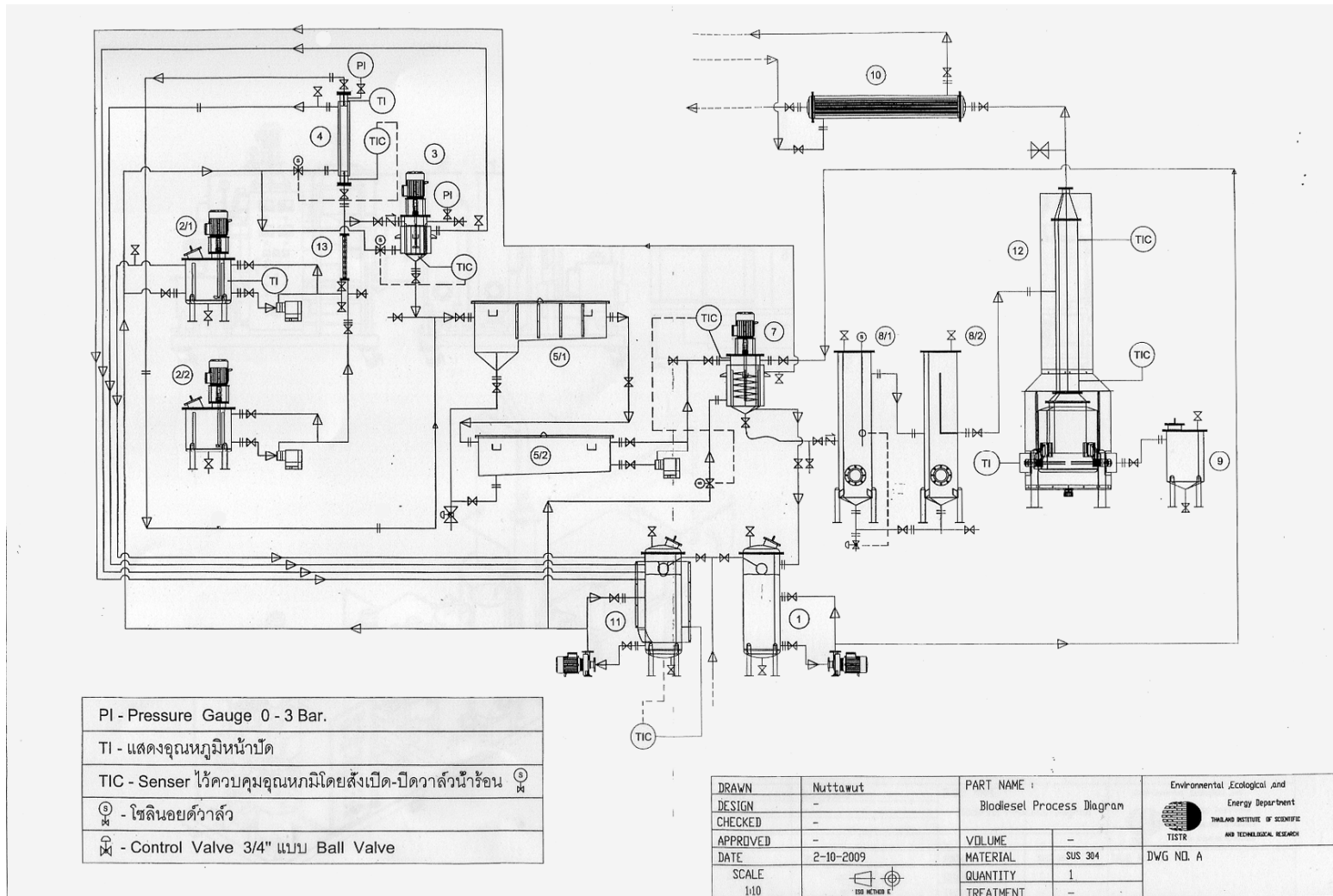
เมื่อทำการคำนวณแล้ว พบว่า หากต้องการให้ผู้ดำเนินการผลิต เติมสารตั้งต้นในถังทั้งสองเพียงวันละ 1 ครั้ง ขนาดของถังเก็บวัตถุดิบสามารถคำนวณได้จากอัตราการป้อนน้ำมันสุญุดำ คือ 5.34 ลิตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 128 ลิตรต่อวัน และอัตราการป้อนสารประกอบเมทอกไซค์ คือ 2 ลิตรต่อชั่วโมงหรือประมาณ 48 ลิตรต่อวัน. เมื่อคำนวณออกมาเป็นปริมาตรของถังได้ออกมาดังนี้.

ดังนั้น ปริมาตรของถังเก็บน้ำมันสุญุดำ คือ $128 \times 1.4 = 179.2$ หรือประมาณ 180 ลิตรและปริมาตรของถังเก็บเมทอกไซค์ คือ $48 \times 1.4 = 67.2$ หรือประมาณ 70 ลิตร.

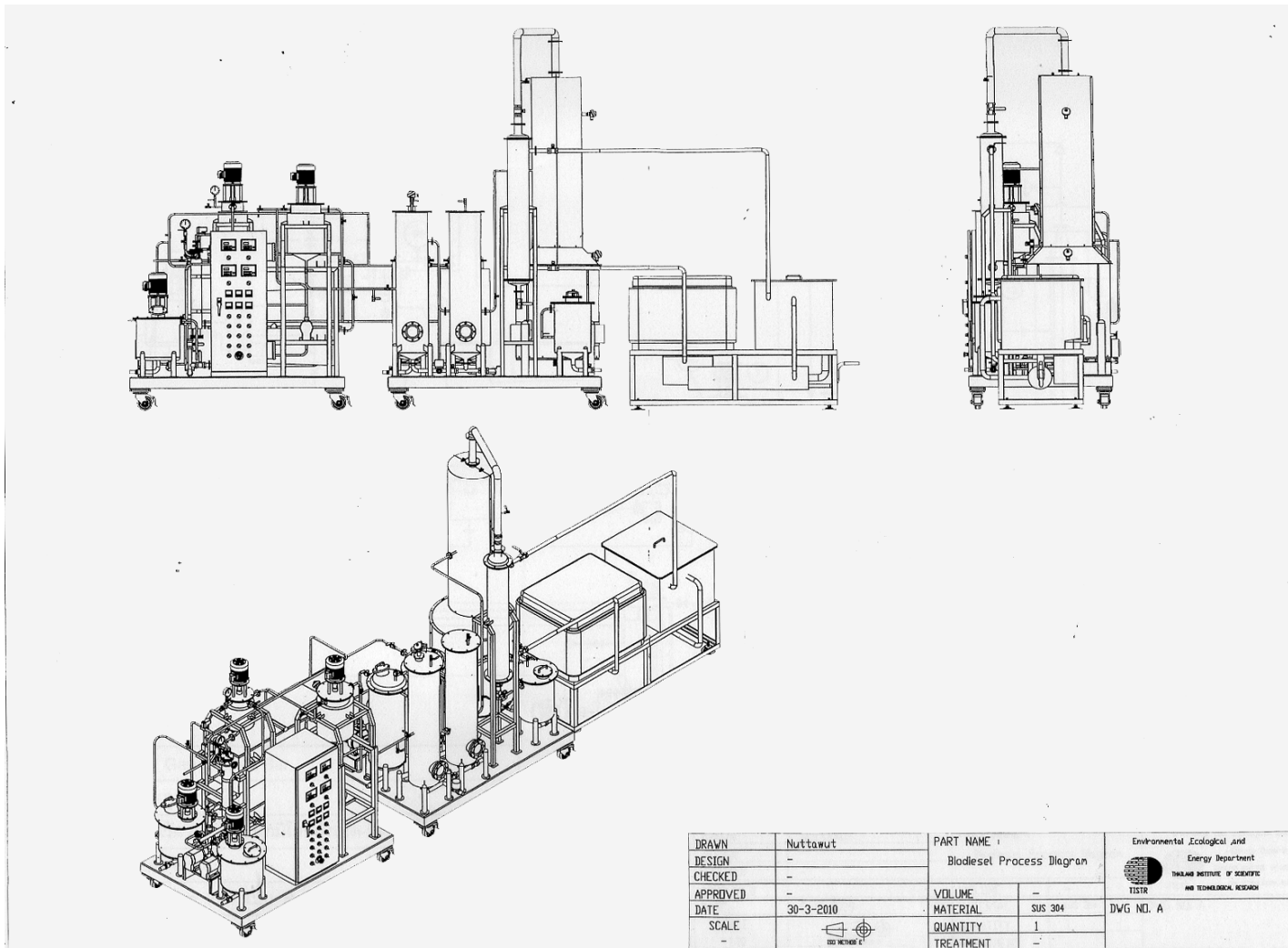
ภายในถังเก็บน้ำมันสุญุดำจะมีการให้ความร้อนกับน้ำมัน โดยใช้ท่อน้ำร้อนวิ่งผ่านภายในถังเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันกลายเป็นไขและอุดตันท่อ, รวมทั้งมีการปั่นกวนด้วยใบกวนแบบใบพัดด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เพื่อให้น้ำมันได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง. ในส่วนถังเก็บเมทอกไซค์จะมีการปั่นกวนโดยใช้ใบกวนแบบใบพัดด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เพื่อให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมเข้ากับเมทิลแอลกอฮอล์เป็นเนื้อเดียวกัน.

การไหลของน้ำมันสุญุดำและเมทอกไซค์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์นั้น จะแยกไหลคนละท่อ รวมทั้งใช้ปั๊ม 2 ตัวซึ่งเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลได้อย่างถูกต้องและป้องกันการเกิดปฏิกิริยานอกถังปฏิกรณ์. ขนาดของปั๊มที่เลือกใช้นั้นจะอยู่ในช่วง 0-8 ลิตรน้ำต่อชั่วโมง ซึ่งครอบคลุมอัตราไหลของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด และอยู่ในช่วงการใช้งานที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการปรับอัตราการไหลให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในการออกแบบ.

ในส่วนของอุปกรณ์ชิ้นอื่นๆ ของเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุด้านั้น ออกแบบให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการสาธิตและขนย้าย รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3 และ 4.



รูปที่ 2. ภาพระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำแบบ 2 ลิตร.



รูปที่ 3. ภาพระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำแบบ 3 มิต.



รูปที่ 4. เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำ.

2.2.3 วิธีการทดลอง

2.2.3.1. ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา

เนื่องจากน้ำมันสุญุดำมีองค์ประกอบหลักคือ ไตรกลีเซอไรด์. ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์, โดยที่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันสุญุดำและเมทานอลแบบต่อเนื่อง เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันสุญุดำให้กลายเป็นเอสเทอร์. อุปกรณ์การผลิตมีรายละเอียดดังนี้.

- ❖ ชุดเตรียมและป้อนสำหรับน้ำมันสุญุดำและสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์

ถังน้ำมันสบูดำ T 2/1 ทำหน้าที่อุ่นน้ำมันสบูดำเพื่อให้มีสถานะที่พร้อมต่อการทำปฏิกิริยา และถังเตรียมสารโซเดียมเมทอกไซด์ T 2/2 ทำหน้าที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเมทานอล, ซึ่งเป็นสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเข้าด้วยกัน ในสัดส่วนที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยจะทำงานแบบกะ.

❖ ชุดทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

น้ำมันสบูดำที่บรรจุอยู่ในถัง T 2/1 จะเข้าทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันกับโซเดียมเมทอกไซด์จากถังในถังปฏิกรณ์ R 3 แบบต่อเนื่อง, โดยควบคุมอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาให้คงที่ ในช่วงประมาณ 65 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ, เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที. ผลึกภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ จะเป็นไบโอดีเซลที่มีกลีเซอรินและเมทานอลที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดรวมทั้งน้ำผสมอยู่. ผลึกภัณฑ์จะไหลออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ไปสู่ถังแยกกลีเซอริน T 5/1 และ T 5/2 ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบถังล้น เพื่อทำการแยกกลีเซอรินออกจากระบบผลิต, โดยที่กลีเซอรินจะถูกรวบรวมจากถังถึง T 5/1 และ T 5/2 เพื่อรอการจัดเก็บต่อไป. ไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นจากกลีเซอรินและลอยอยู่ด้านบนนั้น จะถูกส่งไปยังถังปฏิกรณ์ R7 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์.

2.2.3.2 ขั้นตอนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นจากกลีเซอรินจะลอยอยู่ด้านบน ถูกส่งไปเก็บที่ถังปฏิกรณ์ R7 ซึ่งเป็นชุดล้างต่างจากไบโอดีเซล โดยเป็นการล้างด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดกลีเซอรินที่ยังหลงเหลือ, แอลกอฮอล์, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสบู, ออกจากชั้นไบโอดีเซล. ไบโอดีเซลและน้ำล้างจากถังล้าง R7 จะถูกส่งเข้าระบบแยกน้ำและกำจัดน้ำที่ถัง T 8/1 และ 8/2 เพื่อแยกน้ำล้างออกจากไบโอดีเซล โดยใช้ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซล. ไบโอดีเซลจะถูกส่งไปยังเครื่องระเหยน้ำ T12 เพื่อกำจัดปริมาณน้ำที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล. ใอน้ำที่ระเหยที่เครื่องระเหยน้ำ T12 ถูกทำให้เย็นลงโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน T10. ไบโอดีเซลที่ไหลเข้าเครื่องระเหยน้ำแล้ว จะไหลเข้าสู่ถังพัก T9. อุปกรณ์หลักในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีรายละเอียด ดังนี้.

❖ ถังแยกกลีเซอริน

ไบโอดีเซลจากถังปฏิกรณ์ R3 จะไหลเข้าสู่ถังแยกกลีเซอริน T 5/1 และ T 5/2 ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบถังล้น เพื่อทำการแยกกลีเซอรินออกจากระบบผลิต โดยที่กลีเซอรินจะถูกรวบรวม

รวมจากกันถึง T 5/1 และ T 5/2 เพื่อรอการจัดเก็บต่อไป. ชั้นกลีเซอรินที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน จะแยกออกจากชั้นไบโอดีเซล เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งควบคุมการถ่ายออกของกลีเซอรินด้วยวาล์วไฟฟ้า และทำการปิด-เปิดตามเวลาที่ตั้งไว้. ส่วนชั้นของไบโอดีเซลซึ่งอยู่ด้านบนของถังแยกกลีเซอริน จะไหลล้นเข้าสู่ถังล้างต่อไป.

❖ ชุดล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

ไบโอดีเซลที่อยู่ด้านบนของถังแยกกลีเซอริน จะไหลล้นเข้าสู่ถังล้างไบโอดีเซล R7 ที่มีลักษณะเป็นแบบใบกวนรอบต่ำ เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในชั้นไบโอดีเซล เช่น เมทานอล, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกลีเซอริน. โดยควบคุมให้น้ำล้างมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำจะถูกส่งมาจากถังเก็บน้ำร้อน T11 และ ถังเก็บน้ำเย็น T12 ด้วยปั้มน้ำ.

ไบโอดีเซลและน้ำล้างจากถังล้างไบโอดีเซล R 7 จะถูกส่งเข้าระบบแยกน้ำและกำจัดน้ำที่ถัง T8/1 และ T8/2 เพื่อแยกน้ำล้างออกจากไบโอดีเซลโดยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซล. น้ำล้างจะถูกแยกออกจากด้านล่างของถังแยกและควบคุมการถ่ายเท ด้วยวาล์วไฟฟ้า โดยอาศัยลูกลอยไฟฟ้าในการควบคุมระดับของเหลวในถัง T8/1. จากนั้นไบโอดีเซลที่ล้างสะอาดแล้ว จะถูกส่งไปยังถังพัก T8/2 เพื่อรอการกำจัดน้ำที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลต่อไป.

❖ เครื่องระเหยน้ำ

ไบโอดีเซลจากถังพักถูกส่งเข้าเครื่องระเหยน้ำ T12 เพื่อกำจัดน้ำที่เหลือออกจากไบโอดีเซล และน้ำจะได้รับความร้อนโดยทางอ้อมจากขดลวดไฟฟ้าบริเวณด้านล่างของหอ. ไอน้ำจะระเหยขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องระเหยและถูกควบแน่นด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน T10 โดยมี พัดลมดูดไอช่วยให้การระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น. ไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์จะถูกดึงออกจากด้านล่างของเครื่องระเหยอย่างต่อเนื่อง ก่อนเข้าสู่ถังเก็บไบโอดีเซล T9 ในที่สุด.

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนและความดันสูง

2.3.1 วัสดุและสารเคมี

2.3.1.1 วัสดุ

- กรวยแยก ขนาด 500, 1000 มล.
- บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 500, 2000 มล.
- ขวดเก็บสารตัวอย่าง ขนาด 500, 1000 มล.
- เครื่องปฏิกรณ์ทนความร้อนและความดันสูง(HP/HT Pressure reactors) รุ่น

4570 ของบริษัท Parr Instrument จำกัด.

- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PB602-5 ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand) จำกัด.
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของบริษัท Mettler-Toledo (Thailand) จำกัด.
- เครื่องระเหย และเครื่องทำน้ำเย็น ของบริษัท BUCHI จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC 2010 ของบริษัท SHIMADZU

จำกัด.

- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำ ของบริษัท Methrom จำกัด.
- เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของบริษัท Methrom

จำกัด.

- เครื่องวิเคราะห์ค่ากรด ของบริษัท Mettler จำกัด.

2.3.1.2 สารเคมี

- ❖ น้ำมันสบู่ดำ ของบริษัท น้ำมันสบู่ดำไทย จำกัด.
- ❖ เมทานอล ของบริษัท LABSCAN จำกัด.

2.3.2 วิธีการทดลอง

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ความร้อนและความดันสูง (แสดงดังรูปที่ 4 และ 5) โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 6.



รูปที่ 5. เครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทนความร้อนและความดันสูง.

ตารางที่ 6. สถานะการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทนความร้อนและความดันสูง

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
30 : 1	300	180
45 : 1	300	180
60 : 1	300	180
X : 1	250	180
X : 1	350	180
X : 1	Y	120
X : 1	Y	60

ในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ดีที่สุด โดยทำการคงอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 300 องศาเซลเซียสและ 180 นาที, ตามลำดับ.

เมื่อได้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ดีที่สุดแล้ว, จะทำการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุด โดยทำการคงอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 180 นาที.

สุดท้ายจะทำการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุด โดยทำการคงอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา.

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในระดับห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์, ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธุ์ และการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล รายละเอียดดังนี้.

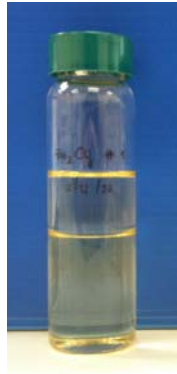
3.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ในระดับห้องปฏิบัติการ

3.1.1 ผลของการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรินที่ผลิตจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวีวิธพันธุ์

เมื่อพิจารณาการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน ที่ผลิตจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวีวิธพันธุ์พบว่า การแยกชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนั้น ไม่มีความแตกต่างกัน, ไบโอดีเซลและกลีเซอรินแยกชั้นกันอย่างชัดเจน, จะแตกต่างกันเล็กน้อยที่ปริมาณของกลีเซอริน เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่ใช้และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไม่เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 6 และ 7.



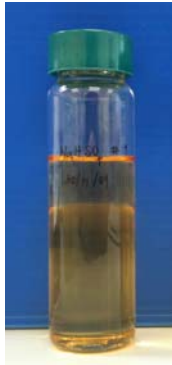
แคลเซียมออกไซด์



ซิงค์คาร์บอเนต



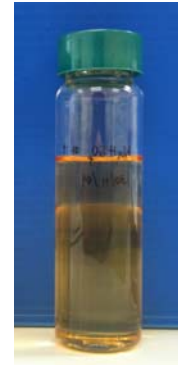
ซิงค์ออกไซด์



โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต



โพแทสเซียมคาร์บอเนต

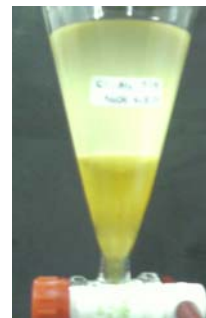


โพแทสเซียมไฮโดรเจนซัลเฟต

รูปที่ 6. การแยกชั้นของกลีเซอรินและไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต, โพแทสเซียมซัลเฟต และแคลเซียมออกไซด์.



โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

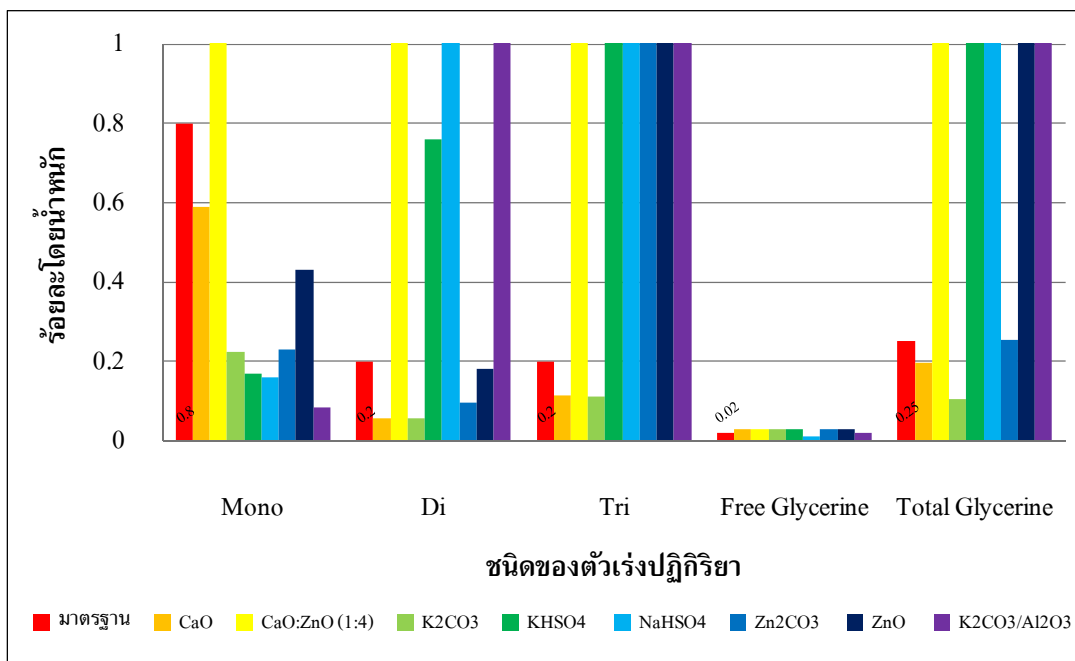


โซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 7. การแยกชั้นของกลีเซอรินและไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์.

3.1.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อค่า โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณน้ำมันสุญุดำที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดลองมีจำกัด, ดังนั้น ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นเพื่อศึกษาถึงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา จึงทำการเลือกศึกษาปริมาณ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด, โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ Gas chromatography แสดงดังภาคผนวก ข, ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล คือ 1:12, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันสุญุดำ, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง. ผลของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 8.

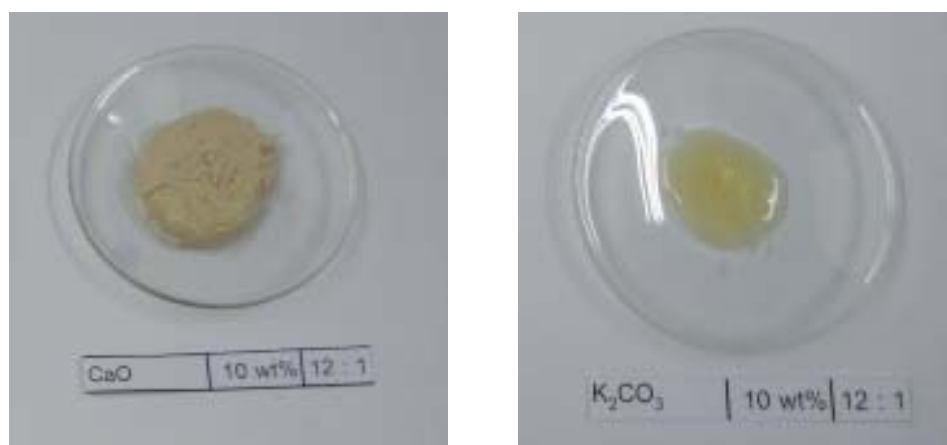


รูปที่ 8. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์ต่อชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.

เมื่อพิจารณารูปที่ 8, พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีความสามารถในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำนั้น ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากปริมาณ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์ที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันและกลีเซอรินทั้งหมด มีค่าผ่านมาตรฐาน. ในส่วนของกลีเซอรินอิสระที่มีค่าเกินมาตรฐานนั้น เนื่องมาจาก ในการทดลองไม่มีการกำจัดกลีเซอรินที่ปนเปื้อนอยู่ในไบโอดีเซลด้วยวิธีการล้าง ซึ่งวิธีการล้างนั้นสามารถกำจัด

กลีเซอรินออกได้. จากการที่กลีเซอรินมีความสามารถในการละลายน้ำได้เป็นอย่างดี, ดังนั้น จึงอาจมีกลีเซอรินที่ตกค้างอยู่ภายในไบโอดีเซล.

จากข้อมูลข้างต้น หัวข้อถัดมาที่ต้องพิจารณา คือ ความสามารถในการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยา. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ดีต้องไม่ละลายในน้ำมันหรือในแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนตพบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตละลายได้ดีในขณะที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ไม่ละลายขณะทำปฏิกิริยา, แสดงดังรูปที่ 9.



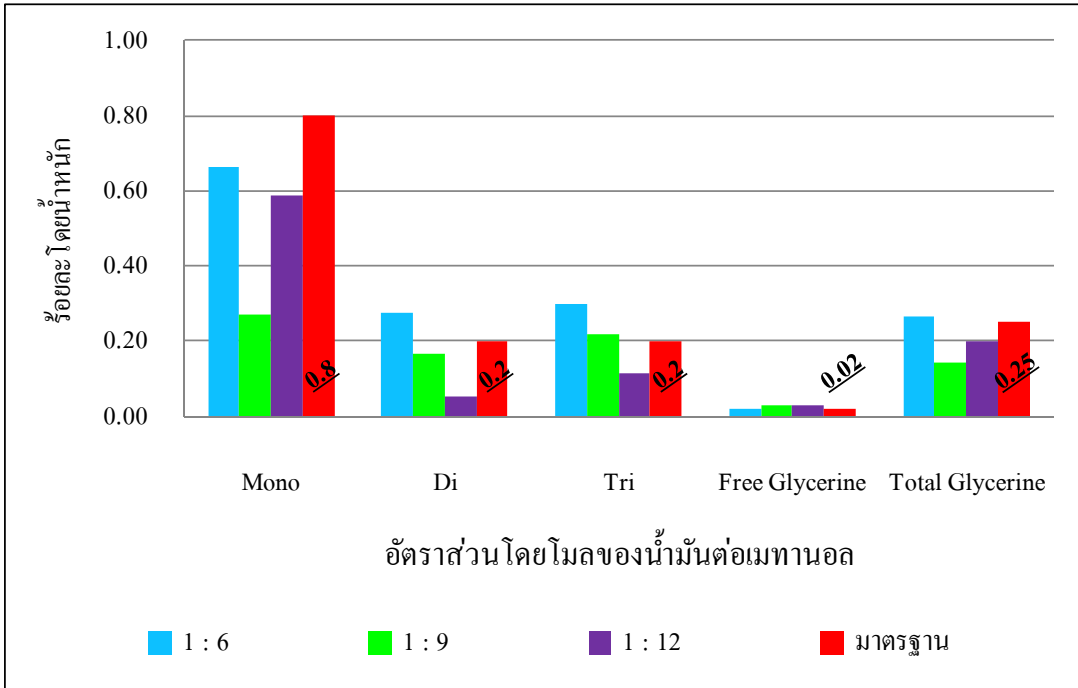
รูปที่ 9. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.

ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่เหมาะสม คือ แคลเซียมออกไซด์. จึงทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา, โดยการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้:

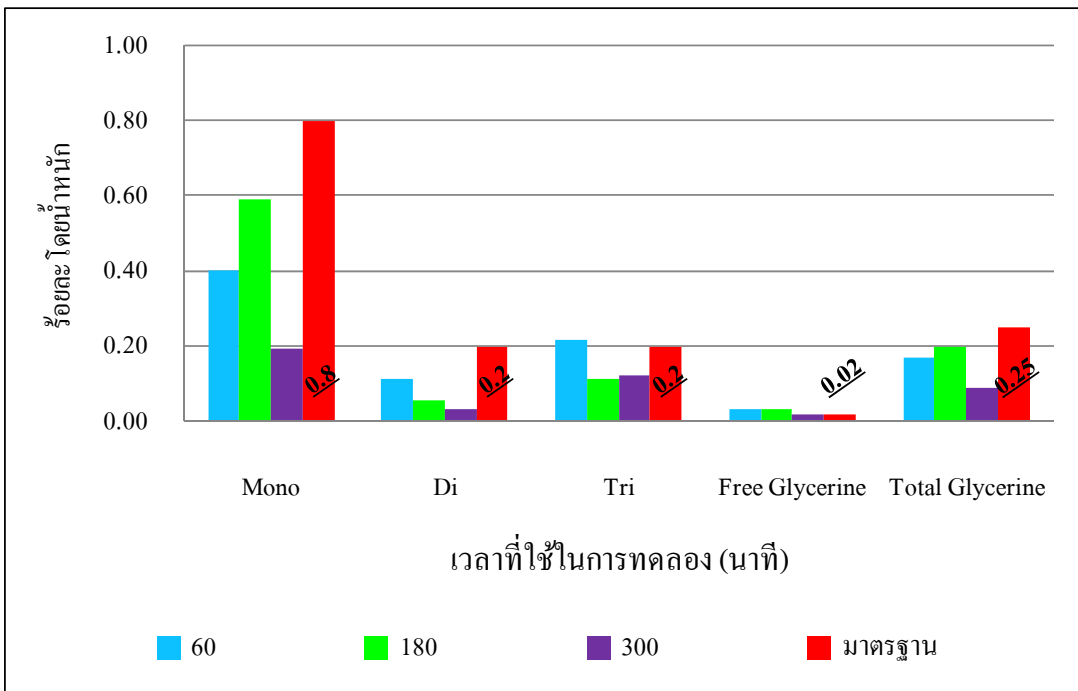
ขั้นตอนแรก กำหนดให้ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง, ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบูดำ เพื่อศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.

ขั้นตอนถัดมา เมื่อทราบสภาวะอัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม จึงกำหนดให้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบูดำ, เพื่อศึกษาใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม.

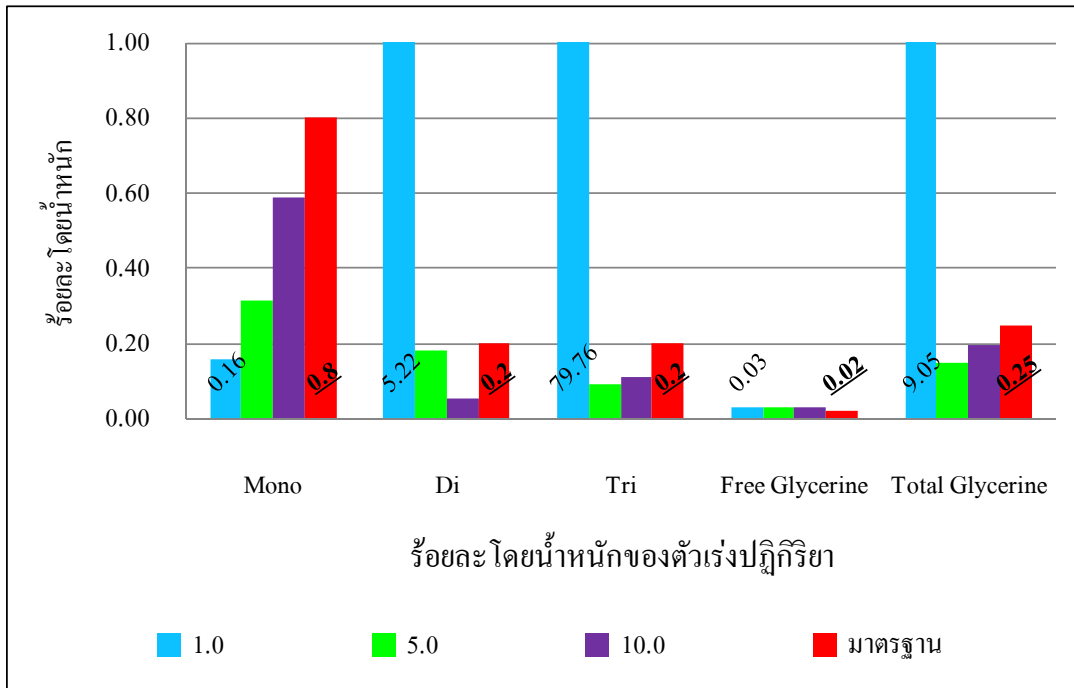
ขั้นตอนสุดท้าย เมื่อทราบเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสมแล้ว, ตัวแปรสุดท้ายที่ต้องศึกษา คือ ปริมาณร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม, โดยผลของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 10, 11 และ 12.



รูปที่ 10. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.



รูปที่ 11. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม.



รูปที่ 12. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม.

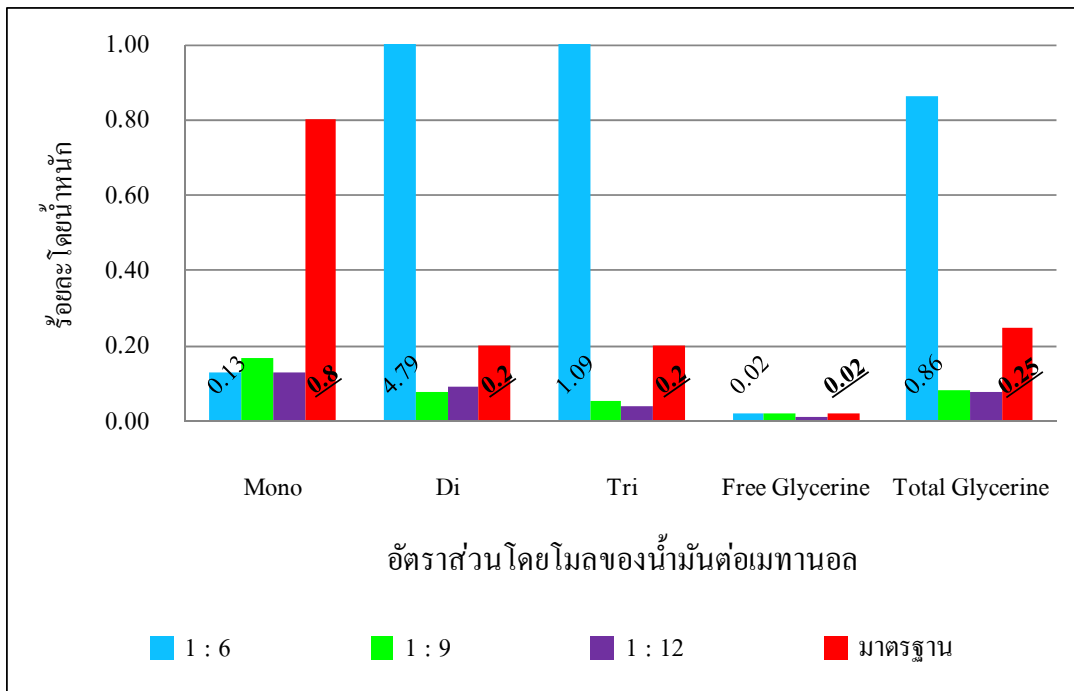
เมื่อพิจารณารูปที่ 10 - 12 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1 : 12, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันสุบุดำ.

ส่วนสุดท้ายในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบุดำในระดับห้องปฏิบัติการ คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้:

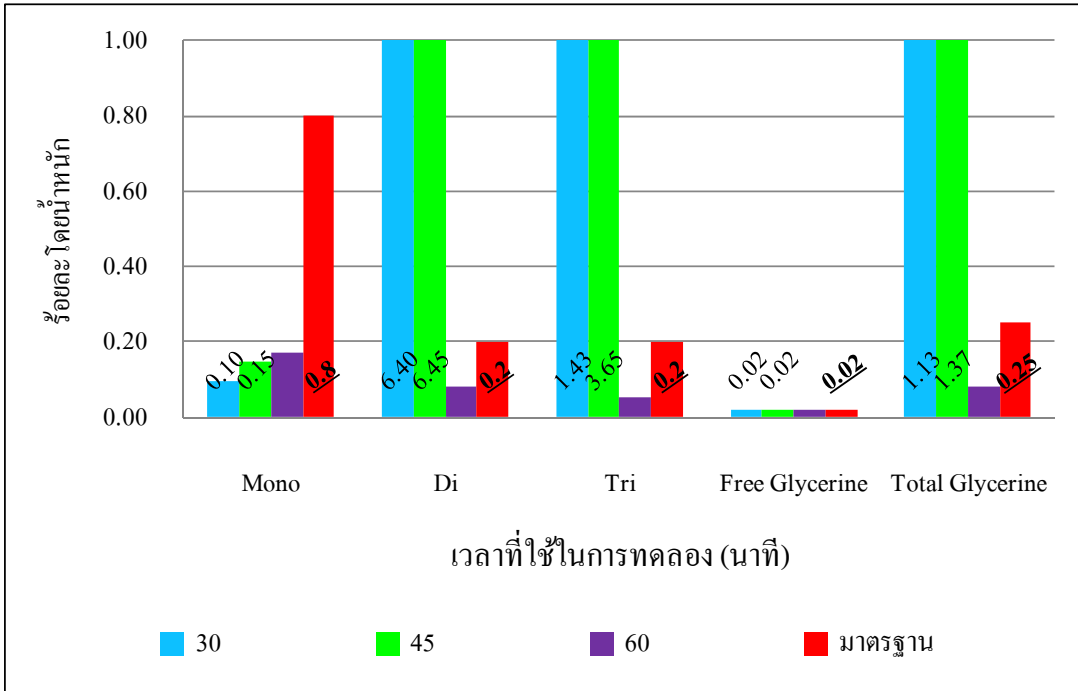
ขั้นตอนแรก กำหนดให้ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง, ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันสุบุดำ, เพื่อศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.

ขั้นตอนถัดมา เมื่อทราบสภาวะอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม จึงกำหนดให้ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันสุบุดำ, เพื่อศึกษาใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม.

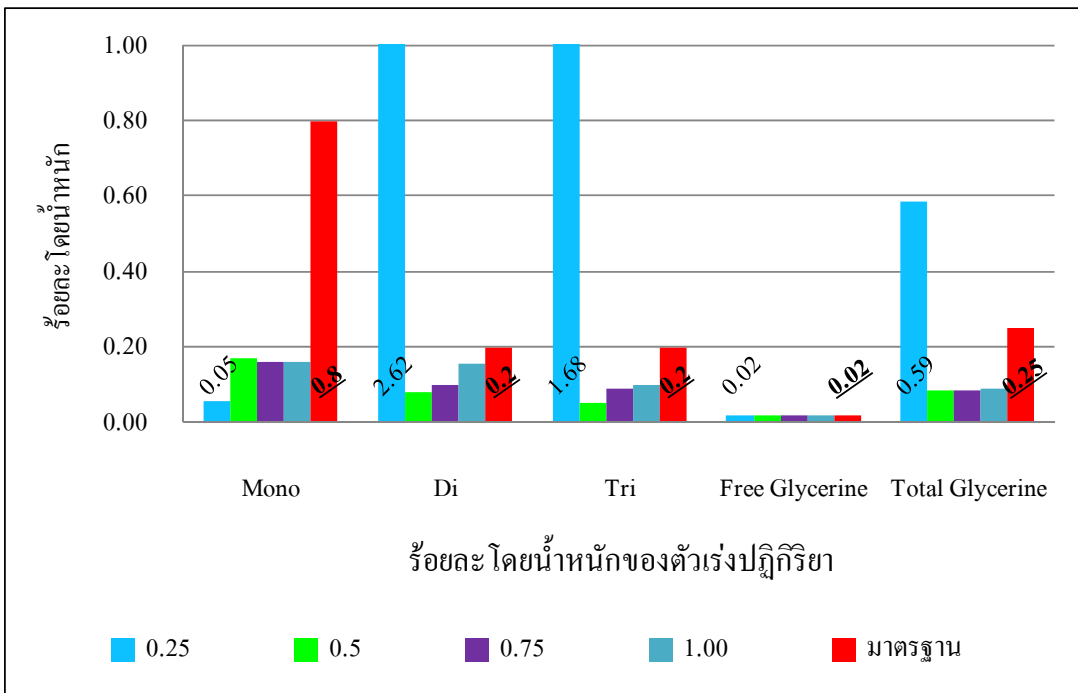
ขั้นตอนสุดท้าย เมื่อทราบเวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสมแล้ว, ตัวแปรสุดท้ายที่ต้องศึกษาคือ ปริมาณร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม, โดยผลของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 13, 14 และ 15.



รูปที่ 13. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตรกลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.



รูปที่ 14. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม.



รูปที่ 15. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม.

เมื่อพิจารณารูปที่ 13 – 15 พบว่า สภาพที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:9, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ.

ในขั้นตอนถัดไป จึงเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ ผู้การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ.

3.2 การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

3.2.1 การประเมินสมรรถนะเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล

น้ำมันสบู่ดำ ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระ (คิดเทียบเท่ากรดโอเลอิก) ร้อยละ 6.03 โดยน้ำหนัก ถูกเลือกใช้เป็นวัตถุดิบในการทดสอบเดินระบบ เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำอย่างต่อเนื่องที่กำลังการผลิต 100 ลิตรต่อวัน เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ, ชนิดและชั้นคุณภาพของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต, รวมถึงปริมาณสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอน. โดยอาศัยข้อมูลในระดับห้องปฏิบัติการเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล แสดงดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ตามลำดับ.

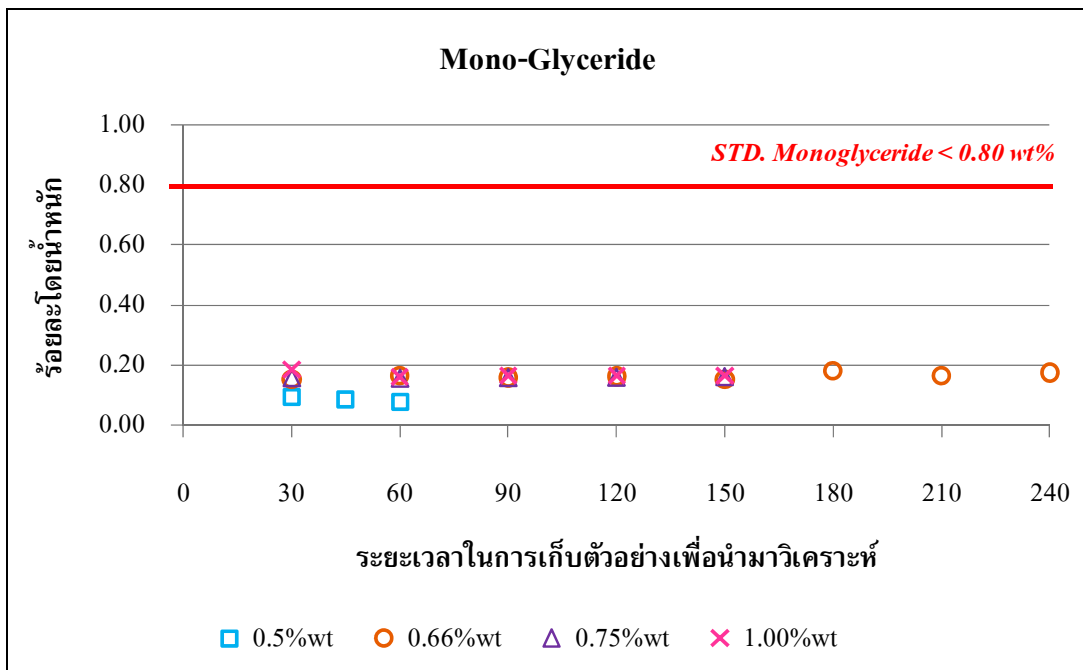
ตารางที่ 7. ชนิดและชั้นคุณภาพของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบและสารเคมี	ชั้นคุณภาพ
น้ำมันสบู่ดำ	ไม่จำกัดปริมาณกรดไขมันอิสระ
เมทานอล	ชั้นคุณภาพทางการค้า
โซเดียมไฮดรอกไซด์	ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก
	ชั้นคุณภาพทางการค้า
	ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.06 โดยน้ำหนัก

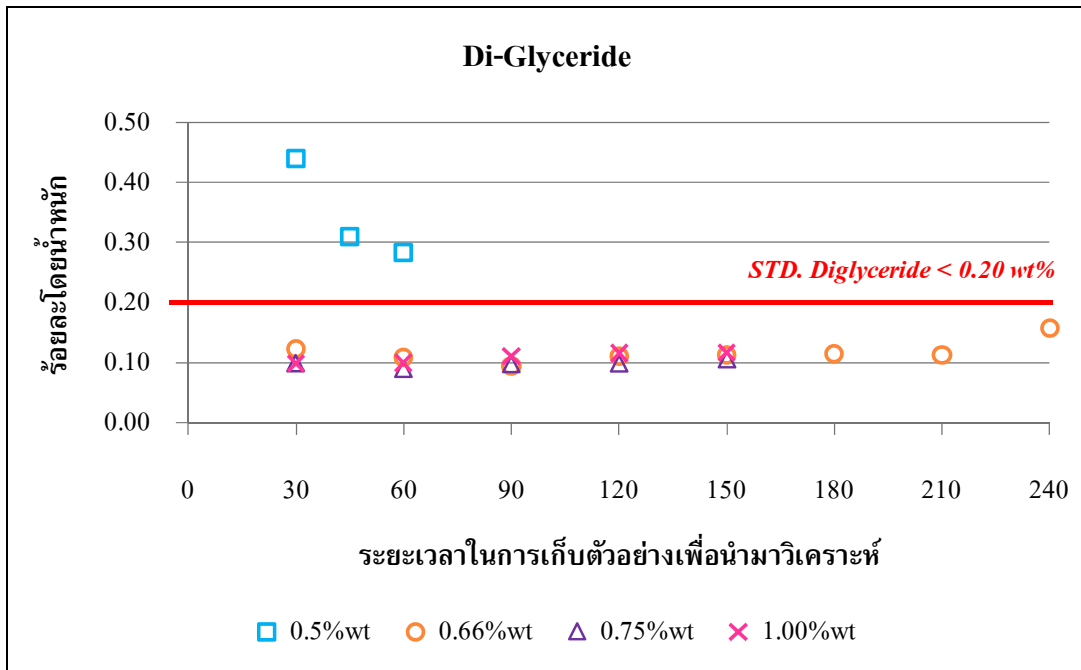
ตารางที่ 8. ปริมาณสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยา

<p>ปฏิกิริยา ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน</p>	<p>อัตราส่วนสารตั้งต้นโดยโมล น้ำมันสบู่ดำ : เมทานอล = 1:9</p>
	<p>ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.5, 0.66, 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันสบู่ดำ</p>

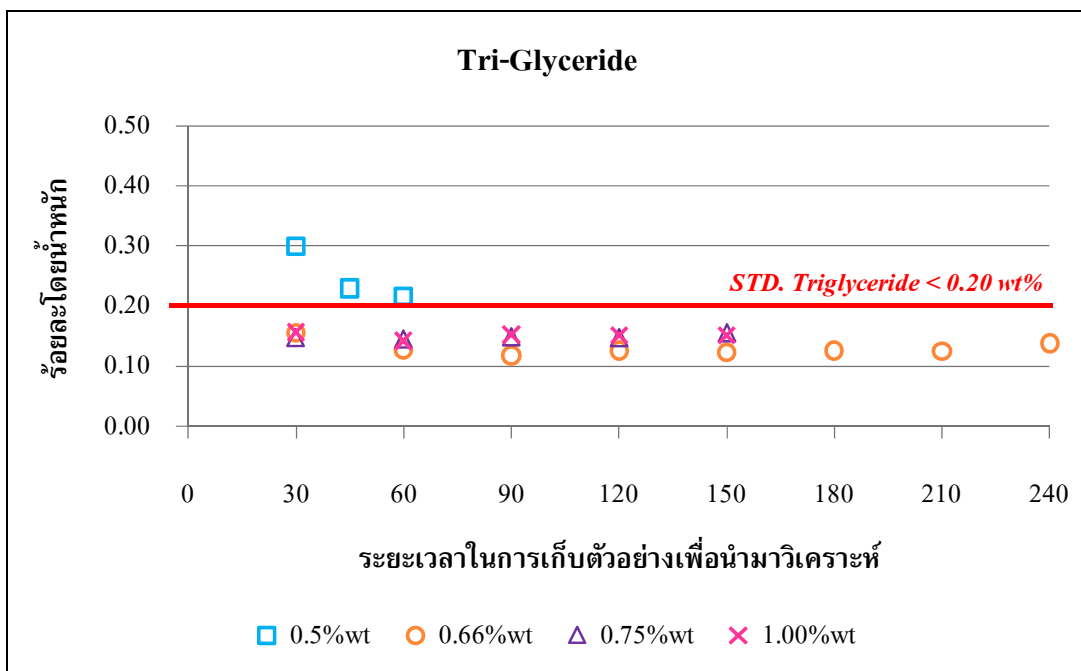
เนื่องจากเครื่องต้นแบบเป็นการผลิตในระบบต่อเนื่อง จึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม, โดยคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ต้องมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา, โดยอาศัยอัตราส่วนปริมาณสารตั้งต้นและสารเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ 8, ผลแสดงดังรูปที่ 16, 17 และ 18.



รูปที่ 16. ร้อยละโดยน้ำหนักของโมโนกลีเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ.



รูปที่ 17. ร้อยละโดยน้ำหนักของไดกลีเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ.



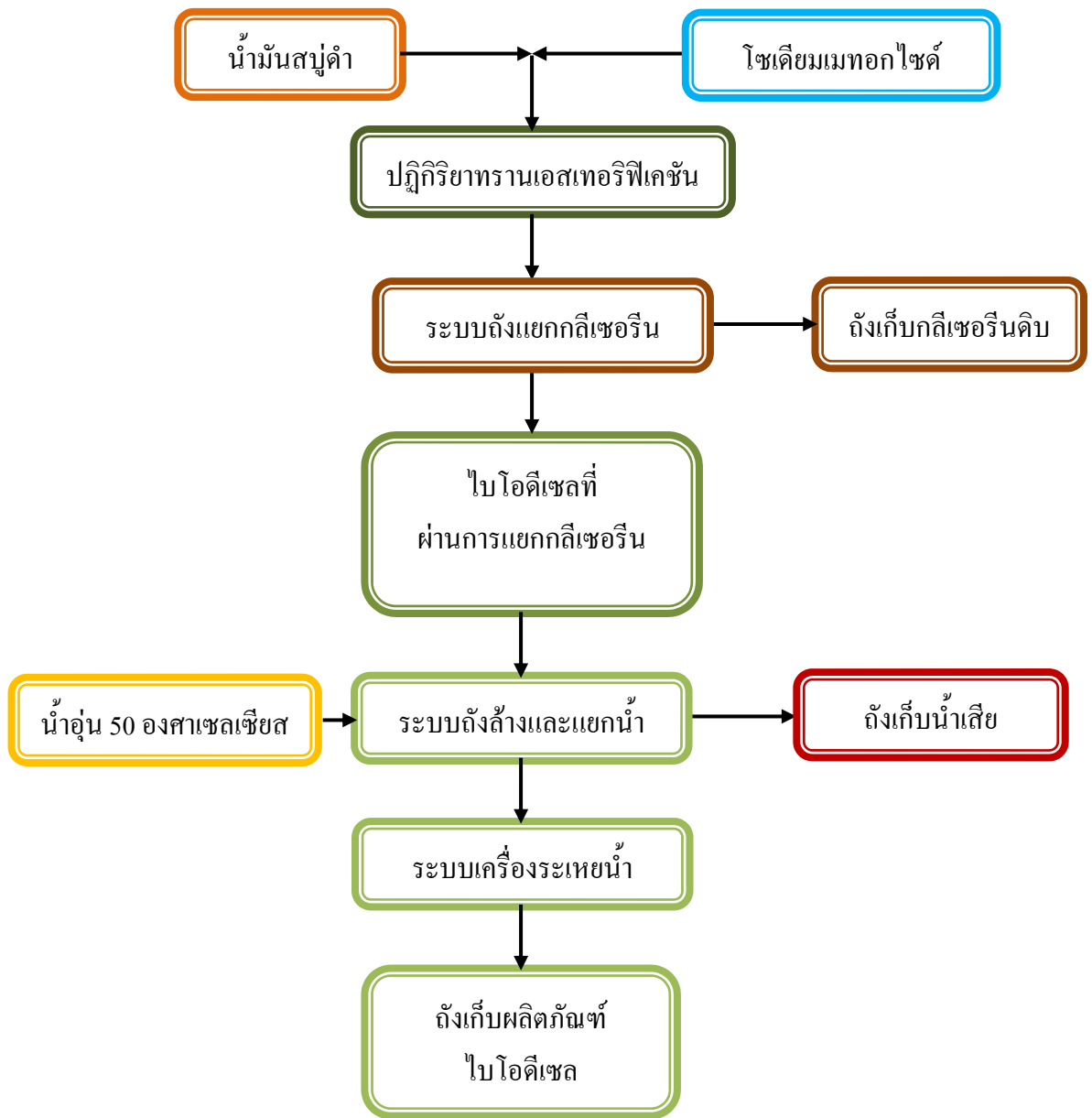
รูปที่ 18. ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ.

จากผลข้างต้นพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 0.66 โดยน้ำหนักของ น้ำมันสบู่ดำ เนื่องจากให้ค่า โมโน-, ได-, ไตรกลีเซอไรด์ ที่ผ่านมาตรฐาน และมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป.

ดังนั้น เครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานไบโอดีเซล ที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก), โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาแบบทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน. นอกจากนี้ ยังประกอบด้วยระบบแยกกลีเซอริน, ระบบล้างน้ำ และระบบระเหยน้ำจากไบโอดีเซล, ซึ่งจะสามารถกำจัดวัตถุดิบตั้งต้น, สารเร่งปฏิกิริยา, ผลิตภัณฑ์ร่วมจากปฏิกิริยา และน้ำล้าง, ออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้, คิดเป็นผลได้ของกระบวนการผลิตมีค่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่อุดที่เข้าสู่กระบวนการผลิต. สำหรับปริมาณการสูญเสียไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสบู่อุดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และ/หรือกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชตั้งต้นบางส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน. โดยที่ปริมาณสบู่อุดกล่าวจะส่งผลต่อขั้นตอนการแยกชั้นกลีเซอริน (รูปที่ 19) และขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล (รูปที่ 20), ทำให้มีปริมาณไบโอดีเซลสูญเสียไปกับชั้นกลีเซอรินและน้ำล้างจำนวนหนึ่ง. สมดุลมวลสารสำหรับระบบผลิตไบโอดีเซลในเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล แสดงดังตารางที่ 9 และ 10.



รูปที่ 19. การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน ที่ได้จากการเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญดำ.



รูปที่ 20. Flow Chart การทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ.

ตารางที่ 9. สมดุลมวลสารสำหรับระบบผลิตไบโอดีเซล

	สาร	สายเข้า (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	สายออก (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
1	น้ำมันสุบุดำ	3.00	
2	เมทานอล	1.00	
3	โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.05	
4	น้ำล้าง	40.0	
5	ไบโอดีเซล		3.07
6	กลีเซอรอล		0.91
7	น้ำเสีย		39.46
	รวม	44.05	43.44

ตารางที่ 10. คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบุดำที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบ

ลำดับที่	คุณสมบัติ, หน่วย	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ
1.	เมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14103	97.4
2.	ความหนาแน่น ณ. อุณหภูมิ 15 °ซ., กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร	ASTM D1298	0.874
3.	ความหนืด ณ. อุณหภูมิ 40 °ซ., เซนติสโตกส์	ASTM D445	4.40
4.	จุดวาบไฟ, °ซ.	ASTM D93	162
5.	กำมะถัน, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D2622	
6.	กากถ่าน, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D4530	
7.	จำนวนซีเทน	ASTM D613	
8.	เถ้าซัลเฟต, % โดยน้ำหนัก	ASTM D874	
9.	น้ำ	EN ISO 12937	0.15
10.	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 12662	
11.	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ASTM D130	1a
12.	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ อุณหภูมิ 110 °ซ., ชั่วโมง	EN 14112	0.50
13.	ค่าความเป็นกรด, มก.KOH/กรัมน้ำมัน	ASTM D664	0.15
14.	ค่าไอโอดีน, กรัมไอโอดีน/100 กรัม	EN14111	102.91
15.	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14103	Nil
16.	เมทานอล	EN 14110	
17.	โมโนกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	0.1638
18.	ไดกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	0.1169
19.	ไตรกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	0.1298

ตารางที่ 10. (ต่อ)

ลำดับที่	คุณสมบัติ, หน่วย	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ
20.	กลีเซอรินอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	0.02
21.	กลีเซอรินทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	0.0936
22.	โลหะกลุ่ม 1, มิลลิกรัม/กิโลกรัม	EN 14108	
	- โซเดียม	และ	
	- โพแทสเซียม	EN 14109	
	โลหะกลุ่ม 2, มิลลิกรัม/กิโลกรัม	Pr EN 14538	
	- แคลเซียม		
	- แมกนีเซียม		
23.	ฟอสฟอรัส, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D4951	
24.	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน	

ทำการทดสอบโดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

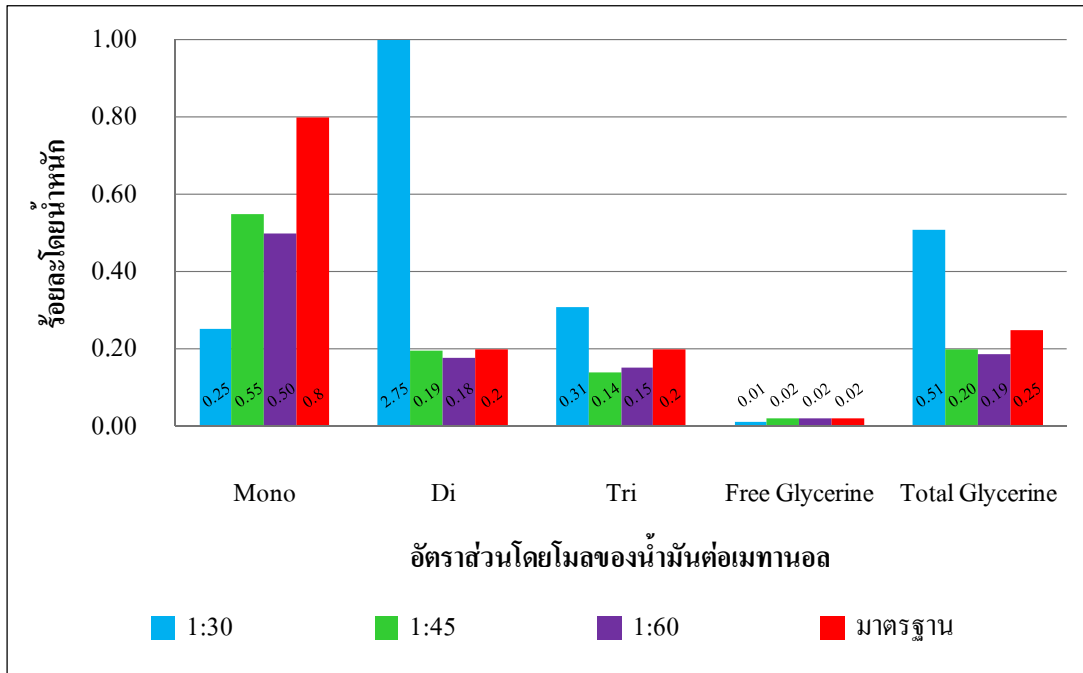
3.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำด้วยความร้อนและความดันสูง

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำด้วยความร้อนและความดันสูง เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำและเมทานอลและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา, เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล, อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, โดยการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้:

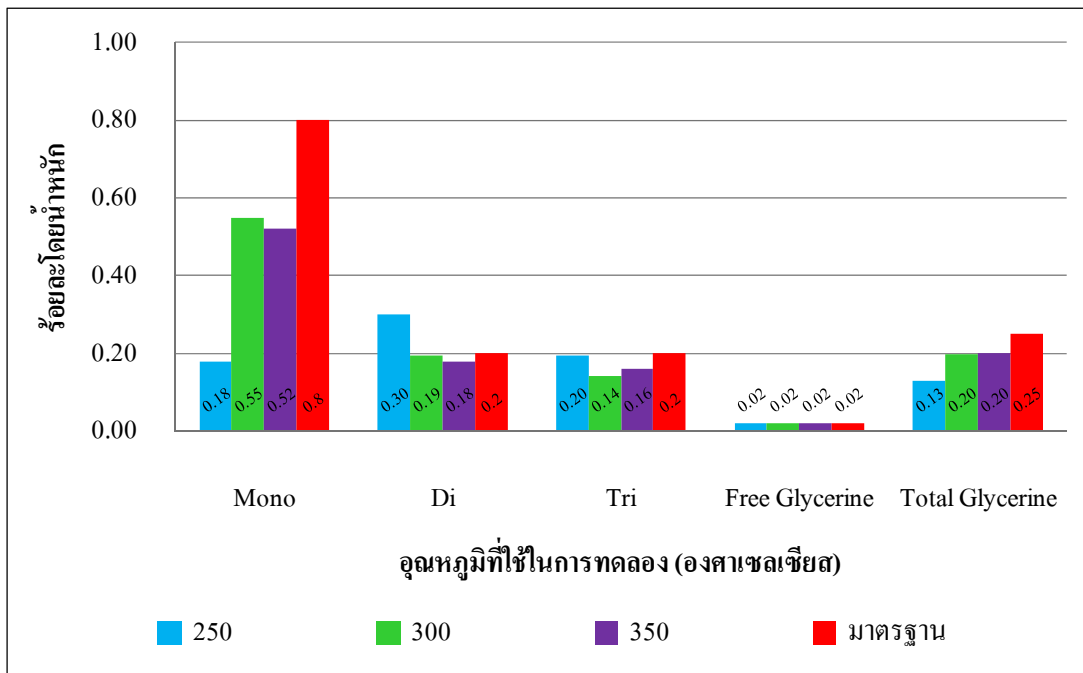
ขั้นตอนแรก กำหนดให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส, เพื่อศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.

ขั้นตอนถัดมา เมื่อทราบสภาวะอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม จึงกำหนดให้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง, เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม.

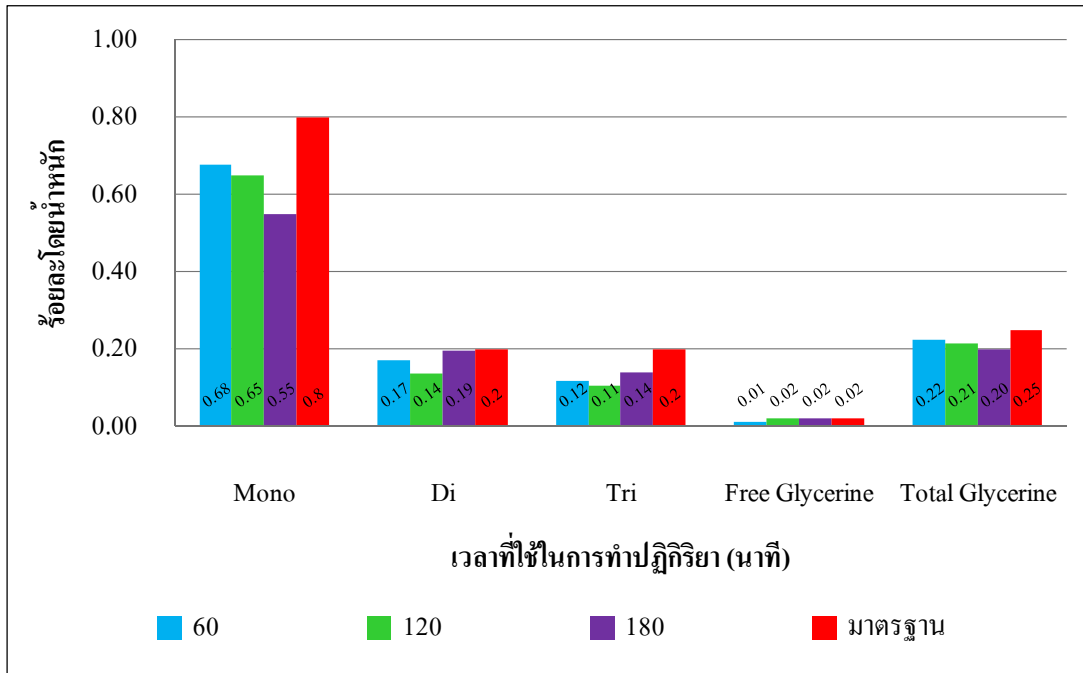
ขั้นตอนสุดท้าย เมื่อทราบเวลาในการทำปฏิกิริยา, อัตราส่วน และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสมแล้ว, ตัวแปรสุดท้ายที่ต้องศึกษา คือ เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม. โดยผลของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 21, 22 และ 23.



รูปที่ 21. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม.



รูปที่ 22. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอริน ทั้งหมดต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม.



รูปที่ 23. ร้อยละโดยน้ำหนักของ โมโน-, ได-, ไตร- กลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดต่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม.

เมื่อพิจารณารูปที่ 21-23 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนและความดันสูง, ได้แก่ อัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1 : 45, อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง.

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ความร้อนและความดันสูงนั้นสามารถผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านมาตรฐานได้, แต่เนื่องจากใช้สภาวะการผลิตที่ความร้อนและความดันสูง ซึ่งเป็นสภาวะที่ค่อนข้างอันตราย, อาจเกิดความไม่เหมาะสมในการนำมาเป็นเครื่องต้นแบบในการสาธิตให้แก่ผู้สนใจทั่วไป จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างสูงในระหว่างการสาธิต.

4. สรุปผลการทดลอง

น้ำมันสบู่ดำสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลได้ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีในระดับห้องปฏิบัติการหรือในระดับเครื่องต้นแบบนั้น ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ ได้แก่ โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์, ไตรกลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด เป็นต้น, พบว่า มีค่าผ่านมาตรฐานตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดและสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้.

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในระดับห้องปฏิบัติการพบว่า สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิวิธพันธ์. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลเท่ากับ 1 : 9, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง. ส่วนสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลเท่ากับ 1:12, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง. ไบโอดีเซลที่ผลิตได้นำมาทดสอบคุณภาพพบว่า มีค่าผ่านมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน.

ในระดับเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลเท่ากับ 1:9, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.66 โดยน้ำหนัก. ในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยความร้อนและความดันสูง ที่สามารถผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำได้ พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันสบู่ดำต่อเมทานอลเท่ากับ 1 : 45, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง. โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้นำมาทดสอบคุณภาพพบว่า มีค่าผ่านมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานได้เช่นเดียวกัน.

5. ข้อเสนอแนะ

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของวัตถุดิบในการผลิต เช่น ปริมาณกรดไขมันอิสระหรือปริมาณน้ำในน้ำมันพืชเริ่มต้น, ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้, ความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา, ความเหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับกระบวนการหรือเครื่องผลิตไบโอดีเซลชนิดต่างๆ และคุณสมบัติของไบโอดีเซลซึ่งต้องมีค่าผ่านมาตรฐาน.

อีกทั้งควรมีการศึกษาชนิดและความเหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยารวiturเพิ่มเติม เพื่อที่จะนำมาใช้กับเครื่องผลิตไบโอดีเซลต่อไป.

6. บรรณานุกรม

- ภาสบุตร ระพีพันธุ์. มปป. การใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลในไร่นา, เอกสารประกอบการฝึกอบรมโครงการนำร่องการใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซล, กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร.
- ศรีสวัสดิ์, อิศร. 2529. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชและไขสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค, กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อตัน โถ, ลลิตาและคณะ. 2548. การศึกษาและวิจัยสารเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล, กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- Alcantara, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M.J., and Navarro, A. 2000. Catalyst Production of Biodiesel from Soy-Bean Oil, Used Frying Oil and Tallow, Biomass and Bioenergy, V. **18**, pp:515-527.
- Canakci, M. and Gerpen, J. V. 1999. Biodiesel production via acid catalyst, Transactions of the ASAE, V. **42**(5) pp:1203-1210.
- Choo, Y. M., Ma, A. N. and Basiron, Y. 1995. Production and evaluation of Palm oil methyl esters as diesel substitute, Proceedings PORIM International Biofuel Conference 1995.
- Crabbe, E., Nolaseo-Hipoliti, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K., and Ishizaki, A. 2001. Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties, Process Biochemistry, V. **37**, pp:65-71.
- Demirbas, A. 2009. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification, Energy Conversion and Management, V. **50**, pp:923-927.
- Demirbas, A. 2007. Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide, Energy Conversion and Management, V. **48**, pp:937-941.
- Demirbas, A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol, Energy Conversion and Management, V. **43**, pp:2349-2356.
- Encinar, J. M. *et al.* 1999. Preparation and Properties of Biodiesel from *Cynara Cardunculus* L. Oil, Ind. Eng. Chem. Res., V. **38**(8), pp:2927-2931.
- Freedman, B., Kwolek, W. F. and Pryde, E. H. 1986. Quantitation in the Analysis of Transesterified Soybean Oil by Capillary Gas Chromatography. JAOCS. **63**.

- Interim report on the study of *Jatropha curcas* oil as a substitute for diesel engine oil, The Institute of Osaka Municipal Industry.
- Kasim, N. S., Tsai, T-H., Gunawan, S. and Ju, Y-H. 2009. Biodiesel production from rice bran oil and supercritical methanol. *Bioresource Technology*, V. **100**, pp:2399-2403.
- Ma, F. and Hanna, M. A. 1999. Biodiesel Production: a review. *Bioresource Technology*. **70**, pp:1-15.
- Song, E-S., Lim, J-W., Lee, H-S. and Lee, Y-W. 2008. Transesterification of RBD palm oil using supercritical methanol, *J. of Supercritical Fluids*, V. **44**, pp:356-363.
- Saka S. and Kusdiana D. 2001. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol, *Fuel*, V. 80, pp:225-231.
- Yin, J-Z., Xiao, M. and Song, J-B. 2008. Biodiesel from soybean oil in supercritical methanol with co-solvent, *Energy Conversion and Management*, V. **49**, pp:908-912.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานเพื่อควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้กำหนดมาตรฐานเพื่อควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลภายในประเทศ ที่เรียกว่า ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548 เพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการสร้างเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภค โดยครอบคลุมรายละเอียดในการวิเคราะห์ 24 ข้อ ดังแสดงในตารางที่ ก-1.

ตารางที่ ก-1. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

พ.ศ. 2552

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีการทดสอบ
1	เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester , % wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 ^o ซ. กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 ^o C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ที่ อุณหภูมิ 40 ^o ซ. เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 ^o C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point , ^o C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur , % wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue , on 10% distillation residue , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874

ตารางที่ ก-1. (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีการทดสอบ
9	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ชั่วโมง (Oxidation Stability at 110 ^o C , hours)	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน, กรัมไอโอดีน/100กรัม (Iodine Value, g. Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลินolenic เมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester , %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	En14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na + K) mg/kg) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca + Mg) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109 prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด ในน้ำมันไบโอดีเซล



วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระและกลีเซอรินทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยจะวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระในช่วง ร้อยละ 0.005-0.05 โดยน้ำหนัก และค่ากลีเซอรินทั้งหมดในช่วง ร้อยละ 0.05-0.5 โดยน้ำหนัก.

วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับน้ำมันพืชที่มีเมทิลเอสเทอร์ที่มาจากลอริก เช่น น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม, เนื่องจากมีคาร์บอน 12 ในปริมาณมาก ซึ่งอาจเกิดการซ้อนทับกันของพีคเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอไรด์.

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี บริษัท SHIMADZU รุ่น GC 2010.
2. คอลัมน์ บริษัท Agilent Technology จำกัด รุ่น DB-5HT
 - stationary phase คือ 5% phenylpolydimethylsiloxane.
 - ความยาว 10-15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร และความหนา 0.1 ไมโครเมตร.
3. ดีเทคเตอร์ เฟลมไอออไนเซชันดีเทคเตอร์.

4. ไมโครไซริง ขนาด 100 และ 250 ไมโครลิตร.
5. สารละลายเฮปเทน.
6. N-Methyl-N-trimethylsilyltrifluoroacetamide (MSTFA).
7. สารละลายไพรีดีน.
8. ขวดทดลอง ขนาด 10 มล.

ตารางที่ ข-1. สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Injector		
ปริมาณตัวอย่างที่ฉีด	1 ไมโครลิตร	
Column Temperature Program		
Initial temperature	50 °ซ.	ทิ้งไว้ 1 นาที
Rate 1	15 °ซ./นาที ถึง 180 °ซ.	
Rate 2	7 °ซ./นาที ถึง 230 °ซ.	
Rate 3	30 °ซ./นาที ถึง 380 °ซ.	ทิ้งไว้ 10 นาที
Detector		
ชนิด	เฟลมไอออไนเซชัน	
อุณหภูมิ	380 °ซ.	
Carrier Gas		
ชนิด	ฮีเลียม	
อัตราการไหลของแก๊ส	3 มล./นาที	

การเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

ชั่งน้ำมันไบโอดีเซล น้ำหนัก 50 มก. โดยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ลงในขวดทดลอง. เติมสารละลาย Internal standard ปริมาตร 100 ไมโครลิตร และสาร MSTFA ปริมาตร 100 ไมโครลิตร. ปิดฝาและเขย่าสารละลายอย่างแรงให้เข้ากัน, วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที. จากนั้น เติมสารละลายเฮปเทน ปริมาตร 8 มล. นำสารตัวอย่าง ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.

ตัวอย่างลักษณะโคมาโทแกรม (Chromatogram)

